



Faculté : Sciences de L'ingénierat  
Département : Electronique  
Domaine : Sciences et Techniques  
Filière : Automatique  
Spécialité :Automatique et Informatique Industriel

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Modélisation et commande d'un Onduleur connecté  
à un générateur photovoltaïque**

Présenté par :BOUAZIZ Roumaïssa

Encadrant :BEDOUD KhouloudMRA

URMA/CRTI

**Jury de Soutenance :**

GHERRBI Sofiane	M.C.A	UBMA	Président
BEDOUD Khouloud	M.R.A	URMA/CRTI	Encadrant
BENMOUSSA Samir	M.C.A	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

## Résumé :

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule sur la modélisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque et d'étude de deux méthodes de commande MPPT pour l'extraction de la puissance maximale. Pour cela, nous avons utilisé deux algorithmes P&O et les réseaux de neurones. Toutefois, nous avons aussi étudié l'effet de la variation de l'éclairage et de la température sur la puissance et le courant, les résultats de simulation montrent l'efficacité des techniques de commande utilisées.

ملخص:

العمل المقدم في هذه الأطروحة يتضمن نظام MPPT من أجل الحصول على نقطة طاقته القصوى. لهذا قمنا باستعمال خوارزميتي P & O والشبكة العصبية و ايضا قمنا بدراسة تأثير درجة الحرارة و الإشعاع على اللوحة الضوئية، النتائج المتحصل تؤكد الفعالية خورزميتي المستعملتين.

## ***Dédicace***

*Avant tout, je remercie Allah (mon dieu) le plus puissant de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire « Ya Karim » et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à :*

*Mes chers parents « Djamila » et « Ahmed ».*

*A mes adorables Frères et Sœurs.*

*Que dieu les gardes et les protèges.*

*A tout la famille du plus grand au tout petit.*

*A mon amie Sabrina.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

*Je dédie ce travail.*

***Bouaziz.Roumaïssa***

## ***Remerciements***

En premier lieu, je remercie Allah, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la patience pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur DR.K.BEDOUD, d'avoir accepté de m'encadrer pour mon mémoire, ainsi que pour son soutien, ses remarques, son encouragement, ses conseils et pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce travail dans des meilleures conditions.

Mes précieux remerciements vont également au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Enfin, je remercie toute personne qui nous a aidés à atteindre ce point-là.

***Bouaziz.Roumaïssa***

Introduction générale.....	01
Chapitre 1 État de l'art	
1.1.Introduction.....	03
1.2. Le soleil.....	03
1.3.2.1.Rayonnement solaire.....	04
1.2.1.1.Rayonnement direct.....	04
1.2.1.2.Rayonnement diffus.....	04
1.2.1.3.Rayonnement réfléchi ( albédo).....	04
1.2.1.4.Rayonnement global.....	04
1.2.2.Spectre de rayonnement.....	05
1.2.3.Durée d'insolation.....	05
1.3.Energie solaire.....	05
1.4.Energie photovoltaïque.....	06
1.4.1.Effet photovoltaïque.....	06
1.4.2.La conversion photovoltaïque.....	07
1.4.2.1.Absorption de la lumière dans le matériau.....	07
1.4.2.2.Transfert d'énergie des photons aux charges électriques.....	07
1.4.2.3.Collecte des charges.....	07
1.5.Semi-conducteur.....	09
1.6.Cellule photovoltaïque.....	09
1.6.1.Les différentes technologies.....	09
1.7.Champs de module photovoltaïque.....	11
1.8.Générateur photovoltaïque.....	11
1.9.Système photovoltaïque.....	11
1.10.Différents types de système photovoltaïque.....	13
1.11.Conclusion.....	14

Chapitre 2 Modélisation et Simulation d'un panneau PV

2.1.Introduction.....	15
2.2.Branchement des panneaux photovoltaïques.....	15
2.2.1.Branchement série.....	15
2.2.2.Branchement parallèle.....	16
2.2.3.Branchement mixte (hybride).....	16
2.3.Modélisation de la cellule PV.....	17
2.3.1.Cellule idéale (Modèle simplifié).....	17
2.3.2.Cellule réelle (Modèle à une diode).....	17
2.4.Principales caractéristiques d'un module PV.....	19
2.4.1.La puissance crête.....	19
2.4.2.Rendement.....	19
2.4.3.Facteur de forme.....	19
2.4.4.Caractéristiques courant tension d'un module..	19
2.5.Paramètres influençant sur le fonctionnement d'un module.....	21
2.5.1.Influence de la température.....	21
2.5.2.Influence de l'éclairement.....	21
2.6.Conclusion.....	22

### Chapitre3 Modélisation et commande d'un système photovoltaïque

3.1.Introduction.....	23
3.2.Modélisation de la chaîne photovoltaïque.....	23
3.2.1.Modélisation du convertisseur Boost.....	23
3.2.2.Modélisation d'un onduleur triphasé à MLI.....	26
3.3.CommandeMLI.....	27
3.4.Commande MPPT.....	32
3.4.1.MPPT indirect.....	32
3.4.2.MPPT direct.....	33
3.4.3.Commande P&O.....	33
3.5.Simulation et discussions.....	35
3.6.Conclusion.....	38

Chapitre4 Réseaux de neurones	
4.1.Introduction.....	39
4.2.Neurone.....	39
4.3.Réseaux de neurones artificiels.....	39
4.3.1.Architecture de Réseau de neurones .....	40
4.3.2. Apprentissage de Réseau de neurones .....	40
4.3.3 Algorithme de RNA.....	40
4.4. Résultats de simulation .....	41
4.5.Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	45
Références.....	46

# Liste des Figures

---

## Chapitre 1

## Etat de l'art

Figure 1.1 : Différents types de rayonnement solaire.

Figure 1.2 : Spectre de rayonnement

Figure 1.3 : Conversion de l'énergie solaire en électricité

Figure 1.4 : Semi-Conducteur

Figure 1.5 : Réflexion, Transmission, Absorption

Figure 1.6 : Dopage de type N

Figure 1.7 : Dopage de type P

Figure 1.8 : Jonction PN

Figure 1.9 : Cellule PV

Figure 1.10 : Module PV

Figure 1.11 : De la cellule au champ PV

Figure 1.12 : Les composants d'un système PV

Figure 1.13 : Montage série / parallèle

Figure 1.14 : Système PV autonome

Figure 1.15 : Système PV raccordé au réseau

Figure 1.16 : Système PV hybride

# Liste des Figures

---

## Chapitre 2

## Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque

Figure 2.1 : Association en série

Figure 2.2 : Association parallèle

Figure 2.3 : Association mixte

Figure 2.4 : Modèle électrique simplifié de la cellule PV

Figure 2.5 : Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule PV

Figure 2.6 : Caractéristique  $I(V)$  pour différentes valeurs de température

Figure 2.7 : Caractéristique  $P(V)$  pour différentes valeurs de température

Figure 2.8 : Caractéristique  $I(V)$  pour différentes valeurs d'éclairement

Figure 2.9 : Caractéristique  $P(V)$  pour différentes valeurs d'éclairement

# Liste des Figures

---

## Chapitre 3

## Modélisation et commande d'un système photovoltaïque

Figure 3.1 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque

Figure 3.2 : Convertisseur DC/DC

Figure 3.3 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Figure 3.4 : Onduleur à MLI sinus - triangle

Figure 3.5 : Allure des signaux modulés et porteuse

Figure 3.6 : Intervalles de conduction d'interrupteur K1

Figure 3.7 : Intervalles de conduction d'interrupteur

Figure 3.8 : Tension  $V_{ab}$  (v) en fonction du temps

Figure 3.9 : Zoom de figure 3.8

Figure 3.10 : Tension  $V_{bc}$  (v) en fonction du temps

Figure 3.11 : Zoom de figure 3.10

Figure 3.12 : Tension  $V_{ac}$  (v) en fonction du temps

Figure 3.13 : Zoom de figure 3.12

Figure 3.14 : Tensions simples  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ac}$  en fonction du temps

Figure 3.15 : Algorithme de perturbation et observation

Figure 3.16 : Caractéristique de l'éclairement en fonction du temps

Figure 3.17 : Caractéristique de la température en fonction du temps

Figure 3.18 : Courbe du courant  $I_{pv}$  (A) en fonction du temps

Figure 3.19 : Courbe de tension  $V_{pv}$  (v) en fonction du temps

Figure 3.20 : Courbe de puissance  $P_{pv}$  (w) en fonction du temps

Figure 3.21 : Courbe de puissance  $P(w)$  injectée au réseau en fonction du temps

# Liste des Figures

---

## Chapitre 4

## Réseau de neurones artificiels

Figure 4.1 : Structure d'un RNA non bouclé et bouclé avec deux entrées

Figure 4.2 : Différentes structures (entrées/sorties) de réseaux de neurones artificiels modélisant le fonctionnement de panneau photovoltaïque

Figure 4.3 : Formation RN avec MATLAB

Figure 4.4 : Bloc du réseau de neurones dans SIMULINK

Figure 4.5 : Courant (A) en fonction du temps

Figure 4.6 : Tension (V) en fonction du temps

Figure 4.7 : Puissance (W) en fonction du temps



# Introduction générale

## Introduction générale

---

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas du tout nouveau. Celles-ci ont été pendant longtemps la première possibilité de produire de l'énergie. On distingue plusieurs types de sources d'énergie renouvelable : l'énergie hydraulique, l'énergie géométrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie solaire. Parmi ces énergies, l'énergie solaire est sans conteste celle qui attire de plus l'attention ces dernières années. Elle est une bonne alternative pour la production d'électricité grâce à sa disponibilité et propreté. En 1839, le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans des matériaux solides, c'est l'effet photovoltaïque. En effet, en 1875 Werner Vont Siemens a exposé devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi- conducteurs mais jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire. En outre, en 1954 trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale nécessite cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux vers les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires [1]. La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développé aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photo sensibilité du silicium pouvait être augmenté en ajoutant des `impuretés `conducteurs mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout de suite isolés.

L'Algérie est un pays de grande surface saharienne, les chercheurs veulent en profiter de ce type de ressource [2].

# Introduction générale

---

Le contenu de ce mémoire est structuré en quatre chapitre :

- ❖ Dans le premier chapitre, expose des généralités sur le soleil, l'énergie solaire ainsi que de la cellule, module, champ et générateur photovoltaïque. Puis, tous les éléments constitutifs du système photovoltaïque et les différents types de système PV ont été évoqués.
- ❖ Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque basé sur le modèle à une diode en utilisant Matlab/Simulink, et l'étude de l'influence de différentes conditions climatiques (éclairage et température) sur les caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension.
- ❖ le troisième chapitre, présente la modélisation et la commande d'u système photovoltaïque ainsi que la commande MLI de l'onduleur triphasé. Une commande MPPT de type P&O à été utilisée pour commander le convertisseur, afin d'avoir une puissance maximale.
- ❖ Le dernier chapitre est consacré au développement d'une autre technique MPPT à base de réseau de neurones artificiels.
- ❖ Finalement, nous terminerons par une conclusion générale sur les travaux réalisés



# Chapitre 1

**Etat de l'art**

## 1.1 Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse parmi les énergies renouvelables. L'énergie photovoltaïque est obtenue par la transformation de la lumière en énergie électrique à travers un générateur PV. Cette énergie a des avantages tels que :

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- Energie propre est non polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Générer l'énergie requise.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- Les installations sont silencieuses et non polluantes.
- Aucun bruit.

Elle présente aussi quelques inconvénients comme :

- Elle est périodique et aléatoire.
- Elle ne se stocke pas facilement.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles (5 à 15% suivant les technologies).
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

Dans ce chapitre, nous avons rappelé tout d'abord quelques généralités sur le soleil, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Ensuite, nous avons expliqué l'effet PV et nous présentons ainsi les technologies existantes de cellule PV. Aussi, nous parlons du champ et de générateur PV. Nous terminons ce chapitre par la représentation des différents composants et des différents types du système PV.

## 1.2 Le soleil

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire. IL est une étoile qui fonctionne depuis 4,6 milliards d'années de type naine jaune, qui se compose d'hydrogène et d'hélium et des éléments plus lourds. Grâce au soleil la vie est apparue et s'est développée sur terre. C'est lui qui régit le cycle des saisons, nous apportant lumière et chaleur [3]

### 1.2.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire défini comme puissance reçue par une surface, il s'exprime en  $\text{w/m}^2$ . Il constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique.

#### 1.2.1.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère.

#### 1.2.1.2 Rayonnement diffus

La composante diffuse provenant de toute la voûte céleste, elle n'a pas d'orientation privilégiée. Elle ne peut donc être concentrée par des instruments optiques. Le rayonnement diffus est plus riche en bleu que le rayonnement global [4].

#### 1.2.1.3 Rayonnement réfléchi (albédo)

C'est le rayonnement réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface..

#### 1.2.1.4 Rayonnement global

C'est la somme de tous les rayonnements reçus, c'est le rayonnement solaire arrivant au sol a au moins deux composantes : Une composante direct I et une composante diffuse D, le tout formant le rayonnement global G. La figure 1.1 présente les différents types de rayonnement solaire

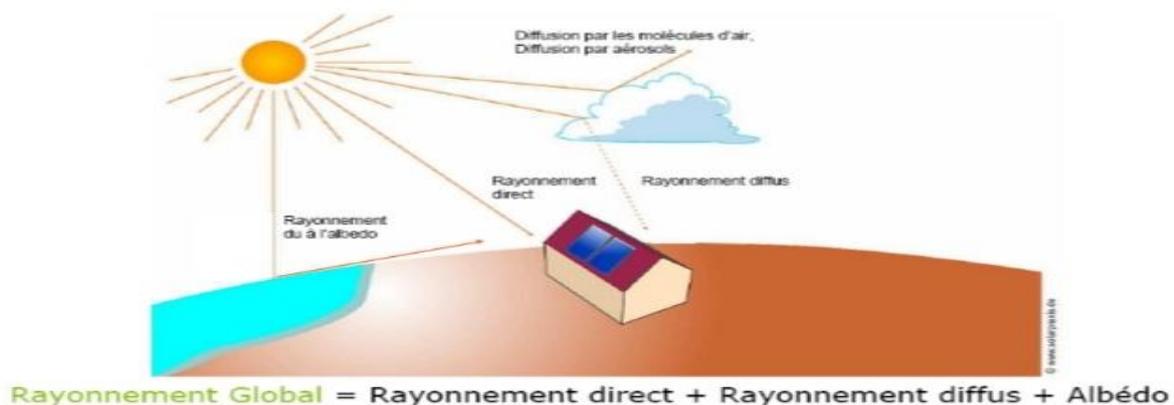


Figure 1.1 : Différents types de rayonnement solaire [26]

**1.2.2 Spectre de rayonnement**

Le rayonnement électromagnétique est composé de <grains> de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde &. On différencie les types de rayons à partir de leur longueur d'onde : C'est le spectre solaire comme l'indique dans la figure 1.2.

Ultraviolet UV	0.20 <math>\lambda</math> <math>< 0.38\mu\text{m}</math>	64%
Visible	0.38 <math>\lambda</math> <math>< 0.78\mu\text{m}</math>	48.0%
Infrarouge IR	0.78 <math>\lambda</math> <math>< 10\mu\text{m}</math>	45.6%

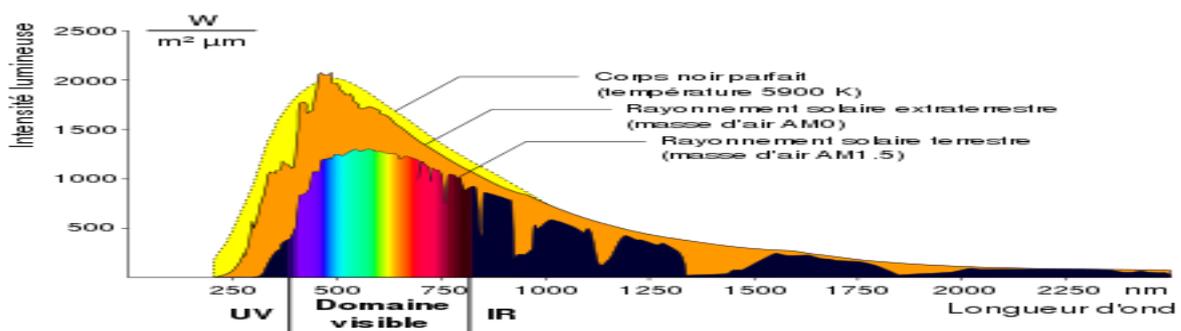


Figure 1.2 : Spectre de rayonnement solaire[20]

**1.2.3 Durée d'insolation**

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée entre le levé et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Elle est réelle ou effective est dépendue du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. Les durées d'insolation sont mesurées avec des héliographes dont le seuil est  $120 \text{ w/m}^2$ . On notera que le nombre théorique maximal est de 4380h(12h/jr) [4].

**1.3 Énergie solaire**

L'énergie solaire est la source énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables mais elle est atténuée. Actuellement, il existe deux voies d'utilisation de l'énergie solaire qui transforment directement le rayonnement en électricité ou en chaleur respectivement le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. Le soleil rayonne

dans tout l'espace par une puissance  $L=41026w$ . Au niveau de la terre mais hors de l'atmosphère, la puissance  $E$  reçue par  $m^2$  est donc :

$$E=L/4nd^2 \quad (1.1)$$

$d$  : distance terre-soleil au cours de l'année.

La valeur moyenne  $E_0$  est appelée la constante solaire, c'est la puissance reçue par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires en dehors de l'atmosphère terrestre.

$$E_0=1353w/m^2 \quad (1.2)$$

En première approximation, les valeurs de  $B$  au cours de l'année peut être décrites par une sinusoïde :

$$E=E_0 r_e \text{ avec } r_e = 1+0.033\cos(n360/365) \quad (1.3)$$

$n$  : étant la quantième, c'est le nombre de jours écoulés depuis le premier janvier.

### 1.4 Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque désigne l'électricité produite par la transformation d'une partie de rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque comme le montre dans la figure 1.3. L'électricité produite peut être soit stocker dans des batteries soit convertir par onduleur pour être distribuée aux normes du réseau [5].

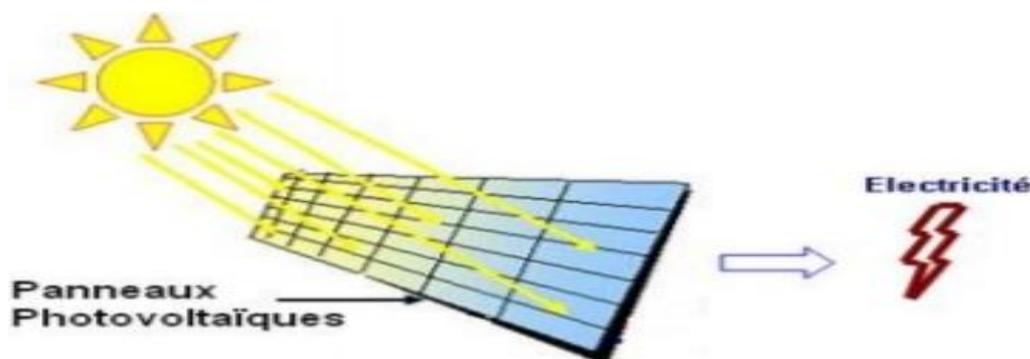


Figure 1.3 : Conversion de l'énergie solaire en électricité [23]

#### 1.4.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons

et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone P [6]. Une jonction PN a été formée. Dans les cellules photovoltaïques une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons 'décrochés' créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : C'est l'effet photovoltaïque. La figure 1.4 présente le semi-conducteur.

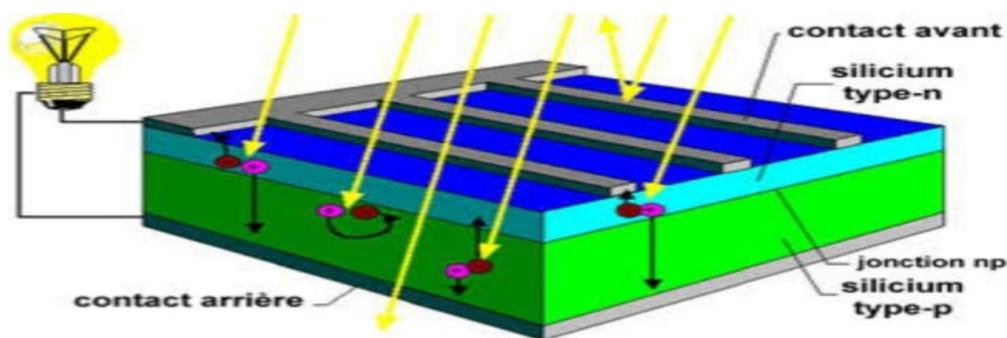


Figure 1.4 : Semi-conducteur [19]

## 1.4.2 La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est basée sur les trois mécanismes suivants

### 1.4.2.1 Absorption de la lumière dans le matériau

Rayonnement lumineux qui arrive sur un solide peut subir l'un des trois phénomènes optiques :

- la réflexion, la transmission et l'absorption

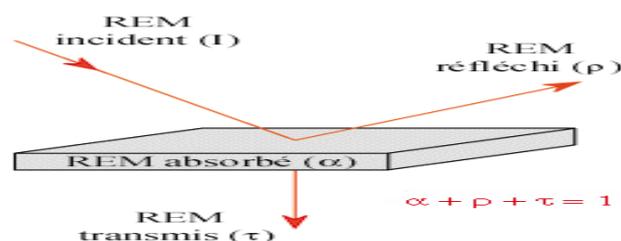


Figure 1.5 : Réflexion, Transmission, Absorption [7]

La réflexion : lors d'un changement de milieu de réflexion. Elle peut être spéculaire c'est-à-dire à quelle est dirigée dans une seule direction, ou diffuse lorsqu'elle est digérée dans toutes les directions [7].

La diffusion : des particules microscopiques, comme celle contenues dans l'atmosphère, amènent la diffusion dans toutes les directions d'une partie du rayonnement.

Le rayonnement traversant ce milieu peut alors être considérablement comme en transformé [7].

L'absorption : un corps qui reçoit une quantité de rayonnement peut en absorber une partie. Cette énergie absorbée est transformée et modifiée d'énergie interne du corps. Ainsi, la température interne du corps peut augmenter ce qui va être la source d'émissions plus importantes [7].

### *1.4.2.2 Transfert d'énergie des photons aux charges électriques*

Le transfert de l'énergie des photons vers les charges ne s'effectue pas sur la totalité du spectre électromagnétique de rayonnement solaire.

Deux phénomènes entrent en jeu :

- Les longueurs d'onde n'ayant pas une énergie supérieure à l'énergie de gap ne pourront exploitées :

Chaque particule de lumière(photon) a une énergie  $E_{ph} = h \cdot c / \lambda$

Donc :

Pour avoir une conversation il faudrait que :

Le surplus d'énergie sous forme de chaleur.

D'autre part, le gap ( $E_g$ ) fixe l'énergie potentielle acquise par les électrons libres photo-crées et comme la charge d'électron est fixée, la tension de sortie maximale de la cellule élémentaire théorique est écrêtée à la valeur  $V_g$  telle que :  $V_g = E_g / e$

- L'énergie excédentaire du photon est cédée au réseau cristallin sous forme de chaleur.

### *1.4.2.3 Collecte des charges*

Afin d'exploiter l'excitation de l'électron par l'énergie du photon absorbée par l'électron avant que ce dernier ne revienne à former la liaison covalente du silicium cristallin, il faut qu'elles circulent. Afin de faire circuler il faudrait attirer les électrons en dehors du matériau semi-conducteur. Cela est possible grâce à la création d'un champ électrique à l'intérieur du matériau. Ce champ électrique est réalisé à l'aide d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur qui entrainera les électrons hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique.

## 1.5 Semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celles des conducteurs et celle des isolants.

## 1.6 Cellule photovoltaïque

On appelle cellule photovoltaïque un dispositif convertissant directement la lumière en électricité. C'est l'élément fondamental du monde du photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90% des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin. Il existe des différentes technologies de cellule photovoltaïque les différences entre elles se situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication. La figure 1.6 représente la cellule PV.



Figure 1.6 : Cellule PV [6]

### 1.6.1 Les différentes technologies

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes :

- La première technologie photovoltaïque fait appel aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie souvent de plus de 25 à 30 ans et pour le poly cristallin monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.

- La deuxième technologie utilisée recourt aux cellules de silicium amorphe. L'efficacité est moindre, Variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.
- La troisième technologie recourt à d'autre matériaux semi-conducteur, comme le Tellure de Cadmium(CdTe), Cuivre Indium Sélénium(CIS) et les jonctions à base D'arséniure de Gallium(GaAs)

Le tableau 1.1 présent une étude comparative des différentes technologies [8]

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium Mono-cristallin</b>	12 à 18% (24.7% <i>en laboratoire</i> )	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très performant.</li> <li>• Stabilité de production.</li> <li>• Méthode de production coûteuse et laborieuse.</li> </ul>	Aérospatiale, modules pour toits, Façades,...
<b>Silicium poly-cristallin</b>	11 à 15% (19.8% <i>enlaboratoire</i> )	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapté à la production à grande échelle.</li> <li>• Stabilité de production,</li> <li>• Plus de 50% du marché mondial.</li> </ul>	Modules pour toits, façades, générateur ,...
<b>Amorphe</b>	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut fonctionner sous la lumière fluorescente.</li> <li>• Fonctionnement si faible luminosité.</li> <li>• Fonctionnement par temps couvert.</li> <li>• Fonctionnement si ombrage partiel.</li> </ul>	Appareils électroniques (montres, calculatrices,...), Intégration dans le bâtiment.

			<ul style="list-style-type: none"> <li>• La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieur à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.</li> </ul>	
--	--	--	--	--

**1.7 Champs de modules photovoltaïques**

Le champ PV est un ensemble de modules photovoltaïques Interconnectés et fonctionnant comme une seule unité de production d'électricité. Les modules sont assemblés sur un support ou bâti. La figure 1.7 représente le champ PV.

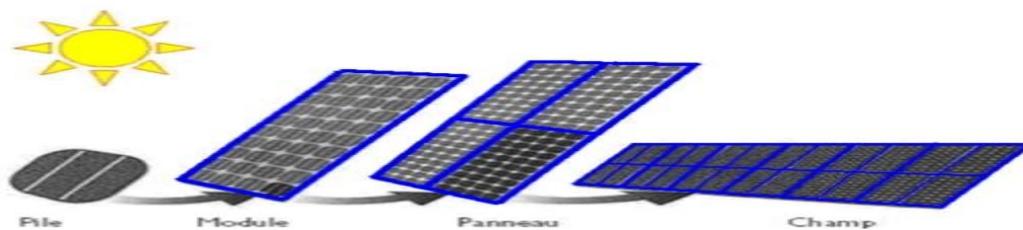


Figure 1.7 : De la cellule au champ PV [1]

**1.9 Générateur photovoltaïque [8]**

Le générateur photovoltaïque est un module photovoltaïque qui compose d'un certain nombre de cellule solaire connectées en série et en parallèle. Ces règles peuvent être transposées d'un module vers un générateur de plusieurs dizaines ou centaines de modules avec quelques recommandations :

- Associé des modules dont les caractéristiques I-V sont les proches possibles (très préalable).
- Toujours commencer par mettre les modules en série pour former une branche (string).
- Mettre ensuite les branches en parallèle pour faire des champs (Field) ou sous-champs selon la taille du générateur solaire.
- Utiliser le même module pour tout le champ : même dimension (Lx Ix e, poids), même technologie (c-Si, CdTe, a-Si, etc.) et même puissance (+\_×%).

## 1.10 Système photovoltaïque

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

### 1.10.1 Les composants d'un système photovoltaïque

La figure 1.8 représente les différents composants d'un système PV.



Figure 1.8 : Les composants d'un système PV [5]

Les modules solaires sont le cœur du système, se sont générateurs d'énergie. Ils peuvent également être connectés en série et en parallèle (champs photovoltaïque) afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Par ailleurs, les batteries les plus utilisés dans ce genre d'installation sont en général de types plomb-acide (pb), pour leurs coûts initialement bas.

Les batteries cadmium-nickel (NiCd) sont rarement utiliser du fait de leurs toxicité et leurs coût très élevés. Elles sont remplacées par les batteries nickel métal-hydrure (NiMH), leur emploi étant en plus fréquent dans les applications haut de gamme, ou de très petite taille (< 2 Ah). Pour obtenir une certaine capacité, il vaut mieux mettre en série de grands éléments qu'en parallèle de petits comme le montre dans la figure 1.9 [5].

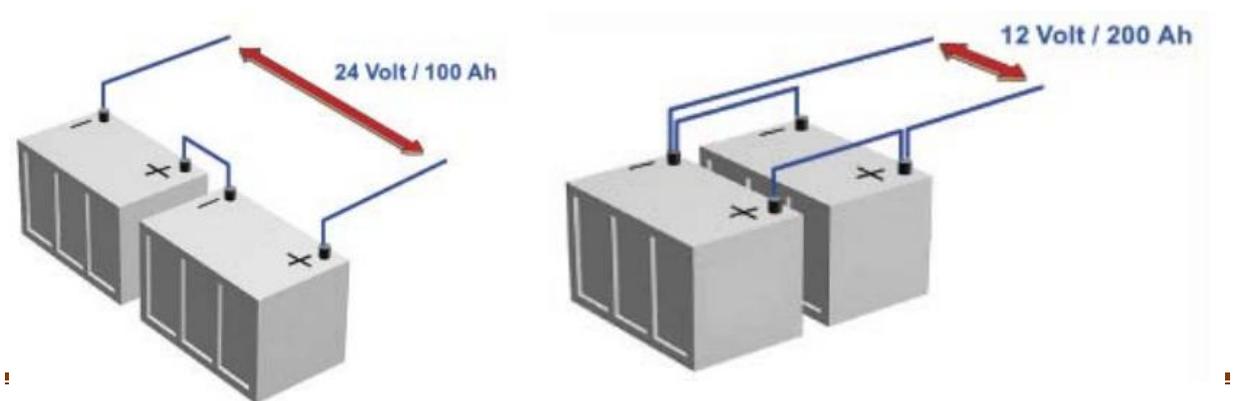


Figure 1.9 : Montage série / parallèle [5]

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer l'énergie continu en alternatif. La principale caractéristique de l'onduleur est de trouver le point de fonctionnement optimale du système. Il existe des onduleurs autonomes destinés pour utilisation hors réseau et les onduleurs connectés au réseau.

## 1.11 Différents types de système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques non connecté au réseau peuvent être autonome avec ou sans accumulateur c'est-à-dire dépendant uniquement de l'énergie solaire ou hybride. Les systèmes hybrides allient la technologie PV à une ou plusieurs autres formes de production d'électricité et comprennent habituellement des accumulateurs.

### 1.11.1 Système autonome

Le système autonome est comme son nom l'indique sont complètement indépendant d'autres sources d'énergie. Il comprend généralement des accumulateurs. Dans certains cas, par exemple le pompage de l'eau ou la ventilation d'une serre, on a besoin d'énergie électrique pendant les périodes ensoleillées seulement. Les systèmes autonomes sans accumulateur convient alors. Toutefois la plupart du temps, la demande d'énergie est indépendante de l'ensoleillement, et le système doit alors comporter des accumulateurs. On emploie le système autonome avec accumulateur pour l'électrification des clôtures de pâturage, et pour les communications, le balisage, les stations de surveillance...[9]. La figure 1.10 représente le système PV autonome (isolé).

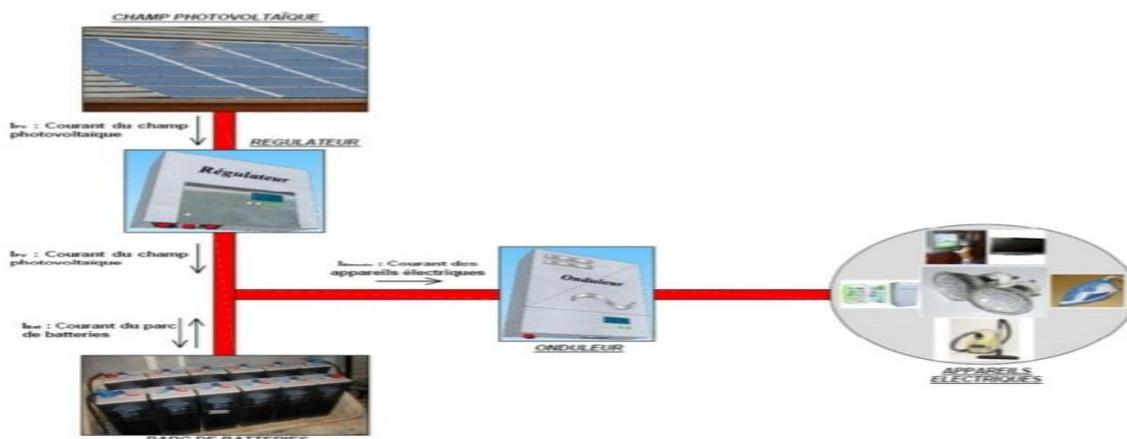


Figure 1.10 : système PV autonome(isolé) [24]

## 1.11.2 Système raccordé au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau son (Sonal gaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. On peut distinguer les systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage. La figure 1.11 représente le système PV raccordé au réseau.

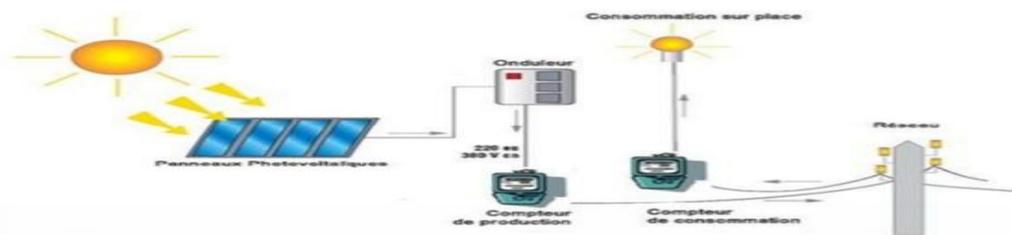


Figure 1.11 : Système PV raccordé au réseau [25]

## 1.11.3 Système hybride

Le système photovoltaïque hybride intègre un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène, et même parfois le réseau public d'électricité. La figure 1.12 représente le système PV hybride.

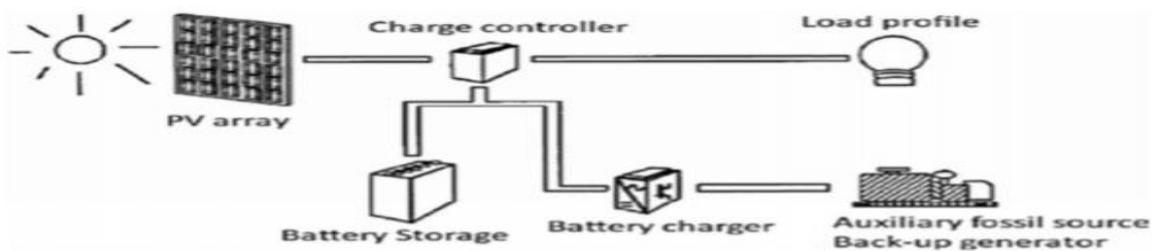


Figure 1.12 : Système PV hybride [26]

## 1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les définitions et les mécanismes de base du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Nous avons donné des notions sur le rayonnement solaire et leurs différents types, nous avons expliqué le fonctionnement de la

cellule PV et leurs caractéristiques. Ensuite, un rappel sur le système PV, leur composants et les différents types a été exposée.



# **Chapitre 2**

**Modélisation et commande d'un panneau  
photovoltaïque**



## 2.1 Introduction

Le générateur photovoltaïque (GPV) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques montées entre elles électriquement soit en série ou en parallèle pour produire plus de puissance. Dans ce chapitre, on va étudier la modélisation et la simulation d'un générateur PV par l'environnement Matlab/Simulink afin d'obtenir les caractéristiques tel que le courant et la puissance en fonction de la tension du GPV. Par la suite, nous étudierons l'influence des paramètres météorologiques (Température et éclairage) sur les grandeurs électriques du générateur PV.

## 2.2 Branchement des panneaux photovoltaïques

### 2.2.1 Branchement série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en Série [10]. Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi de constituer d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

Malheureusement, les cellules ou les modules ne sont pas tous absolument identiques. Le courant total s'oriente alors à la cellule ou au module le plus faible. Ce phénomène est appelé mismatching. La figure 2.1 représente l'association en série des cellules / modules PV.

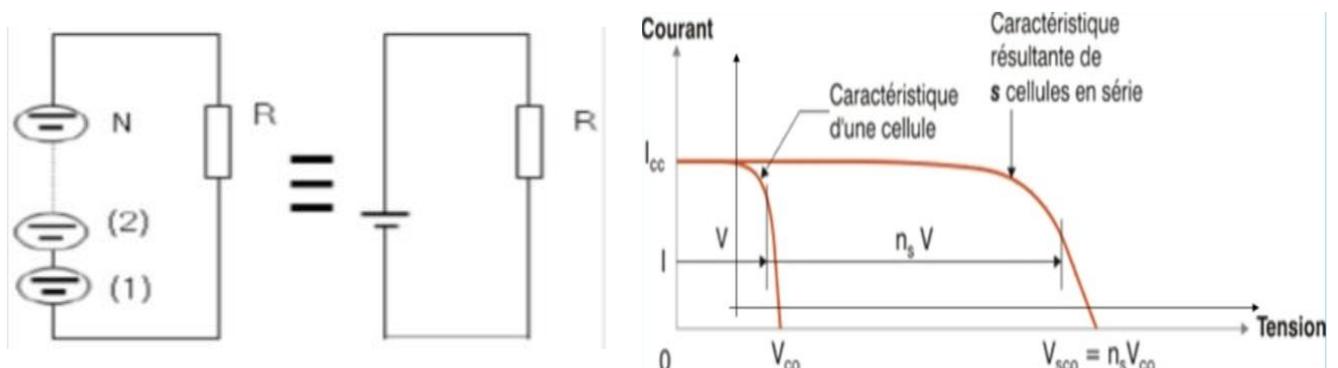


Figure 2.1 : Association en série [27]

### 2.2.2 Branchement parallèle

D'autre part, une association parallèle des cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules ou modules identiques connectés en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. Le montage en parallèle de cellules/modules permet d'obtenir des courants plus importants. Dans ce cas, les différents courants s'additionnent. Seuls ont le droit d'être montés en parallèle des cellules ou des modules de même type. Si les modules sont différents, des courants compensateurs risquent de détruire les modules. La figure 2.2 représente l'association en parallèle des cellules ou des modules PV.

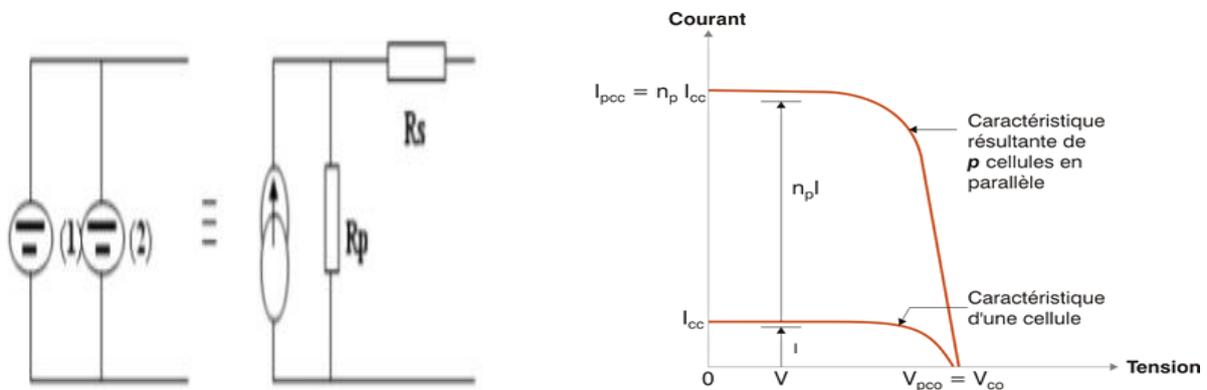


Figure 2.2 : Association en parallèle [27]

### 2.2.3 Branchement mixte (hybride)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série parallèle de nombreux modules photovoltaïque regroupés par panneaux PV. La caractéristique électrique globale courante tension se déduit théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $N_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $N_p$  parallèlement à l'axe des courants [11]. La figure 3.3 représente l'association mixte.

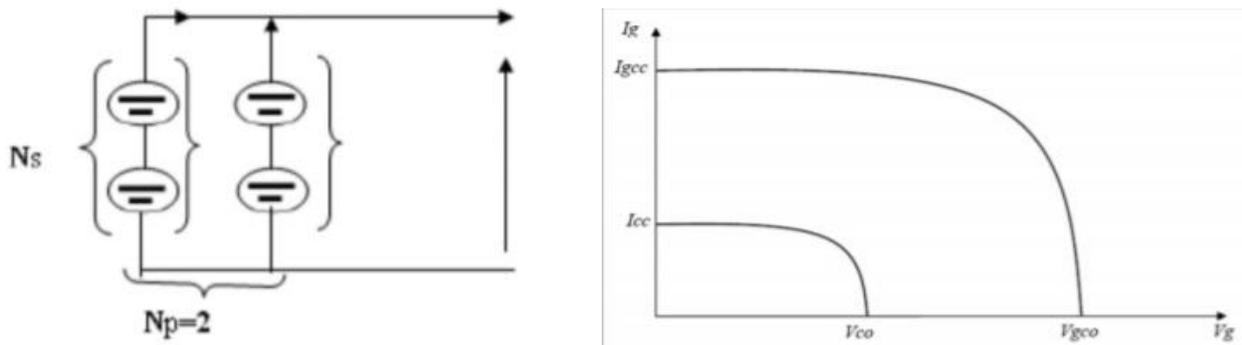


Figure 2.3 : Association mixte [28]

### 2.3 Modélisation de la cellule PV

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule PV.

#### 2.3.1 Cellule idéale (Modèle simplifié)

Une cellule idéale peut être décrite comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec la diode. La figure 2.4 représente le modèle électrique simplifié de la cellule PV.

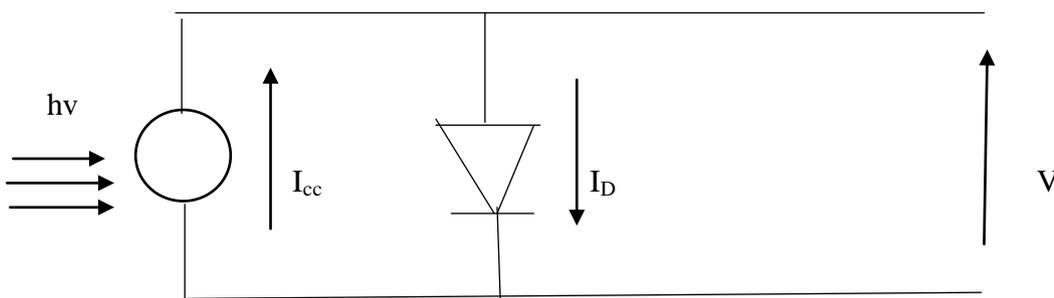


Figure 2.4 : Modèle électrique simplifié de la cellule PV [29]

#### 2.3.2 Cellule réelle (modèle à une diode)

C'est le modèle fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, en parallèle avec une diode pour modéliser les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et parallèle) pour les pertes. La figure 2.5 représente le modèle électrique à une diode de la cellule PV.

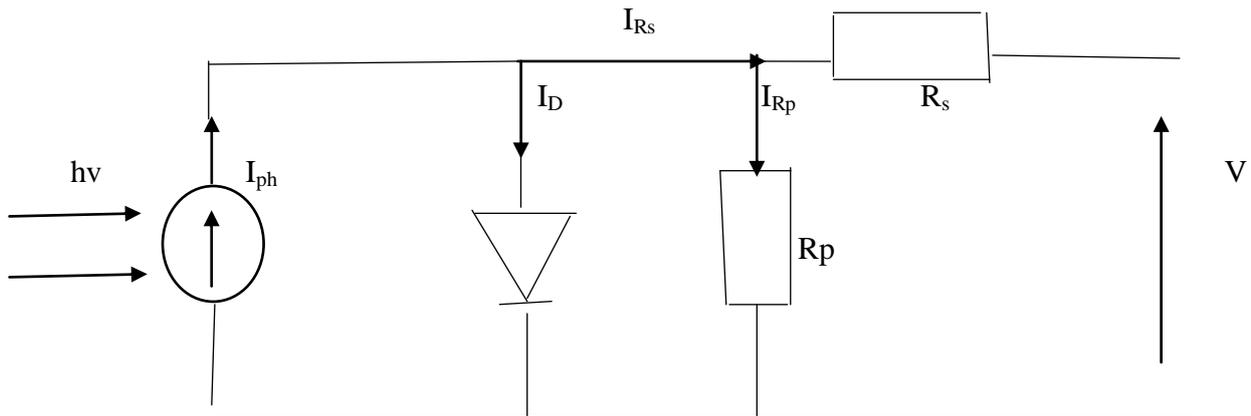


Figure 2.5 : Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule PV [29]

Le courant à la sortie de cellule I est donné par

$$I = I_{Rp} - I_D \tag{2.1}$$

Avec

$I_{ph}$  : le photo-courant qui est constant pour un ensoleillement donné.

$I_D$  : le courant traversant la diode donné par l'équation suivante

$$I_D = I_s [ \exp( V + R I/a V_t ) - 1 ] \tag{2.2}$$

$V_t$  : Tension thermique à la température T.

Le courant fournie par ce modèle est donné par

$$I = I_{ph} - I_s [ \exp(V + I R_s/a V_t) - 1 ] \tag{2.3}$$

Le courant de sortie de la cellule PV est calculé en utilisant la loi de Kirchhoff

$$I_{ph} = I_D - I_{Rp} - I_{Rs} \tag{2.4}$$

$I_{ph}$  : le courant photonique

$I_D$  : le courant dans la diode

$I_{Rp}$  : le courant dans la résistance

$I_{Rs}$  : le courant générer par la cellule PV

$$I_d = I_0 [ \exp(V + R_s I/a V_t) - 1 ] \tag{2.5}$$

$$I_{Rp} = (V + R_s I/R_p) \tag{2.6}$$

A partir de l'équation 2.4, on peut d'écrire

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (2.7)$$

On remplace 2.7 dans 2.5 et 2.6, on obtient

$$I_{Rs} = I - I_0 [\exp(V + R_s I / a V) - 1] - (V + R_s I / R_p) \quad (2.8)$$

### 2.4 Principales caractéristiques d'un module PV

#### 2.5.1 La puissance crête

C'est la puissance délivrée sous un éclairage de 1000w/m<sup>2</sup> et pour une température de la jonction de cellule de 25°C.

#### 2.5.2 Rendement

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.

#### 2.5.3 Facteur de forme

C'est le rapport entre la puissance optimale  $P_o$  et la puissance maximale  $P_m$  que peut avoir la cellule :  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ .

#### 2.5.4 Caractéristique courant tension d'un module

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant-tension. Il dépend de l'éclairage solaire et de la température des cellules.

### 2.6 Paramètres influençant sur le fonctionnement d'un module

#### 2.6.1 Influence de la température

En faisant varier la température  $T$ , l'influence de celle-ci sur les caractéristiques pour un éclairage constant ( $G=1000\text{w/m}^2$ ) est donnée par les figures 2.6 et 2.7 respectivement aux courants et de puissance en fonction de sa tension. On constate que l'effet d'augmentation de la température fait diminuer la tension de circuit ouvert du panneau photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

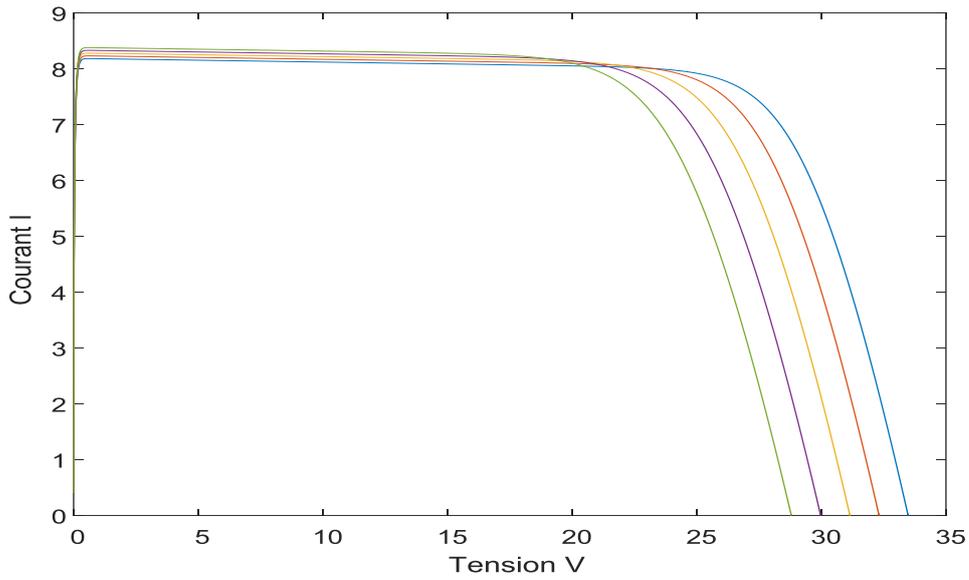


Figure 2.6 : Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de température

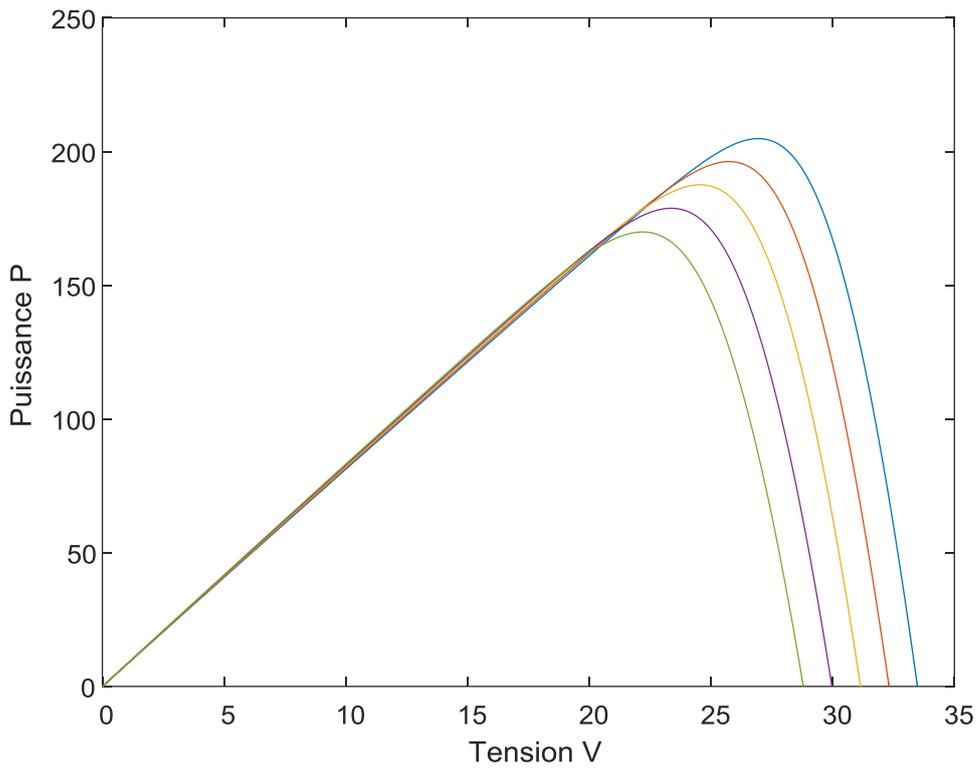


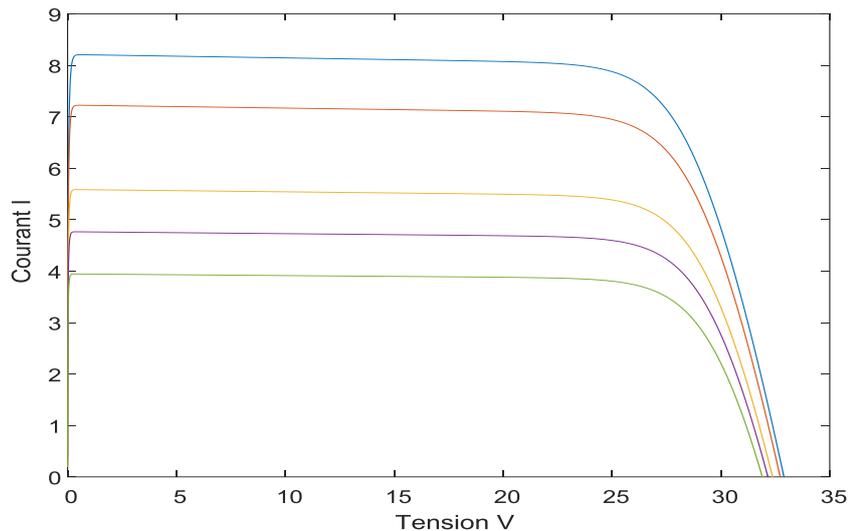
Figure 2.7 : Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de température

### 2.6.2 Influence de l'éclairement

Cas d'une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et différentes valeurs de l'éclairement :

D'après les figures 2.8 et 2.9 , on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement et une faible diminution dans la tension de circuit ouvert.

On remarque aussi sur la courbe  $P=f(V)$  que l'affaiblissement de l'éclairement diminue



considérablement le point de la puissance.

Figure 2.8 : Caractéristique  $I(V)$  pour différentes valeurs d'éclairement

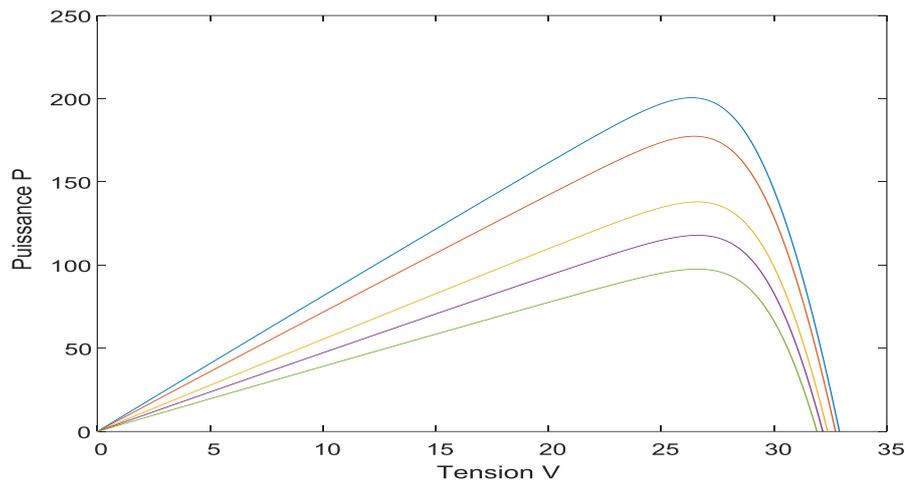


Figure 2.9 : Caractéristique  $P(V)$  pour différentes valeurs d'éclairement

**2.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique d'un générateur PV en utilisant un modèle à une diode et appelé aussi modèle à quatre paramètres. Ensuite, nous avons utilisé le logiciel Matlab pour étudier le comportement d'un GPV, ainsi l'influence de la température et de l'éclairement sur les grandeurs électriques du générateur PV( Courant  $I=f(V)$  et Puissance  $P=f(V)$ ).

A decorative border resembling a scroll, with a brown outline and grey circular accents at the corners and along the left edge.

# **Chapitre3**

**Modélisation et commande de la chaîne de  
conversion photovoltaïque**



### 3.1 Introduction

Aujourd'hui la modélisation mathématique est une étape essentielle pour l'analyse des systèmes et aussi pour le développement des techniques de commandes. En effet, dans ce chapitre on s'intéresse principalement à la modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion d'un système photovoltaïque (PV) ainsi que le développement des techniques de commande : commande MLI et commande MPPT de type P&O, sous l'environnement Matlab/Simulink.

### 3.2 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

Le système photovoltaïque étudié se compose d'un générateur photovoltaïque, convertisseur Boost et d'un onduleur.

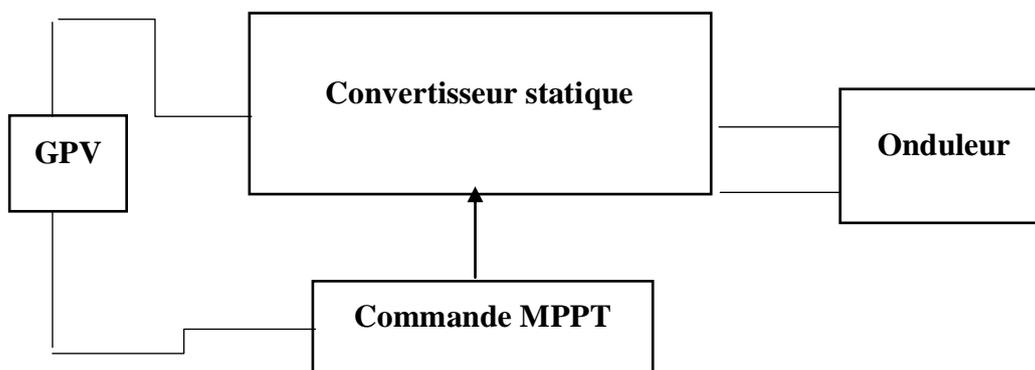


Figure 3.1 : schéma de principe d'un système photovoltaïque

#### 3.2.1 Modélisation du convertisseur Boost

Un hacheur est un convertisseur de type continu-continu qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable. Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Il est constitué de condensateur, d'inductance et de commutateurs [12]. Le rôle de ce convertisseur est de faire fonctionner les modules à leurs point de puissance maximale quelques soient l'éclairement et la température pour délivrer cette puissance à l'utilisation.

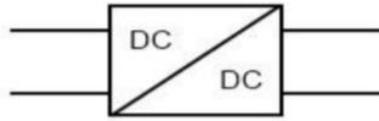


Figure 3.2 : Convertisseur DC/DC [19]

Il existe plusieurs types de convertisseur, ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée et non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Par contre les topologies non isolées ne comportent pas de transformateur d'isolement, elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [13]. Ces topologies sont encore classés en 3 catégories :

- Abaisseur est appelé aussi dévolteur, convertisseur série, Buck. Il est employé pour des faibles tensions, dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batterie et dans les systèmes de pompage d'eau.
- Élévateur est connu aussi par le nom survolteur, convertisseur parallèle, Boost. Il est employé pour augmenter la tension. Le système de production d'énergie emploie le convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau de service avant l'étage de l'ondulation.
- Abaisseur-Élévateur ou bien dévolteur-survolteur, convertisseur série parallèle, Buck-Boost, qui est capable d'augmenter et de diminuer la tension.

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés par le hacheur Boost. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

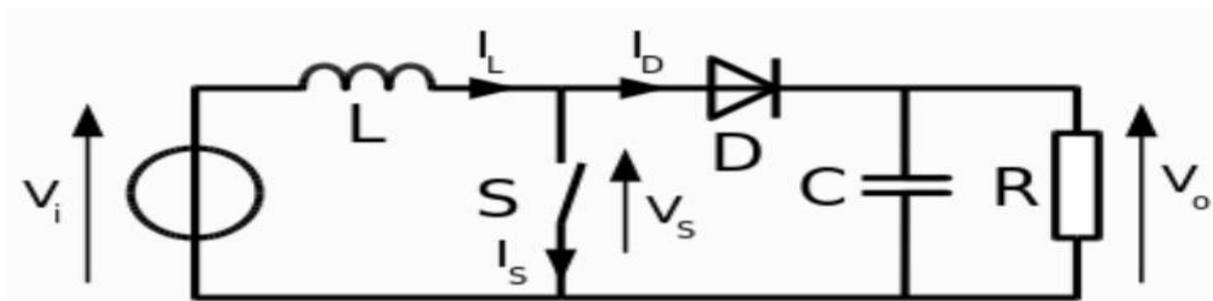


Figure 3.3 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost [22]

Lorsque la fonction de commutation est  $D=1$ , on obtient la dynamique suivante :

$$V_i = V_0 \tag{3.1}$$

$$V_i = L \, di/dt \tag{3.2}$$

$$C \, dV_c/dt = -V_0/R \tag{3.3}$$

$$i(t) = V_i(t)/L + i_{\min} \tag{3.4}$$

Le courant augmente linéairement avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum à

$t_{on} = D$  :

$$I_{\max} = (V_i/L) \, DT + i_{\min} \tag{3.5}$$

$$i_{\max} - i_{\min} = (V_i/L) \, DT \tag{3.6}$$

$$\Delta i = (V_i/L) \, DT \tag{3.7}$$

lorsque la fonction de commutateur est  $D=0$ , on obtient la dynamique suivante :

$$V_L = V_i - V_0 \tag{3.8}$$

$$L \, di/dt = V_i - V_0 \tag{3.9}$$

$$I(t) = (V_i - V_0)/L + i_{\min} \tag{3.10}$$

$$I_C = i - i_0 \tag{3.11}$$

$$C \, dV_C = i - V_0/R \tag{3.12}$$

Quand  $t \rightarrow t_{on}$ , le courant à travers l'inductance diminue linéairement de sa valeur maximale à sa valeur minimale

$$i_{\min} = ((V_i - V_0)/L) \, (1-D)T + i_{\max} \tag{3.13}$$

$$\text{Donc } \Delta i = (V_0 - V_i/L) \, (1-D)T \tag{3.14}$$

En combinant ces deux relations (3.7) et (3.14), on peut établir l'expression de la tension de sortie

$$(V_i/L)DT = V_0 - V_i/L \tag{3.15}$$

$$\text{Ce qui implique : } V_0 = (1/(1-D)) \, V_i \tag{3.16}$$

L'équation (3.16) donne la relation fondamentale entre l'entrée et la tension de sortie de convertisseur. De ce fait, on peut augmenter la tension d'entrée par l'utilisation d'un circuit Boost.

**3.2.2 Modélisation d'un onduleur triphasé à MLI**

L'onduleur de tension est un convertisseur statique d'énergie électrique alimenté par une source de tension continue et d'impédance négligeable qui permet d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace.

La relation entre la tension continue et les tensions alternatives varie en fonction de l'ouverture et la fermeture des interrupteurs IGBT. Le stockage d'énergie du coté continu est effectué au moyen d'un condensateur placé en parallèle à la tension qui est maintenue à la une valeur approximativement constante.

A chaque bras de l'onduleur est associée une fonction logique qui correspondant à l'état des interrupteurs (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>).

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \text{si K1 est fermé et K4 est ouvert} \\ 0 & \text{si K4 est fermé et K1 est ouvert} \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} 1 & \text{si K2 est fermé et K5 est ouvert} \\ 0 & \text{si K5 est fermé et K2 est ouvert} \end{cases}$$

$$F_3 = \begin{cases} 1 & \text{si K3 est fermé et K6 est ouvert} \\ 0 & \text{si K6 est fermé et K3 est ouvert} \end{cases}$$

Ainsi, les tensions de ligne sont données par :

$$U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_{dc} (F_3 - F_1)$$

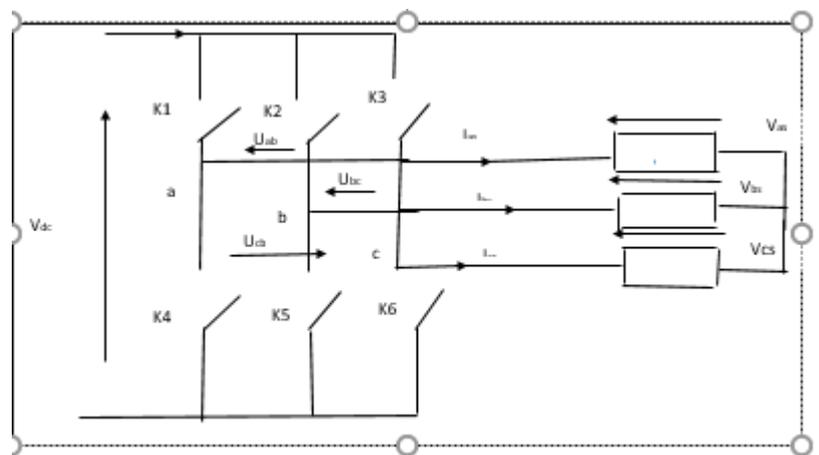
La tension de sortie de l'onduleur est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} * V_{dc} / 3$$

Tels que

$$V_{as} = V_{dc} / 3 (2F_1 - F_2 - F_3)$$

$$V_{bs} = V_{dc} / 3 (2F_2 - F_1 - F_3)$$



$$V_{cs} = V_{dc} / 3 (2F_3 - F_1 - F_2)$$

$V_{dc}$  : Tension d'alimentation continue de l'onduleur

### 3.3 Commande MLI

La technique de modulation de largeur d'impulsion MLI ( PWM : Pulse With Modulation en anglais ) est utilisée pour avoir des tensions sinusoïdale à la sortie de l'onduleur. Dans ce travail, on va utiliser la comparaison d'un signal de la tension de référence sinusoïdale d'amplitude  $A_m$  et de fréquence  $f$ , a un signal triangulaire (porteuse) d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $f_p$ .

Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse 0, si non : le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et la porteuse la figure représente les deux signaux à comparer ( modulante et porteuse).

$$m = f_p / f$$

$$r = A_m / A_p$$

$m$  : L'indice de modulation

$r$  : Le coefficient de réglage en tension

Les figures 3.5, 3.6 et 3.7 présentent respectivement les signaux de la commande MLI, l'état de commutation de l'interrupteur du haut d'un bras du convertisseur et l'état de commutation de l'interrupteur du bas.

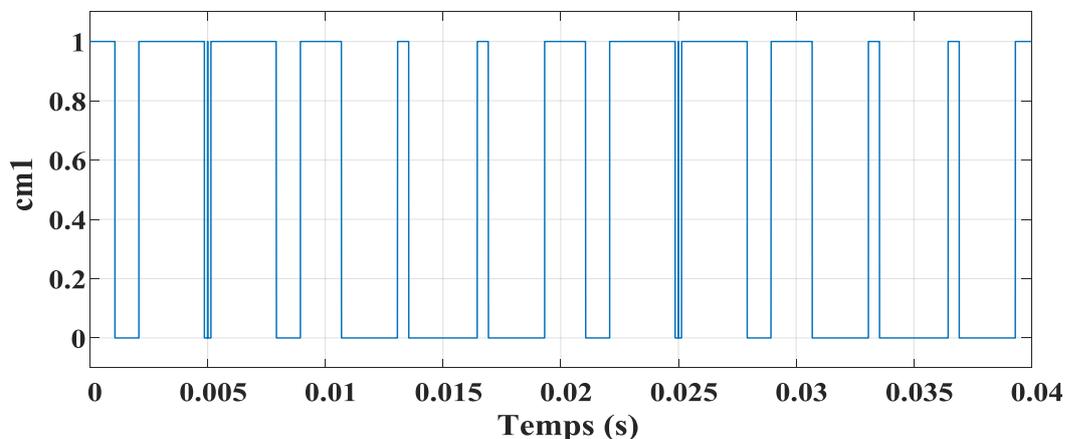


Figure 3.5 : Intervalles de conduction d'interrupteur K1

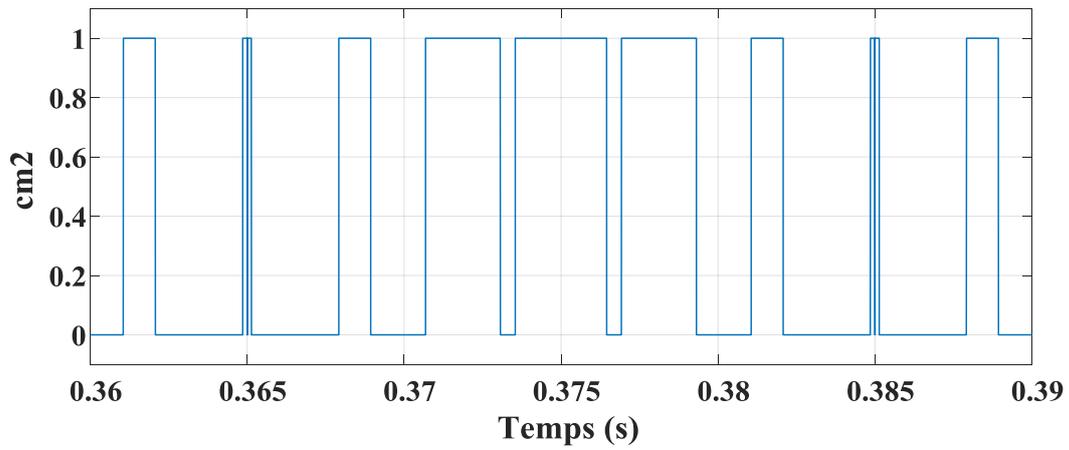


Figure 3.6 : Intervalles de conduction d'interrupteur

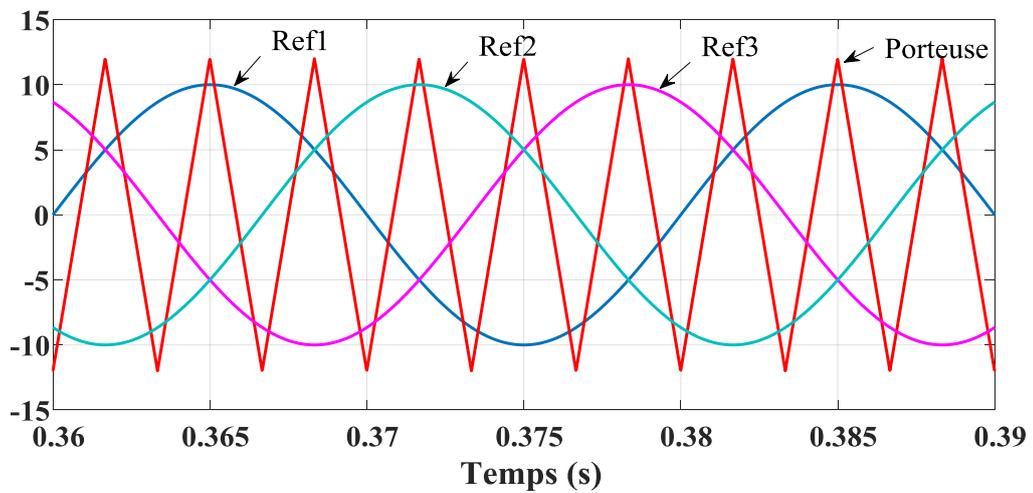


Figure 3.7: Allure des signaux modulés et porteuse

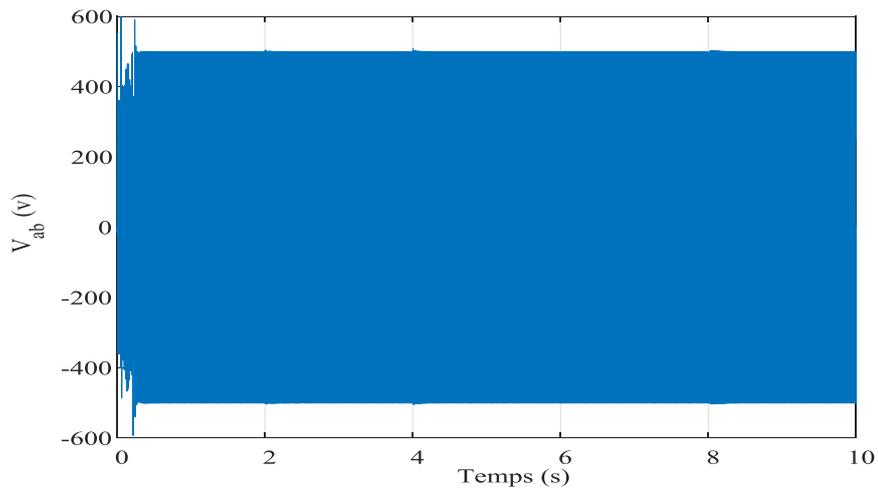


Figure 3.8 : Tension  $V_{ab}(v)$  en fonction du temps

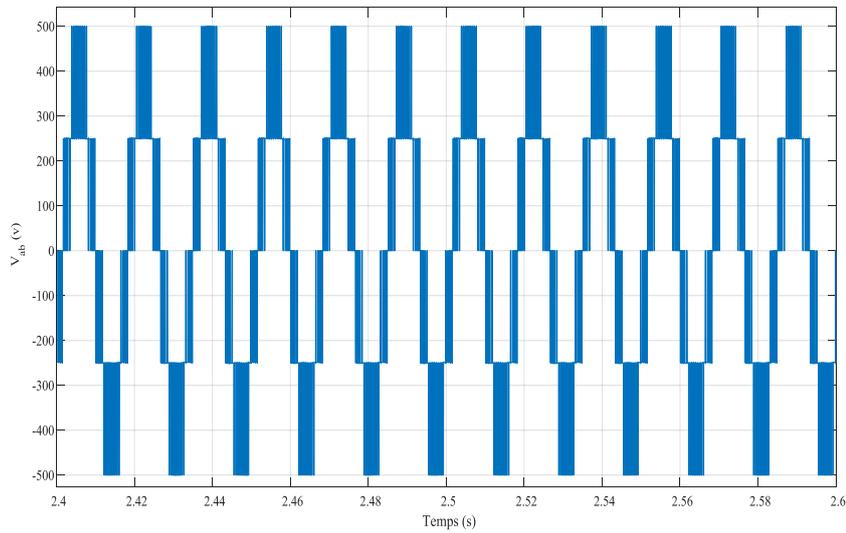


Figure 3.9 : Zoom de figure 3.8

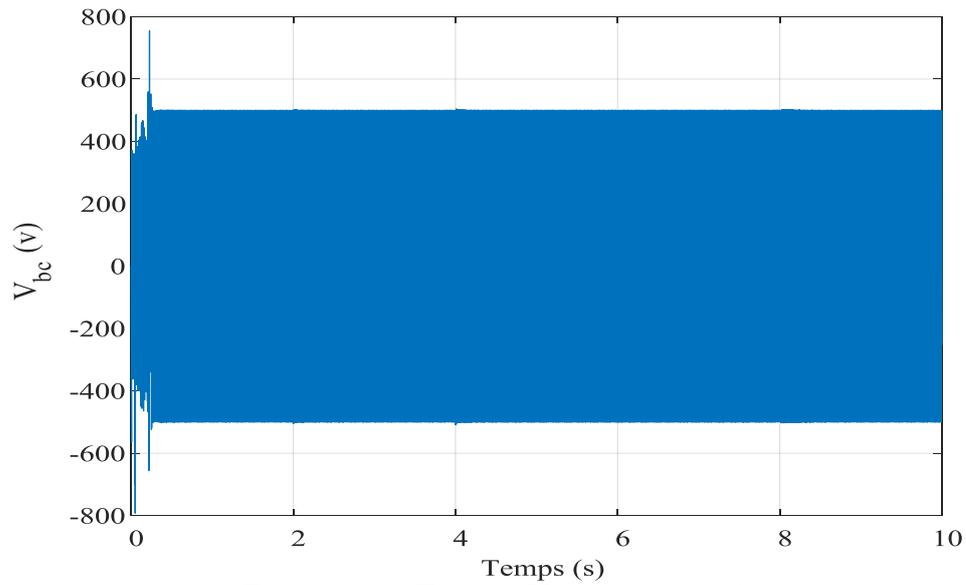


Figure 3.10 : Tension  $V_{bc}$  en fonction du temps

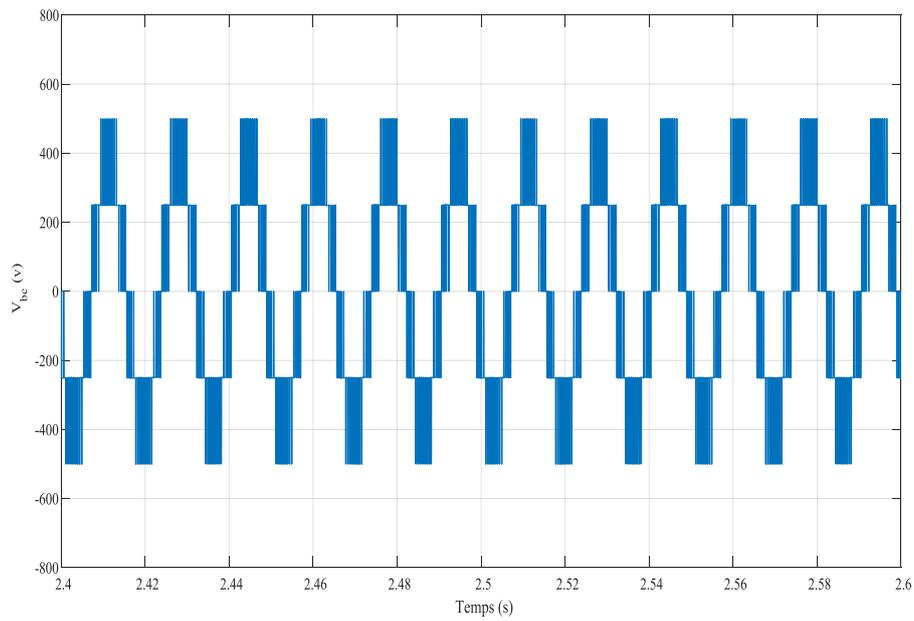


Figure 3.11 : Zoom de figure 3.10

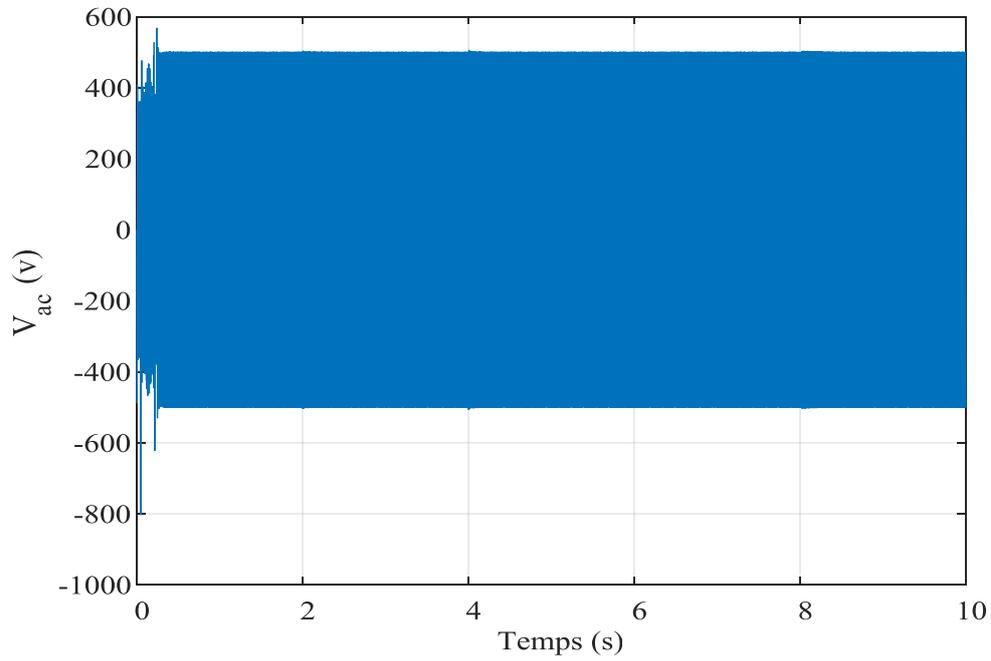


Figure 3.12 : Tension  $V_{ac}$  (V) en fonction du temps

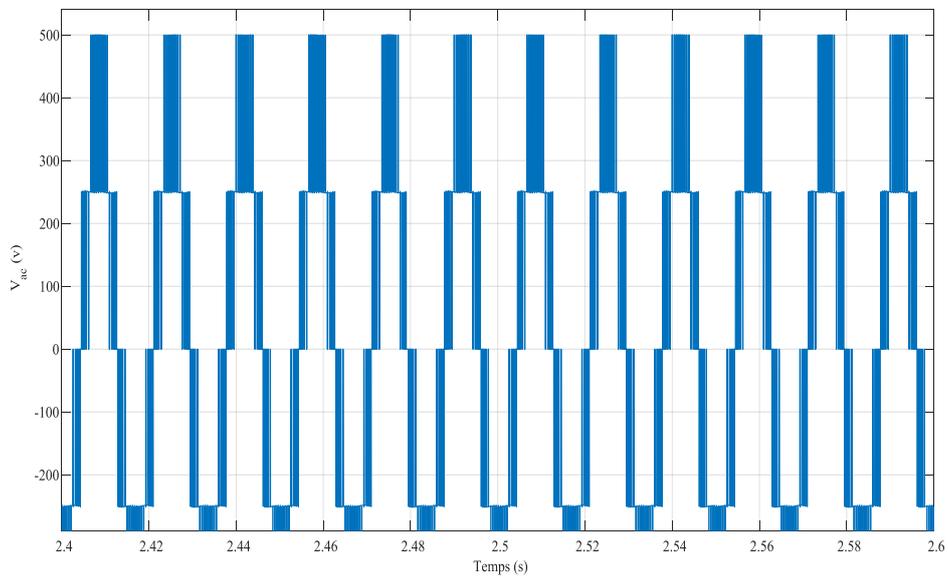


Figure 3.13 : Zoom de figure 3.12

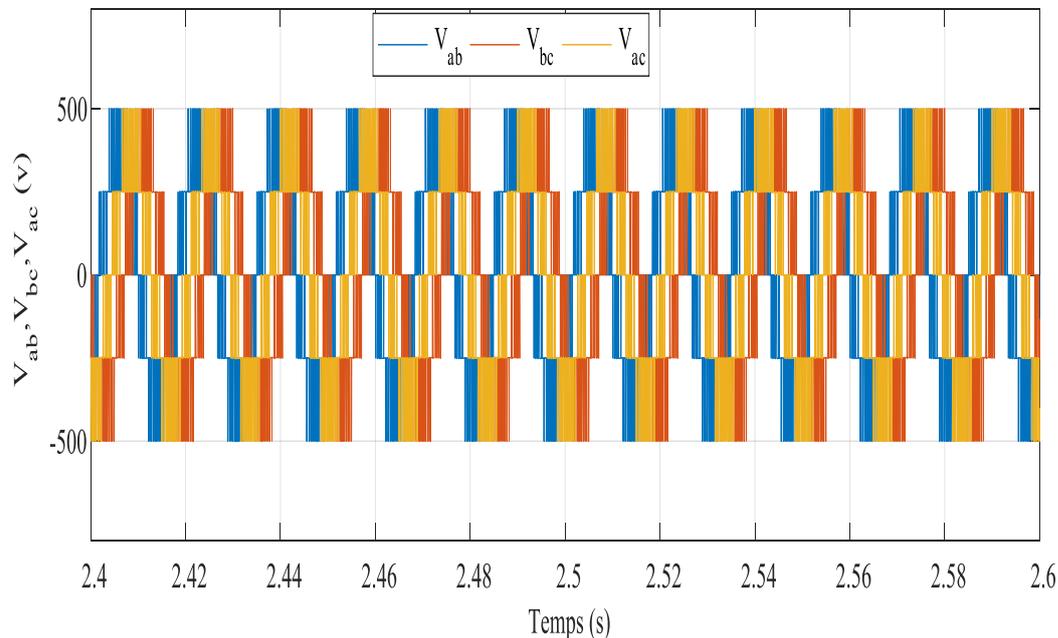


Figure 3.14 : Tensions simples  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ac}$  en fonction du temps

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que la tension au début elle est constante après elle prend la forme sinusoïdale ( alternance negative vers positive ).

Dans la figure 3.14, on a trois tensions simples déphasées de  $60^\circ$  l'une par rapport à l'autre.

### 3.4 Commande MPPT

MPPT est nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou en anglais « Maximum Power Point », associé à un convertisseur statique qui est placé entre le générateur et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement.

La poursuite de point de puissance maximale MPPT permet de forcer le système PV à fonctionner au PPM en variant le rapport cyclique du convertisseur selon les variations de la charge ou les des conditions atmosphériques, ainsi la puissance délivrée est toujours à la valeur maximale. Il existe plusieurs types de commande MPPT :

#### 3.4.1 MPPT indirect

Ce type de commande MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement de GPV réalisé à

partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Elles ont besoin aussi de mesurer et de comparer plusieurs grandeurs comme l'éclairement, la température ambiante et la tension. Leurs algorithmes nécessitent une grande capacité de mémoire pour stocker des données et il faut mettre à jour des données pour chaque panneau [14] et [15].

#### *3.4.2 MPPT direct*

Ces méthodes utilisant les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV.

Parmi ces méthodes, on peut citer :

- La méthode nommée « algorithme d'incrément de conductance ».
- La méthode de la capacité parasite [16].
- La méthode perturbe et observe.

#### *3.4.3 Commande P&O*

D'après les recherches scientifiques la méthode P&O est la plus adaptée dans le domaine du photovoltaïque parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et de courant du champ photovoltaïque,  $V$  et  $I$  respectivement. La méthode perturbe and observe comme son nom l'indique fonctionne avec la perturbation de la tension volontairement (augmenter ou diminuer) aux bornes du champ du module PV, ou en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Le fait de modifier le rendement de conversion de l'onduleur perturbe le courant continu issu des modules et par conséquent la tension à leurs bornes et la puissance instantanée délivrée.

Cette méthode est donc basée sur le contrôle de puissance instantanée délivrée par le champ de module PV en fonction de la variation de la tension continue aux bornes du champ PV.

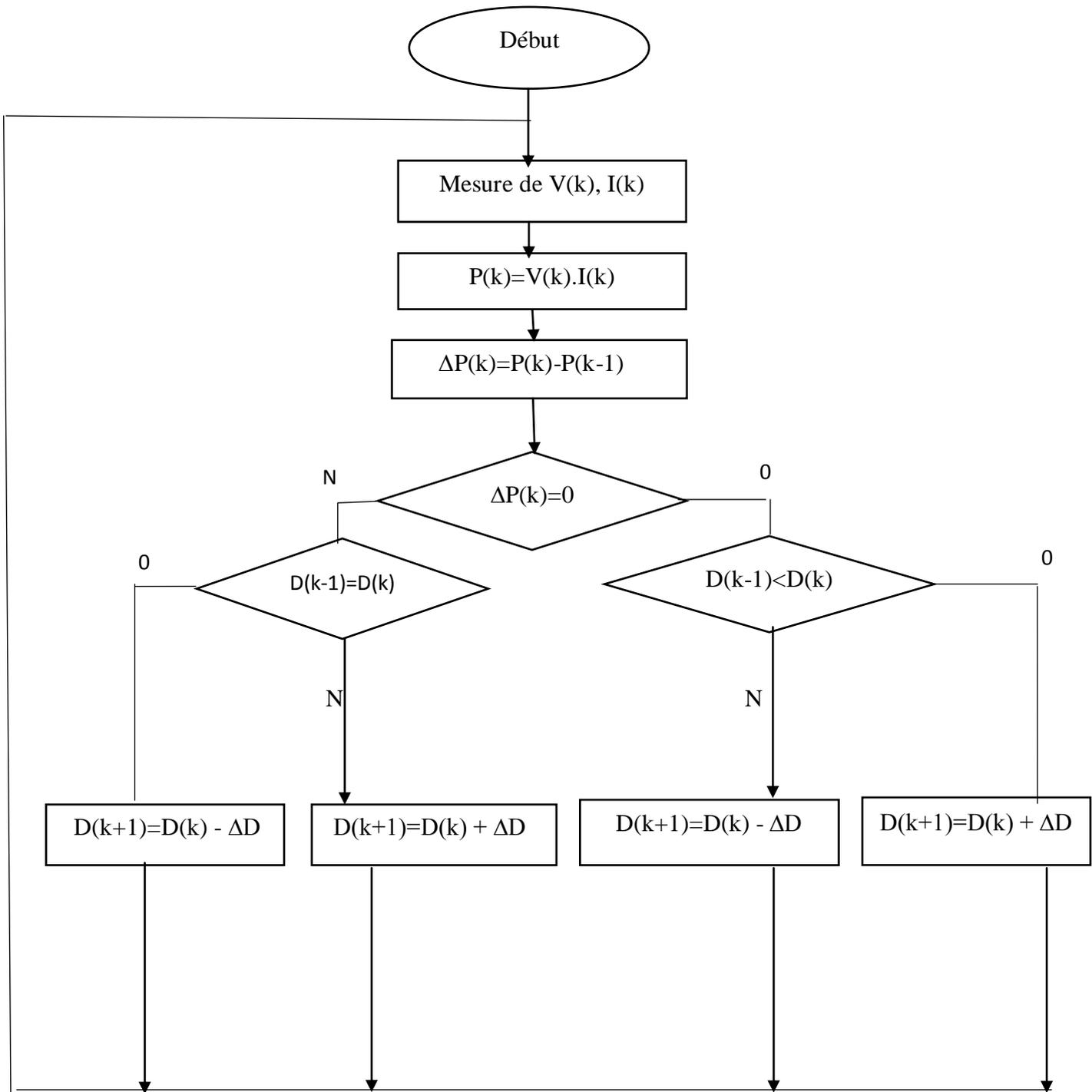


Figure 3.15 : Algorithme de perturbation et observation [20]

## 3.5 Simulation et discussions

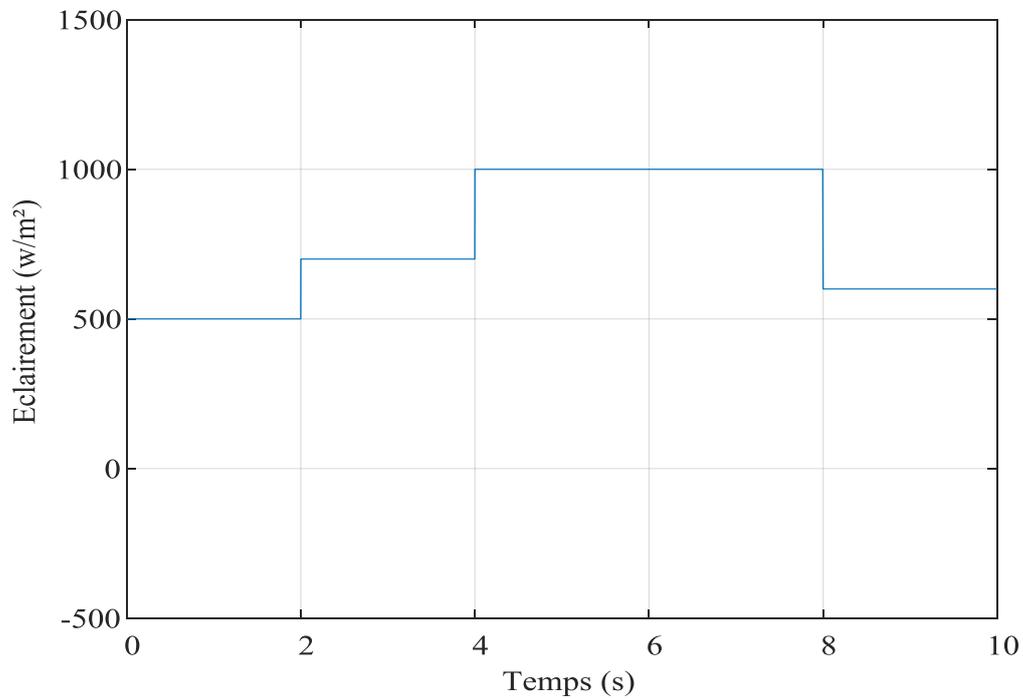


Figure 3.16 : Caractéristique de l'éclairement en fonction du temps

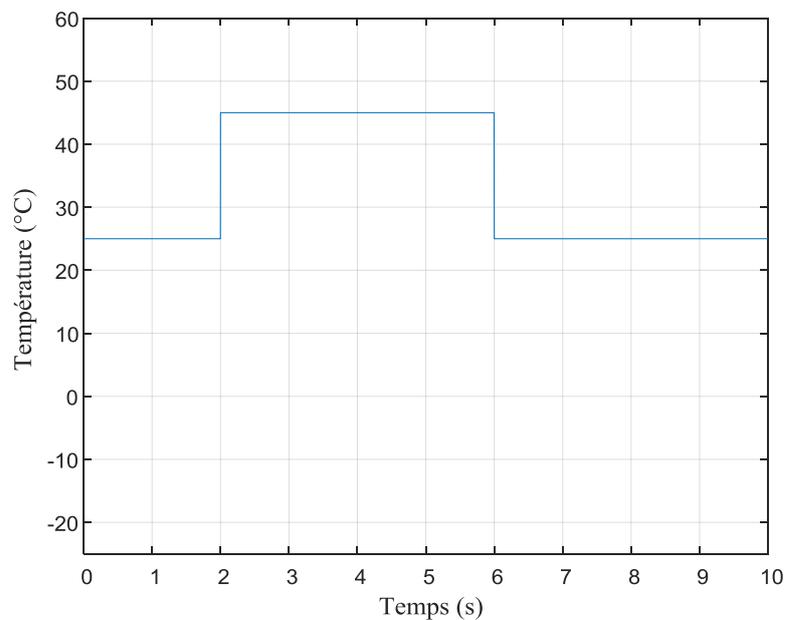


Figure 3.17 : Caractéristique de la température en fonction du temps

Tableau 3.1 : Variations de l'éclairement (G) et la température (T)

Temps (s)	T (°C)	G (w/m <sup>2</sup> )
$0 \leq t < 2$	25	500
$2 \leq t < 4$	45	700
$4 \leq t < 6$	45	1000
$6 \leq t < 8$	25	1000
$8 \leq t < 10$	25	600

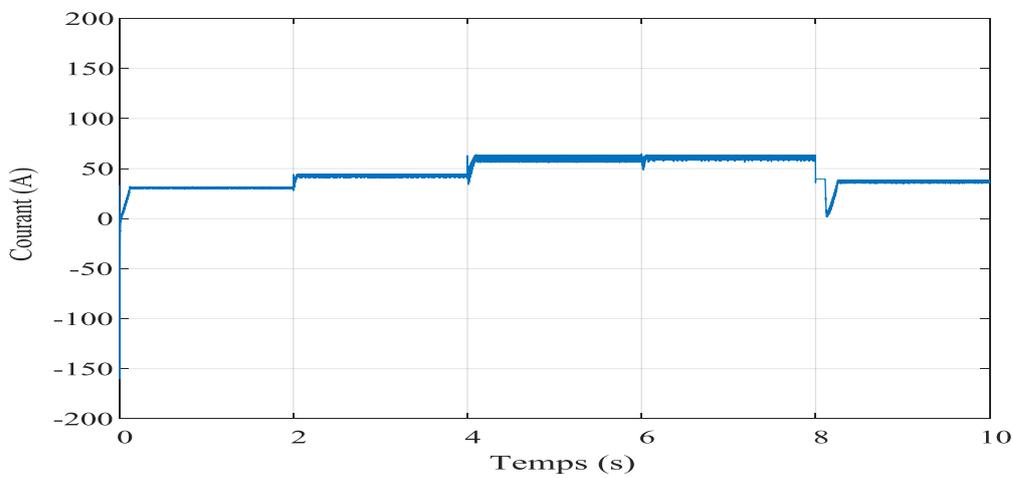


Figure 3.18 : Courbe du courant  $I_{pv}$  (A) en fonction du temps

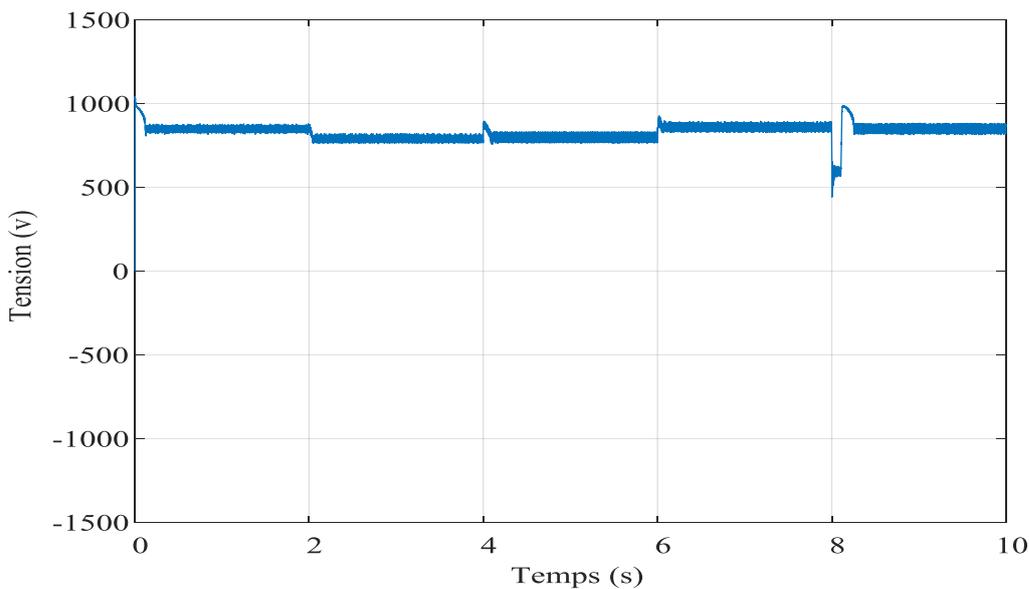


Figure 3.19 : Courbe de tension  $V_{pv}$  (v) en fonction du temps

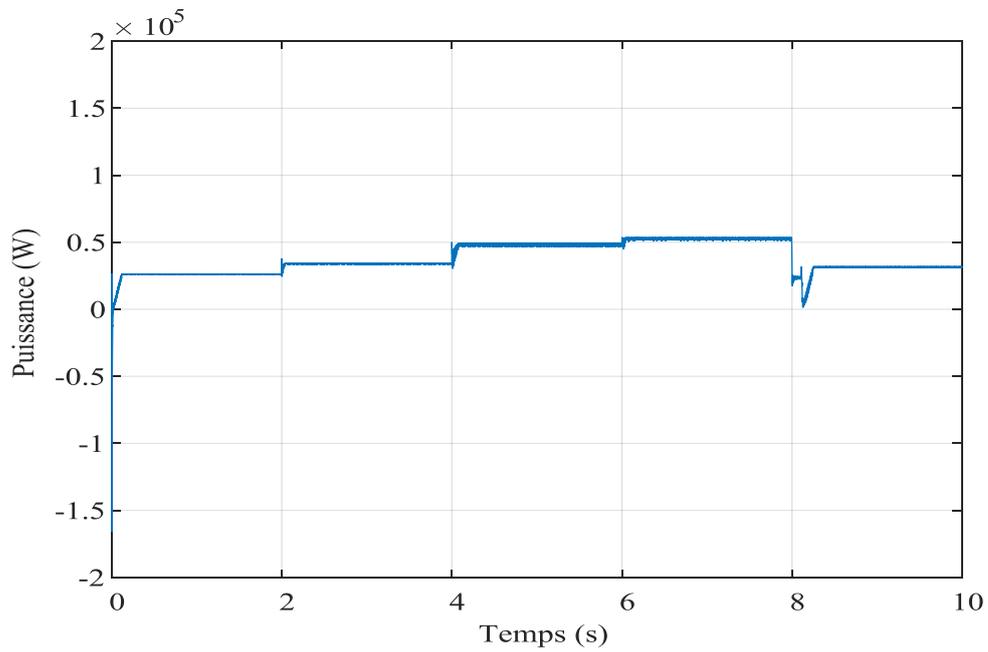


Figure 3.20 : Courbe de puissance Ppv (w) en fonction du temps

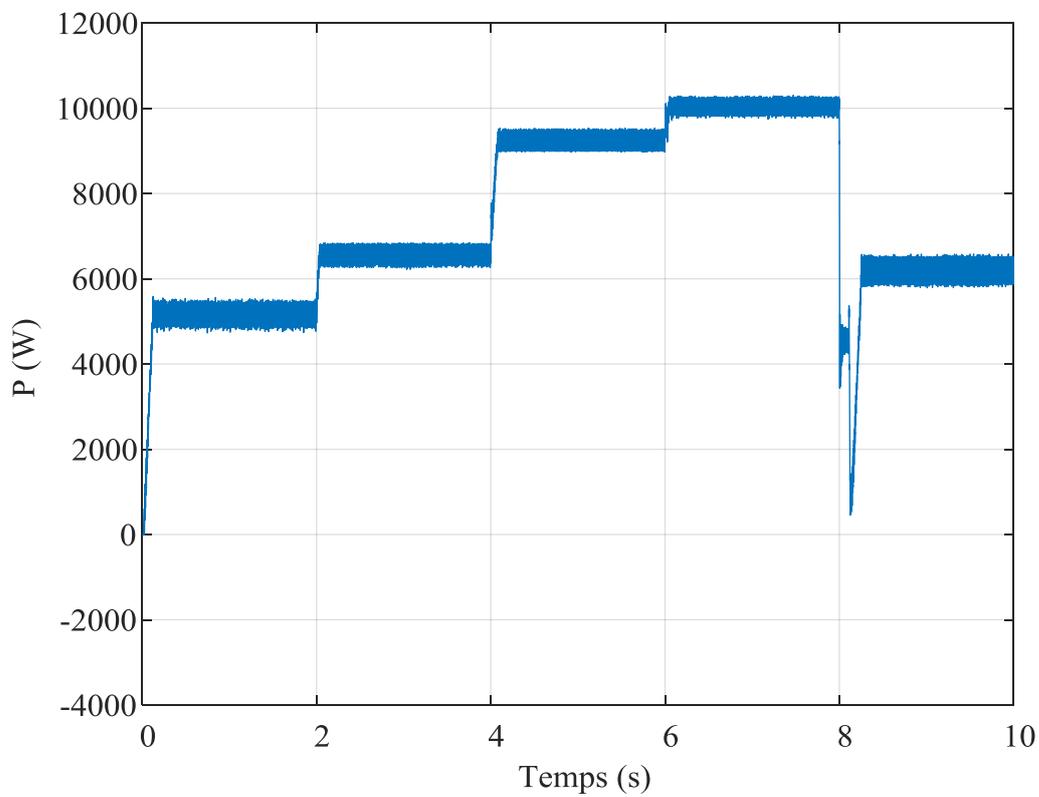


Figure 3.21 : Courbe de puissance P (w) injectée au réseau

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que la puissance augmente pour un changement de l'éclairement seul, car à partir des courbes courant-tension du panneau PV et pour différentes valeurs de l'ensoleillement, la tension diminue légèrement tandis que l'augmentation du courant est importante. Par contre, la puissance diminue avec l'augmentation de température, cela est dû à la diminution de la tension alors que le courant reste à peu près constant. Concernant la variation de la température et l'éclairement en même temps, la puissance et la tension varient légèrement.

### **3.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le hacheur Boost, leur modèle mathématique et de l'onduleur triphasé. Ensuite, nous présentons la modélisation de cet onduleur par la commande MLI (triangulo-sinusoidale). Ainsi, la commande MPPT basée sur l'algorithme Perturbe & observe du hacheur Boost. Enfin, nous terminons par la discussion des résultats de simulation, les résultats montrent que le hacheur Boost et la commande MPPT de type P&O effectuent correctement leurs rôles et pour l'onduleur à MLI présente une meilleure solution dans les domaines de moyennes et faibles puissances.

A decorative scroll frame with a brown outline and grey circular accents at the corners, containing the chapter title and subtitle.

# **Chapitre4**

**Résrau de neurones artificiels**

### 4.1 Introduction

L'intelligence artificielle (Artificial Intelligence) se retrouve implémentée dans plusieurs domaines d'application. Les techniques d'intelligence artificielle jouent un rôle important par l'analyse et la prédiction des performances et le contrôle des systèmes d'énergie renouvelable. Le premier réseau de neurones apparaît en 1958, cette technique est placée dans la famille des méthodes d'intelligence artificielle. L'avantage de l'utilisation de modèles à réseau de neurones comparativement aux modèles mathématiques réside dans leurs habilité à modéliser des systèmes complexes, non sans avoir besoin de comprendre les relations mathématiques reliant entrées et sorties du système. Dans ce chapitre, nous avons développé une commande MPPT du convertisseur Boost à base de réseau de neurones pour extraire le point de puissance maximale (PPM) d'un panneau PV quelques soient les conditions de fonctionnement.

### 4.2 Neurone

Le neurone est une cellule vivante, qui peut prendre des formes variables (pyramide, sphérique ou étoile) son forme est définit par une membrane qui sépare l'intérieur du neurone à l'extérieur. Ces neurones sont considérés comme l'élément de base qui constituent les unités élémentaires de traitement dans le cerveau [17].

### 4.3 Réseaux de neurones artificiels

Le réseau de neurones est un système d'opérateur non linéaire interconnecté, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées et délivrant des signaux de sortie, qui compose de plusieurs éléments simples opérant en parallèle appelé neurone. La fonction du réseau est largement déterminée par la connexion de ces éléments. Il ne se programme jamais pour réaliser une telle couche, il est entraîné sur des données acquises à travers un mécanisme d'apprentissage qui agit sur les constituants du réseau afin de réaliser au mieux la tâche souhaitée [17]. Le réseau de neurones peut être définir par les quatre éléments suivants :

La nature des entrées et de sorties (binaire ou réelle) ;

La fonction d'entrée totale qui définit les prétraitement effectué sur les entrées (booléenne, linéaire, affine et polynomiale de degré supérieur à deux) ;

La fonction d'activation de neurone (fonction binaire à seuil ou bien satur la fonction à seuil) et aussi fonction sigmoïde et la fonction de sortie).

## 4.3.1 Architecture du réseau de neurones artificiels

Le RNA est constitué de plusieurs couches connectées entre elles par des poids synaptiques, il existe deux architectures :

Réseau de neurones non bouclés ou l'information circulant des entrées vers les sorties sans retour en arrière par contre le réseau de neurones bouclé est avec retour en arrière comme c'est indiqué dans la figure 4.1.

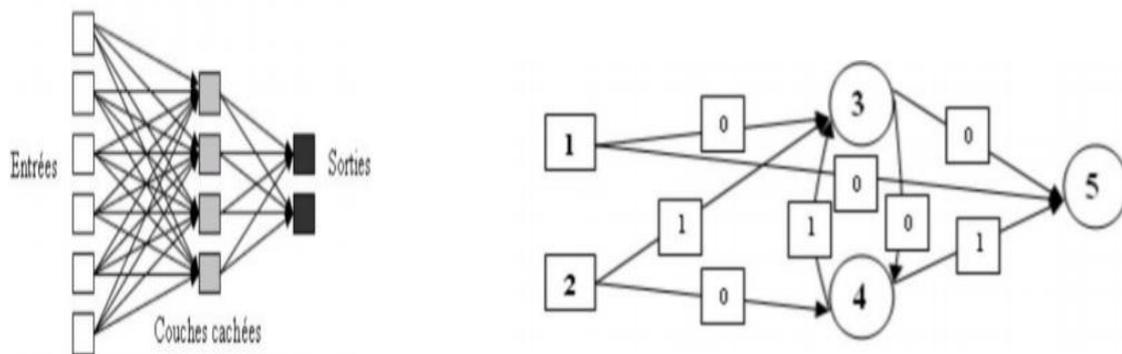


Figure 4.1 : Structure d'un RNA non bouclé et bouclé avec deux entrées

## 4.3.2 Apprentissage de réseau de neurones artificiels [18]

Il existe différents types d'apprentissage du réseau de neurones artificiels :

L'apprentissage supervisé : pour les RNA formels, il permet de calculer les coefficients synaptiques de telle sorte que les sorties du réseau soient pour les exemples utilisés lors de l'apprentissage, aussi proche que possible des sorties désirées.

L'apprentissage non supervisé est connu en statique par le nom d'agrégation.

Le mode hybride reprend en fait les deux autres approches.

## 4.3.3 Algorithme de réseau de neurones artificiels

Il existe plusieurs structures entrées/sorties de créer un modèle de panneau PV à base de RNA (voir figure 4.2).

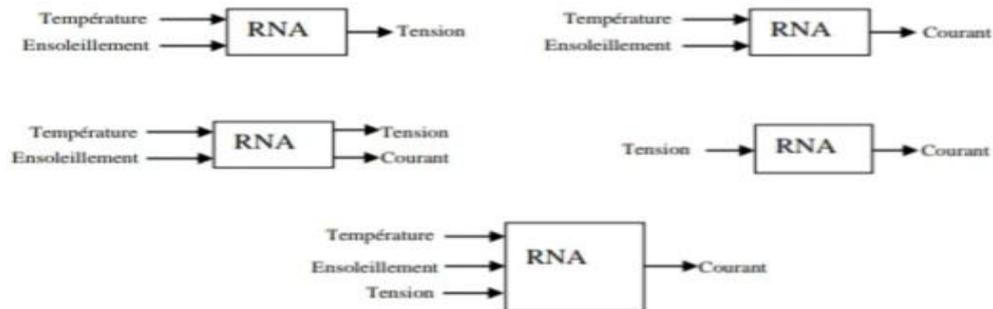


Figure 4.2 : Différents structures (entrées/sorties) de réseaux de neurones artificiels modélisant le fonctionnement de panneau photovoltaïque

#### 4.4 Résultats et discussions

Comme il a été présenté dans le chapitre précédent, une commande MPPT de type P&O a été développée pour assurer un fonctionnement à puissance maximale. Toutefois, les résultats de simulation ont montré des oscillations autour du point de puissance maximale (PPM). Alors, dans ce chapitre nous avons utilisé une autre technique de commande basée sur les réseaux de neurones. Le contrôleur MPPT-neurone a été conçu comme suite :

- ❖ La collecte d'une base de données : ces données constituent l'entrée du réseau et à la fois il détermine la taille et les performances du système PV. Dans notre travail, on a une seule variable d'entrée (Puissance  $P_{pv}$ ) et une seule variable de sortie (Rapport cyclique  $D$ ).
- ❖ Le choix de l'architecture du réseau de neurones : On a construit un réseau de neurones multi couches avec :
  - Une couche d'entrée à quatre neurones.
  - Une couche cachée à 40 neurones.
  - Une couche de sortie à un seul neurone.
  - Pour la fonction de transfert de la couche d'entrée et de sortie, on a utilisé les fonctions :  $\text{logsig}$ ,  $\text{pure lin}$ ,  $\text{train lm}$ .
  - Entraînement du réseau de neurones sur les bases d'apprentissage et de validation.

On a effectué un apprentissage automatique jusqu'à l'obtention d'une erreur quadratique très petite.

- ❖ Mesure des performances du réseau de neurones sur la base de test.

La figure 4.3 présente le bloc MPPT - Neurone

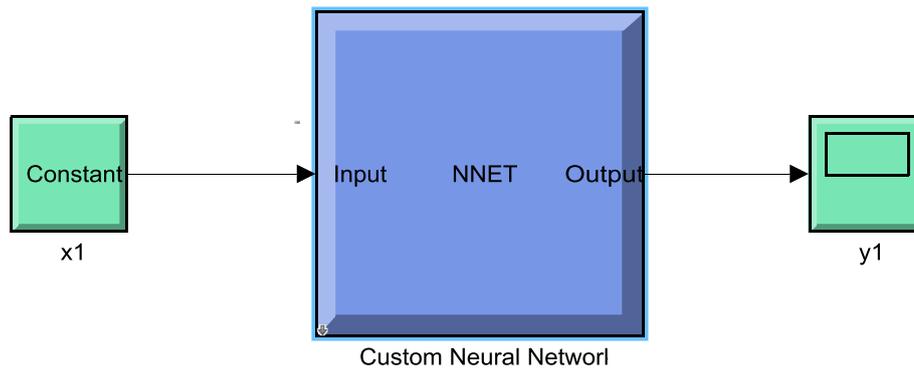


Figure 4.3 : Formation RN avec MATLAB

La figure 4.4 illustre la structure du réseau de neurones artificiels

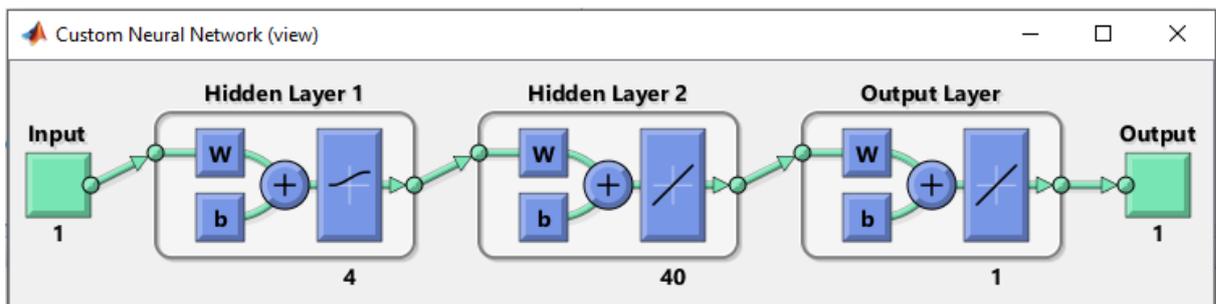


Figure 4.4 : Bloc du réseau de neurones dans SIMULINK

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 représentent, respectivement, le courant, la tension et la puissance du générateur photovoltaïque.

Ces résultats montrent un bon fonctionnement de l'algorithme P&O mais, ils montrent aussi un meilleur fonctionnement du contrôleur neuronal. Ce dernier montre clairement qu'il y a de meilleures performances, une rapidité en temps de réponse, la stabilité exactement à la PPM sans oscillation par contre, le contrôleur P&O a des oscillations très importantes qui vont provoquer des pertes de puissances.

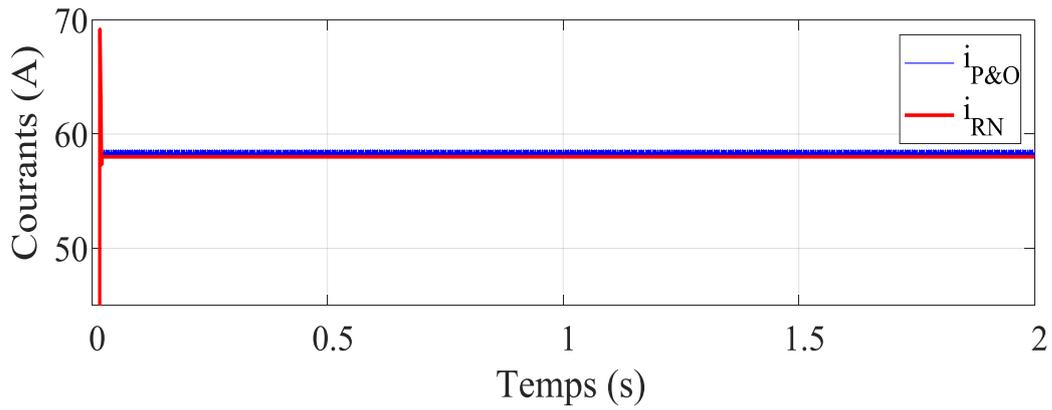


Figure 4.5 : Courant (A) en fonction du temps

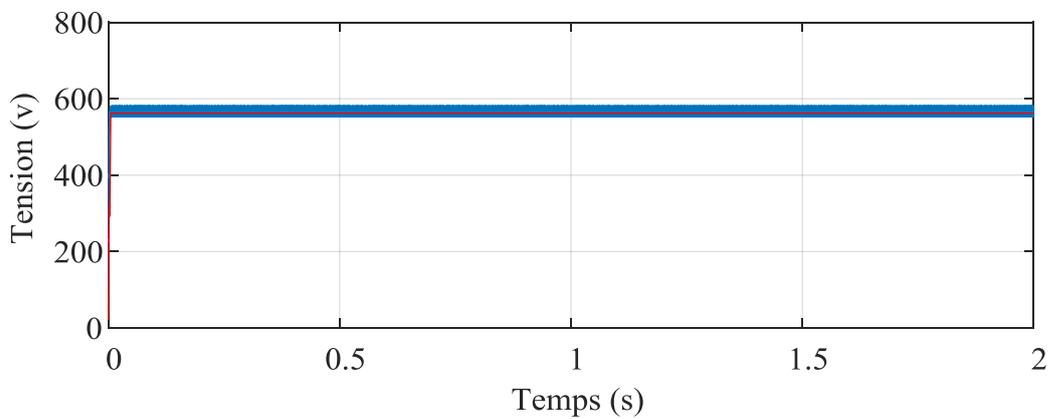


Figure 4.5 : Tension (V) en fonction du temps

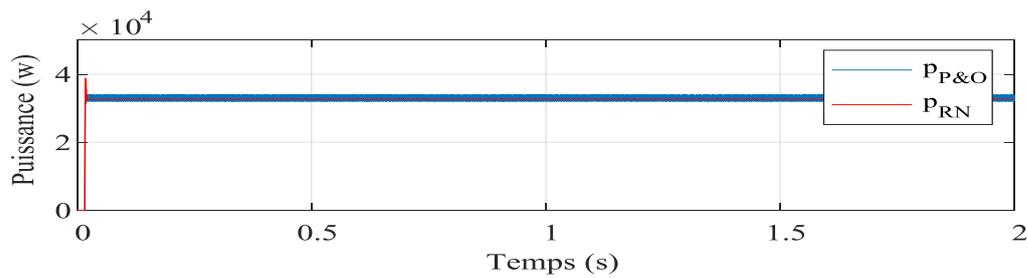


Figure 4.5 : Puissance (W) en fonction du temps

### 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande MPPT basée de l'algorithme RNA est utilisé pour assurer le fonctionnement d'un panneau PV à son point de puissance maximale le but principale à travers la réalisation de ce chapitre est la maîtrise l'une des techniques de l'IA pour la commande, à partir de l'étape de la création du RN et l'apprentissage jusqu'à la validation de ses performances

À partir des résultats de simulation nous avons montré l'efficacité de l'algorithme RNA avec un temps de réponse réduit

Donc, on peut dire que RNA sont des outils de modélisation efficaces et puissants, leurs robustesses, rapidités et la décisions correcte à travers la précision de ses sorties.

A decorative scroll frame with a brown border and three grey circular accents at the top-left, top-right, and bottom-left corners. The text "Conclusion générale" is centered within the frame.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

L'énergie solaire est la plus simple, rapide à installer et aussi non polluante. L'énergie photovoltaïque est la conversion de l'énergie solaire en électricité c'est parmi les énergies renouvelables la plus utilisée pour la production des énergies.

Ce travail de fin d'étude master 2, est une étude ayant pour objectif d'étudier la modélisation et la commande du système PV. En effet, l'influence d'ensoleillement et de la température sur le fonctionnement du panneau PV a été analysés. Toutefois, un hacheur Boost commandé par MPPT de type P&O pour extraire le point de puissance maximale sous différentes conditions climatiques. Ainsi, la commande MPPT de réseau de neurones artificiels a été développée.

Notons, on utilise le logiciel MATLAB/SIMULINK comme l'outil de programmation.



# Références

## Référence

---

- [1] Dr. BELAID Sofia, Maitre de Conférence Classe B, Années universitaire 2014/2015
- [2] Renewables 2020 Global Status Report Renewables Global Status Report. 2019 July 15; Available from: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.
- [3] cea©Commissariat à l'énergie Atomique, 2009, Direction de la communication, Bâtiment siège -91191 Gif-Yvette cedex, [www.cea.fr](http://www.cea.fr), ISSN 1937-5408.
- [4] © Convertisseurs photovoltaïques\_Alain Ricaud\_Nov-07 - Comprese.doc.
- [5] M.OULAMI « L'énergie Solaire Photovoltaïque », Ecole Technique de Blida.
- [6] A.Labouret, M.Villoz, « Energie Solaire De L'algerie », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [7] MIE CHABI, INSTITUT DE FORMATION EN ELECYRICITE ET GAZ, RAYONNEMENT SOLAIRE, Laboratoire des energies renouvzlables, Groupe SONELGAZ - IFEG - Eco Tec Blida.
- [8] Boukhalfa Yaïci, formateur, Les cellules et les modules photovoltaïques 2 ème Partie.
- [9] Petit Guide pour étudier un projet d'installation photovoltaïque Dimensionner un parc de batteries Centre de formation Bwa Toma – Acded Marigot - Haïti Pierre Teisseire\* Novembre 2003.
- [10] A.MIRICKI « Étude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat de l'université national de polytechnique de Toulouse France, 2005.
- [11] O.Gregoud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.
- [12] [www.memalgeria.org/fr/enr/energie](http://www.memalgeria.org/fr/enr/energie) 20%.solaire/press\_20-villages.htm
- [13] A. Oi, Design and simulation of photovoltaic water puming system, thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [14] Salas, V., Olias, E., Barrado, A., and Lazaro, A. (2006). “ Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems”. Solar Energy Materials and Solar Cells, 90(11) :1555– 1578.

## Référence

---

- [15] D. and Ropp, M. (2003). “Comparative study of maximum power point tracking algorithms. Progress in photovoltaics” : Research and Applications, 11(1) :47–62.
- [16] Brambilla, A., Gambarara, M., Garutti, A., and Ronchi, F. (1999). “New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking”. In Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE, volume 2, pages 632–637. IEEE.
- [17] François B. Et Michel V. « Les réseaux de neurones artificiels », Press Universitaire, Paris, 1996.
- [18] Institut de Mécanique céleste de calcul des éphémérides, caractéristiques du soleil, lien : <http://www.imcce.fr/langues/fr/grandpublic/systeme/promenade/page1/134.html>
- [19] Hamida Chohraoui & Ratiba Hadbi, modélisation et simulation d’un système PV connecté au réseau, mémoire de master 14 juin 2016.
- [20] Chebana Abdelkrim, control d’un système PV connecté au réseau, mémoire de master 03 juin 2014.
- [21] Dris Mida, thèse de doctorat 10/04/2019 contribution à la Modélisation d’un Système de Production d’Energie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque ».
- [22] Salim ABOUDA, Contribution à la Commande des systèmes PV , Application aux systèmes de pompage, 14/04/2015.
- [23] M<sup>elle</sup> SALI Sara & M<sup>elle</sup> OUKLI Aldjia, Commande non linéaire d’un système de pompage photovoltaïque.
- [24] dl.Ummto.dz
- [25] Les-energies-renouvelables.eu
- [26] NYAMIEN Yao Thomas Modélisation et optimisation des systèmes hybrides PV/DIESEL, Validation Experimentale par le pilote « FLEXY ENERGY », 15 juin 2010.
- [26] Gisement solaire, Installation PV raccordée au réseau compétence électrique version janvier 2011.
- [27] C.Larbes, S.M , Aït Chheikh\* ;T.Obeidi,A.Zerguerras. Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system. Renewable Energy 34 (2009) 2093-2100.
- [28] A.Aziz , K.Kassmi, F.Olivier, G.Sarrabayrouse, A.Martinez « Analyse dans l’environnement Orcad-Pspice l’adaptation DC-DC des systèmes PV par des convertisseurs

## Référence

---

Boost fonctionnant à haute fréquence » rapport LAAS/CNRS N 05267,19P Toulouse-France,juin 2005.

[29]Amélioration le rendement d'un système PV autonome par la commande MPPT neuronale.

[30] R.Plipmann,An introduction to computing with neural network, IEEE ASSP Magazine, April 1987.