



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de maintenance en instrumentation**

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** *Génie Industrielle*

**Spécialité:** *Génie Industrielle*

**Thème**

# Commande avancée d'un système photovoltaïque connecté à un réseau électrique

Présentée soutenu publiquement par:

MESSABIH SIHAM  
CHAHTOU KARIMA

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement
Aoumeur Amina	MAA	Examineur
Arbi Maachia	MCB	Président
Haimour Rachida	MAA	Encadreur

# Commande Avancé d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

## Résumé

Au cours de ces dernières décennies, l'apport des énergies renouvelable à l'approvisionnement mondial d'électricité montre tout leur capacité tant du côté écologique que la structure qui est elle-même décentralisé. Dans ce mémoire nous avons présenté les généralités sur un système photovoltaïque étude et simulation ensuite nous avons inséré le convertisseur continu continu pour élever le niveau de tension et améliorer le fonctionnement du panneau PV en poursuivant le point de fonctionnement à puissance maximale, Les résultats de simulation nous ont permis de visualiser le fonctionnement des différents composants du système, ainsi mettre en valeur les avantages de chaque élément.

## Mots clés

Energies renouvelable, générateur photovoltaïque (PV), Poursuite du point de puissance maximum (MPPT), Perturbation et Observation (PO), MPPT Incrémentale, facteur de puissance unitaire, réseau électrique.

---

## Abstract

Over the last decades, the contribution of renewable energies to the global electricity supply shows all their capacity both on the ecological side and the structure which is itself decentralized. In this work we presented the generalities on a photovoltaic system study and simulation then we inserted to the DC-DC converter to raise the voltage level and improve the PV panel operation by tracking the operating point at maximum power,. The simulation résulte allowed us to visualize the functioning of the various components of the system, thus highlighting the advantages of each element.

## Keywords

Renewable Energy, Photovoltaic Generator (PV), Maximum Power Point tracking (MPPT), Incremental MPPT, Unit Power Factor.

---

## Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie industriel de la Institut de maintenance et de sécurité industrielle d'Oran.

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le Courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à Mm. R. Haimour professeur à IMSI notre encadrant. Notre reconnaissance pour sa disponibilité, son soutien, pour ses réponses à nos questions durant nos recherches qui nous ont permis une progression concrète de ce projet.

Nos remerciements à tous les membres des jurys qui ont accepté de juger ce travail, maître de conférence à IMSI.

Nos remerciements aux enseignants du département de génie industriel de la Institut de maintenance et de sécurité industrielle d'Oran sans oublier tous ceux qui ont pu nous aider dans la réalisation de ce travail, les amis et les collègues pour leur présence à nos côtés tout au long de cette étude.

---

## Dédicaces 1

Je dédie ce modeste travail réalisé grâce à l'aide de dieu tous puissant

- ✓ A ma mère, ma raison de réussite, c'est ma mère et ma sœur, ma vie, tu m'as beaucoup aidé à atteindre ce niveau, merci maman
- ✓ A mon père, mon soutien, ma force, ma confiance ma vie ; qui m'a donnée toujours le courage, merci papa

« Je vous aime mes parentes »

- ✓ A mes chères frères ; Rachid, Tayeb, Abdelrahmen, Mohamed, Djamel, que j'aime de tout mon cœur
- ✓ A mes sœurs ; Aïcha, Narimene, Amel pour leurs encouragement
- ✓ A mon tout la famille, mes grandes parentes et mes tantes et mes oncles
- ✓ Mon amie Loubna qui m'a soutenu pour terminer mes études
- ✓ A ma chérie amie et Binôme Karima
- ✓ A toute les amies

---

## Dédicaces 2

Je dédie ce modeste travail réalisé grâce à l'aide de dieu tous puissant  
A mes salutation et la récolte de ce que j'ai semé pendant de nombreuse années pour  
le savoir a mon père décédé (que Dieu ait pitié de lui).

A ma très chère mère qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais  
cesse de prier pour moi.

A mon frère : Bouzid.

Ames sœur : Zeneb, Noura, Amina, Fatiha, Alya, Djamila.

Aux poussins de chez nous : Hiba, Fatima.

A mes amis : Nesrine, Houda, Loubna, Meriem.

En fin je remercie mon binôme Siham contribué à la réalisation

## TABLE DES MATIERES

Remerciements	I
Dédicaces1	II
Dédicaces2	III
TABLE DES MATIERES	VIII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES ABREVIATIONS	XII
INTRODUCTION GENERAL	1

### CHAPITRE I : L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE ET RESEAU ELECTRIQUE

I.1 - Introduction	2
I.2 - Historique et état actuel	2
I.3 - Evolution des énergies renouvelables	8
I.3.1-Énergie solaire	8
I.3.2-Les chiffres du soleil	9
I.4-Le rayonnement solaire et sa caractérisation	9
I.4.1-Spectre du rayonnement	9
I.4.2-Types de rayonnement	10
• Rayonnement direct	10
• Rayonnement diffus	10
• Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo	10
I.4.3-Domainses d'utilisation du rayonnement	10
I.5-La situation de l'énergie photovoltaïque en Algérie	11
I. 6-Les Systèmes Photovoltaïques	12
I.6.1-Avantages et inconvenants de l'énergie photovoltaïque	12
_ Avantage	12
_ Inconvénients	12
I.6.2-Système photovoltaïque autonome	13
I.6.3-Système photovoltaïque raccordé au réseau	13

<b>I.7</b>	<b>Principe d'une cellule photovoltaïque</b>	14
<b>I.7.A</b>	<b>Cellule photovoltaïque</b>	15
<b>I.7.A.1</b>	<b>Bref historique de l'évolution de la cellule PV</b>	15
<b>I.7.A.2</b>	<b>Principe de fonctionnement d'une cellule PV</b>	15
<b>I.8</b>	<b>Types de Cellules PV</b>	16
<b>I.8.1</b>	<b>La Cellule à silicium monocristalline</b>	17
<b>I.8.2</b>	<b>La Cellule à silicium poly-cristallin</b>	17
<b>I.8.3</b>	<b>La Cellule à silicium amorphe</b>	18
<b>I.9</b>	<b>Qualité d'énergie électrique</b>	18
<b>I.9-1</b>	<b>Problématique des harmoniques</b>	18
<b>I.9-2</b>	<b>Origine des harmoniques</b>	18
<b>I.10</b>	<b>Types des harmoniques</b>	19
<b>I.10.1</b>	<b>Infra-harmoniques</b>	19
<b>I.10.2</b>	<b>Inter-harmoniques</b>	19
<b>I.11</b>	<b>Caractérisations des harmoniques</b>	20
<b>I.11.1</b>	<b>La distorsion harmonique totale (THD)</b>	20
<b>I.11.2</b>	<b>Le facteur de distorsion</b>	20
<b>I.11.3</b>	<b>Facteur de crête</b>	21
<b>I.10.4</b>	<b>Facteur de Puissance</b>	21
<b>I.12</b>	<b>Causes de la production des harmoniques</b>	22
<b>I.13</b>	<b>Effets indésirables de la pollution harmonique</b>	22
<b>I.14</b>	<b>Réduction de la pollution harmonique</b>	22
<b>I.14.1</b>	<b>Filtres passifs de puissance</b>	23
<b>I.14.2</b>	<b>Avantages des filtres passifs</b>	24
<b>I.14.3</b>	<b>Inconvénients des filtres passifs</b>	24
<b>I.14.4</b>	<b>Filtres actifs de puissance</b>	25
<b>I.15</b>	<b>Classification des filtres actifs de puissance</b>	25
<b>I.15.1</b>	<b>Avantages des filtres actifs</b>	25
<b>I.15.2</b>	<b>Inconvénients des filtres actifs</b>	25
<b>I.16</b>	<b>Comparaison entre un filtre actif et passif</b>	25
<b>I.17</b>	<b>conclusion.</b>	27

## CHAPITRE II: LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

II.1-Introduction	28
II. 2-Connexion direct entre la source et la charge	28
II.3- Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque	29
II.4- Rendements de la Chanie de Puissance	29
II.5-Principe de fonctionnement de MPPT	30
II.6-Gestation de la MPPT	31
II.7-Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max	33
II.7.a- Les methods indirectes	33
II.7.a.1- La method de la tension de circuit ouvert du générateur	33
II.7.a.2 -La method de court-circuit	33
II.7.b- Les methods directs	33
II.7.b.1- La methode perturbed & Observe (P&O)	33
II.7.b.2- La method incrimination de la conductance	35
II.7.b.3- Method à contre reaction de la tension	37
II.7.b.4- Method contre reaction de courants	37
II.8- Conclusion	38

## CHAPITER III: MODELISATION DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

III.1-introduction	39
III .2- CALCUL DE ( $I_{ph}$ )	39
III.3- CALCUL DE LA RESISTANCE SERIE DANS LE POINT( $V_{co}$ )	40
III .4- PUISSANCE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ( $P$ )	41
III.5-PUISSANCE MAXIMALE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE( $P_{max}$ )- 42	
III.6-conclusion	43



## CHAPITRE VIII : SIMULATION

<b>VIII .1-introduction</b>	44
<b>VIII.2-Matlab (MATrix LABoratory)</b>	44
<b>VII.2.1-Intérêts</b>	44
<b>VIII .2.2-Inconvénients</b>	44
<b>VII.3-sumilation</b>	45
<b>VIII.4-conclusion</b>	49
<b>Conclusion general</b>	50
<b>Bibliographies</b>	56

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1.</b> <i>Incendie de la flotte romaine</i>	3
<b>Figure I.2.</b> <i>Miroir ardent</i>	3
<b>Figure I.3.</b> <i>Four solaire</i>	4
<b>Figure I.4.</b> Coupe transversale d'une "boîte chaude" avec thermomètre	4
<b>Figure I.5.</b> <i>Plans et Photos de la centrale thermique de Média</i>	5
<b>Figure I.6.</b> <i>Four de Montlouis</i>	6
<b>Figure I.7.</b> Première voiture solaire	7
<b>Figure (II.1):</b> Connexion directs entre un GPV et une charge	28
<b>Figure (II.2):</b> Etage d'adaptation d'un GPV-charge	28
<b>Figure (II.3):</b> Chaîne élémentaire de conversion d'énergie PV	29
<b>Figure (II.4):</b> La caractéristique I-V, P-V et la trajectories PPM	30
<b>Figure (II.5):</b> Chain élémentaire de conversion photovoltaïque	31
<b>Figure (II.6):</b> Recherché errecoup	32
<b>Figure (II.7):</b> Schema de converge veers le PPM par P&	34
<b>Figure (II.8):</b> Algorithme de MPPT à base de la methoP&O	35
<b>Figure (II.9):</b> Trajectories par Incrimination de Conductance	36
<b>Figure (II.10):</b> Algorithme d'incrimination de laconductance	37
<b>Figure (II.11):</b> Methode contre reaction de la tension	37
<b>Figure (II.12):</b> Method contre reaction de courants	38
<b>Figure (III .1).</b> <i>Puissance maximale idéale pratique</i>	42

## LISTE DES ABREVIATIONS

### Systeme photovoltaïque

I<sub>Ph</sub>: Photo-courant [A]

I<sub>D</sub>: Courant à travers la diode [A]

I<sub>cell</sub>: Courant fourni par la cellule [A]

I<sub>ch</sub>: Courant à travers la charge [A]

R<sub>p</sub> : Résistance parallèle de la cellule [  $\square\square$  ]

R<sub>s</sub> : Résistance série de la cellule [  $\square\square$  ]

R<sub>ch</sub> : Résistance de la charge [  $\square\square$  ]

V<sub>ch</sub>: Tension aux bornes de la charge [V]

V<sub>cell</sub>: Tension aux bornes de la cellule [V ]

q: Charge électrique élémentaire [q=6021764e-19C]

k: Constante de Boltzmann [K = 1,3806503e-23 J/K]

T : Température absolue de la cellule [K]

I<sub>s</sub>: Courant de saturation de la jonction non éclairée [A]

V<sub>oc</sub>: Tension du circuit ouvert [V]

I<sub>sc</sub> : Courant de court-circuit [A]

$\eta$  : Facteur d'idéalité de la jonction

I : Courant de cellule.

V : Tension de cellule.

T : Température de la cellule [°K]

I<sub>0</sub>: Courant de saturation [A]

I<sub>pv</sub> : Courant du module photovoltaïque [A]

V<sub>pv</sub> : Courant du module photovoltaïque [A]

N<sub>p</sub>:Nombre de modules en parallèles

N<sub>s</sub> : Nombre de modules en séries

E : Irradiation [w/m<sup>2</sup> ]

h : Constante de Planck

$\lambda$  : Longueur d'onde



# **Introduction général**

### INTRODUCTION GENERALE

Dans l'optique de réduire les gaz à effet de serre dans l'atmosphère, les gouvernements du monde entier à l'exception de USA et de Chine ont signés un accord international ; le protocole de Kyoto visant à réduire des émissions de gaz à effet de serre et qui vient s'ajouter à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques dont les pays participants se rencontrent une fois par an depuis 1995. Cette pollution de l'atmosphère provient de la consommation des énergies fossiles. Pour remédier à cette situation de pollution, d'autres formes d'énergie dit renouvelables sont envisageable.

L'énergie est dite renouvelable si le stocke de la ressource se reconstitue par des mécanismes naturels aussi vite ou plus vite à l'échelle de vie humaine qu'il ne disparaisse par son exploitation. Les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle : rayonnement solaire, vents, cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, flux de chaleur interne de la terre, effet solaire sur les océans. Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jours après jours des développements considérables.

L'énergie solaire est considérée depuis longtemps comme l'origine des majorités d'énergies .L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible nommés cellules PV. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques. La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qui sont des dispositifs qui transforment l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge.

# **Chapitre I : L'énergie photovoltaïque et réseau électrique**

## I.1 INTRODUCTION

Le soleil est une source d'énergie quasi inépuisable. Il génère du rayonnement et de la chaleur et est considéré comme le principal responsable de la création de toutes les autres énergies sur terre en l'occurrence les énergies dites renouvelables : l'énergie éolienne, l'énergie de biomasse, l'énergie thermique, l'énergie chimique, l'énergie cinétique, l'énergie thermique et même l'énergie électrique. Cette dernière est obtenue par la conversion du rayonnement solaire en électricité grâce à l'énergie des photons. Ce processus est la capacité d'un matériau à délivrer une quantité d'électricité quand il est exposé au soleil. C'est la photovoltaïque. Il a été découvert en 1839 par le physicien Français Antoine Becquerel. Cette découverte a connu une évolution et a été améliorée au fur des années. En 1954, la première cellule solaire au silicium cristallin a été fabriquée aux États-Unis par la société Bell Téléphone Laboratoires, avec un rendement de 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. En 1958 le satellite américain Vanguard I a été lancé, équipé de six panneaux recouverts de cellules au silicium ayant un rendement moyen de 6%. Depuis, les modules PV, choisis pour minimiser le rapport poids/puissance électrique délivrée, équipent tous les satellites. C'est au début des années 1980 que le PV et les autres énergies renouvelables vont connaître leur premier essor "terrestre" avant le redémarrage observé au cours des années 1990. Les applications spatiales ont donc permis initialement un apprentissage et une maîtrise graduelle, mais relativement rapide, de l'utilisation des cellules PV au silicium cristallin[1]. Dès lors, son utilisation ne cesse d'augmenter et prend des proportions mondiales. Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est utilisée pour l'alimentation des sites isolés. Par ailleurs des fermes entières de l'ordre de Mégawatt sont installées dans le monde en vue de baisser l'émission de gaz dans l'atmosphère due aux énergies fossiles. Elles sont soit autonome, soit reliées au réseau électrique principale. Ce chapitre portera sur la description du système photovoltaïque, son principe de fonctionnement, ses composantes et caractéristiques.

## I.2- HISTORIQUE ET ETAT ACTUEL

L'utilisation de l'énergie solaire est un fait très ancien. L'énergie solaire est à l'origine de la vie sur Terre : les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leur matière organique. Le but de cette sous-partie est de montrer que l'évolution des techniques d'exploitation de l'énergie solaire s'est faite en plusieurs phases.

Dans l'ère de *l'antiquité*, les Grecs et les Romains savaient utiliser l'énergie solaire. Pour allumer la flamme des jeux olympiques, ils utilisaient une sorte de miroir parabolique primitif, le skaphia, car pour eux seuls les rayons du Soleil étaient assez purs pour allumer cette flamme.

Le philosophe grec Socrate a enseigné l'architecture bioclimatique en expliquant que les maisons orientées au sud bénéficiaient de la chaleur du Soleil en hiver, tandis qu'en été, le soleil se retrouvait quasiment au-dessus des toits laissant les maisons dans une extrême fraîcheur.

On raconte qu'Archimède réussit à enflammer des bateaux de la flotte romaine qui assiégeait Syracuse en, grâce à de nombreux miroirs géants en bronze polis tous orientés sur le même point du navire. Mais ce fait a fait débat au cours des siècles, certains savants jugeant en effet cette histoire improbable.





*Figure I.1. Incendie de la flotte romaine*

Aujourd'hui on est pourtant presque sûr que cette histoire est un mythe, si l'on en croit l'expérience réalisée par des étudiants du MIT (Massachusetts Institute of Technology) qui ont réitéré l'expérience d'Archimède en **2005** et on réussit à enflammer en 10 minutes et à 30 mètres une reconstitution de bateau romain, qui cependant était sèche et immobile, ce qui a facilité l'enflamment.

Cependant, *au XVIIIème siècle*, le Siècle des Lumières voit renaître l'intérêt pour le Soleil et les premières études et expériences sur son énergie.



*Figure I.2. Miroir ardent*

En **1747**, le botaniste Buffon met au point une machine capable d'enflammer des planches en bois à 48 mètres. Cet engin est composé de 168 petits miroirs plans de 16 centimètres de largeur sur 22 de hauteur qui réfléchissent les rayons du soleil en un point unique permettant une élévation de la température.



Figure I.3. Four solaire

Ainsi, il parvient à enflammer du bois à une distance de 65 mètres, et de faire fondre de l'étain à 49 mètres, du plomb à 42 mètres, et de l'argent à 20 mètres. Le célèbre chimiste français **Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)** invente en **1774** un très puissant four solaire dans le but de faire fondre des métaux sans que ceux-ci soient pollués par les produits des combustibles.

Pour cela il utilise deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du Soleil, et qui lui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C.

Le suisse **Horace Bénédicte de Saussure (1740 ; 1799)** invente en **1767** le tout premier four solaire qu'il appelle "boîte chaude" qui lui permet de démontrer l'effet de serre. Il obtient une température de 160°C.

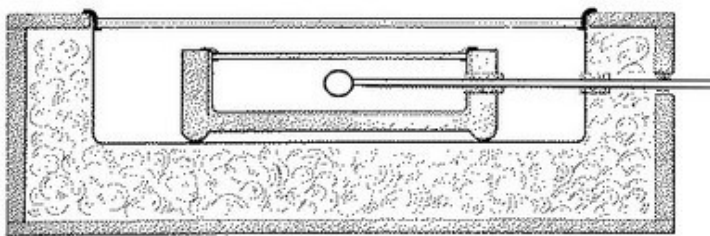


Figure I.4. Coupe transversale d'une "boîte chaude" avec thermomètre

Par contre, le **XIX<sup>ème</sup> siècle** est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique. En **1839**, le physicien **Alexandre Edmond Becquerel** découvre par hasard l'effet photovoltaïque : En plaçant deux électrodes métalliques dans un liquide conducteur et en exposant l'ensemble au rayonnement solaire, on peut mesurer une faible tension. Ce fut donc la première fois que l'énergie solaire fut transformée en énergie électrique.

\*/ En **1872**, l'ingénieur suédois **Charles Wilson** construit un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m<sup>2</sup>, ce distillateur produisit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à un prix minime.

\*/ En **1875**, l'industriel allemand **Werner Von Siemens** décrit le principe d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le principe photovoltaïque devant l'Académie des

## L'énergie photovoltaïque et réseau électrique

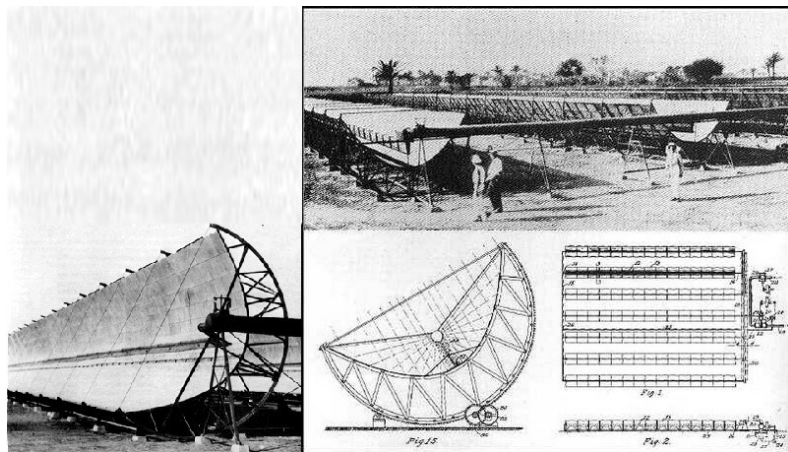
Sciences de Berlin. Le professeur français **Augustin Mouchot** inventa le principe de poursuite du Soleil avec un capteur à concentration. En **1873**, grâce à une subvention du conseil général de Tours il construit une machine de 4m<sup>2</sup>qu'il présente en **1875** à l'Académie des Sciences.

\*/ En **1877**, c'est une subvention du conseil général d'Alger qui lui permet de construire un nouveau capteur de 20m<sup>2</sup> couplé à une machine à vapeur qu'il expose lors de l'Exposition Universelle de Paris en**1878**. L'engin, d'une puissance d'un demi-cheval (368 W), permet d'imprimer le journal de l'Exposition Le Soleil à raison de 500 exemplaires/heure. La machine eut un grand succès et fut primée. **Augustin Mouchet** avait déjà deviné que les énergies fossiles que les occidentales commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il préconisait et étudiait l'énergie solaire qui selon lui était déjà l'énergie du futur. C'est ce qu'il écrivait dans le livre qu'il publiait en **1869**, La Chaleur Solaire et ses Applications Industrielles.

\*/ En**1883** : La première cellule en sélénium fut construite par l'américain **Charles Fritts** ( $\eta=1\%$ ) : Dans les années **1880**, l'américain **Charles FRITTS** mit au point les premières cellules solaires au sélénium. Les investigations sur le silicium, les tentatives pour l'isoler, le purifier, mettre en œuvre ses propriétés physiques, commencèrent avant**1910**.

A partir du **XXème siècle**, une nouvelle voie de l'exploitation de l'énergie solaire s'ouvre alors. Il faudra attendre **1900** pour qu'**Einstein** explique cet effet et en **1910** pour qu'il soit mis en évidence par **Robert Andrew Millikan**. En **1904** : Albert Einstein (**1879-1975**) expliqua cet effet et reçut le prix Nobel en **1921** : **Einstein** en expliqua les mécanismes en **1912**, mais ce n'est qu'entre **1930** et **1945** qu'un premier procédé industriel de purification par refroidissement progressif du silicium fondu fut mis au point.

Après **1900**, toutes les technologies découvertes au siècle précédant sont améliorées. De nouvelles découvertes sont faites et dès **1970** le solaire connaît un vif regain d'intérêt. Les premières centrales solaires sont construites, et les premières applications individuelles apparaissent.



**Figure 1.5.** Plans et Photos de la centrale thermique de Média en 1913 (Egypte)

Le physicien anglais **Charles Vernon Boys** (**1855 ; 1944**) est l'inventeur du capteur cylindre-parabolique. Son invention servit pour la première fois en Egypte, à Mead, où on construisit en **1912** une centrale thermique qui fonctionnait sur le principe de **Boys**, permettant d'irriguer une grande surface de cultures. Cette centrale était composée de 5 réflecteurs de 60 mètres de long pour une ouverture de 4 mètres qui couplés à une pompe permirent de pomper plus de

2000 litres d'eau par minute à partir de 1913, irriguant 200 hectares de champs de coton. Des installations similaires à celle-ci furent prévues dans le Soudan anglais et dans les colonies africaines de l'empire Allemand, mais ces centrales restèrent à l'état de projet à cause du début de la seconde guerre mondiale.

A partir de **1920**, aux Etats-Unis, des particuliers installent chez eux des chauffe-eaux solaires, et des « Crystal House », maisons chauffées uniquement grâce à l'apport énergétique du Soleil, sont construites.

Le français Félix Trombe (**1906 ; 1985**) invente le premier four solaire à concentration : en **1944**, lors de leur fuite, les allemands abandonnent un projecteur de DCA. Ces projecteurs très puissants qui permettaient de repérer les avions ennemis dans le ciel nocturne sont des miroirs paraboliques orientables au foyer duquel on plaçait une puissante ampoule ce qui donnait un faisceau de lumière parallèle.

**Trombe** décide d'utiliser de réutiliser le projecteur abandonné à l'envers et de jour. Le projecteur est placé de telle manière que les rayons du soleil sont concentrés au foyer du miroir. Quand on place une bûche de bois au niveau du foyer celle-ci s'enflamme instantanément. Il est le directeur de la construction d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50 kW à Montlouis dans les Pyrénées-Orientales. Puis il dirige celle du four solaire d'Odeillo d'une puissance de 1000 kW. C'est le plus puissant four solaire du monde. Il est utilisé par l'industrie.



**Figure I.6.** Four de Montlouis

L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années **1950** lors des premiers lancements spatiaux de satellites ;

Il faut attendre **1954** pour voir la création de la toute première cellule photovoltaïque au silicium. Elle est mise au point par les américains **Gerald Pearson, Daryl Chapin** et **Calvin Fuller**, des laboratoires de la Bell Téléphone.

\*/ En**1954** : Trois chercheurs américains, **Chapin, Pearson** et **Prince**, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites

\*/ Toujours en **1954**, des chercheurs des laboratoires américains **Bell, Darryl Chapin** et **Carl Fuller**, annoncèrent au public que des cellules solaires à base de silicium avaient été obtenues avec un rendement de 6%. Bien que ces scientifiques arrivèrent par la suite à fabriquer en laboratoire des cellules à 15% de rendement, ils rencontrèrent des obstacles économiques et



### L'énergie photovoltaïque et réseau électrique

les laboratoires et abandonnèrent leurs efforts de recherche pour diminuer les coûts de fabrication **Boukli-Hacen**.

Mais la technologie mise au point est hors de prix : non seulement elle a un faible rendement mais en plus elle nécessite l'utilisation du silicium très cher à l'époque. Il faut attendre **1958** et l'invention d'une cellule d'un rendement de 8% pour son premier emploi par l'industrie aérospatiale.

\*/ En **1958**, le premier satellite équipé de cellules photovoltaïques, est donc lancé : 1ère utilisation photovoltaïque dans un satellite artificiel américain **Vanguard 1** ( $\eta=9\%$  et 0,1 W) ;

\*/ En **1963** : Première application terrestre dans un phare au Japon (242 W) ;

\*/ Les crises économiques des années **1970** (La flambée des prix du pétrole, **1973**), en **1973** : 1<sup>ère</sup> maison photovoltaïque 'Solar One' fût construite à l'université de Delaware aux USA : La première maison alimentée en électricité par des cellules photovoltaïque ;

\*/ L'utilisation des cellules solaires débute dans le domaine spatial. Les recherches ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique de **1973** pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

\*/ Puis le choc pétrolier de **1980** donne un grand élan aux technologies solaires devenant d'un coup moins cher. De nombreux projets de centrales thermiques solaires apparaissent dans le monde, comme la centrale Thémis en France dont la construction s'étale **1980** à **1982**.



Figure I.7. Première voiture solaire

\*/ En **1983** : En Australie, La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4.000 km, Indépendamment du pétrole, de nombreux petits appareils portatifs sont équipés de cellule photovoltaïque comme des calculatrices ou des montres.

Mais avec le contre-choc pétrolier de **1986**, de nombreux projets sont arrêtés et en France la centrale Thémis est fermée.

\*/ En **1992** : 1<sup>ère</sup> installation Photovoltaïque reliée au réseau électrique en France (900 W) ;

\*/ En **2015** : Plus de 200 GWc de panneaux solaires installés dans le monde.

Aujourd'hui, dans un contexte avéré de réchauffement climatique et de flambée des prix des énergies fossiles, l'énergie solaire est de nouveau propulsée sur le devant de la scène.

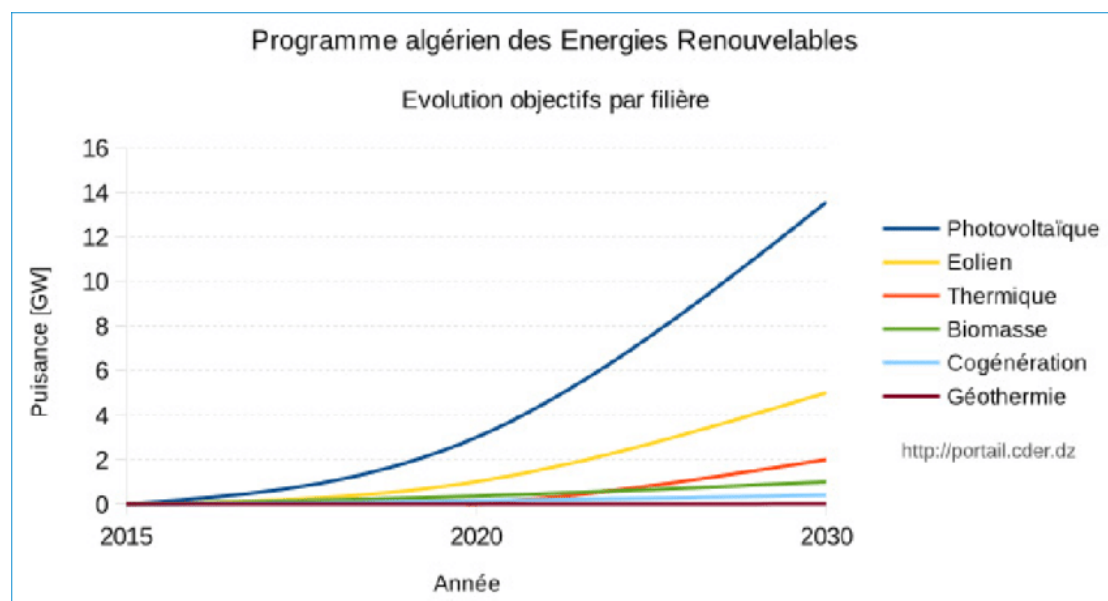
L'exploitation du solaire par l'homme s'est donc déroulée en 3 phases:

- La découverte (Antiquité), et redécouverte (XVIIIème siècle);
- L'expérimentation (XVIIIème et XIXème siècles);
- Le développement à grande échelle des moyens d'exploitation (XIXème et XXème siècles).

Et elle n'est pas un fait récent, contrairement à ce que nous avons souvent tendance à le penser. [Z]BENYAGOUB/KHIRI

### I.3\_EVOLUTION DES ENERGIES RENOUVELABLES :

Evolution des énergies renouvelables à l'horizon 2030. L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22.000 MW à l'horizon 2030 ou 12.000MW pour le marché national, ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10.000MW. A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïques et éoliennes en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique. 37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable. Le volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m<sup>3</sup>, soit un volume équivalent à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014. [3]. Le potentiel national en énergie renouvelable étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.



#### I.3.1\_Énergie solaire :

### L'énergie photovoltaïque et réseau électrique

Le soleil est une étoile jeune du système solaire qui a mis 100 Millions

D'année à se former. A l'intérieur du soleil se forme de l'hélium (He) à partir

D'une réaction de fusion nucléaire massive d'hydrogène. Cette réaction dégage

De l'énergie sous deux (2) forme ; l'rayonnement et la chaleur (ou thermique).

L'énergie solaire est transformée à d'autres formes d'énergie comme : énergie

Chimique, énergie cinétique, énergie thermique, énergie de biomasse et énergie

Électrique. Cette dernière est obtenue par la conversion du rayonnement solaire en électricité.

Ce processus est la capacité d'un matériau à délivrer une quantité

D'électricité quand il est exposé au soleil. C'est l'émet photoélectrique. Il a été

Découvert en 1839 par un physicien Français du nom d'Antoine Becquerel.

#### I.3.2\_ LES CHIFFRES DU SOLEIL :

- ✓ Distance Terre-Soleil : environ 150 millions de kilomètres
- ✓ Diamètre : environ 1,4 million de kilomètres (Terre = 12 700 km)
- ✓ Masse : environ  $2 \cdot 10^{30}$  kg (Terre =  $6 \cdot 10^{24}$  kg)
- ✓ Masse volumique : 1,41 g/cm<sup>3</sup> (eau = 1 g/cm<sup>3</sup>, Terre = 5,5 g/cm<sup>3</sup>)
- ✓ Puissance rayonnée par le Soleil :  $4 \cdot 10^{23}$  kW
- ✓ Energie solaire reçue par la Terre : 1353 J/m<sup>2</sup>/s
- ✓ Température au centre du Soleil : environ 14 millions de Kelvins (0 K = -273,15 °C)  
Température de la surface du Soleil : environ 5 800 K

#### I.4\_ LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET SA CARACTERISATION

L'un des phénomènes les plus importants pour le transfert d'énergie dans l'atmosphère est le rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique se propage sous forme d'onde à une vitesse d'environ 300 000 km/s (la vitesse de la lumière). Ces rayons traversent l'atmosphère terrestre puis arrivent jusqu'à la surface de la Terre. Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire, il peut aussi être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée quantum d'énergie et notée  $\Delta E$ . Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets (5%) à l'infrarouge (55%) en passant par le visible (40%) ou il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 Watts/m<sup>2</sup>.

##### I .4.1\_ SPECTRE DU RAYONNEMENT :

L'un des phénomènes les plus importants pour le transfert d'énergie dans l'atmosphère est le rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique se propage sous forme d'onde. Toutes les ondes électromagnétiques se propagent à la même vitesse dans le vide, soit

$2,99793 \times 10^8$  m/s, et en une vitesse proche mais moins rapide dans l'air. La lumière visible avec les rayons gamma, rayons x, ultraviolet, infrarouge, micro-ondes, et radio forment le spectre électromagnétique. La longueur d'onde et la fréquence du spectre sont montrées dans la figure (I.1).

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante :

$$E=hc/\lambda$$

$h=6.62 \times 10^{-34} \text{JS}^{-1}$  : la constante de Planck.

$c=3 \times 10^8 \text{mS}^{-1}$  : étant la vitesse de propagation.

La longueur d'onde.

**I.4.2\_TYPES DE RAYONNEMENT** : Généralement on constate 4 types :

**\_RAYONNEMENT DIRECT** : c'est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Le pyrhéliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct.

**\_RAYONNEMENT DIFFUS** : il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre.

**\_RAYONNEMENT SOLAIRE REFLECHI OU L'ALBEDO** : c'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé et. Il peut être mesuré par un Albédo mètre.

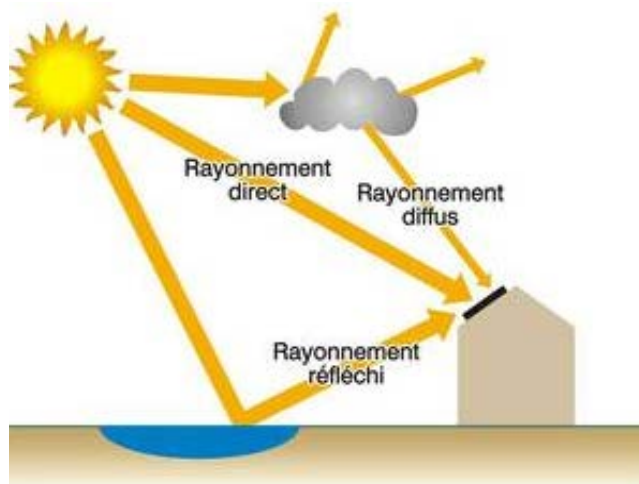
*Rayonnement global* : Il représente la somme de tous les rayonnements reçus (direct+diffus+albédo). Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre.

**I.4.3\_DOMAINES D'UTILISATION DU RAYONNEMENT** :

Le rayonnement solaire disponible au sol est un élément clé dans de nombreux domaines qu'on peut tenter de regrouper de la manière suivante :

- Production d'électricité par la voie photovoltaïque ou solaire thermique (décision d'investissement, management du réseau d'électricité, ...)
- Agriculture et énergie de la biomasse (prévision et surveillance de la croissance de la culture et de la biomasse)
- Prévisions météorologiques et climatiques (GCOS, 2010)
- Environnement (photochimie de l'air dans les villes)
- santé humaine (prévention des cancers de la peau, ...)
- vieillissement et résistance des matériaux (polymères, peintures, caoutchouc, ...)
- architecture et habitat (économies d'énergie, confort lumineux, ...)



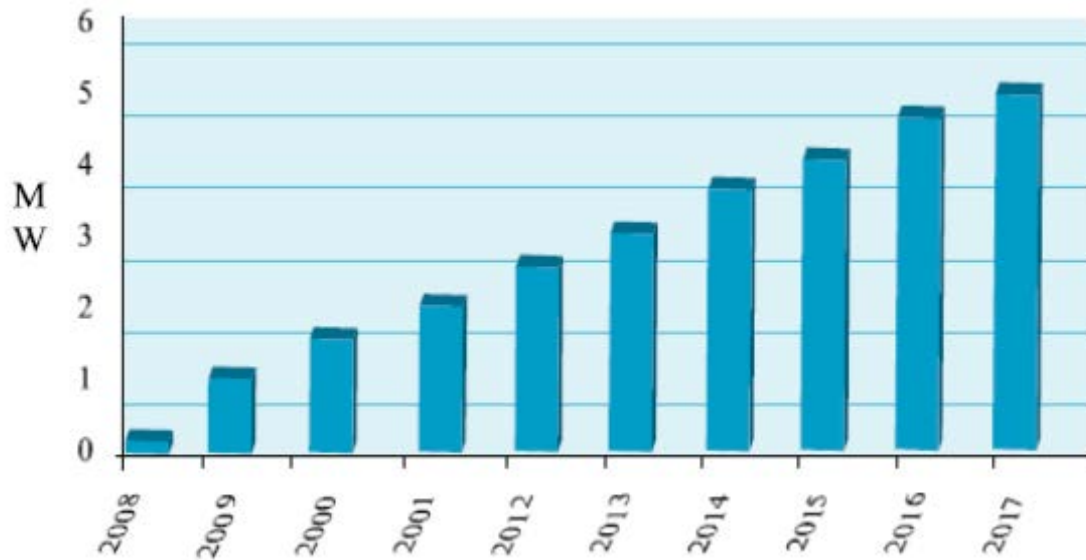


### I.5-LA SITUATION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE EN ALGERIE :

L'Algérie est en et l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au Monde avec une durée d'ensoleillement de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/M2, soit l'équivalent de 10 fois la Consommation mondiale.

La révision du programme national sur l'énergie porte essentiellement sur le développement du photovoltaïque à grande échelle. Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation des projets pilotes et des tests sur les déférentes technologies disponibles. Le programme national de développement des énergies renouvelables et de la capacité d'énergétique vise la mise en service d'une capacité de production d'origine renouvelable de 22000 MW à l'horizon2030, dont plus de 2500MW seront injectés dans le réseau d'ici 2020.

La deuxième phase vient d'être lancée par l'appel d'ores national et international du projet algérien dénommé \_Atlas 1\_, d'une capacité globale de 4.050 mégawatts, réparti en trois lots de 1.350 mégawatts chacun en énergie d'origine solaire de type photovoltaïque. Cela contre la volonté politique de l'état d'investirde plus en plus dans les énergies renouvelables et en particulier énergie photovoltaïque.



#### **I.6 LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES :**

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque dit GPV), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types : autonome et raccordé au réseau.

#### **I.6.1 AVANTAGES ET INCONVENANTS DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE :**

##### **\_AVANTAGE :**

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucrerait pour alimenter la planète entière.

##### **\_INCONVENIENTS :**

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

### I.6.2\_SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME :

Les installations autonomes sont des installations non raccordées au réseau, dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité.

Ces installations sont avantageuses d'un point de vue technique et financier c'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible.

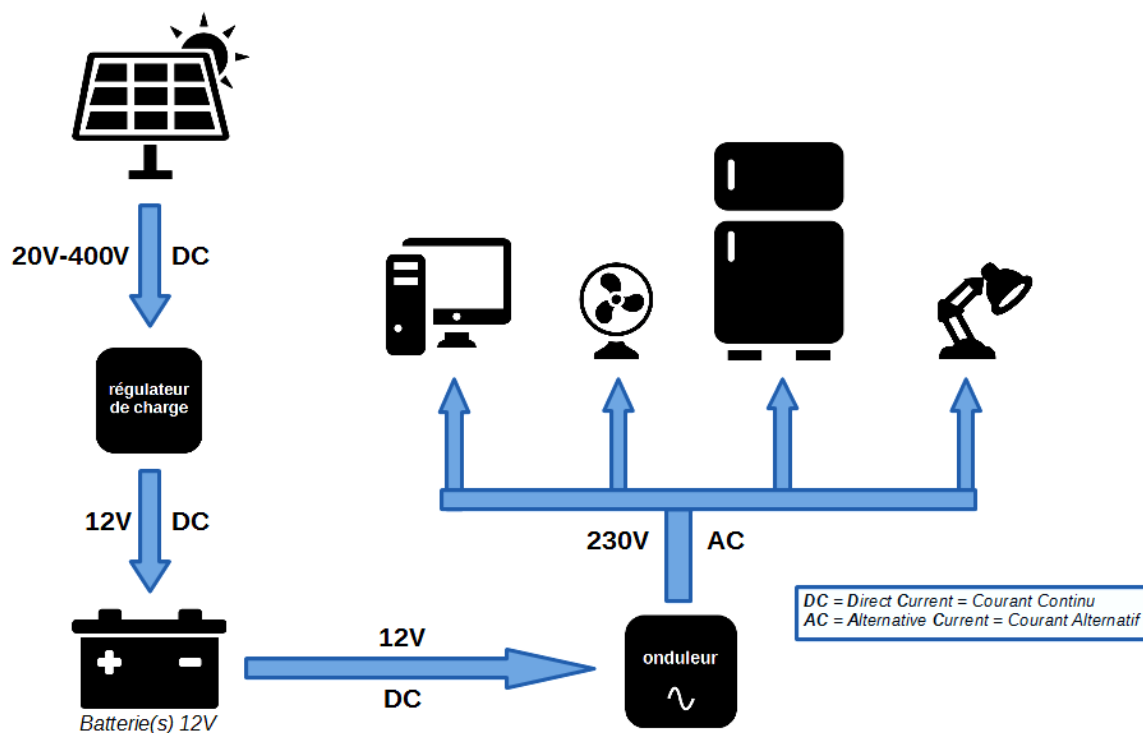
Etant donné que le courant fourni par le générateur PV est du courant DC, si l'installation de l'utilisateur requiert du courant AC, un onduleur est nécessaire.

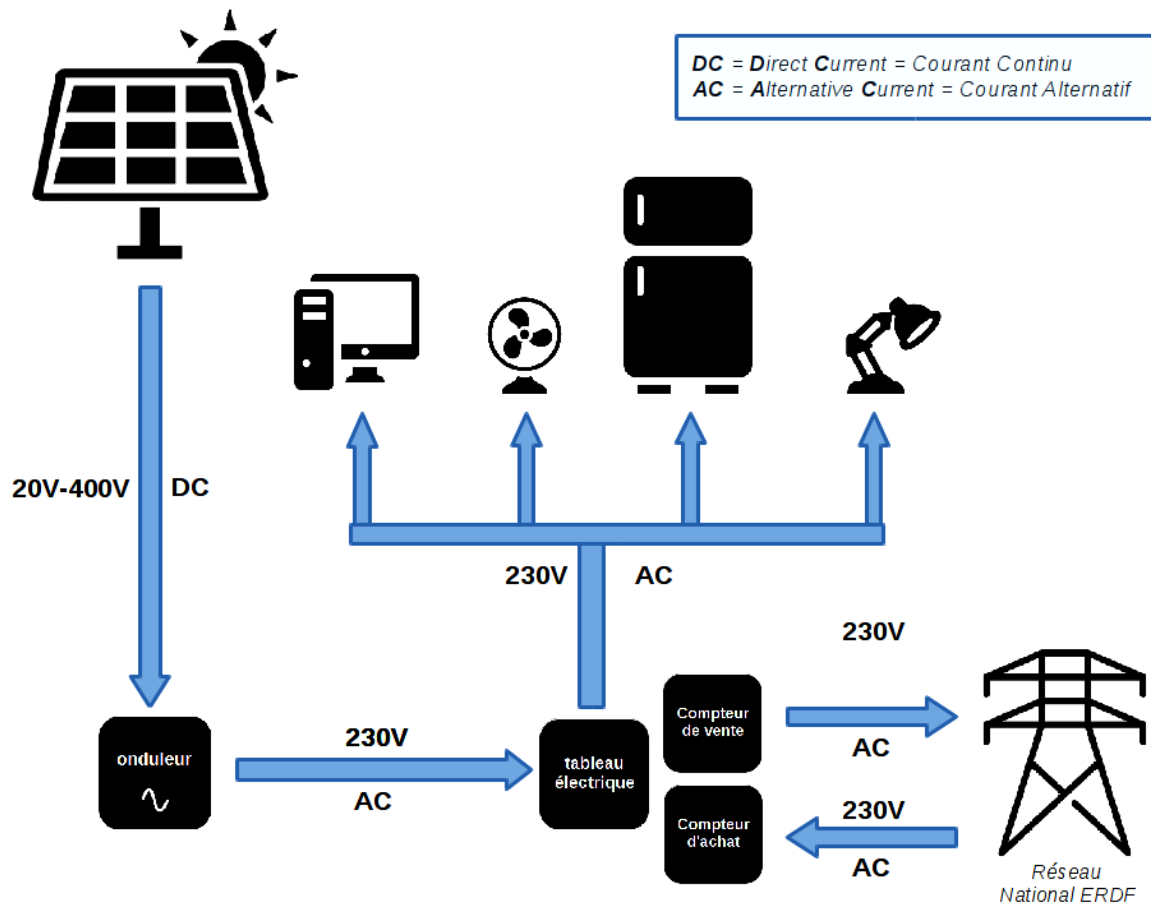
Ces systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.

### I.6.3\_SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE RACCORDE AU RESEAU :

Système raccordé au réseau, ou non autonome, c'est un système qui injecte l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique qui agit par conséquent comme un grand accumulateur, il est couplé donc directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur.

Les systèmes raccordés au réseau n'ont donc pas besoin de batterie d'accumulateur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité





### I.7 PRINCIPE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :

Une cellule photovoltaïque aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Elle utilise le phénomène photoélectrique pour produire de l'électricité, sous forme de courant continu, constitué de semi-conducteurs, principalement à base de silicium.

Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives (dopée au phosphore) et l'autre, les charges positives (dopée au bore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée <sup>222</sup>tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (ICC) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

En résumé le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se déplacer chacun vers une face opposée du matériau photovoltaïque au lieu de se replacer simplement dans la même position qu'avant. Il s'agit en somme de faire déplacer tous ces électrons et ces trous dans une seule et même direction pour créer un courant.

### I.7.A\_CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :

#### I.7.A.1 -BREF HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DE LA CELLULE PV

Le mot photovoltaïque vient du mot grec "photos" qui signifie la lumière et "voltaïque" du physicien italien "Alessandro volta". La conversion du rayonnement solaire en électricité, appelé et photovoltaïque, a été découvert en 1839 par un physicien Français Alexandre Edmond Becquerel. Cette découverte a connu une évolution dans le temps grâce au scientifique comme Heinrich Hertz qui, pour la première fois a utilisé le matériau de silicium. Dès les années 1870 pour étudier l'émet photoélectrique. Le rendement a atteint alors 1%.

En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'et photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Frits, mais le rendement de celle cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation. Cependant, c'est en 1954 que la première cellule solaire au silicium cristallin a été mise au point aux États-Unis par trois chercheurs américains "Gerald Pearson", "Derry chapon" et "Calvin Fuller" de la société Bell TéléphoneLa moratoire, avec un rendement de 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. C'est en 1958, en pleine guerre froide au moment de la guerre pour le contrôle de l'espace (la guerre des étoiles) que les américains ont adoptés l'énergie photovoltaïque pour alimenter leur satellite dont la première est le Vaguer I. le rendement a été amélioré à 6%.

Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les

Industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En émet des reports ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

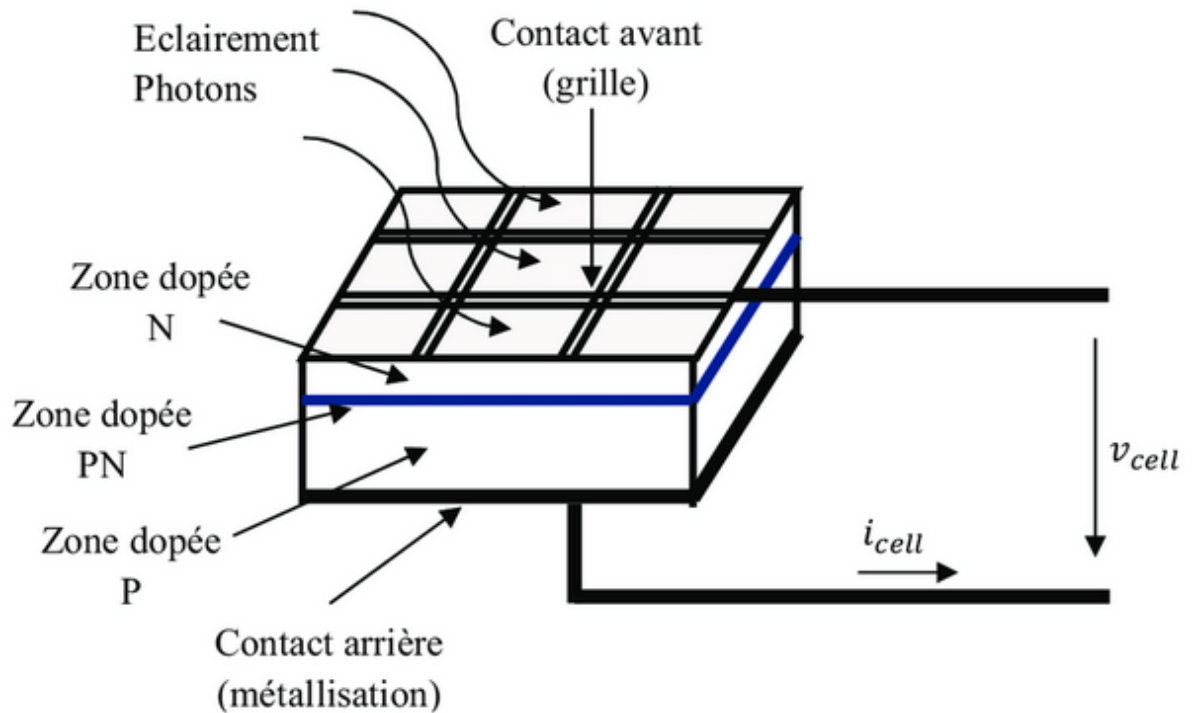
#### I.7.A.2\_Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

Le photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques). Cet photovoltaïque a été découvert pour la Première fois en 1839 par le physicien Alexandre-Edmond Becquerel. Lorsque les photons heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des métaux. Ce courant peut être ajouté à celui provenant d'autres dispositifs semblables de façon à atteindre la puissance désirée pour un usage donné la cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires Photovoltaïques. Dans la majorité des cas, la cellule photovoltaïque est en émet Fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur)

- Une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P). Elle est couverte d'une plaque qui joue le rôle d'anode.

- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N). Elle est couverte d'une plaque qui joue le rôle de cathode.

En mettant en contact ces deux plaques polarisées, on obtient une jonction PN(Positive-négative). Le fait de créer une telle jonction, fait apparaître un champ électrique interne.



$I_{cell}$ : le courant de la cellule.

$V_{cell}$  : la tension de la cellule.

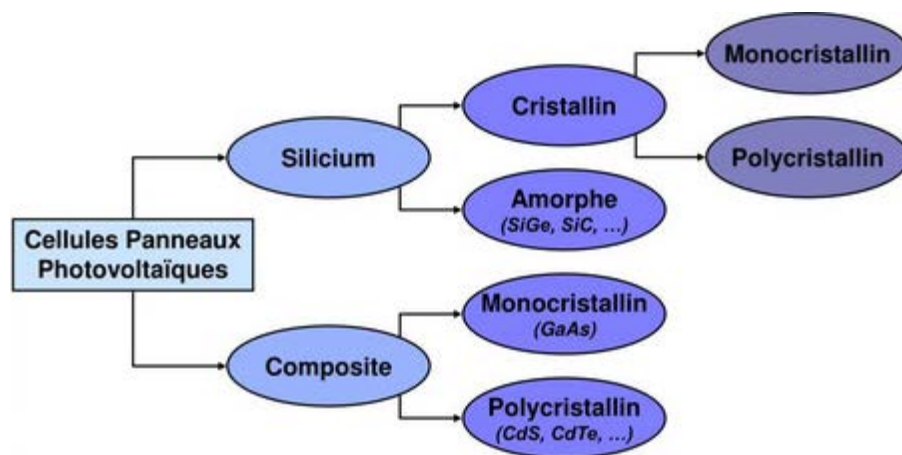
### I.8\_Types de Cellules PV

La réalisation d'une cellule PV se fait à l'aide de nombreux matériaux semi-conducteurs.

En et, trois principales technologies existent sur le marché qui sont essentiellement le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

Toutefois, le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. Ceci est dû au fait que, la silice, aussi appelée dioxyde de silicium ( $SiO_2$ ) est un minéral très présent sur notre planète donc moins chère. Par ailleurs, il est non toxique et représente 25% de la masse de notre croûte terrestre, ce qui en fait l'élément le plus répandu après l'oxygène. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules



Technologie des cellules solaires



### I.8.1\_LA CELLULE A SILICIUM MONOCRISTALLINE :

Ces cellules sont en général de couleur bleu uniforme. Il a le meilleur rendement Parmi tous (compris entre 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire). IlTend à perdre du terrain à cause de son coût de fabrication élevé.



Exemple d'une cellule à silicium monocristalline

### I.8.2\_LA CELLULE A SILICIUM POLY-CRISTALLIN :

C'est la technologie la plus présente sur le marché de la production d'énergie photovoltaïque, leur coût de fabrication est beaucoup moins cher. Cependant, leur rendement est moyen et est compris entre 11% à 15% voir jusqu'à 19.8% en laboratoire.



Exemple d'une cellule à silicium poly-cristalli

#### I.8.3-LA CELLULE A SILICIUM AMORPHE

Leur rendement est faible. Il est compris entre 5% et 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire. Elles ont une couleur grise ou marron Etude électrique de la cellule photovoltaïque

#### I.9-QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tension sinusoïdale. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- La fréquence ;
- L'amplitude ;
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.

La symétrie du système triphasé est caractérisée en fait par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. Ainsi il est possible de distinguer :

- Les alternations de l'onde de tension (harmonique, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes ;
- Les creux de tensions et coupures brèves d'une durée de quelques secondes ;
- Les surtensions transitoires.

Dans ce qui suit, nous nous limiterons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique.

La qualité de l'énergie est l'un des principaux problèmes du système de production et de distribution de l'énergie électrique. Avec l'augmentation de l'utilisation de l'équipement d'électronique de puissance, la qualité de l'énergie subit une dégradation. En raison des caractéristiques non linéaires, ils tendent à produire des harmoniques dans le système [5]. Ces harmoniques provoquent divers problèmes, tels que : La distorsion du courant et de la tension, le mauvais facteur de puissance. Ces harmoniques d'ordre élevé peuvent causer des interférences dans les réseaux de communication voisins. Si ces harmoniques se déplacent sur les lignes de transmission vers la source, ils provoquent des pertes joules excessives dans les lignes, du bruit ou des vibrations.

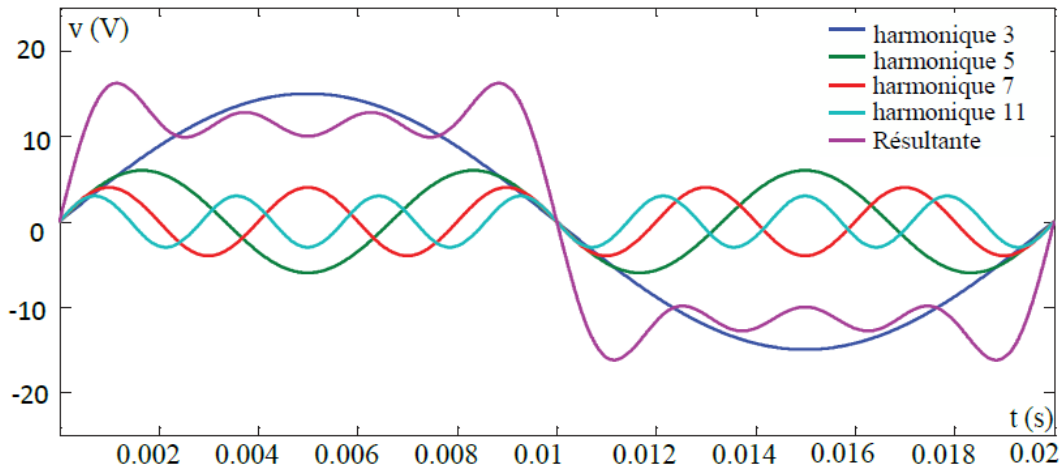
##### I.9.1 Problématique des harmoniques :

Avec l'augmentation des charges non linéaires connectées au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des équipements raccordés au réseau. D'où l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

##### I.9.2 ORIGINE DES HARMONIQUES :

Les harmoniques peuvent être définies comme des composantes sinusoïdales d'une onde périodique ayant des fréquences multiples entières de celle de l'onde fondamentale. Lorsqu'ils sont additionnés, ils donnent lieu à une forme d'onde déformée. Par exemple, la figure I.1 illustre la forme d'onde déformée résultante de l'addition du terme fondamentale de fréquence 50 Hz avec les harmoniques d'ordre impair de degré 3,5,7





**Figure. I.1** : Fondamentale et harmoniques dans un signal distordu

### **I.10\_ TYPES DES HARMONIQUES :**

Les harmoniques se divisent particulièrement par leur ordre ; il existe des harmoniques de type pair ou impair. Les harmoniques d'ordre pair (2, 4, 6, ...) très fréquemment négligeables dans un milieu industriel, ils s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue. Par contre, les harmoniques d'ordre impair (3, 5, 7...) sont souvent rencontrés sur un réseau électrique. Dans les cas où il existe des changements périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs, on remarque qu'il existe d'autres types des composantes harmoniques :

**I.10.1\_INFRA-HARMONIQUES** : Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamentale : 10 Hz, 20 Hz.

**I.10.2\_INTER-HARMONIQUES** : Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle du fondamentale : 130 Hz, 170 Hz, 220 Hz [8].

L'arrangement des inter-harmoniques et des infra-harmoniques est présenté sur la figure I.2 :

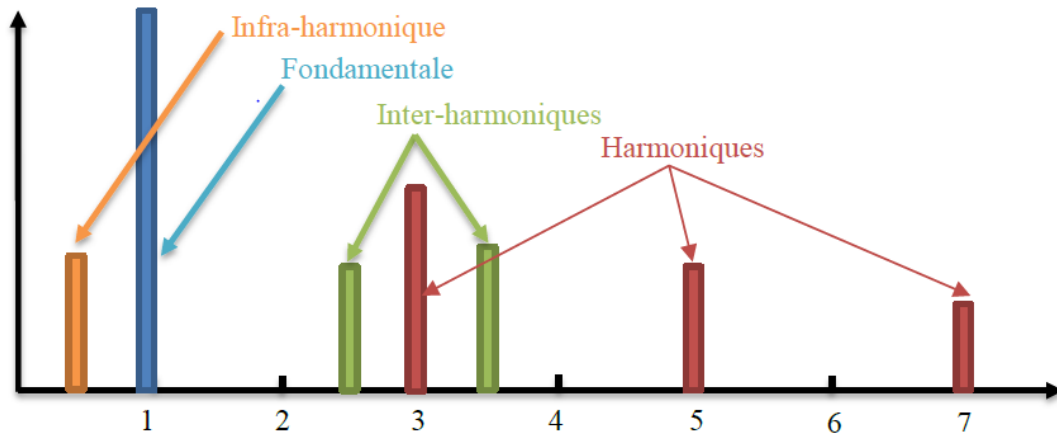


Figure. I.2 : Arrangement d'inter-harmoniques et d'infra-harmoniques

**I.11\_ CARACTERISATIONS DES HARMONIQUES :**

**I.1 1.1\_ LA DISTORSION HARMONIQUE TOTALE (THD) :**

L'impact harmonique est caractérisé par le taux de distorsion harmonique globale (THD). C'est un indice important largement utilisé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Le THD est défini comme la valeur efficace des harmoniques au-dessus de la fondamentale, divisée par la valeur efficace de cette dernière. Le THD est défini pour les signaux de tension et de courant, respectivement, comme suit :

$$THDv(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} * 100 \tag{I.1}$$

$$THDi(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} * 100 \tag{I.2}$$

**I.11.2\_ Le facteur de distorsion :**

Le facteur de distorsion **Fd** est défini comme étant le rapport entre la fondamentale et le signal en valeurs efficaces. Il est donné par l'expression suivant :

$$Fd = \frac{I_1}{I_{eff}} \tag{I.3}$$

Il est alors égal à l'unité lorsque le courant est purement sinusoïdal et diminue lorsque la distorsion apparaît.

**I.11.3 \_FACTEUR DE CRETE :**

Le facteur de crête **FC** d'un signal est défini par ainsi :

$$Fc = \frac{\text{valeur crete}}{\text{valeur efficace}} \quad \text{I.4}$$

Pour les ondes sinusoïdales, le facteur de crête est 1,41. Il peut atteindre la valeur de 5 dans le cas d'ondes fortement déformées.

**I.11.4\_ FACTEUR DE PUISSANCE :**

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active **P** et la puissance apparente **S** :

$$Fp = \frac{P}{S} \quad \text{I.5}$$

$$Fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Les puissances active **P** et réactive **Q** peuvent être données par les relations suivantes

$$P = 3VI \cos \varphi_1 \quad \text{I.7}$$

$$Q = 3VI \sin \varphi_1 \quad \text{I.8}$$

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée puissance déformée **D** apparaît. Cette puissance peut être donnée par la relation :

$$D = V_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} I_{Ln}^2} \quad \text{I.9}$$

D'après l'équation. I.11, on constate que le facteur de puissance est réduit en raison de la présence des harmoniques et de la consommation de puissance réactive.

Le diagramme de Fresnel des puissances est présenté sur la figure I.3 :

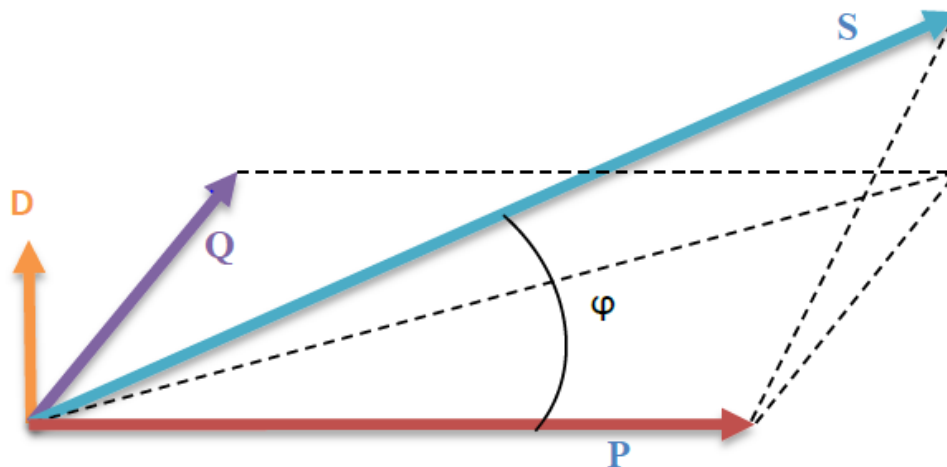


Figure I.3 : Diagramme de Fresnel des puissances

### I.12\_ CAUSES DE LA PRODUCTION DES HARMONIQUES :

La production harmonique est due à l'utilisation d'un grand nombre de charges non linéaires. Les charges non linéaires sont les charges qui n'absorbent pas de courant sinusoïdal même lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale.

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux dans le réseau. Différentes sources génératrices des courants harmoniques peuvent être citées :

Charges commerciales : Alimentations monophasées, éclairage fluorescent, variateurs de vitesse pour HVAC, ascenseurs, etc... ;

Charges industrielles : Variateurs des courants continus et alternatifs ;

Charges domestiques : Systèmes informatiques et autres charges électroniques.

### I.13\_ EFFETS INDESIRABLES DE LA POLLUTION HARMONIQUE :

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques, tel que :

- La surchauffe des transformateurs, moteurs, etc.... ;
- L'augmentation des pertes dans le réseau électrique ;
- Le faux déclenchement des relais de protection ;
- Les vibrations dans les machines tournantes ;
- La dégradation de la qualité de la tension.

### I.1 4\_ REDUCTION DE LA POLLUTION HARMONIQUE

La solution la plus efficace pour améliorer la qualité de l'alimentation est l'utilisation des filtres pour réduire les harmoniques. L'idée de base d'utiliser un filtre est expliquée dans la Figure I.4, où le filtre injecte un courant qui compense les harmoniques du courant de charge.

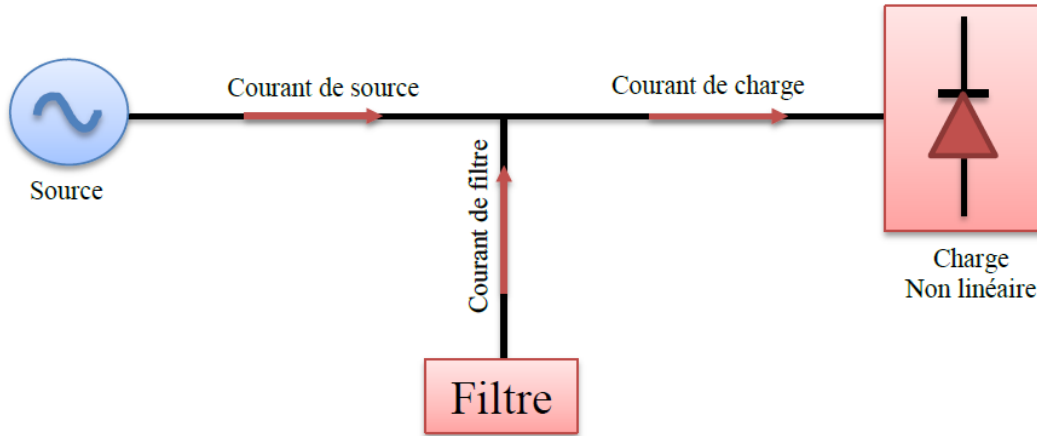


Figure I.4 : Opération de base d'un filtre

Les différents filtres présents dans la littérature sont classés en trois types de base : Filtres actifs, filtres passifs et filtres hybrides. Chaque type à sa propre sous-classification comme le montre la figure I.5 :

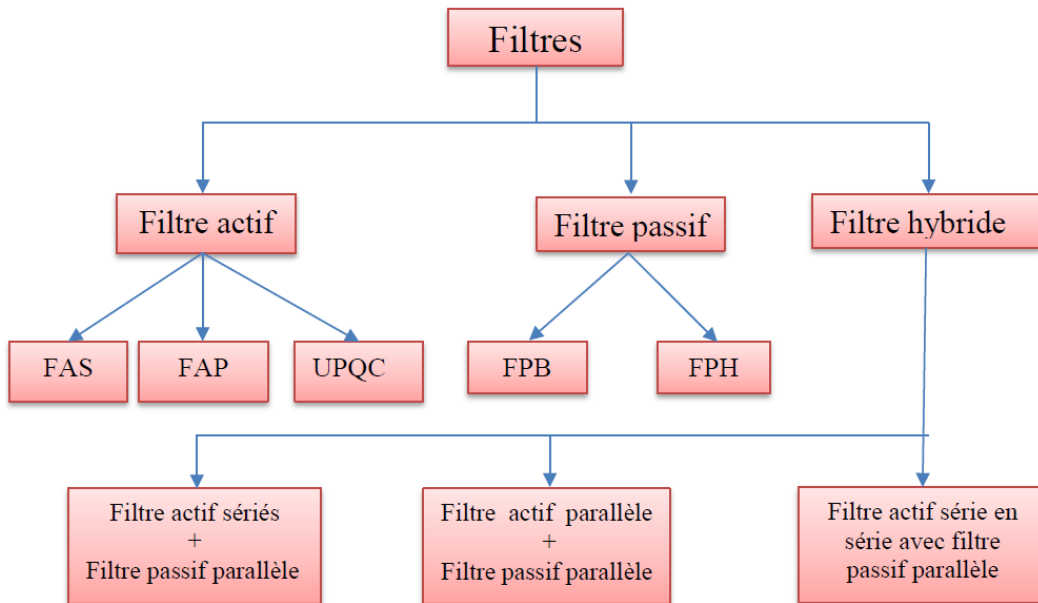


Figure I.5 : Classification des filtres

### I.14.1\_ FILTRES PASSIFS DE PUISSANCE

Les filtres passifs de puissance sont utilisés pour filtrer un ordre particulier des harmoniques, et ont le problème de la résonance parallèle. Ces filtres sont constitués d'éléments passifs tels que les condensateurs, les inductances et les résistances. Ils sont largement utilisés en raison de leur faible coût. Les filtres passifs fournissent également une puissance réactive en dehors du filtrage des harmoniques. La performance de ces filtres dépend fortement de l'impédance

du système. Différents types possibles de filtres passifs destinés à compenser les courants harmoniques sont représentés sur la figure I.6 :

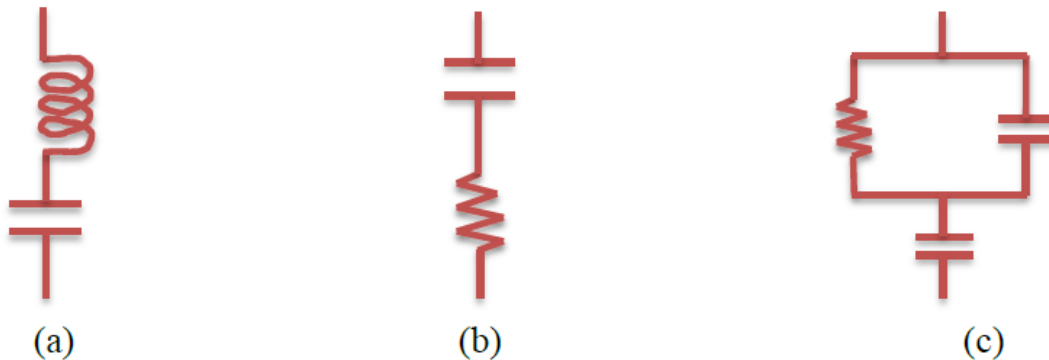


Figure I.6 : Filtre passe bande (a), passe haut 1<sup>er</sup> ordre (b), passe haut 2<sup>eme</sup> ordre

### I.14.2 \_AVANTAGES DES FILTRES PASSIFS

Bien que les filtres passifs n'éliminent pas les harmoniques dans une grande plage, néanmoins, il est utilisé en raison de certaines caractéristiques importantes qui sont décrits comme suit :

- ☒ Ils sont plus simples à configurer et à construire ;
- ☐ Ils possèdent un faible coût initial et de maintenance (par rapport au filtre actif).

### I.14.3\_ INCONVENIENTS DES FILTRES PASSIFS

Certains inconvénients majeurs des filtres passifs sont cités ci-dessous :

- La propriété et les caractéristiques du filtre dépendent de l'impédance de la source qui sont soumises à des variations dues à une condition externe ;
- L'état de résonance dans le filtre peut créer un problème avec les charges et le réseau, entraînant des fluctuations de tension ;
- Il est fondamentalement capable d'enlever certaines composantes harmoniques particulières par le raccordement chaque fois que l'ampleur de cette composante harmonique est constante et le facteur de puissance **PF** du système est faible ;
- La réponse du filtre est statique, c'est-à-dire, si la variation de charge introduit de nouvelles composantes harmoniques, le filtre doit être redessiné, ce qui augmente les coûts de maintenance et d'exploitation du filtre ;
- Les problèmes de déséquilibre de la charge ne peuvent pas être résolus.

En raison des inconvénients cités ci-dessus et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs come les thyristors GTO et les transistors IGBT, une nouvelle structure de filtres, appelée filtre actif de puissance est conçu pour générer des courants ou des tensions

harmoniques de manière à ce que le courant est la tension du réseau soient sinusoïdaux et parfois opérant avec un facteur de puissance unitaire.

#### **I.14.4\_ FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE**

Pour surmonter l'inconvénient du filtre passif, une compensation active connue sous le nom de filtre actif de puissance est utilisée récemment. Le FAP est un onduleur de tension (VSI) qui injecte le courant ou la tension de compensation sur la base de la configuration du réseau.

#### **I.15\_ CLASSIFICATION DES FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE**

Les FAP peuvent être classés en fonction du type du convertisseur, de la topologie et du nombre de phases [10], [11]. Le type de convertisseur est principalement de deux types :

- Onduleur source de tension (VSI) ;
- Onduleur source de courant (CSI).

Les topologies du FAP sont classées en trois types :

- Filtres actifs série (FAS) ;
- Filtres actifs shunt (FAP) ;
- Filtres actifs hybrides (FAH).

Enfin, la disposition selon le nombre de phases du FAP, il existe principalement deux types :

- Système à deux fils (monophasé) ;
- Système triphasé à trois ou quatre fils.

#### **I.15.1\_ AVANTAGES DES FILTRES ACTIFS**

- Un seul filtre peut éliminer tous les harmoniques indésirables ;
- L'état de résonance est absent, augmentant ainsi la stabilité du système de puissance ;
- La flexibilité et l'adaptabilité avec la variation de la charge.

#### **I.15.2\_ INCONVENIENTS DES FILTRES ACTIFS**

- Le coût élevé a limité l'implémentation dans l'industrie ;
- Les pertes sont plus élevées ;
- Amélioration de la forme de la tension n'est pas toujours évidente

#### **I.16\_ COMPARAISON ENTRE UN FILTRE ACTIF ET PASSIF**

Dans le tableau I.1 suivant, on résume une comparaison entre le filtre actif et le filtre passif selon différents critères :

Critère de comparaison	Filtre actif	Filtre passif
Action sur les courants harmoniques	Agit simultanément sur plusieurs fréquences selon sa bande passante	Nécessite un filtre pour chaque harmonique
Interaction entre filtres voisins	Pas de risque	Risque de destruction du filtre accordés à des fréquences voisins (résonances)
Influence d'une variation de fréquence	Aucun risque	Efficacité réduite (le filtre est calculé pour une fréquence exacte)
Surcharge	Pas de risque	Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse ses capacités
Variation de l'impédance du réseau	Aucune conséquence	Risque d'amplification harmonique (déplacement de la fréquence d'antirésonance vers une fréquence harmonique)
Vieillessement	Pas d'influence sur les performances	Risque de dégradation des performances (dérive de la fréquence d'accord)
Raccordement	Pas d'étude préalable	Etude au cas par cas
Surveillance de fonctionnement	Réalisée par le système de contrôle commandé	Pas de surveillance
Influence d'une augmentation de courant	Aucun risque de surcharge.	Risque de surcharge et de détérioration



**L'énergie photovoltaïque et réseau électrique**

	Mais efficacité diminuée	
Rajout d'équipement en aval	Pas de problème (dans la limite de la puissance du filtre)	Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas
Encombrement	Faible	Important
Poids	Faible	Elevé
Coût	Coût des composants plus élevé  Pas de coût d'étude de dimensionnement	Coût des composants plus faible  Etude de dimensionnement obligatoire

**I.17\_ CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les notions de base de la production d'énergie à base de solaire photovoltaïque. Ceci étant dit, la description des cellules PV, leur technologie de fabrication ainsi que leur modèle mathématique ont été effectués. A cela, s'ajoute l'étude des caractéristiques électrique d'un générateur PV en fonction des phénomènes physiques telle que la température, l'éclairement, et électrique telle que la résistance série et la résistance parallèle ou shunt. En n, nous avons présentés les types de structures de systèmes PV et la protection de générateur photovoltaïque.

Dans la suite de notre travail, nous étudierons la modélisation d'un générateur photovoltaïque et l'étage d'adaptation de celle-ci pour une charge continue donnée.

# **CHAPITRE II: LE GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE**

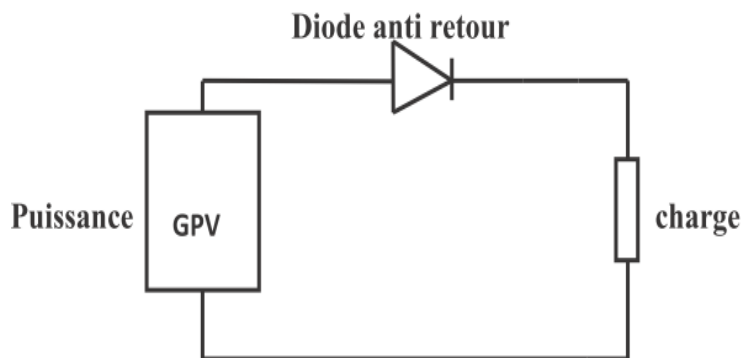
## II.1- INTRODUCTION

Le coût élevé des générateurs photovoltaïques peut justifier l'adjonction d'un appareillage annexe, même sophistiqué, permettant de gérer au mieux l'énergie disponible. En particulier, sur la caractéristique courant-tension du générateur (qui dépend des conditions d'éclairement, de température, de vieillissement) il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale. L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur. Cette adaptation de charge, dont le principe est maintenant classique, s'effectue en général à l'aide d'un convertisseur statique dont les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'une grandeur de sortie (conversion continu-alternatif ou continu-continu avec modification de tension par exemple).

Dans ce chapitre on va étudier les différents techniques de suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, d'abord on verra la problématique de la connexion directe entre le GPV et la charge et en suite nous présentons les différentes méthodes (directes et indirectes) pour optimiser la puissance et on terminera par une conclusion.

## II.2-CONNEXION DIRECTE ENTRE LA SOURCE ET LA CHARGE

Dans le cas d'une connexion directe qui est finalement aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté [19]. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût (II.1)



**Figure (II.1):** Connexion directe entre un GPV et une charge.

L'inconvénient de ce type, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV, comme l'illustre la figure (II.1) un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- Une charge de type source de tension continue,
- Une charge de type source de courant continu,
- Une charge purement résistive.

Comme illustrer précédemment il y trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$ . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale.

### II.3- LE FONCTIONNEMENT OPTIMAL DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

La conception de système PV optimiser est par nature difficile. en effet, coté source ,pour générateur PV , la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement de la température ,mais aussi du vieillissement global du système .coté charge , que ce soit de nature continue (DC) ,ou bien alternative (AC), comme le réseau électrique ,chacune a son comportement propre qui peut être aléatoire .pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimale ,la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique figure (II.2) qui jouera le rôle d'adaptateur source –charge .

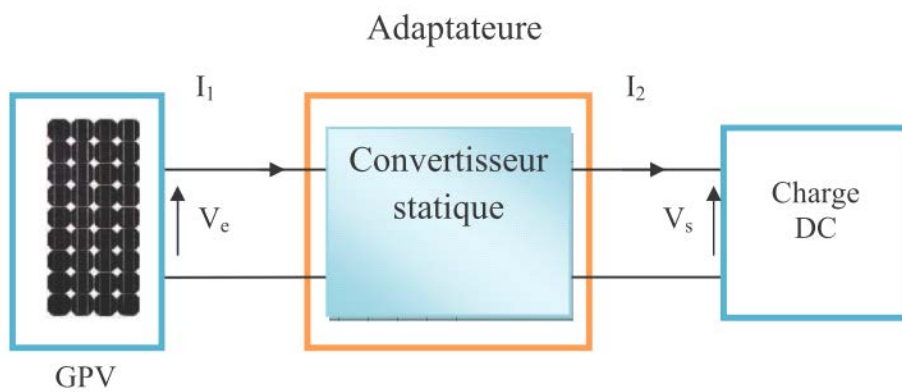


Figure (II.2): Etage d'adaptation d'un GPV-charge

### II.4- Rendements de la Chaîne de Puissance

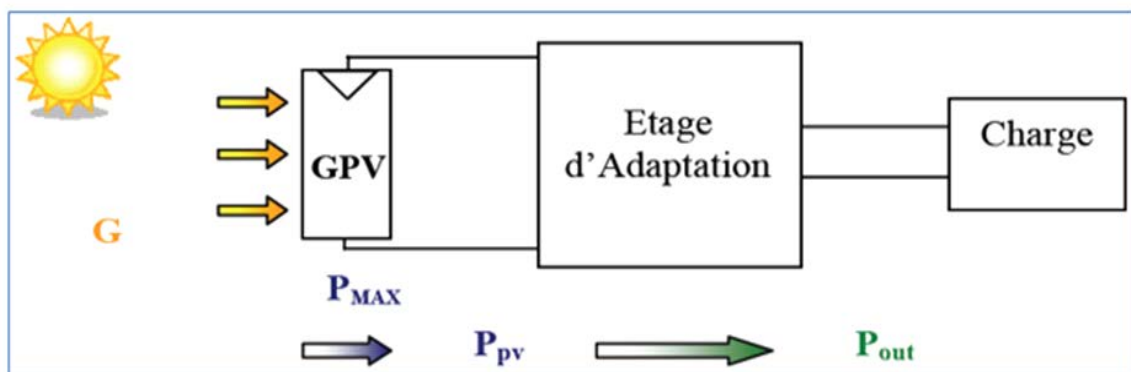


Figure (II.3): Chaîne élémentaire de conversion d'énergie PV

Le rendement total de l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge DC se compose de divers types de rendements reliés à chaque partie de la chaîne. Le

rendement maximum de la conversion photons-electrons du panneau solaire  $\eta_{PV}$

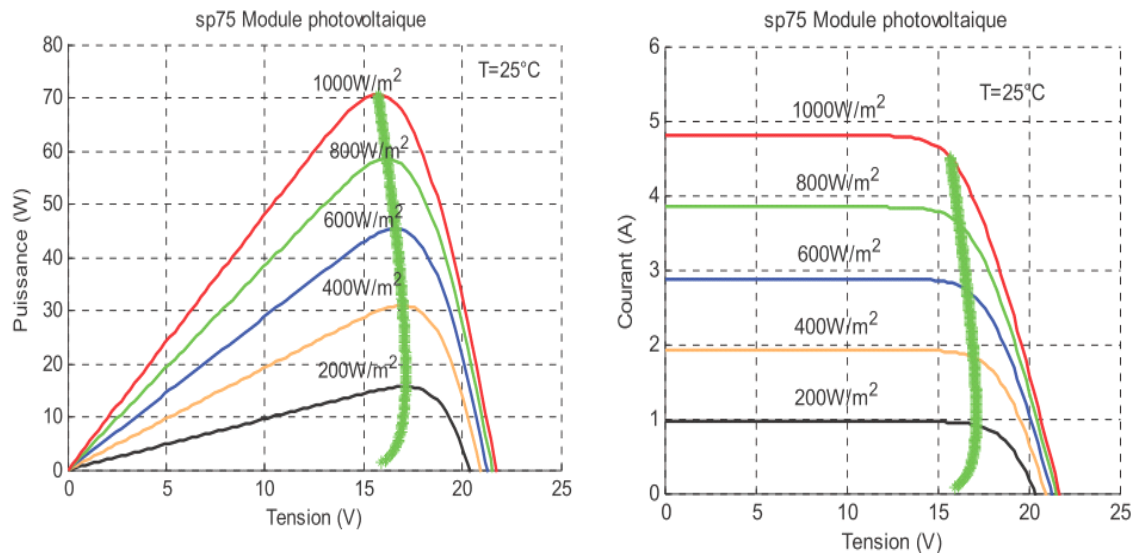
Où  $P_{max}$  est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau,  $G$  est l'irradiante ( $W/m^2$ ) et  $t$  la surface effective du panneau PV.

La puissance  $P$  effectivement délivrée par un GPV dépend en plus de la commande utilisée dans le convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle est noté  $\eta$

MPPT (Rendement MPPT) permet de mesurer l'efficacité de la commande qui contrôle le convertisseur statique afin que le module PV fournisse la puissance maximale. Avec Pout la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

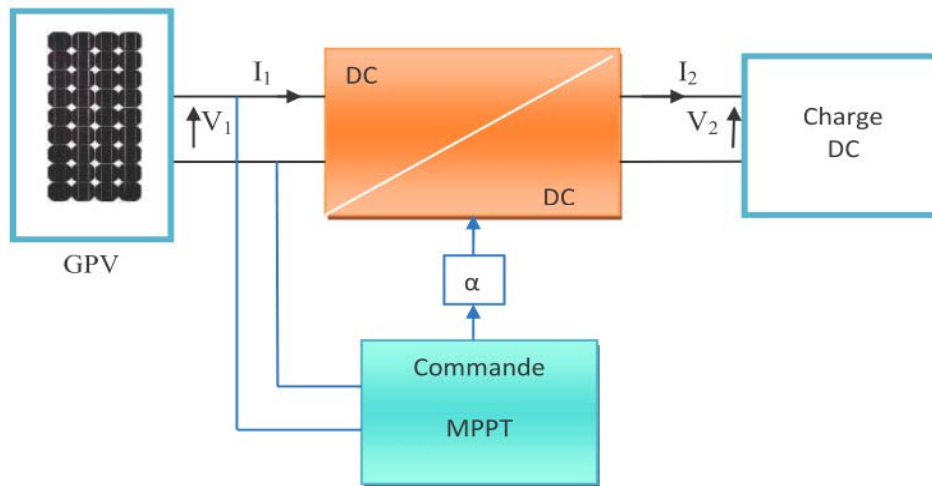
## II.5-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE MPPT

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (II.4) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.



**Figure (II.4) :** La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM

La Figure (II.5) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.



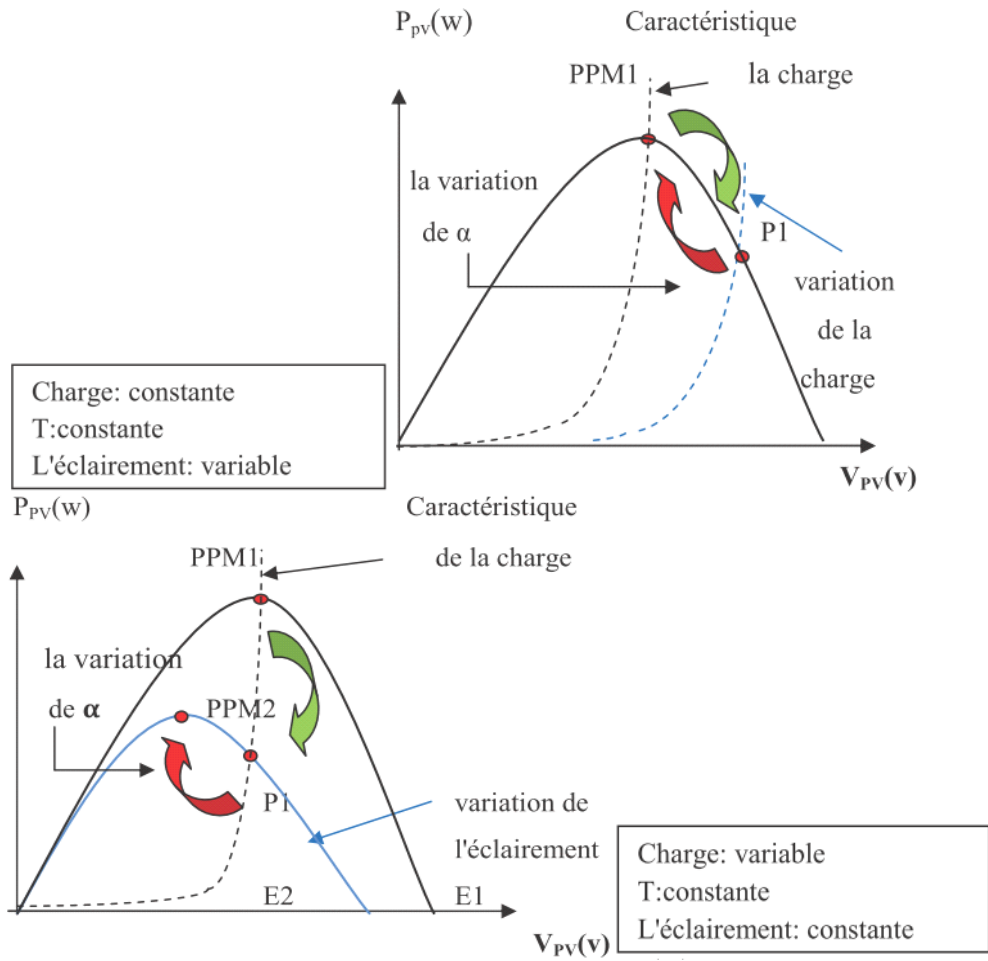
pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM),des contrôleur **Figure (II.5) : Chain élémentaire de conversion photovoltaïque.**

MPPT sont utilisés ,ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques baser sur des méthode optimale (voir la suite).

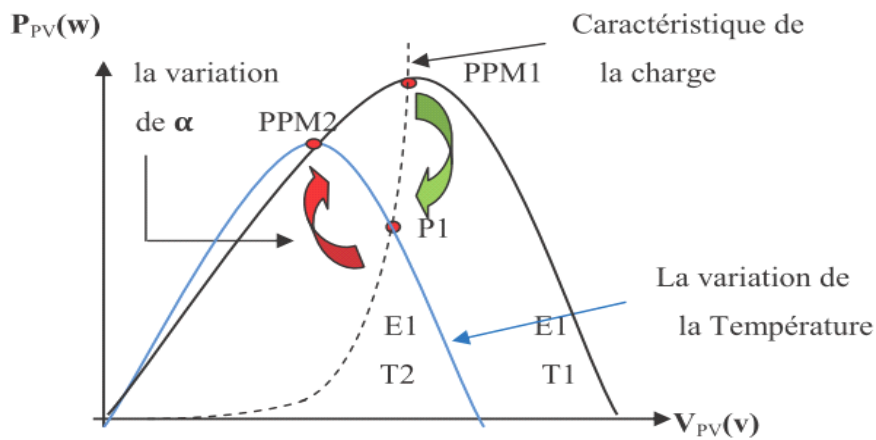
## II.6\_ GESTION DE LA MPPT

La figure (II.6) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande .



Charge: constante  
T: variable  
L'éclairement: constante



(c)

**Figure (II.6):** Recherché et recoup

Rement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

## II.7- CLASSIFICATION DE L'ALGORITHME DE SUIVEUR LA PUISSANCE MAX

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

### II.7.A -LES MÉTHODES INDIRECTES

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser: la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

#### II.7.A.1- LA MÉTHODE DE LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT DU GÉNÉRATEUR:

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert .La constante proportionnelle . dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation (3.1), et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de  $k$  1 Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

#### II.7.A.2\_ LA METHODS DE COURT-CIRCUIT

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre l courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximal.

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

### II.7.B- LES METHODS DIRECTS

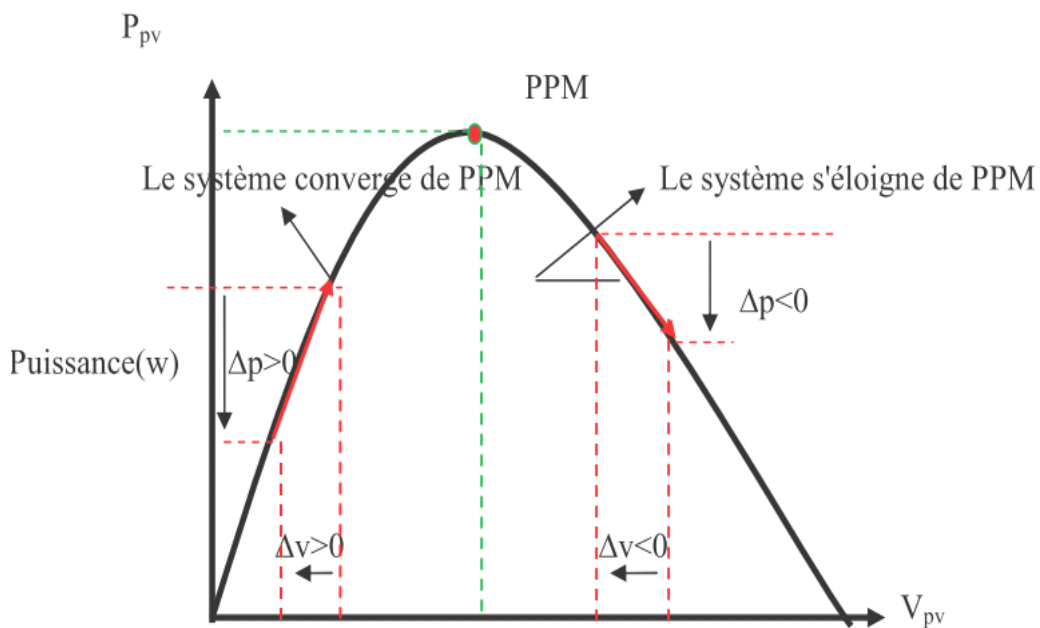
Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces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

#### II.7.b.1- La method Perturb & Observe (P&O)



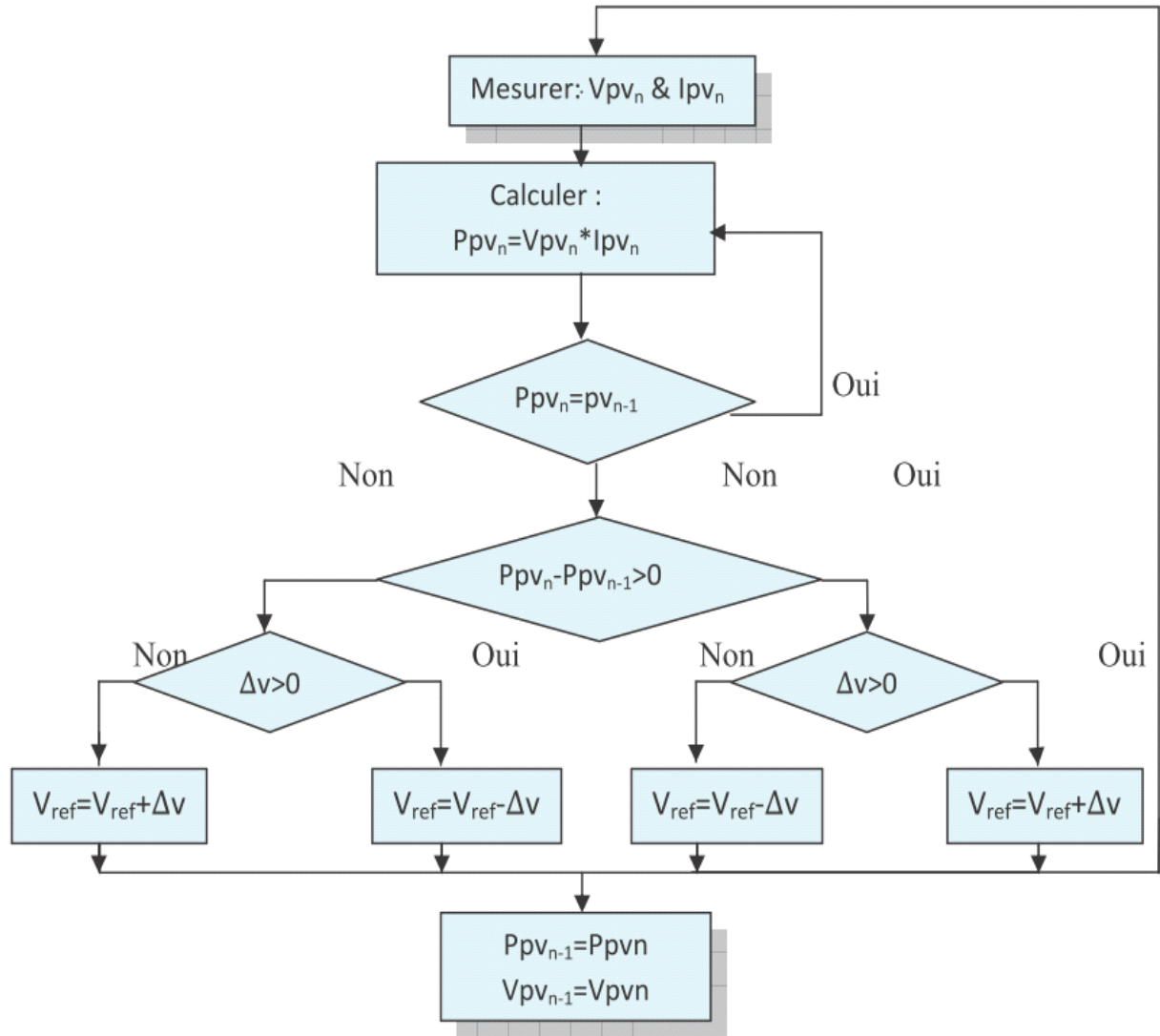
Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (3.7), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique (V), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.



**Figure (II.7):** Schema de convergence vers le PPM par P&O

La figure (II.8) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant



**Figure (II.8):** Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

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

### II.7.B.2- LA MÉTHODE INCRÉMENTATION DE LA CONDUCTANCE

L’avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l’algorithme sera présentée par la suite.

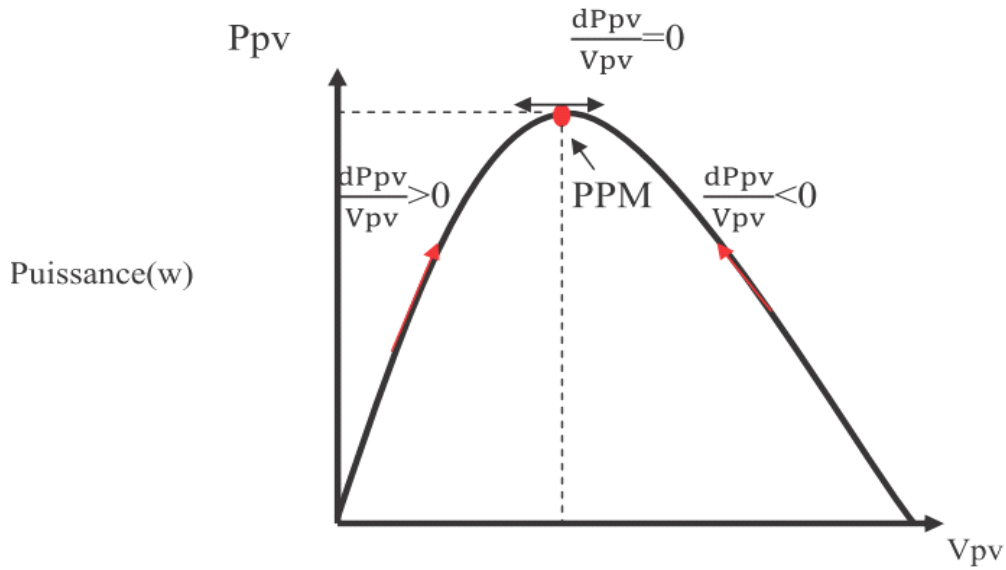
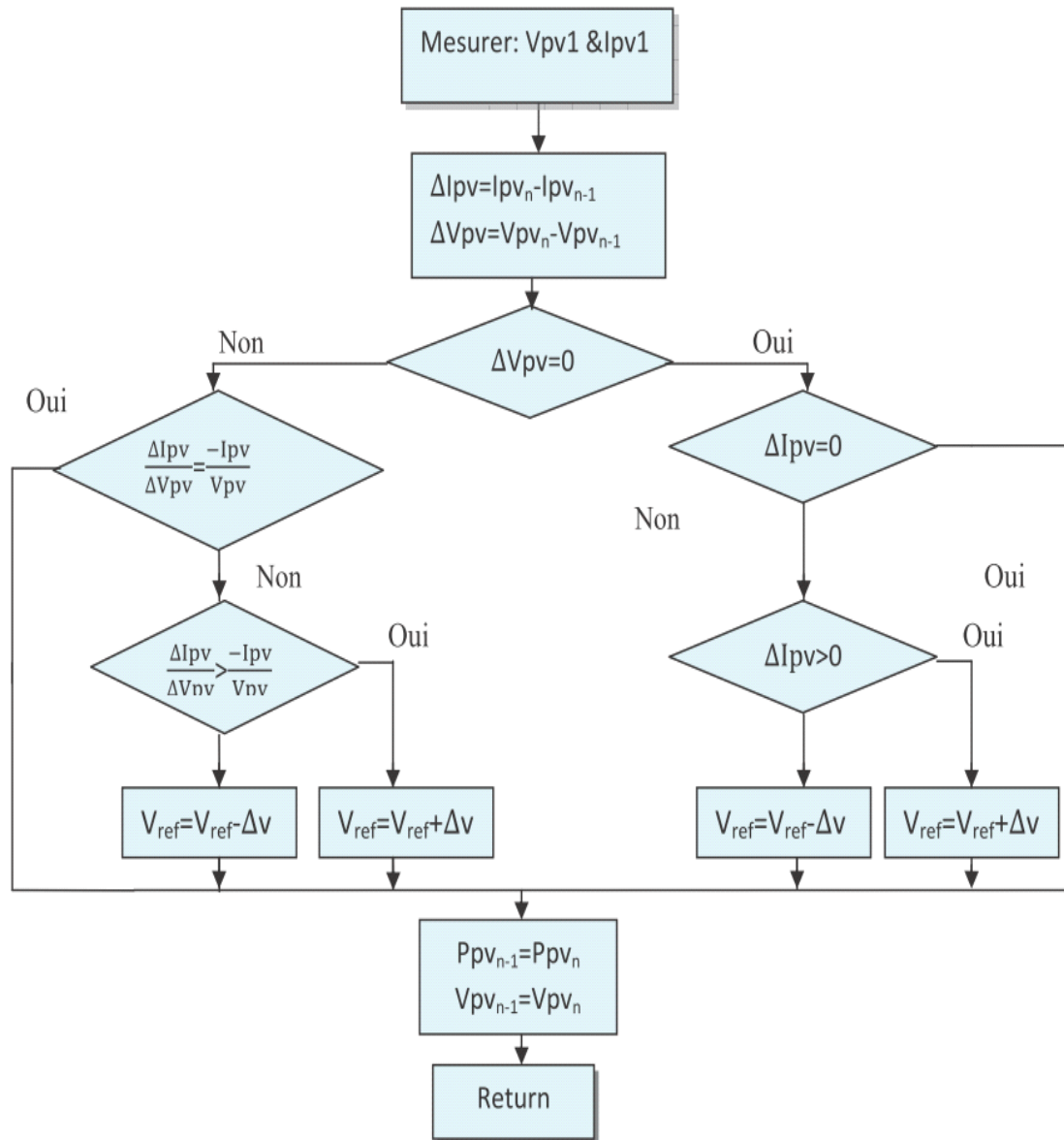


Figure (II.9): Trajectories par Incrimination de Conductance



**Figure (II.10):** Algorithm incrémentation de la conductance  
on peut écrire aussi:

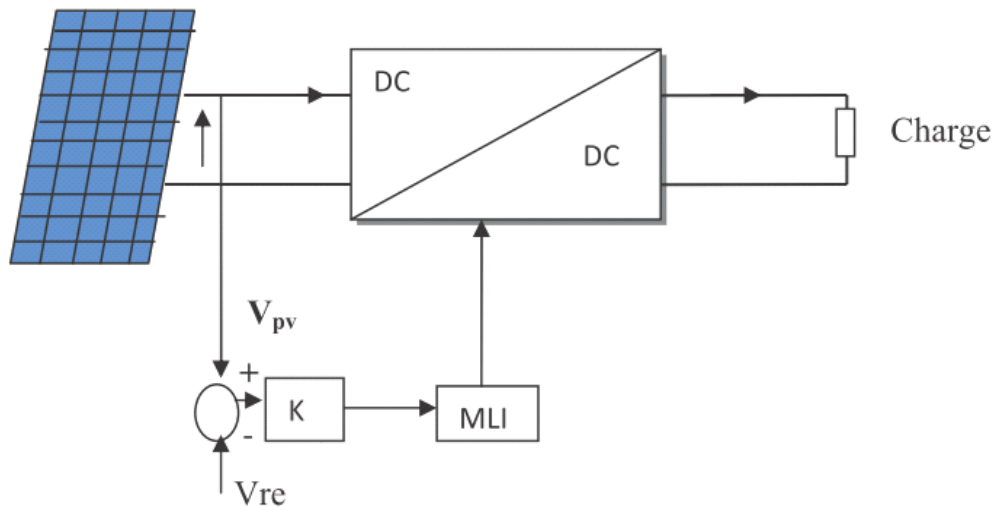
0 : Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

Le point de fonctionnement sur le PPM.

: Le point de fonctionnement est droit de PPM.

### II.7.B.3- MÉTHODE À CONTRE RÉACTION DE LA TENSION

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure (II.11):



**Figure (II.11):** Méthode contre réaction de la tension

Les inconvénients de cette configuration sont les mêmes que pour la méthode de connexion directe (générateur PV + charge de profil). C'est-à-dire, le système ne peut pas s'adapter aux conditions variables d'environnement, telles que l'irradiance et la température.

Les avantages de cette technique c'est une technique simple, économique et emploie seulement une commande de boucle de feedback .

### II.7.B.4- MÉTHODE CONTRE RÉACTION DE COURANTS

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de a été employée pour obtenir des information sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utiliser seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système figure (I.12).

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment.

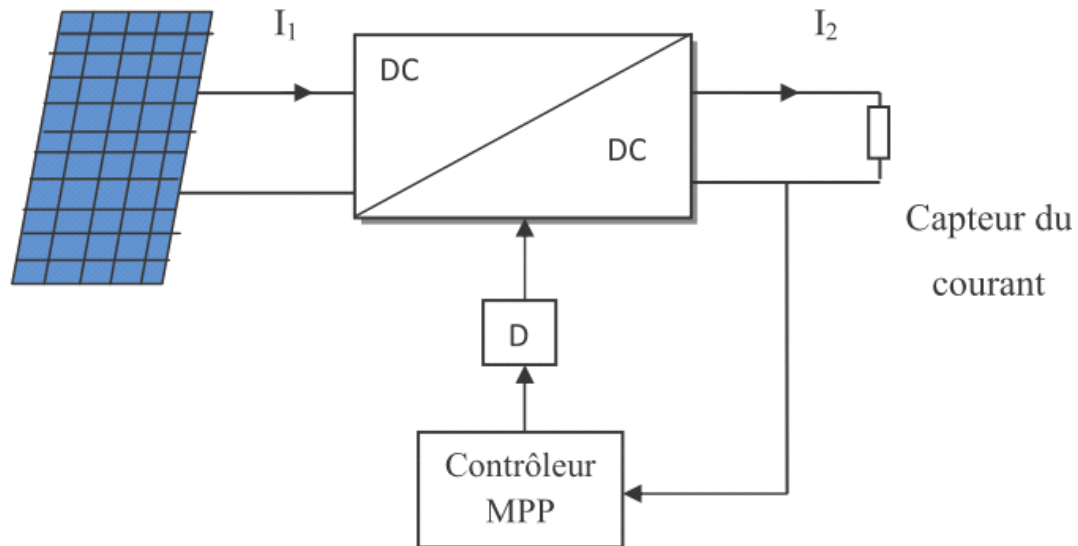


Figure (II.12): Methode contre reaction de courants

## II.8 -CONCLUSION

A travers de ce chapitre, nous avons montré les limites de la connexion directe et la caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque n'est pas linéaire. Nous avons vu également les algorithmes MPPT ont été couverts en détail. Comme ont été faits connaître, il y a beaucoup de manières à distinguer et de grouper les techniques pour suivre le MPP au générateur PV. Cependant, en ce chapitre, les techniques directes et indirectes étaient choisies et développées en détail.

Les techniques indirectes ont le dispositif particulier de l'obtention de la puissance maximale soit l'ensoleillement, soit la température. Ils doivent mesurer une partie de la tension, du courant du générateur PV, ou employer des données empiriques par des expressions mathématiques d'approximation numérique pour estimer le MPP du générateur spécifique de PV installé dans le système. Bien que, dans beaucoup de cas, ils puissent être simples et peu coûteux, ils ne sont pas totalement souples.

D'autre part, la technique directe offre les avantages suivants: ni une grande base de données, ni une grande mémoire nécessaire pour calculer le MPP; elle est totalement souple en ce qui concerne le profil de charge, le suiveur de MPP est indépendant de la variation des paramètres du générateur PV.



**CHAPITRE III :**  
**MODELISATION DE LA CELLULE**  
**PHOTOVOLTAÏQUE**

### III.1-INTRODUCTION

L'énergie photovoltaïque est obtenue par conversion directe des rayonnements solaires par un dispositif électronique appelé cellule. C'est un générateur électrique. Le regroupement de plusieurs cellules constitue un module par conséquent un panneau photovoltaïque. La puissance du panneau PV dépend du niveau d'ensoleillement et de la température ambiante. L'énergie produite peut subir différente transformation selon les besoins de l'utilisateur (mécanique, thermique, lumineuse chimique). En effet, pour alimenter une charge, il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter (de transformer) les caractéristiques de la source afin d'assurer le bon fonctionnement (et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie).

L'énergie produite peut subir différente transformation selon les besoins de l'utilisateur (mécanique, thermique, lumineuse chimique). En effet, pour alimenter une charge, il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter (de transformer) les caractéristiques de la source afin d'assurer le bon fonctionnement (et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie). Dans ce chapitre, nous allons étudier le générateur photovoltaïque, l'influence des phénomènes physiques (température et l'éclairement) et électrique sur ces performances et les convertisseurs continu-continus.

Rappelons l'équation donnant la caractéristique  $I(V)$  de la cellule basée sur le circuit équivalent à une diode :

$$I = I_{ph} - I_S \left[ e^{\frac{V+I R_S}{n V_t}} - 1 \right] - \frac{V+I R_S}{R_p} \quad (III.1)$$

### III.2- CALCUL DE ( $I_{ph}$ )

Le courant de court-circuit  $I_{CC}$  représente le courant maximum généré par la cellule. Il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit  $V=0$ . Comme  $R_S \ll R_P$ , on peut admettre que  $I_{ph} \approx I_{CC}$  pour ( $G=1000W/m^2$ ). L'équation (III.2) devient :

$$III \quad I = I_{CC} - I_S \left[ e^{\frac{V+I R_S}{n V_t}} - 1 \right] - \frac{V+I R_S}{R_p} \quad (III.2)$$

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ( $R_P = \infty$ ) l'équation (III.3) se simplifie à :



$$I = I_{CC} - I_S \left[ e^{\frac{V+I R_S}{nV_t}} - 1 \right] \quad (\text{III.3})$$

Où

\*/ I: Le courant fourni par la cellule.

\*/ V: la tension aux bornes de la cellule.

### III. 3- CALCUL DE LA RESISTANCE SERIE DANS LE POINT ( $V_{CO}$ )

La différentiation de l'équation (III.4), donne :

$$dI = 0 - I_S \left( \frac{dV + I R_S \cdot dI}{nV_t} \right) \cdot e^{\frac{V+I R_S}{nV_t}} \quad (\text{II.4})$$

Ce qui en résulte :

$$R_S = - \frac{dV}{dI} - \frac{nV_t}{I_S \cdot e^{\frac{V+I R_S}{nV_t}}} \quad (\text{III.5})$$

En circuit ouvert la tension est  $V = V_{CO}$  et l'équation devient:

$$R_S = - \frac{dV}{dI} |_{V_{CO}} - \frac{nV_{Tref}}{I_{Sr} \cdot e^{\frac{V_{CO}}{nV_{Tref}}}} \quad (\text{III.6})$$

Où :  $\frac{dV}{dI} |_{V_{CO}}$  est la pente de la courbe  $I(V)$  dans le point  $V=V_{CO}$  (calculée à partir de la courbe  $I(V)$  dans la fiche technique du module puis divisée par le nombre de cellules en série).

On réécrit l'équation (III .7) sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{CC} - I - I_S \cdot \left[ e^{\frac{V+I R_S}{nV_T}} - 1 \right] \quad (\text{III.7})$$

La méthode de Newton est utilisée généralement pour résoudre l'équation non linéaire (III.8). Rappelons que la méthode de Newton est exprimée par :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{III.8})$$

Où :

\*/  $f'(x_n)$  : Dérivée de la fonction  $f(x_n)$  ;

\*/  $X_n$  : Valeur actuelle de  $x$  ;

\*/  $X_{n+1}$  : Valeur prochaine de  $x$ .

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_n - I_s \left[ e^{\left( \frac{V + R_s I_n}{nV_T} \right)} - 1 \right]}{-1 - I_s \left( \frac{R_s}{nV_T} \right) \cdot \left[ e^{\left( \frac{V + I_n R_s}{nV_T} \right)} \right]} \quad (\text{III.9})$$

Les équations établies jusqu'à présent ne sont valables que pour un mode de fonctionnement spécifique en termes d'éclairement et de température. Pour généraliser la modélisation pour différents éclaircements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

Alors la nouvelle valeur du courant de court-circuit  $I_{cc}$  pour une irradiation  $G$  et une température  $T$  données est calculée selon l'équation suivante :

$$I_{cc}(G, T) = I_{cc} \frac{G}{1000} [1 + a(T - T_{ref})] \quad (\text{III.10})$$

Avec :

\*/  $I_{cc}$  : Le courant de court-circuit mesuré sous une irradiation  $1000 \text{ W/m}^2$  ;

\*/  $a$  : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température  $a=0.65 \cdot 10^{-3}$  ;

\*/  $T_{ref}$  : la température de référence,  $298^\circ \text{K}$  ( $25^\circ \text{C}$ ).

Le courant de saturation de la diode dépend de la température. Sa valeur pour une température  $T$  donnée est calculée par :

$$I_s(T) = I_{sr}(T_{ref}) \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\left( \frac{-qE_g}{nk} \right) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (\text{III.11})$$

### III.4- PUISSANCE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE (P)

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique  $P(\text{W})$  disponible aux bornes d'une cellule Photovoltaïque est :

$$P = VI \quad (III.12)$$

\*/  $P(W)$  : Puissance fournie par la cellule Photovoltaïque ;

\*/  $V(V)$  : Tension mesurée aux bornes de la cellule Photovoltaïque ;

\*/  $I(A)$  : Intensité débitée par la cellule Photovoltaïque.

### III.5- PUISSANCE MAXIMALE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ( $P_{MAX}$ )

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{max, idéale}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

$$P_{max, idéale} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (III.13)$$

\*/  $P_{max, idéale} (W)$ : La puissance fournie par la cellule Photovoltaïque ;

\*/  $V_{co}(V)$ : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule Photovoltaïque ;

\*/  $I_{cc} (A)$ : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule Photovoltaïque.

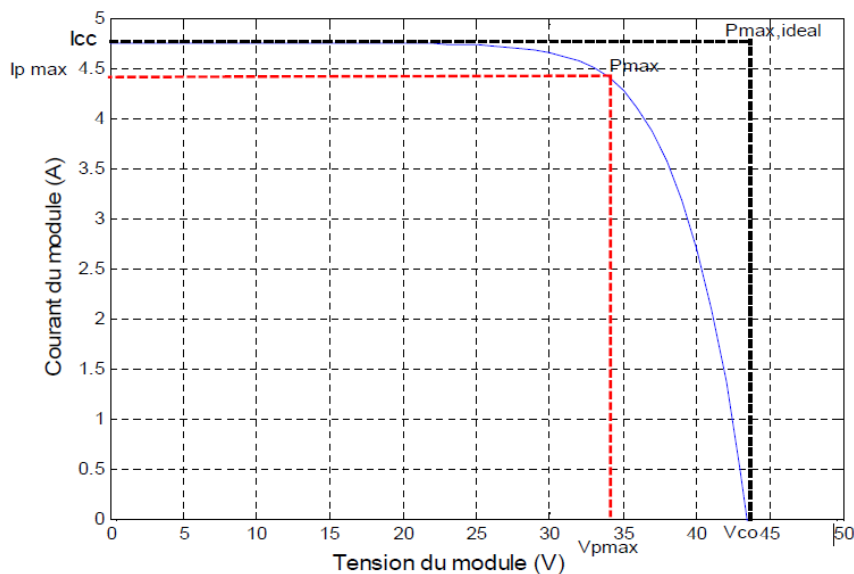


Figure III .1. Puissance maximale idéale et pratique.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (figure III.14), et la tension au point de puissance maximale  $V_{PMax}$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I_{PMax}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{cc}$ . L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{Max} = V_{PMax} I_{PMax} \quad (III.14)$$

### III.6-CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisés, analyse les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque. Nous avons aussi étudié l'influence des phénomènes physiques ; la température et l'éclairement sur le générateur. En eet, pour appliquer le panneau à une charge, il faut un étage d' adaptation ; un hacheur tel que le survolteur (ou boost) et entrelacée puis nous avons étudiés les caractéristiques.

# **Chapitre VIII : Simulation**

## VIII. INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est de réaliser un modèle de cellules photovoltaïque (PV)

Dédié à l'enseignement des 'énergie renouvelables en utilisant le logiciel PSIM .

Ce modèle est basé sur les valeurs nominales fournies par le fabricant ,à savoir :tension à vide ,courant de court-circuit ,tension et courant correspondant au point de puissance maximale .le modèle ainsi obtenu offre la possibilité de mieux rendre compte de l'influence des différentes grandeurs physique notamment la température l'irradiation ,la résistance shunt et le courant de saturation de la diode.

Après une présentation générale de la chaine de conversion photovoltaïque, l'article détaille, dans un premier temps, la modélisation d'un panneau photovoltaïque .Dans un deuxième, nous nous intéressons à l'implémentation d'un contrôleur afin de commande le convertisseur DC/DC pour permettre au générateur photovoltaïque de fonctionner à son maximum de puissance (MPP)

### VIII.2-MATLAB (MATRIX LABORATORY)

EST UN LOGICIEL POUR EFFECTUER DES CALCULS NUMERIQUES. IL A ETE CONÇU INITIALEMENT POUR FACILITER LE TRAITEMENT DES MATRICES MAIS IL EST MAINTENANT UTILISE DANS TOUS LES DOMAINES DES SCIENCES QUI NECESSITE DE FAIRE DES CALCULS.

#### VII.2.1-INTERETS :

- Programmation infiniment plus rapide pour le calcul et pour l'affichage
- Une librairie très riche
- Possibilité d'inclure un programme en C/C++
- Langage interprété : Pas de compilation donc pas d'attente pour compiler
- Possibilité d'exécuter du code en dehors du programme
- Code facile à comprendre et très lisible
- Une aide très bien faite

#### VIII .2.2-INCONVENIENTS :

- Vitesse de calcul moins rapide qu'en C/C++
- Payant (équivalent gratuit [scilab](#))
- Application auto-exécutable peu pratique

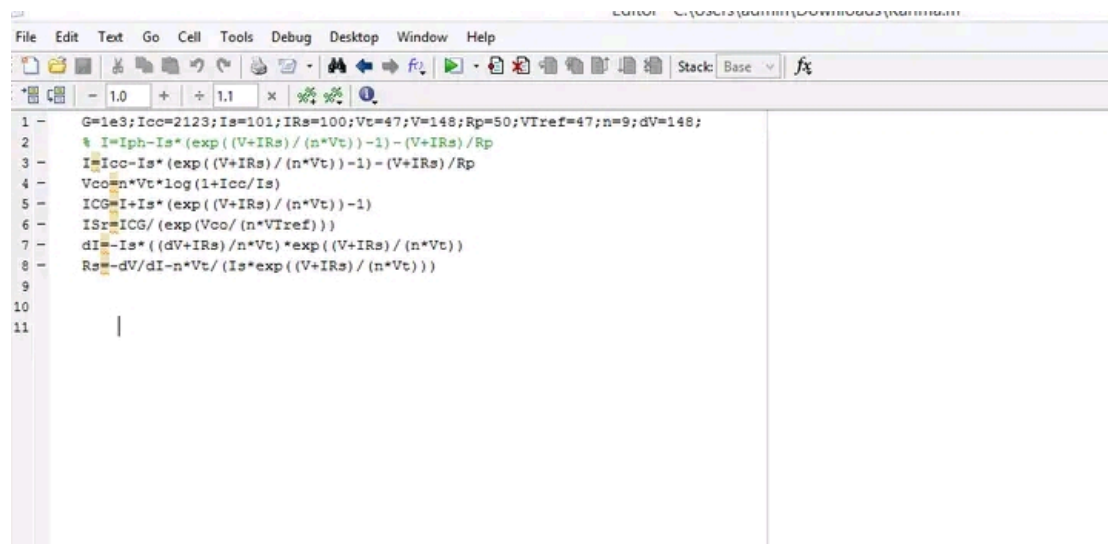
De manière générale, Matlab est utilisé pour faire des expériences de calcul très rapidement. Certains programmes qui nécessiteraient 1 journée de programmation en C/C++ peuvent se réaliser en 1h sous Matlab. Par contre, une fois programmé, le temps de calcul sous Matlab peut être 100 fois supérieur à celui du C/C++. De ce fait,

## Simulation

on ne l'utilise que très peu pour réaliser un produit fini destiné aux particuliers. Le but de ce tutorial est de montrer comment mieux utiliser Matlab afin de programmer plus rapidement tout en minimisant son temps de calcul. J'ai essayé d'être le plus synthétique possible, mais si vous découvrez Matlab pour la première fois et si vous avez peu de notion de programmation, ce tutoriel manquera probablement d'explication.

La première idée pour optimiser sa programmation est de bien connaître toutes les fonctions de Matlab. Je vous conseil de lire et relire ces pages jusqu'à que vous les connaissiez tous, car ça vous sera toujours utile à un moment donné. Après j'explique comment utiliser les fonctionnalités de Matlab pour mieux programmer et comment organiser un projet.

## VIII.3-SIMULATION



```
1 - G=1e3;Icc=2123;Is=101;IRs=100;Vt=47;V=148;Rp=50;VIref=47;n=9;dV=148;
2 - % I=Iph-Is*(exp((V+IRs)/(n*Vt))-1)-(V+IRs)/Rp
3 - I=Icc-Is*(exp((V+IRs)/(n*Vt))-1)-(V+IRs)/Rp
4 - Vco=n*Vt*log(1+Icc/Is)
5 - ICG=I+Is*(exp((V+IRs)/(n*Vt))-1)
6 - ISr=ICG/(exp(Vco/(n*VIref)))
7 - dI=-Is*(dV+IRs)/n*Vt*exp((V+IRs)/(n*Vt))
8 - Rs=-dV/dI-n*Vt/(Is*exp((V+IRs)/(n*Vt)))
9
10
11 |
```

Simulation

File Edit Debug Parallel Desktop Window Help

Current Folder: C:\Users\admin\Downloads

Shortcuts [How to Add](#) [What's New](#)

Warning: MATLAB Toolbox Path Cache is out of date and is not being used.  
Type 'help toolbox\_path\_cache' for more info

MATLAB desktop keyboard shortcuts, such as Ctrl+S, are now customizable.  
In addition, many keyboard shortcuts have changed for improved consistency across the desktop.

To customize keyboard shortcuts, use [Preferences](#). From there, you can also restore previous default settings by selecting "R2009a Windows Default Set" from the active settings drop-down list. For more information, see [Help](#).

[Click here](#) if you do not want to see this message again.

I =

2.0375e+003

Vco =

1.3079e+003

ICG =

2.1180e+003

ISr =

96.1880



Simulation

```
ISr =  
    96.1880  
  
dI =  
-2.3510e+005  
  
Rs =  
    -2.3296  
  
I =  
    2.0375e+003  
  
Vco =  
    1.3079e+003  
  
ICG =  
    2.1180e+003  
  
ICG =  
    2.1180e+003  
  
ISr =  
    96.1880  
  
dI =  
-2.3510e+005  
  
Rs =  
    -2.3296  
  
I =  
    2.0375e+003  
  
Vco =  
    1.3079e+003
```

Simulation

```
ICG =  
    2.1180e+003  
  
ISr =  
    96.1880  
  
dI =  
   -2.3510e+005  
  
Rs =  
   -2.3296  
  
I =  
    2.0375e+003  
  
Vco =  
    1.3079e+003
```

```
Shortcuts | How to Add | What's New  
  
-2.3296  
  
I =  
    2.0375e+003  
  
Vco =  
    1.3079e+003  
  
ICG =  
    2.1180e+003  
  
ISr =  
    96.1880  
  
dI =  
   -2.3510e+005  
  
Rs =  
   -2.3296  
  
>> |
```

#### VIII .4-CONCLUSION

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été

Développé à partir de modèles mathématiques, cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituants.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté

Permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système pour des cas d'applications

## **Conclusion général**

### CONCLUSION GENERAL

Au début nous avons donné une présentation générale des systèmes photovoltaïques, leur modélisation et l'influence de l'irradiation et la température sur le point de fonctionnement. Ensuite, nous avons fait l'étude de l'ensemble du système comportant le générateur photovoltaïque, et le hacheur survolteur classique ou entrelacé pour différents lois de commandes. Les résultats de simulation ont été présentés en détails afin d'illustrer le fonctionnement du système. Les résultats nous ont permis de conclure que la puissance générée par le panneau PV diminue par la diminution de l'éclairement ou l'augmentation de la température. La commande des deux types d'hacheurs a été assurée par deux lois de commande liées au dispositif de poursuite de la puissance maximale (MPPT), qui sont : la Méthode Perturber et Observer et celle incrémentale. Les résultats de simulation montrent que PO donne des résultats meilleurs que l'algorithme INC du point de vue rapidité et ondulation, cependant le résultat avec PO présente un dépassement lors du changement brusque des conditions météorologiques. L'avantage de l'algorithme incrémental est l'absence de dépassement lors du changement rapide des conditions atmosphériques.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudiés l'onduleur triphasé commandé par deux stratégies de commande la MLI (Modulation de largeur Impulsion) et celle par la bande d'hystérésis, puis les ltrés reliant celui-ci au réseau électrique. Ensuite nous avons présenté le système global à savoir l'ensemble des composants : panneau, Hacheur, onduleur et le réseau de distribution BT. Pour injecter de l'énergie dans le réseau, il est nécessaire que la synchronisation soit effectuée ; raison pour laquelle nous avons utilisés une stratégie de commande de l'onduleur basé sur le réglage de la position par le PLL et le réglage de la tension du bus continu. En fin nous avons effectué la simulation du système photovoltaïque globale raccordé au réseau de distribution basse tension BT.

Conclusion 85 satisfaisants (moins de pollution harmonique, facteur puissance unitaire), néanmoins la puissance injectée dépend des conditions climatiques.

# **BIBLIOGRAPHI**

- [1]A.Attou, « Commande de la machine asynchrone dédiée à l'énergie photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès 2017.
- [1]A.amarou, M.Ayache, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [1]A.C. Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse 2005.
- [1]A.Ricaud, « systèmes photovoltaïques » Poly Tech' Savoie, oct. 2011.
- [2]F.Heroguel, « Les cellules photovoltaïques » Ecole normale supérieure, Lyon épreuve de projet, 2007. F. Hananou et A. Rouabah « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque >> Mémoire de Master Université Kasedi Merbah Ouargla 2014.
- [2]F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro - floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008. 107
- [3] H. Aboub « commande d'un onduleur neuf niveaux destiné aux forts puissances PV >> Mémoire de Magister université el hadj Lakhdar Batna. 2014
- [3]H. Historique de la cellule photovoltaïque, [WWW.tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/](http://WWW.tpeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/)
- [4] 1. Ben djamaa « modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque >> Mémoire de Magister Université Abou Baker BelKaid Tlemcen 2011/2012.
- [5] J.P.Hautier et J.P.Caron, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Edition Technip, Paris 1995
- [6] M. Adouane, « < Étude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », Mémoire de magistère, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008
- [6]M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique ». Thèse de doctorat en sciences, Université de Batna 2008.
- [6]M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique ». Thèse de doctorat en sciences, Université de Batna 2008.
- [7] N. Benha douche, La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite, Projet de fin d'étude, Université de Tlemcen, 2014.
- [8] R. Machouma « < Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques, Applications pour les charges commerciales » Thèse de Doctorat en Science université el hadj Lakhdar Batna. 2015
- [9] S. Djeriou « simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone >> Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas Sétif 2011.
- [9] S. Aoufir << modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas Sétif 2014
- [9] S.Abada << Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Mémoire Maître des Sciences, Université Laval, 2011
- [9] S. M. Ait - Cheikh, Étude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques » >. Thèse de Doctorat d'état, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007