

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED**  
**INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE**

**Option : Réseaux électriques**

## **THEME**

# **CONCEPTION ET MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE OPTIMISE PAR METHODE SWARM**

**Proposé et dirigé par :**

**- Mr. LABBI yacine**

**Présenté par :**

**- BEN AMAR asma**

**- BELAID elhadja ibtissem**

**Promotion : 2010**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ

ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَّرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ

السِّنِينَ وَالْحِسَابَ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ نَفْصِلُ

الآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ ﴿٥﴾

[يونس: 5]

# **CENCEPTION ET MODÉLISATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE OPTIMISE PAR METHODE SWARM**

## ***Résumé :***

L'électricité photovoltaïque est perçue comme une importante source d'énergie renouvelable. Le champ photovoltaïque est une source de puissance instable, dont le point de puissance crête dépend de la température et de l'irradiation. Le suiveur du point de puissance maximale est alors nécessaire pour une efficacité optimale.

A cet effet, dans le présent travail l'optimisation par Essaims Particulaires (OEP) est proposée pour détecter le point de puissance maximale pour un panneau photovoltaïque, ils sont utilisés pour générer la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. Un système photovoltaïque est composé d'un module solaire et OEP MPP. Il est modélisé et simulé. Les résultats de simulation montrent que l'efficacité du OEP est de tirer le maximum d'énergie avec un temps de réponse rapide lors des variations dans les conditions de travail.

**Mots clés :** Optimisation par Essaim Particulaires (OEP), système photovoltaïque,

## *Abstract:*

Photovoltaic electricity is seen as an important source of renewable energy. The photovoltaic array is an unstable source of power since the peak power point depends on the temperature and the irradiation level. A maximum peak power point tracking is then necessary for maximum efficiency.

In this work, a Particle Swarm Optimization (PSO) is proposed for maximum power point tracker for photovoltaic panel, are used to generate the optimal MPP, such that solar panel maximum power is generated under different operating conditions. A photovoltaic system including a solar panel and technique PSO MPP tracker is modeled and simulated, it has been carried out which has shown the effectiveness of PSO to draw much energy and fast response against change in working conditions.

**Key words:** Particle Swarm Optimization (PSO), photovoltaic system,

## ملخص:

تعتبر الطاقة الشمسية مصدرًا هامًا من مصادر الطاقة المتجددة. تمثل الألواح الكهروضوئية مصدرًا لطاقة غير مستقرة (متذبذبة) حيث نجد أن نقطة الاستطاعة القصوى تتعلق بدرجة الحرارة و مستوى الإشعاع الضوئي. لذلك فإنه من الضروري تتبع نقطة الاستطاعة من أجل تحقيق أقصى فعالية.

لتعقب نقطة الاستطاعة العظمى والتي يتم (PSO) في هذا العمل اقترحنا تقنية سرب الجزيئات المثالية استعمالها لاستغلال أحسن للطاقة الناتجة من المنبع الكهروضوئي وتحت شروط ( درجة الحرارة وإشعاع ضوئي ) متغيرة. في دراستنا نقوم بعمل نموذج يتكون من المنبع الكهروضوئي مع نظام تحكم مبني على تقنية سرب الجزيئات المثالية لإجراء تجارب ومعرفة مدى فعالية هذه التقنية ، حيث نجد أن النتائج المحصل عليها تبين فعالية سرب الجزيئات المثالية لإيجاد الحل الأمثل ( استطاعة قصوى) تحت مختلف الشروط المذكورة أعلاه بأسرع وقت ممكن.

**الكلمات المفتاحية :** سرب الجزيئات المثالية، النظام الكهروضوئي.



*A la mémoire de mon père,  
que Dieu tout puissant l'accueille dans son vaste paradis.*

*A celle à qui mon cœur depuis sa naissance n'a pas pu éprouver qu'amour et reconnaissance, à celle qui a donné un sens à mon existence en m'offrant une éducation digne de confiance  
A ma mère.*

*A mes adorables frères et mes chères sœurs **Yacine, Ali, Mohamed lakdar, Salah, Siham et Fatima**, pour leur aide, leur soutien et leurs encouragements. Ainsi, **Fars et Abd Raouf** qui me sont chère.*

*A mon promoteur M<sup>r</sup> **LABBI Yacine** grâce à qui le travail a vu le jour.*

*A mes amis, qui par leur affection exemplaire et leur conseils ont aplani devant moi les difficultés de la vie et des études :*

***Tina, Iman, Ibtissem, Karimen, Sara, Hania, Hakima, Madiha, Samia, laila, Daouia, Nacira, Zakia, Nesrine.....***

*A tous les enseignants qui m'ont aidé pour être un jour un ingénieur d'état en électrotechnique.*

*A toute ma grande famille.*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*A tous mes collègues de la promotion 2010.*

*Avec l'expression de tous mes sentiments,  
je dédie ce modeste travail.*

**ASMA**

# الإهداء

إلى من أوردتني أعذب ورد... أيقونة الصبر... وينبوع الرحمة والحنان... أمي الحبيبة.

إلى من أضاء لي طريق المعرفة... أبي العزيز.

إلى أخي الغالي: يوسف.

إلى أخواتي: فائزة، نبيلة، كريمة، سميرة، سهام، سارة و إلى أزواجهم وجميع أبنائهم خاصة: هيبه، مريم

إلى جميع أقاربي وأخوالي خاصة: زينب، مريم.

إلى زوجي العزيز "البشير عبايه"، وإلى جميع أفراد أسرته.

إلى رفيقات الحياة: عقيلة، نجاة.

إلى أخواتي اللاتي لم تلهن أمني: كريمان، حكيمه، سارة، هنية، مدتحة، ليلي، سامية، نسرين

أحلام، الضاوية.

إلى صديقتي العزيزة التي شاركتني وصبرت معي: أسماء.

إلى طالبة قسم سنة خامسة هندسة كهربائية.

إلى معلمي وأساتذتي الذين درّسوني في جميع أطوار حياتي العلمية.

إلى جميع أساتذة "معهد العلوم والتكنولوجيا" والعاملين به، وخاصة الأساذ المشرف: لبي ياسين.

إلى هؤلاء جميعاً أهدي هذا العمل المنوَّاع.

الحاجة إنسام

# REMERCIEMENTS

*Nos plus intenses remerciements vont, en premier lieu, au Dieu le miséricordieux le tout-puissant pour nous avoir donné le courage et la patience de mener à terminer ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur Mr **Y. Labbi** qui a accepté de nous encadrer, et nous lui exprimons particulièrement toute notre reconnaissance pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.*

*Nous remercions les membres de jury d'examen pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier tous les enseignants qui nous ont formé et nous citons en particulier Monsieur **R. Rouiha** et Monsieur **B. Zeguel** auquel nous accordons l'expression de nos affectueuse gratitude.*

*Nos remerciements vont également à :*

- *Dr **B. Benhaoua**;*
- *Dr **D. Ben Attous**;*
- *Mr **A. Chems**;*
- *Mr **R. Labdani**;*
- *Mr **H. Grirh**.*

*Enfin, nous sommes reconnaissant à toutes celles et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse.*

**IBTISSEM et ASMA**

---



---

**SOMMAIRE**

Résumé	
Dédicaces	
Remerciements	
Sommaire.....	I
Liste des Figures.....	V
Liste des	VII
Tableaux.....	
Notations.....	VIII
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>générale</b> .....	
<b>Chapitre I : Systèmes photovoltaïques</b>	
I.1 INTRODUCTION .....	5
I.2 HISTORIQUE.....	6
I.2.1 Dates importantes dans l’histoire du photovoltaïque.....	6
I.3 RAYONNEMENT SOLAIRE.....	7
I.3. 1 Spectre du rayonnement.....	7
I.3.2 Durée d’insolation.....	8
I.4 LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D’UN SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE .....	8
• Hacheur dévolteur (ou série).....	9
• Hacheur survolteur (ou parallèle).....	10
• Hacheur série–parallèle.....	10
I.5 CELLULE SOLAIRE .....	11
I.5.1 Fabrication des cellules solaires.....	11
I.5.2 Principe d’une cellule photovoltaïque.....	12
I.5.3 Les types des cellules solaires .....	14
a) Les cellules monocristallines.....	14
b) Les cellules polycristallines.....	14
c) Les cellules amorphes.....	14
I.6 LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES D’UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	14

I.6.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire.....	14
I.6.2 la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque.....	17
I.6.3 Facteurs limitation de rendement d'un générateur photovoltaïque.....	19
I.6.3.1 Influence de la résistance série $R_s$ .....	19
I.6.3.2 Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$ .....	19
I.7 LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	20
I.7.1 Association des modules photovoltaïques.....	20
I.7.1.1 Association en série.....	20
I.7.1.2 Association en parallèle.....	21
I.7.1.3 Association série-parallèle.....	22
I.8 CARACTERISTIQUE TENSION-COURANT ET PUISSANCE-TENSION SOUS DIFFERENTES CONDITIONS CLIMATIQUES .....	23
I.8.1 Influence de l'éclairement.....	23
I.8.2 Influence de la température.....	24
I.8.3 Influence simultanée de l'éclairement et de la température.....	24
I.9 CLASSIFICATION D'UN SYSTEM PHOTOVOLTAÏQUE .....	25
I.9.1 Système photovoltaïque autonomes.....	25
I.9.2 Système photovoltaïque raccordé à un réseau.....	26
I.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE GPV.....	26
I.10.1 Avantages.....	26
I.10.2 Inconvénients.....	27
I.11 CONCLUSION.....	27
<b>Chapitre II : Technique MPPT (La pour suite du point de puissance maximale)</b>	
II.1 INTRODUCTION.....	29
II.2 LA CONNEXION DIRECT GPV-CHARGE COMME MODE DE TRANSFERT DE PUISSANCE.....	29
II.3 LA CONNEXION GPV-CHARGE VIA UN ETAGE D'ADAPTATION.....	31
II.4 PRINCIPE DE LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL.....	32
II.5 CRITERES D'EVALUATION D'UNE COMMANDE MPPT.....	34
• <i>Simplicité et coût</i> .....	34
• <i>Réponse dynamique</i> .....	34
• <i>Flexibilité</i> .....	34
• <i>Compétitive sur une large gamme de puissance</i> .....	34

II.6 RENDEMENT.....	35
II.7 DIFFERENTS TYPES DE COMMANDES MPPT.....	35
II.8 LA COMMANDE MPPT PERTURBATION PUIS OBSERVATION.....	37
II.8.1 Principe des commandes "Perturbation et Observation" (P&O).....	37
II.8.2 Structure de l'algorithme P&O.....	37
II.9 CONCLUSION.....	40
<b>Chapitre III : Optimisation par Essaim Particulaire (SWARM)</b>	
III.1 INTRODUCTION.....	42
III.2 OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES.....	42
III.2.1 Origines.....	42
III.2.2 Principe.....	43
III.2.3 Principales caractéristiques.....	44
III.2.4 Formalisation.....	44
III.2.5 Configuration de la méthode.....	45
III.2.5.1 Nombre de particules.....	45
III.2.5.2 Topologie du voisinage.....	45
III.2.5.3 Coefficient de confiance.....	46
III.2.5.4 Vitesse maximale et coefficient de constriction.....	46
III.2.5.5 Facteur d'inertie.....	47
III.2.5.6 Initialisation de l'essaim.....	48
III.2.5.7 Critères d'arrêt.....	48
III.2.6 Les étapes de la méthode d'Optimisation "SWARM".....	48
III.3 CONCLUSION.....	50
<b>Chapitre IV : Application, résultats et discussion</b>	
IV.1 INTRODUCTION.....	52
IV.2 TECHNIQUE MPPT-PSO.....	54
IV.3 TESTS ET APPLICATIONS.....	55
IV.3.1 1 <sup>er</sup> test : Comparaison entre MPPT-PSO et P&O.....	55
IV.3.1.1 Effet de l'éclairement.....	56
IV.3.1.2. Effet de la température.....	58
IV.3.1.3. Effet simultané de l'éclairement et de la température.....	59
IV.3.2 2 <sup>eme</sup> test : <i>Simulations en temps réel</i> .....	61
A. <i>Simulation 1 : jour ensoleillé</i> .....	62

---

---

<b><i>B. Simulation 2 : jour nuageux</i></b> .....	64
IV.4 CONCLUSION.....	65
Conclusion générale.....	67
Références bibliographiques.....	68
Annexe.....	69

---



---

**LISTE DES FIGURES**

<b>Figure. I.1</b>	Spectre solaire hors atmosphérique.....	8
<b>Figure. I.2</b>	Structure d'une cellule solaire en silicium.....	9
<b>Figure. I.3</b>	Schémas de principe d'un hacheur série.....	10
<b>Figure. I.4</b>	Schémas de principe d'un hacheur parallèle.....	10
<b>Figure. I.5</b>	Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle.....	10
<b>Figure. I.6</b>	Cellules solaires.....	12
<b>Figure. I.7</b>	Différentes étapes de la production d'un système PV.....	12
<b>Figure. I.8</b>	Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction PN)...	13
<b>Figure. I.9</b>	Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.....	15
<b>Figure. I.10</b>	Caractéristique tension-courant d'une cellule photovoltaïque.....	18
<b>Figure. I.11</b>	Exemples de modules photovoltaïques.....	20
<b>Figure. I.12</b>	Modules en série avec diodes by-pass.....	21
<b>Figure. I.13</b>	Modules en parallèle avec diodes anti-retour.....	22
<b>Figure. I.14</b>	Montage série-parallèle de modules photovoltaïques.....	22
<b>Figure. I.15</b>	Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairements. a) courant-tension b) tension-puissance.....	23
<b>Figure. I.16</b>	Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairements. a) courant-tension b) tension-puissance.....	24
<b>Figure. I.17</b>	Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairements et températures. a) courant-tension b) tension-puissance.....	24
<b>Figure. I.18</b>	influence de facteur d'idéalité.....	25
<b>Figure. I.19</b>	Installation photovoltaïque autonome.....	25
<b>Figure. I.20</b>	Installation photovoltaïques couplée au réseau.....	26
<b>Figure. II.1</b>	Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour	30
<b>Figure. II.2</b>	Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion direct GPV-Charge.....	30
<b>Figure. II.3</b>	Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation	31
<b>Figure. II.4</b>	Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.....	32
<b>Figure. II.5</b>	Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale	

	a) suit à une variation d'ensoleillement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.....	33
<b>Figure. II.6</b>	Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.....	37
<b>Figure. II.7</b>	Algorithme de la méthode P&O.....	38
<b>Figure. II.8</b>	Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation..	39
<b>Figure.III.1</b>	Schéma de principe du déplacement d'une particule. Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances : suivre sa vitesse propre, revenir vers sa meilleure performance, aller vers la meilleure performance de ses informatrices.....	44
<b>Figure.III .2</b>	Trois topologies différentes. a)Etoile, b) Anneau, c) Rayon.....	46
<b>Figure.III.3</b>	Optimisation par Essaim de Particule.....	49
<b>Figure.III.4</b>	Organigramme de PSO.....	50
<b>Figure. IV.1</b>	Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairagements. a) courant- tension b) tension-puissance.....	53
<b>Figure. IV .2</b>	La convergence par (OEP) pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $E = 250\text{w/m}^2$ .....	56
<b>Figure .IV.3</b>	Variation PPMT sous différents valeurs de l'éclairement: a) courant-tension b) puissance-tension.....	58
<b>Figure. IV.4</b>	Variation PPMT sous différents valeurs de la température: a) courant-tension b) puissance-tension.....	59
<b>Figure. IV.5</b>	PPM avec Variation dans la température et l'éclairement au même temps : a) courant-tension b) puissance tension.....	61
<b>Figure. IV.6</b>	Données d'ensoleillement et température d'un jour ensoleillé.....	62
<b>Figure. IV.7</b>	Données d'ensoleillement et température d'un jour nuageux.....	62
<b>Figure. IV.8</b>	Courant et tension optimaux d'un jour ensoleillé.....	63
<b>Figure. IV.9</b>	Puissance optimale d'un jour ensoleillé.....	63
<b>Figure. IV.10</b>	Courant et tension optimaux d'un jour nuageux.....	64
<b>Figure. IV.11</b>	Puissance optimale d'un jour nuageux.....	65

---

---

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Table. IV.1</b>	Résultats de l'optimisation avec éclairage variable à une température constante égale à 25°.....	57
<b>Table. IV.2</b>	Résultat de l'optimisation avec une température variable et un éclairage constant égal à 1000 w/m <sup>2</sup> .....	58
<b>Table. IV.3</b>	Résultats de l'optimisation avec la température et l'éclairage qui varient en même temps.....	60

---



---

**NOTATIONS**

<b>PV</b>	Photovoltaïque.
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque.
<b>DC</b>	Direct Current.
<b>AC</b>	Alternating Current.
<b>D<sub>s</sub></b>	Diamètre de soleil [m].
<b>D<sub>t</sub></b>	Diamètre de la terre [m].
<b>L<sub>ts</sub></b>	Diamètre moyenne soleil_terre [m].
$\square$	Longueur d'onde [ $\mu m$ ].
<b>U<sub>s</sub></b>	Tension moyenne de sortie [V].
<b><math>\alpha</math></b>	rapport cyclique.
<b>U<sub>e</sub></b>	Tension moyenne de l'entrée [V].
<b>E<sub>g</sub></b>	Larguer de la bande interdite du matériau [eV].
<b>I</b>	Courant fourni par la cellule [A].
<b>V</b>	Tension aux bornes de la cellule [V].
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo courant, ou courant généré par l'éclairement [A].
<b>I<sub>0</sub></b>	Courant de Saturation d'une diode [A].
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série de la cellule [ $\Omega$ ].
<b>R<sub>sh</sub></b>	Résistance shunt de la cellule [ $\Omega$ ].
<b>V<sub>d</sub></b>	Tension de la diode [V].
<b>q</b>	Charge de l'électron [ $1.602 \cdot 10^{-19}$ C].
<b>K</b>	Constante de Boltzmann [ $1.38 \cdot 10^{-23}$ JK <sup>-1</sup> ].
<b>n</b>	Facteur d'idéalité de la jonction PN
<b>T</b>	Température absolue de la cellule [K].
<b><math>a</math></b>	Coefficient de température du courant I <sub>ph</sub> [mA/°C].
<b>G, G<sub>0</sub></b>	Eclairements de fonctionnement et normalisé respectivement [W/m <sup>2</sup> ]
<b>I<sub>sc</sub></b>	Courant de court-circuit [A].
<b>V<sub>oc</sub></b>	Tension de circuit ouvert [V].
<b>T<sub>ref</sub></b>	Température aux conditions normalisées [K].

---

$V_{oc(Tref)}$	Tension de circuit ouvert à la température normalisée [V].
$V_t$	Tension thermique [V].
$\eta_{PV}$	Rendement maximale du panneau solaire [%].
$P$	Puissance de effectivement délivrée par un GPV [W].
$P_{max}$	Puissance maximale [W].
$I_{max}$	Courant maximale [A].
$V_{max}$	Tension maximale [V].
$P_{in}$	Puissance incidente [W].
<b>FF</b>	Facteur de forme.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>PPM</b>	Point de Puissance Maximale.
<b>CS</b>	Convertisseur Statique.
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation.
<b>LFR</b>	Loss Free Resistor.
$\eta_{MPPT}$	Rendement de la commande MPPT [%].
$\eta_{CONV}$	Rendement de conversion de l'étage d'adaptation [%].
$\eta_{TOTAL}$	Rendement total de la chaîne de conversion [%].
<b>OEP</b>	Optimisation par Essaim de Particules
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization.
<b>MPPT-PSO</b>	mécanisme de poursuite de point de puissance maximum par PSO.
$nb$	Nombre de particules de l'essaim.
$\vec{V}_{max}$	Vitesse maximale d'une particule.
$w$	Inertie d'une particule
$\rho_1, \rho_2$	Coefficients de confiance.
$\vec{x}_i(t)$	Position dans l'espace de recherche.
$\vec{v}_i(t)$	Vitesse.
$\vec{x}_{pbest}$	Position de la meilleure particule.
<b>pbest</b>	Valeur de fitness de sa meilleure solution.
<b>gbest</b>	valeur de fitness de sa meilleure solution connu du voisinage.

# Introduction Générale

---



## *Introduction générale*

L'industrie moderne a des besoins de plus en plus importants en énergie. Les sources classiques d'énergie, qui sont les sources fossiles telles que le charbon et les hydrocarbures, laissent progressivement la place aux énergies renouvelables. L'augmentation fulgurante du prix du pétrole ces dernières années a en effet contraint les pays développés à investir dans ce type d'énergies telles que l'énergie solaire, éolienne, marémotrice ou géothermique. Ces énergies, en plus d'être inépuisables, représentent un secteur porteur permettant un développement durable tout en préservant l'environnement.

L'énergie solaire représente certainement la source d'énergie renouvelable la plus élégante. En plus d'être silencieuse, elle s'intègre parfaitement aux constructions (façades, toiture...), et du fait qu'elle n'intègre pas de pièces mécaniques mobiles, elle ne nécessite pas un entretien particulier reste fiable longtemps, c'est la raison pour laquelle elle est devenue une référence dans les applications spatiales et dans les sites isolés. Elle est en train de s'imposer comme une valeur sûre dans les applications à petite et moyenne consommation d'énergie, surtout depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers pour des rendements meilleurs.

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

Une caractéristique importante de ces panneaux est la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé «Maximum Power Point» (MPP), défini par une tension et courant donnés, et ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge. Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPPT.

Le problème qui se pose toujours, *comment faire fonctionner le système photovoltaïque pour qu'il fournisse sa puissance maximale?* Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques étaient appliquée, et des techniques suivies pour avoir une adaptation et un rendement élevé. La méthode MPPT (Maximum Power Point Tracking) rentre en compte ici, elle fait appel à plusieurs techniques, à savoir les techniques traditionnelles: numériques, analogiques et analytiques ou les technique basées sur l'intelligence artificielle telle que les réseaux de neurones, la logique floue, le neurone- flou, les algorithmes génétiques et la technique SWARM (PSO).

Dans ce sens, l'Optimisation par Essaim Particulaires sera l'objectif primordial de notre travail, pour détecter le point de puissance maximale (émanant du générateur photovoltaïque) dans un système photovoltaïque sous différentes conditions climatiques. Afin de valider l'importance de telle méthode, on va la comparer avec la célèbre méthode classique dite Perturbation et observation (P&O) où l'on cherche toujours à avoir un algorithme dit efficace.

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce projet sera divisé en quatre chapitres selon le plan suivant :

Le premier chapitre consiste à une introduction à l'énergie photovoltaïque, on y explique brièvement les différents composants et le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque.

Le second chapitre, après avoir introduit des différentes techniques de la poursuite du point de puissance maximale, explique le principe de la méthode MPPT choisie P&O.

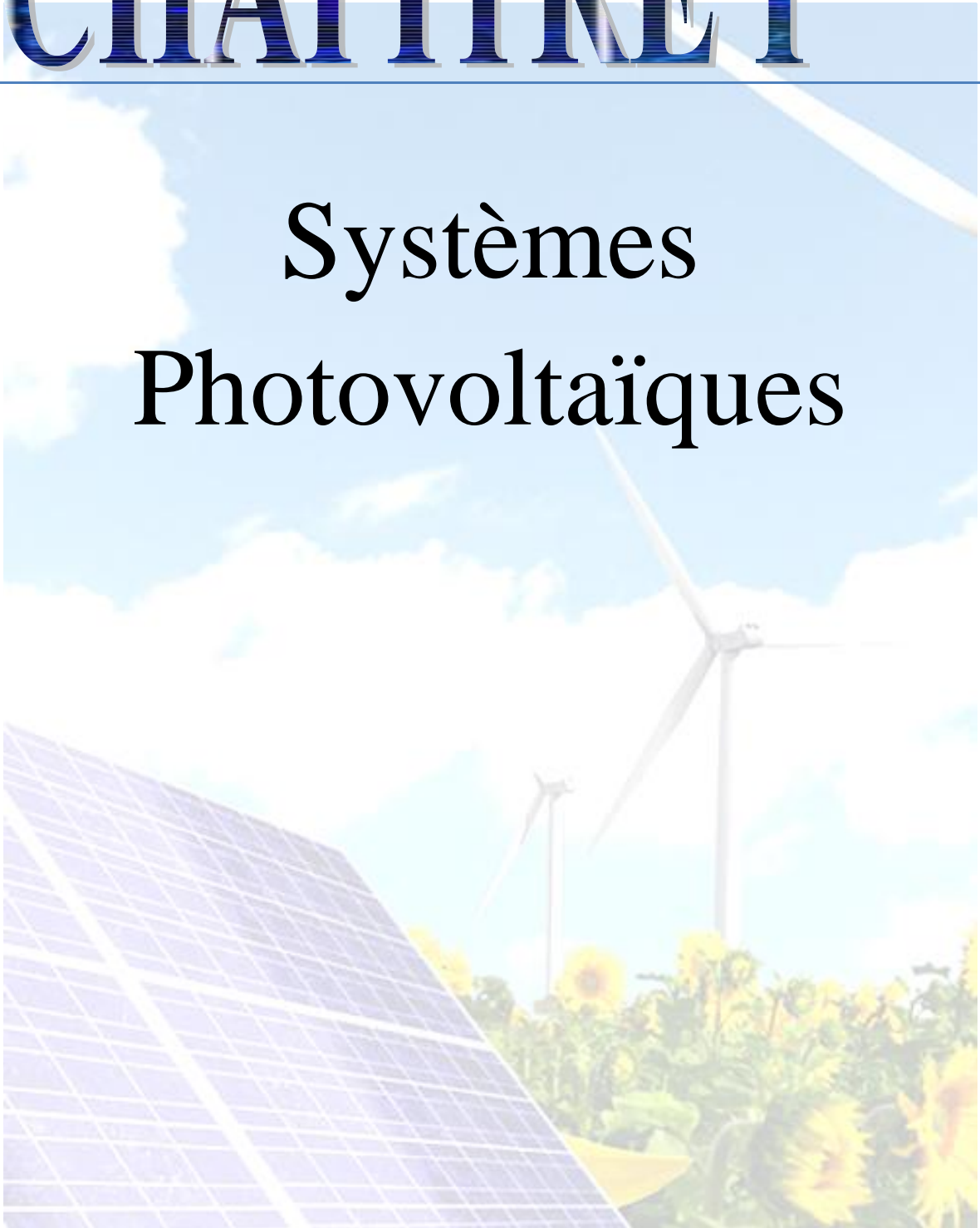
Le troisième chapitre a pour objet de présenter l'origine de la technique d'Optimisation par Essaim de Particules, sa mise en œuvre et les réglages de ses paramètres.

Le quatrième chapitre est consacré à l'optimisation du point de puissance maximale PPM (Maximum Power Point) sous différentes conditions climatiques en utilisant la technique SWARM (PSO) qui est une technique basée sur la randomisation. La programmation et la comparaison des différentes méthodes P&O, MPPT-PSO, ainsi que les interprétations des résultats obtenus seront exposées d'une manière objective.

Ce travail est parachevé par une conclusion générale dans laquelle sont valorisés les différents développements effectués.

# CHAPITRE I

## Systemes Photovoltaïques



# *Systèmes photovoltaïques*

## **I.1 INTRODUCTION :**

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur  $1000 \text{ W/m}^2$  dans les zones tempérées et jusqu'à  $1400 \text{ W/m}^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres comme:

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

La conversion de la lumière en électricité, appelée *effet photovoltaïque*, peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV) [1].

Ce chapitre décrit les concepts de base de l'énergie solaire et de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les principaux éléments du système photovoltaïque y sont étudiés et un survol de leurs caractéristiques est effectué.

## **I.2 HISTORIQUE :**

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [2].

### **I.2.1 Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :**

- **1839:** le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875:** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire
- **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.
- **1958:** une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983:** la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 400 Km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

### **I.3 RAYONNEMENT SOLAIRE :**

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [3].

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 $\mu$ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k:

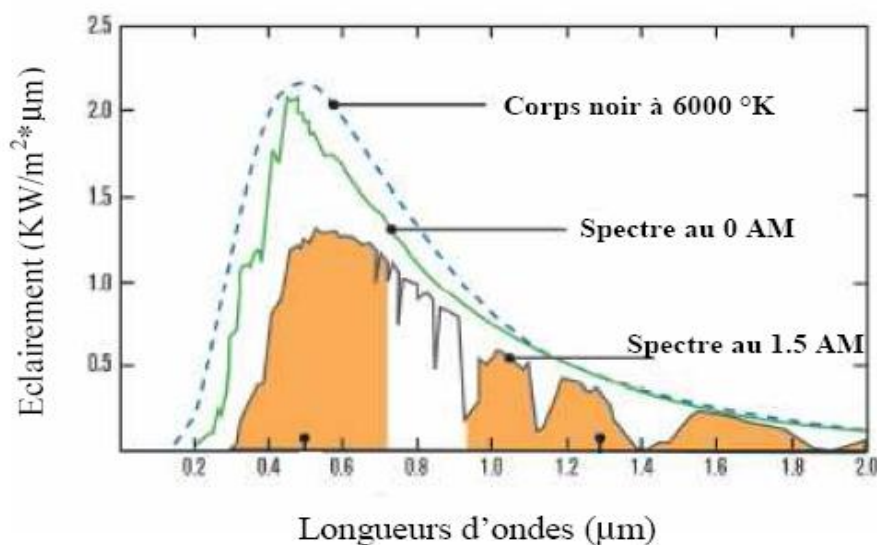
- Diamètre de soleil  $D_s=1.39.10^9$ m.
- Diamètre de la terre  $D_t=1.27.10^7$ m.
- Distance moyenne soleil\_ terre  $L_{ts}=1.5.10^{11}$  m.

### I.3. 1 Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$ :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en:

- Ultraviolet UV 0.20 <  $\lambda$  < 0.38 mm 6.4%.
- Visible 0.38 <  $\lambda$  < 0.78 mm 48.0%.
- Infrarouge IR 0.78 <  $\lambda$  < 10 mm 45.6%.



**Figure I.1** Spectre solaire hors atmosphérique.

### I.3.2 Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

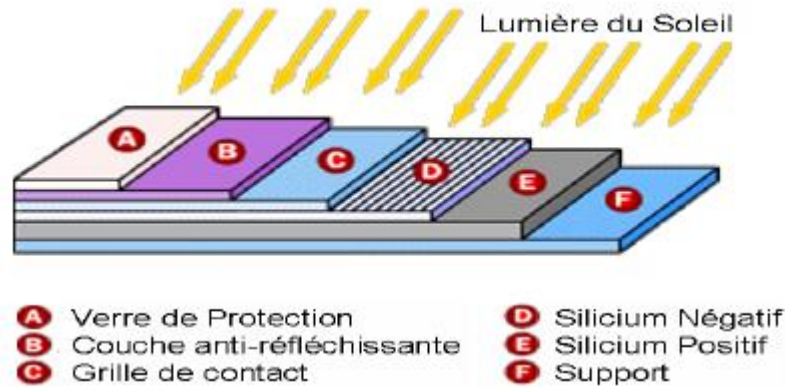
Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle-même dépend de la période de l'année considérée.

### I.4 LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois ou quatre éléments Principaux [4] :

- Le générateur photovoltaïque, qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un

ensemble de panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série ou en parallèle ou hybride). Le module contient des rangés de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) et généralement des cellules à base de **silicium**.



**Figure I.2** Structure d'une cellule solaire en silicium.

- Le stockeur d'énergie (batterie ou accumulateur), qui a le rôle de stocker l'énergie émise par le générateur photovoltaïque et permet par la suite :

- un déphasage entre la production et la consommation (jour/nuit, mauvais temps) ;
- une puissance élevée, sur un temps court, compatible avec la production journalière, avec une puissance crête installée faible.

Il faut noter que le stockeur d'énergie n'est pas toujours parmi les composants d'un système solaires photovoltaïque, car il peut être indisponible et cela selon les besoins

- Le système de contrôle (régulateur), qui assure la sécurité et le bon fonctionnement de la batterie (en cas d'un système avec batterie), plus le fonctionnement optimal de tout le système photovoltaïque. Il est composé généralement d'un hacheur (dévolteur, survolteur ou les deux au même temps) et des jeux de contact. Les hacheurs ou les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Il existe trois types d'hacheurs :

• **Hacheur dévolteur (ou série)** : Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $U_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $U_e$ . Pour un rapport cyclique  $\alpha$  donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$U_s = \alpha \cdot U_e \quad (\text{I.1})$$

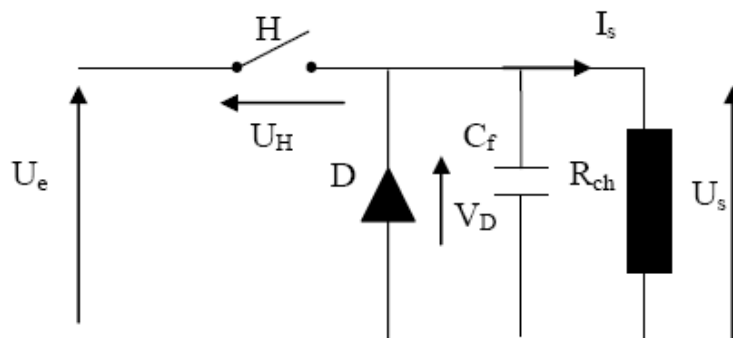


Figure I.3 Schémas de principe d'un hacheur série.

•**Hacheur survolteur (ou parallèle)** : Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $U_s$  est supérieure à celle de l'entrée  $U_e$ . Pour un rapport cyclique  $\alpha$  donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$U_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot U_e \tag{I.2}$$

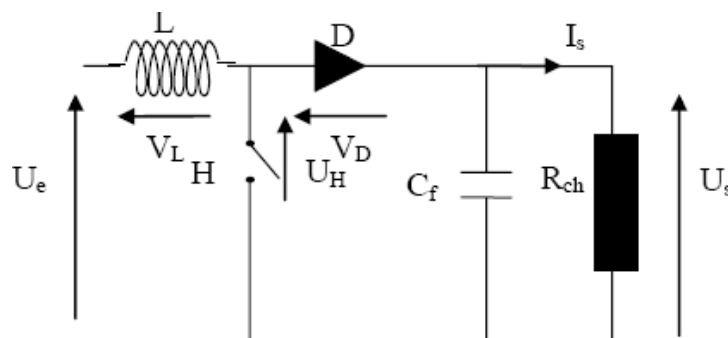


Figure I.4 Schémas de principe d'un hacheur parallèle

•**Hacheur série–parallèle** : Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $U_s$  est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée  $U_e$ . Pour un rapport cyclique  $\alpha$  donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$U_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot U_e \tag{I.3}$$

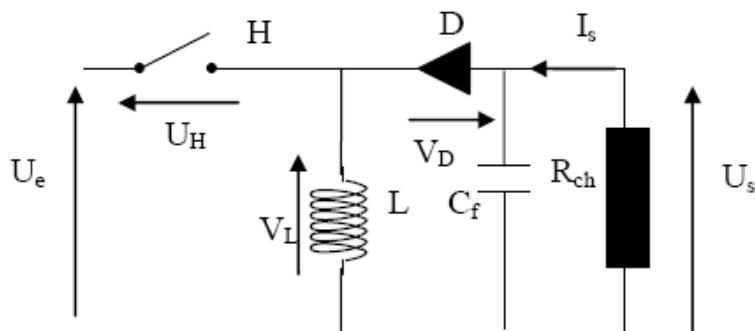


Figure I.5 Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle.

Le système d'interconnexion, qui relie le générateur photovoltaïque (producteur d'électricité) au consommateur (consommateur d'électricité). C'est un système simple (câbles seulement) ou composé (hacheur, onduleur ou les deux au même temps)

❖ **Les autres composants :**

Les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome sont les protections contre la foudre, les disjoncteurs et les fusibles.

Comme les panneaux solaires sont des équipements généralement coûteux, ils doivent être protégés pour éviter toute dégradation. Les dangers sont multiples [5]:

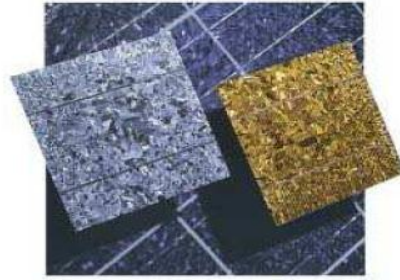
- Perturbations induites par les commutations des convertisseurs de puissance. Dans ce cas, on peut introduire des filtres de puissance pour éliminer les harmoniques.
- Fonctionnement en récepteur : les panneaux se détériorent rapidement quand ils absorbent de la puissance. On peut utiliser des diodes pour empêcher le courant qui circule dans le mauvais sens.
- La Foudre: les protections contre la foudre sont indispensables si l'on veut garantir une alimentation fiable en électricité. Pour réaliser une protection respectés trois principes:

- conduire le courant de foudre vers la terre par le chemin le plus directe ;
- minimiser les surfaces des boucles de masse.
- miter l'onde de surtension par des parafoudres.

## **I.5 CELLULE SOLAIRE :**

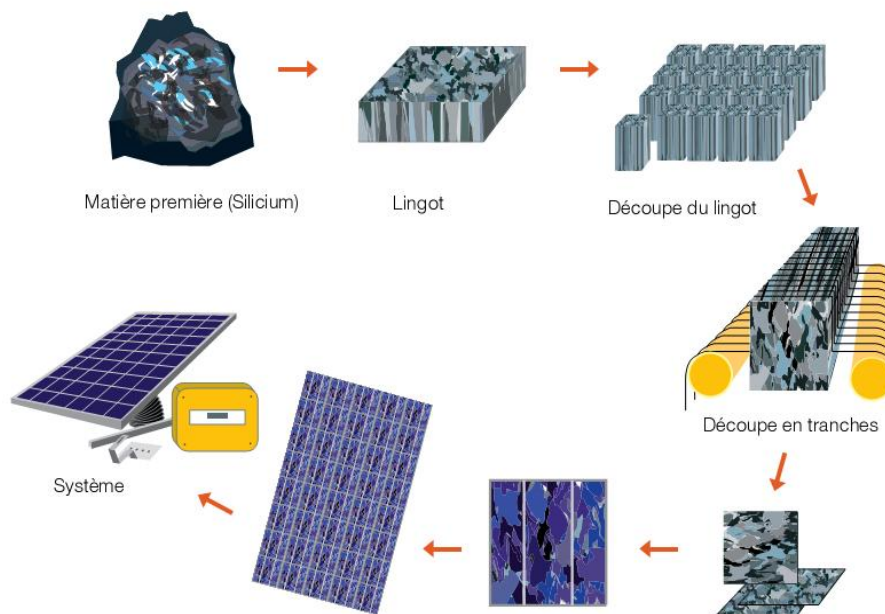
### **I.5.1 Fabrication des cellules solaires :**

Une tranche de silicium réfléchit près de 40% du rayonnement. En réalisant sur la face avant des couches anti-reflets dont la transmission optique est optimisée pour le domaine de longueurs d'onde d'irradiante maximale du spectre solaire, la surface traitée ne réfléchit plus que 4% du rayonnement. Ce sont ces couches anti-reflets qui donnent aux cellules solaires leur couleur bleue alors que le silicium est naturellement gris. Par variation de l'épaisseur de ces couches, on obtient des cellules solaires de différentes couleurs, toujours au prix d'une perte de puissance [6].



**Figure I.6** Cellules solaires.

Le schéma suivant décrit les différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque (technologie cristalline).

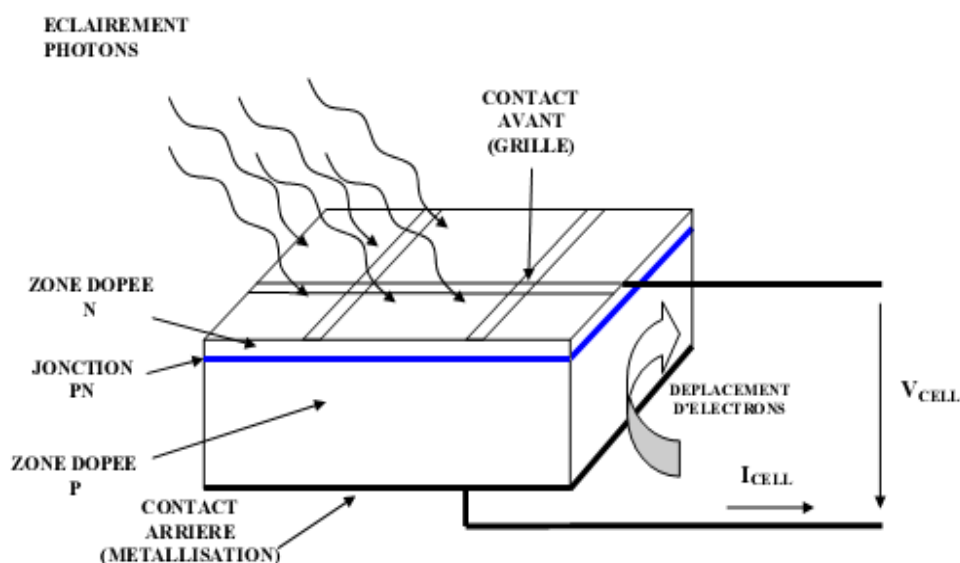


**Figure I.7** Différentes étapes de la production d'un système PV.

### I.5.2 Principe d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux

utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fem) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La figure I.1 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.



**Figure I.8** Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction PN).

Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite ( $E_g$ ) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique  $E$  qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des

régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule [7].

### I.5.3 Les types des cellules solaires :

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [8]:

- a. *Les cellules monocristallines* : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12%-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- b. *Les cellules polycristallines* : Leur conception étant plus faible, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible: (11%-13%).
- c. *Les cellules amorphes* : Elles ont un faible rendement (8%-10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.

## I.6 LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE :

### I.6.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire:

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [2].

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série  $R_s$  et  $R_{sh}$  comme le montre le schéma équivalent de la figure I.9 [4].

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [9].
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [9].

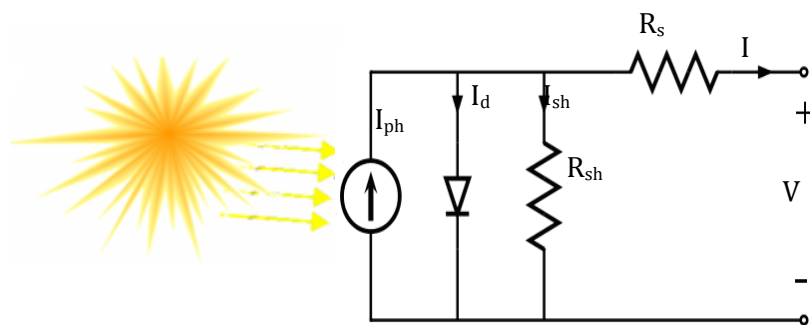


Figure I.9 Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

Ce modèle est présenté par un ensemble d'équations, d'une complexité modérée. Il reflète le comportement de la cellule solaire ( $I_{ph}$  et  $I_d$ ), déduit du circuit de la figure I.9 (one-diode), en prenant en considération les dépendances suivantes : [10]

- courant de saturation  $I_0$  des cellules comme fonction de la température ;
- courant  $I_{ph}$  , comme fonction de la température aussi;
- ainsi que la résistance série  $R_s$  , qui donne une forme plus précise entre le point de puissance maximale et la tension du circuit ouvert, comme étant aussi fonction de la température.

Ce modèle donne une bonne précision pour divers modules. L'ensemble des équations de ce modèle est la version simplifiée d'un tas d'équations obtenues du digramme de 'two-diode model'

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent simplifié est déduite à partir

De la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff: la somme de tous les courants entrant et sortant d'un point est égale à zéro) [11].

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I \quad (\text{I.4})$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{I.5})$$

Connaissant l'équation d'une diode

$$I_d = I_0 \left[ e^{\frac{qV_d}{nKT}} - 1 \right] \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$V_d$  : la tension de la diode

$$V_d = V + R_s I \quad (\text{I.7})$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par:

$$I_{Sh} = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{I.8})$$

on en déduit l'expression du courant fourni par une cellule solaire

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right] - \left[ \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (\text{I.9})$$

I : le courant fourni par la cellule [A].

V : la tension au borne de la cellule [V].

$I_{ph}$ : photo courant [A].

$I_0$  : courant de saturation de la diode [A].

$R_s$ : résistance série [ $\Omega$ ].

$R_{sh}$ : résistance shunt (ou parallèle) [ $\Omega$ ].

q : la charge de l'électron =  $1.602 \cdot 10^{-19}$  coulomb.

K : Constante de Boltzmann =  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k.

n : est le facteur d'idéalité de la jonction p-n, il détermine la déviation des caractéristiques des cellules à partir de la jonction idéale p-n,

T : est la température absolue de la cellule

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut négliger le courant délivré dans  $R_{sh}$ . On obtient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{I.10})$$

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T_{ref}) \left( 1 + a(T - T_{ref}) \right) \quad (\text{I.11})$$

$$I_{ph}(T_{ref}) = I_{sc}(T_{ref}) \frac{G}{G_0} \quad (\text{I.12})$$

Où G et  $G_0$ : sont les éclairagements de fonctionnement et normalisé respectivement;

a: est le coefficient de température du courant  $I_{ph}$  (mA/°C).

$T_{ref}$ : est la température aux conditions normalisées (référence).

$$a = \frac{\left( I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_{ref}) \right)}{I_{sc}(T_{ref}) (T_2 - T_{ref})} \quad (\text{I.13})$$

$I_0$  est le courant de saturation ; qui lui aussi est une fonction des températures  $T$  et  $T_{ref}$ . Ce courant est donné par:

$$I_0 = I_{0(T_{ref})} \left( T/T_{ref} \right)^3 e^{\frac{-qE_g}{nK \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}} \quad (\text{I.14})$$

Où:

$$I_{0(T_{ref})} = \frac{I_{sc(T_{ref})}}{\left( \frac{qV_{oc(T_{ref})}}{e^{nKT_{ref}}} - 1 \right)} \quad (\text{I.15})$$

$I_{sc(T_{ref})}$  : le courant de court circuit de la cellule à la température ambiante  $T$ ;

$E_g$  : est l'énergie de la bande interdite du matériel de la cellule en ev (1.16eV pour le silicium et 1.75ev pour l'amorphe);

$V_{oc(T_{ref})}$  : est la tension du circuit ouvert à la température  $T$ .

L'obtention de l'expression de  $R_s$ , en fonction de  $T$  et d'autres paramètres de la cellule, est déduite à partir de la dérivation de l'équation (I.10) ; ce qui donne l'équation (I.16) :

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{oc}} - \frac{1}{X_V} \quad (\text{I.16})$$

$$X_V = I_{0(T_{ref})} \frac{q}{nKT_{ref}} e^{\frac{qV_{oc(T_{ref})}}{nKT_{ref}}} \quad (\text{I.17})$$

### I.6.2 la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque:

La figure I.10 montre la caractéristique courant-tension (I-V) pour une cellule photovoltaïque. Ainsi, si une résistance variable  $R$  aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique I-V de la cellule avec la courbe de la charge. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente  $1/R$ . par conséquent, la résistance  $R$  est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe. Le courant  $I$  varie peu en fonction de la tension (il est presque égale au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance  $R$  est grande, la cellule fonctionne dans la région CD. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant  $I$ : la cellule se

comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide. Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température.

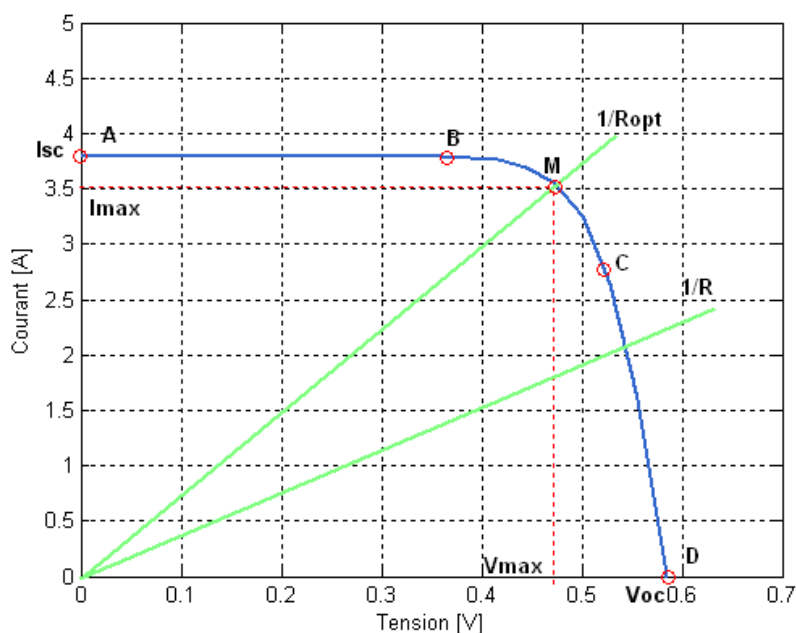


Figure I.10 Caractéristique tension-courant d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule peut être caractérisée par les paramètres principaux, présentés aussi dans la figure I.10:

- **le courant de court circuit**,  $I_{sc} = I_{ph}$ , est proportionnel à l'éclairement et représente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court circuit ( $V = 0$ ).
- **la tension à vide** correspond à la chute de tension sur la diode, quand elle est traversée par le photo courant  $I_{ph}$  ( $I_d = I_{ph}$ ),  $I = 0$ . cette tension peut être exprimée mathématiquement par:

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_t \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{I.18})$$

Où  $V_t = \frac{nKT}{q}$  est la tension thermique et T est la température absolue de la cellule.

- **le point de puissance maximale** est le point de fonctionnement M ( $V_{max}, I_{max}$ ) dans la figure I.10, pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale.
- **le rendement maximal** est le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} V_{max}}{AG} \quad (\text{I.19})$$

où  $P_{in}$  est la puissance incidente,  $G$  est l'éclairement et  $A$  est la surface de la cellule.

- **Le facteur de forme** est le rapport entre la puissance délivrée à la charge et le produit de  $I_{sc}$  et  $V_{oc}$ :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{I.20})$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7. Il diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [12].

### I.6.3 Facteurs limitation de rendement d'un générateur photovoltaïque:

La quantité d'énergie produite par un système photovoltaïque dépend fortement, des caractéristiques électromécaniques de chacun des éléments du système, de la surface des champs capteur, de la quantité d'énergie solaire incidente sur la surface de la partie captation de ce système, de la température ambiante qui influe aussi sur la réponse de ce type de système [2].

#### I.6.3.1 Influence de la résistance série $R_s$ :

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [2].

#### I.6.3.2 Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$ :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle  $R_{sh}$ . L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si :  $R_{sh} = 10^2$  à  $10^4 \Omega$ .

$R_{sh}$  augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [2].

## I.7 LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque [13].



Figure I.11 Exemples de modules photovoltaïques.

### I.7.1 Association des modules photovoltaïques :

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [13].

#### I.7.1.1 Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [13].

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée. Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent

devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse importante et la puissance qu'elle devra dissiper sera trop grande. En fonctionnant ainsi, on provoque l'échauffement de la cellule (*hot spot*), ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (*by-pass*) au niveau de chaque module (Figure I.12).

La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. En court-circuit, la puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à l'ordre du watt, ce qui évite toute destruction. La diode parallèle est inopérante en fonctionnement normal et ne diminue donc pas le rendement des modules [13].

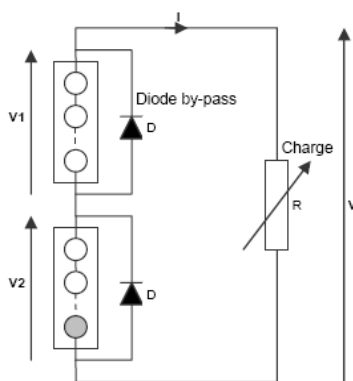


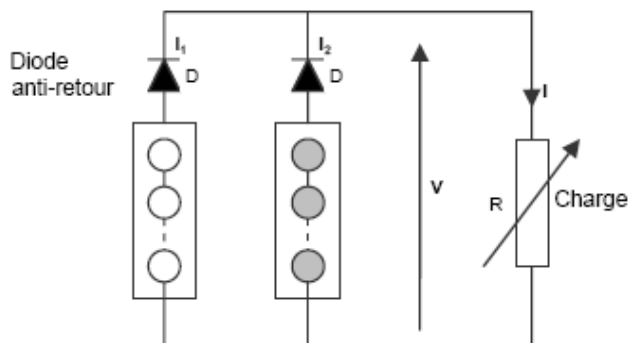
Figure I.12 Modules en série avec diodes *by-pass*.

#### 1.7.1.2 Association en parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante.

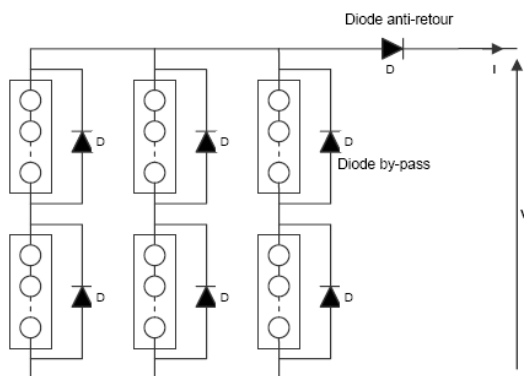
Bien que la cellule puisse dissiper un courant important sans être altérée, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour. Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. Cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche. En effet, cette diode est traversée, en fonctionnement normal, par le courant de la branche, ce qui introduit une perte de puissance permanente [13].



**Figure I.13** Modules en parallèle avec diodes anti-retour.

### 1.7.1.3 Association série-parallèle :

Généralement, on utilise un montage série-parallèle qui nous permet de régler à la fois la tension et le courant selon les caractéristiques de la charge. Les cellules photovoltaïques sont associées entre elles en série, et les modules sont associés en parallèle. On utilise alors les diodes by-pass pour éviter que les cellules les moins performantes deviennent consommatrices, et les diodes anti-retour pour éviter le retour du courant des autres modules lorsqu'un module est mal ensoleillé [13].



**Figure I.14** Montage série-parallèle de modules photovoltaïques.

## I.8 CARACTERISTIQUE TENSION-COURANT ET PUISSANCE-TENSION SOUS DIFFERENTES CONDITIONS CLIMATIQUES :

### I.8.1 Influence de l'éclairement :

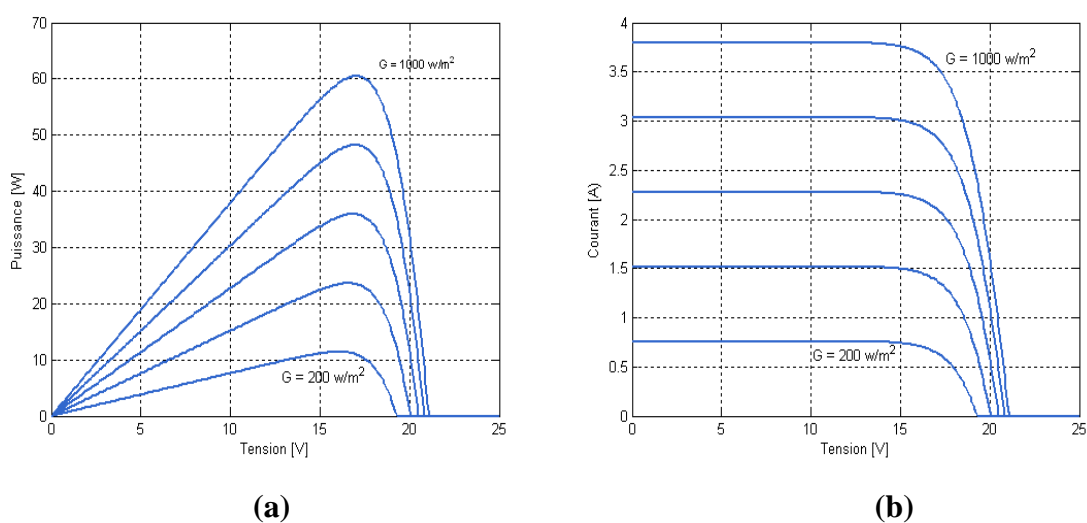
La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  correspond, en fait, à la chute de tension dans la jonction PN, lorsqu'elle est traversée par le photo-courant  $I_{ph}$ .

Nous avons vu que le courant produit par la photopile ( $I_{ph}$ ) est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que:

[8]

- La puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement;
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension

Les figures I.15 (15.a et 15.b) confirment la proportionnalité du courant  $I_{ph}$  ( $I_{sc}$ ) et de la puissance maximale de fonctionnement PPM généré par le flux lumineux sur le module PV. Aussi, on observe la faible variation de la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  du module avec l'éclairement  $G$ .

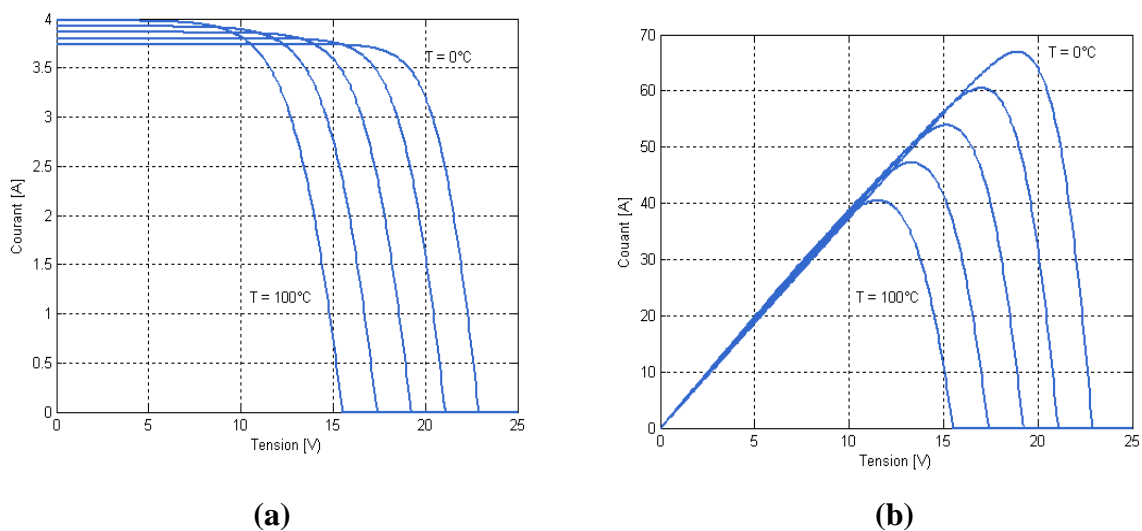


**Figure I.15** Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairagements.

a) courant-tension b) tension-puissance

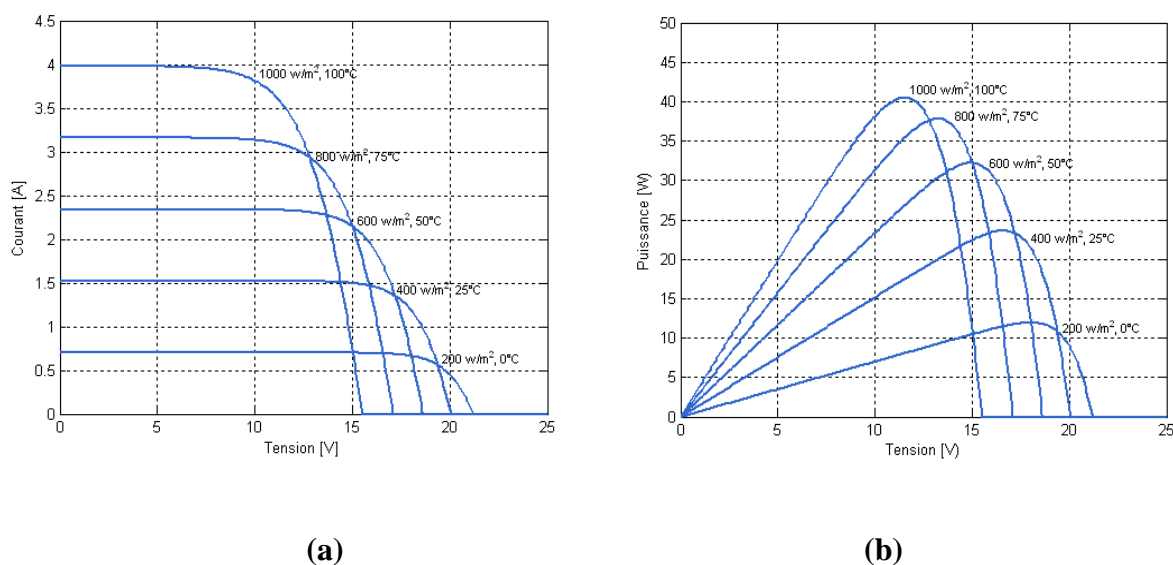
**I.8.2: Influence de la température :**

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque (figure I.16). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ 0,025 mA/cm<sup>2</sup>/°C alors que la tension décroît de 2,2 mV/°C/cellule. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ 0,4%/°C. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque [8].



**Figure I.16** Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairagements.  
a) courant-tension b) tension-puissance

**I.8.3 Influence simultanée de l'éclairément et de la température :**



**Figure I.17** Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairagements et températures. a) courant-tension b) tension-puissance

### ❖ Influence du facteur d'idéalité :

Théoriquement, le facteur d'idéalité  $n$  des cellules poly-cristallines prend une valeur entre 1 et 2, tout en étant près de la valeur de 1 par rapport aux courants élevés, il augmente jusqu'à la valeur 2 pour des courants faibles. Pour un fonctionnement normal, il est généralement égal à 1.3. La courbe de la figure I.18, affirme la notification précédente [14].

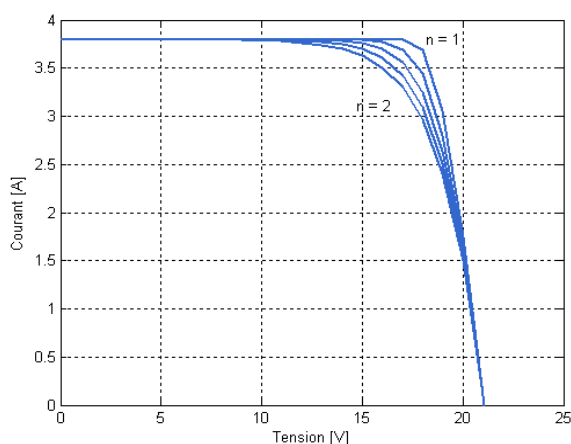


Figure I.18 Influence de facteur d'idéalité.

## I.9 CLASSIFICATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE :

### I.9.1 Système photovoltaïque autonomes :

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif [15].

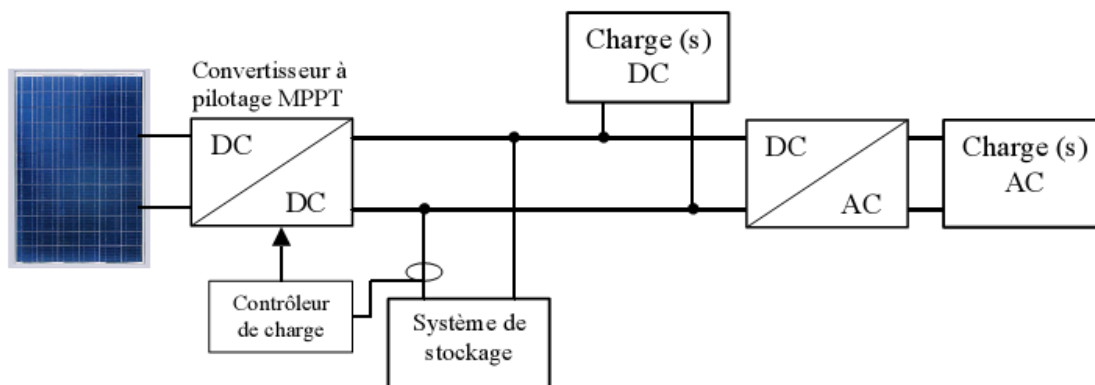


Figure I.19 Installation photovoltaïque autonome.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits [16].

### I.9.2 Système photovoltaïque raccordé à un réseau :

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend inopérant le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins [15].

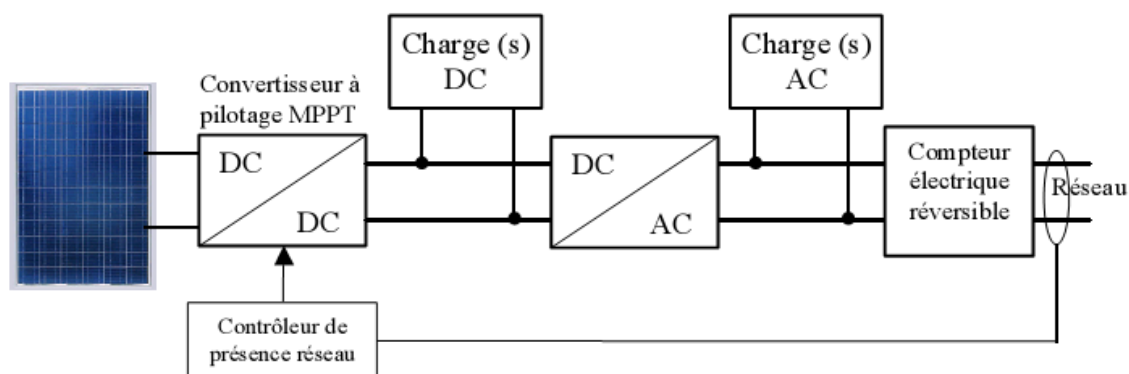


Figure I.20 Installation photovoltaïques couplée au réseau.

## I.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE GPV :

### I.10.1 Avantages : [3]

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être

dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### **I.10.2 Inconvénients : [3]**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28 %. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

### **I.11 CONCLUSION :**

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque. Aussi, que les principes de fonctionnement de ces éléments, ce qui permet d'introduire les méthodes de poursuite de point de puissance maximale, chose qu'on va présenter dans le chapitre II.

# CHAPITRE II

---

**Technique MPPT**  
(La poursuite du point  
de puissance maximale)



# *Technique MPPT*

## *(La poursuite du point de puissance maximale)*

### **II.1 INTROUCTION :**

Aujourd'hui, compte tenu du prix élevé des générateurs PV et du faible rendement des dispositifs de conversion photons-électrons mis en oeuvre (entre 12 et 17 %), le développement de cette énergie à grande échelle nécessite avant tout une amélioration de ces systèmes de telle sorte qu'ils puissent fonctionner, à tout instant, à leur puissance maximale.

En effet, les études en simulation dans le chapitre précédent ont bien montré que l'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température mais aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV.

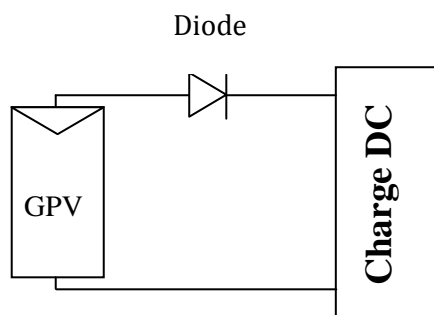
Pour remédier à cette dernière influence, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit les conditions climatiques. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature Recherche du Point de Puissance Maximale ou bien Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT).[9]

Dans ce chapitre, nous allons exposer succinctement les différentes architectures de la chaîne de conversion PV , MPPT, ainsi que le principe de la poursuite du PPM. Ensuite nous allons consacrer une partie de ce chapitre sur une méthode de commande plus couramment utilisée de nos jours dite Perturbation et observation (P&O).

### **II.2 LA CONNEXION DIRECT GPV-CHARGE COMME MODE DE TRANSFERT DE PUISSANCE : [17]**

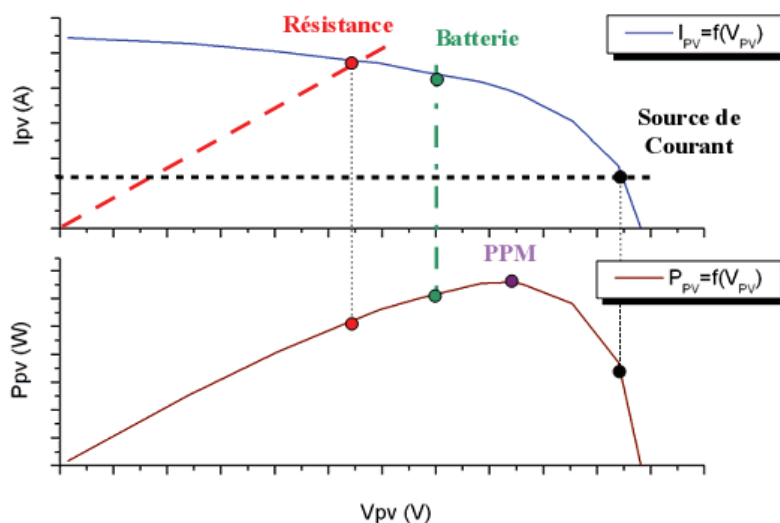
La connexion direct du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu, figureII.1.

Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion direct au générateur de puissance. En effet, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.



**Figure II.1** Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance direct entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique du GPV et celle de la charge. Comme la caractéristique de la figure montre, la puissance transmise directement à une batterie ou charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectuée à la puissance maximale  $P_{MAX}$  que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de  $V_{opt}$ .



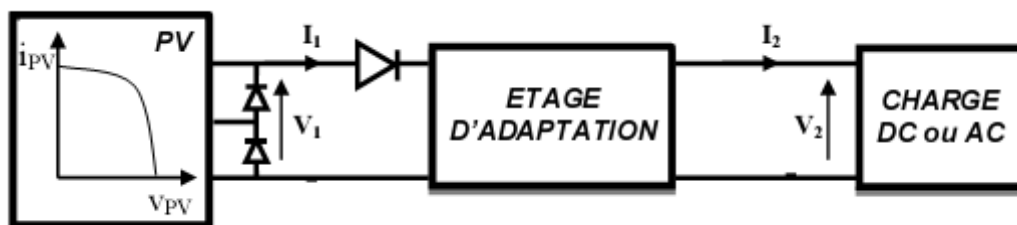
**Figure II.2** caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion direct GPV-Charge.

### II.3 LA CONNEXION GPV-CHARGE VIA UN ETAGE D'ADAPTATION :

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque ( $V_{oc}$ ). Alors, aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure.II.3 est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge [1].

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire.
- Introduire une isolation galvanique.
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative.



**Figure II.3** Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT qui effectue une recherche permanente du PPM.

## II.4 PRINCIPE DE LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL :

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure II.4 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV correspond à la puissance maximale ( $P_{max}$ ) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

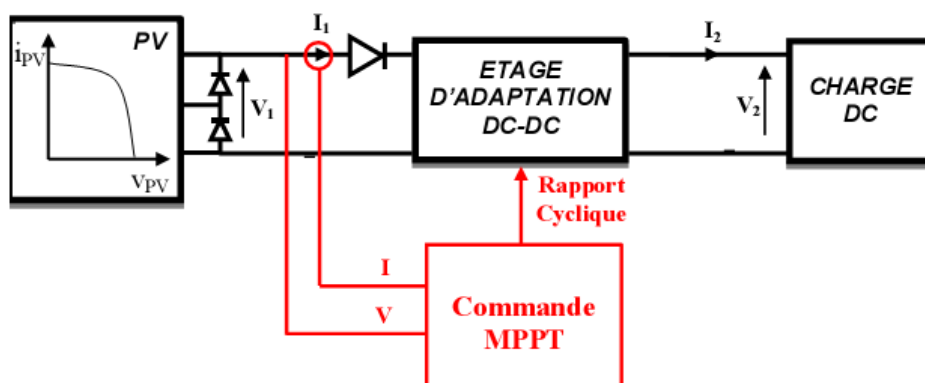
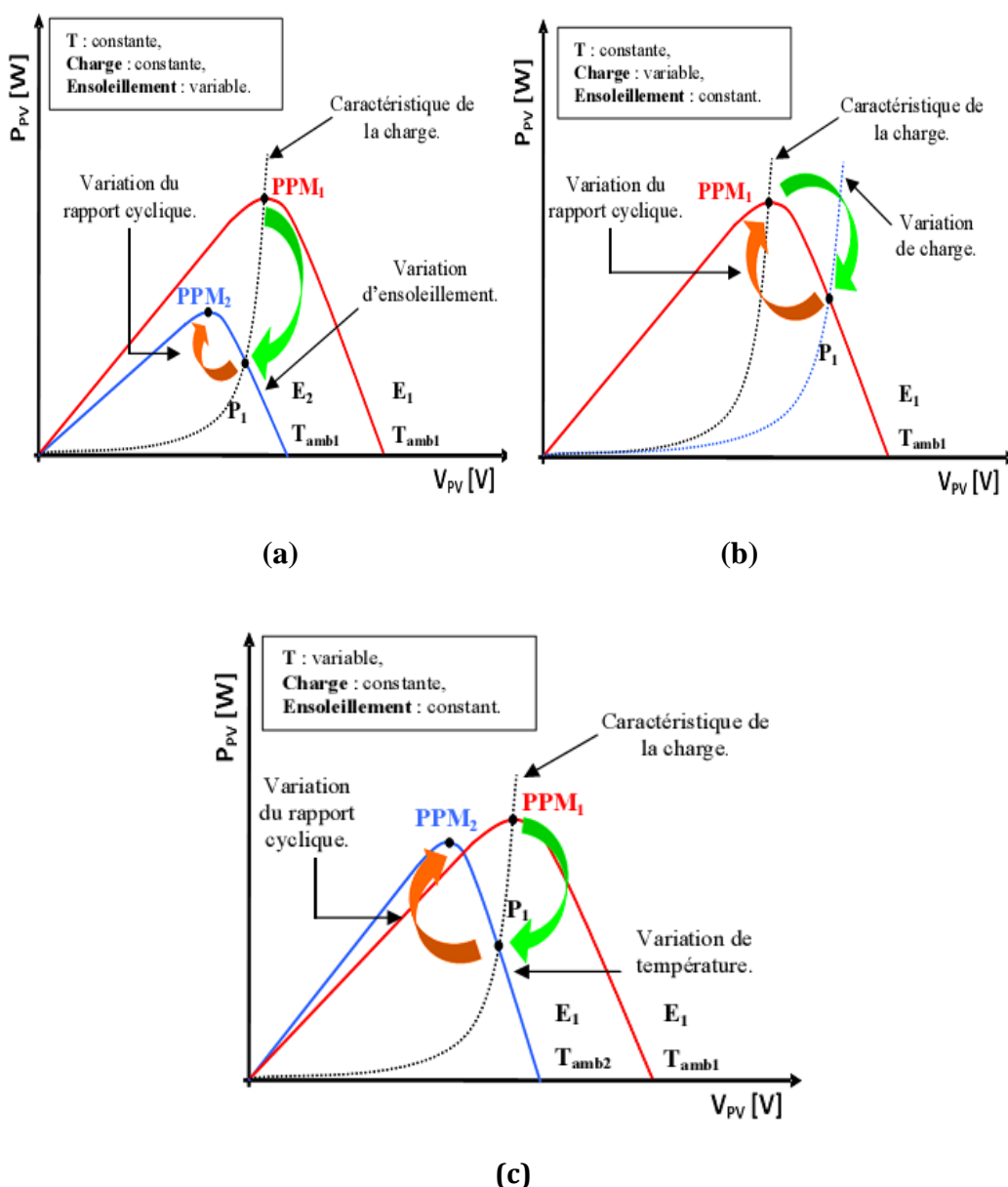


Figure II.4 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure II.5 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal  $PPM_1$  vers un nouveau point  $P_1$  de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum  $PPM_2$ . Pour une variation de la charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut

retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV [1].



**Figure II.5** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

- a) suite à une variation d'ensoleillement,
- b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température.

**II.5 CRITERES D'EVALUATION D'UNE COMMANDE MPPT :**

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance effectivement  $P$  délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons  $\eta_{MPPT}$ , permet de mesurer l'efficacité de la commande. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad (\text{II.1})$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre ( $\eta_{MPPT}$ ). D'autres critères, présentés dans la suite, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande [1].

- ***Simplicité et coût*** : complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implantation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré [1].
- ***Réponse dynamique*** : Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible [1].
- ***Flexibilité*** : Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux des différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse [1].
- ***Compétitive sur une large gamme de puissance*** : Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM

généralisé par un module PV, quelque soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance [1].

## II.6 RENDEMENT:[18]

Pour avoir une idée plus précise sur les origines des pertes dans une chaîne de conversion solaire ; des rendements de chaque partie de la chaîne ont été définis. Pour cela, le rendement total de celle-ci a été décomposé en divers types de rendements reliés spécifiquement à chaque partie de la chaîne.

Le rendement maximum de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté  $\eta_{PV}$  est défini selon l'équation I.19.

Le rendement de la commande MPPT est donné par l'équation II.1.

Enfin, le rendement du convertisseur noté  $\eta_{conv}$  généralement fourni par les documents constructeurs est défini par l'équation (II.2), en notant  $P_s$  la puissance délivrée en sortie du convertisseur.

$$\eta_{CONV} = \frac{P_s}{P_e} \quad (\text{II.2})$$

Le rendement total de la chaîne de conversion (II.3) peut être défini le produit de ces trois rendements précédemment définis.

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{CONV} \quad (\text{II.3})$$

## II.7 DIFFERENTS TYPES DE COMMANDES MPPT : [19]

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

- Commande MPPT à implantation analogique. Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis-à-vis de son équivalente numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire.

- Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor).

- Commandes MPPTs à implantation numérique faisant intervenir que des composants digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande. Ainsi, parmi les nouvelles MPPTs publiées récemment, on peut cité la commande MPPT de type numérique proposé par M. Matsui. Celle ci est basé sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un convertisseur de type boost. En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction du son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique permettant de faire la meilleure adaptation source-charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifeste lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement.

Ces commandes numériques se basent sur des algorithmes de contrôle adaptatifs, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale. Ainsi, nous pouvons distinguer entre plusieurs algorithmes :

- l'algorithme des descentes connu sous Hill-Climbing qui est commun aux deux méthodes d'optimisation suivantes : méthode de perturbation et observation (P&O) et méthode de la conductance croissante,

- l'algorithme de la logique flou,

- l'algorithme de réseau de neurones.

A partir de ces nombreuses techniques et méthode de recherche et d'ajustement du MPP. Nous allons développer dans la suite l'algorithme MPPT-P&O.

## II.8 LA COMMANDE MPPT PERTURBATION PUIS OBSERVATION :

### II.8.1 Principe des commandes "Perturbation et Observation" (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 II.6, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [1].

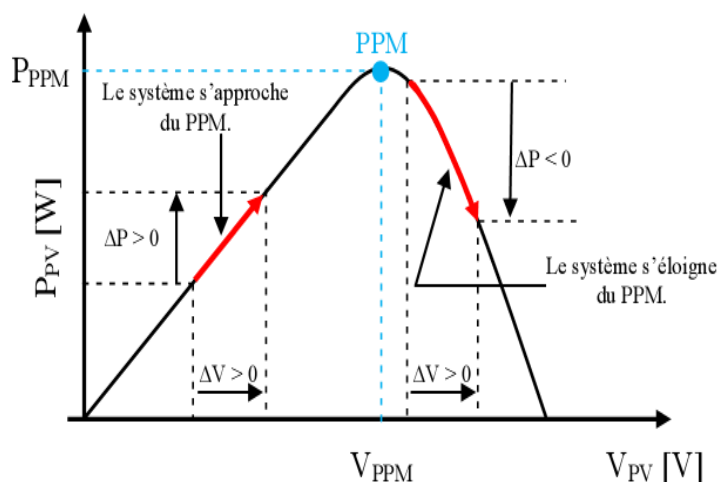


Figure II.6 Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau solaire.

### II.8.2 Structure de l'algorithme P&O :

La figure II.7 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.

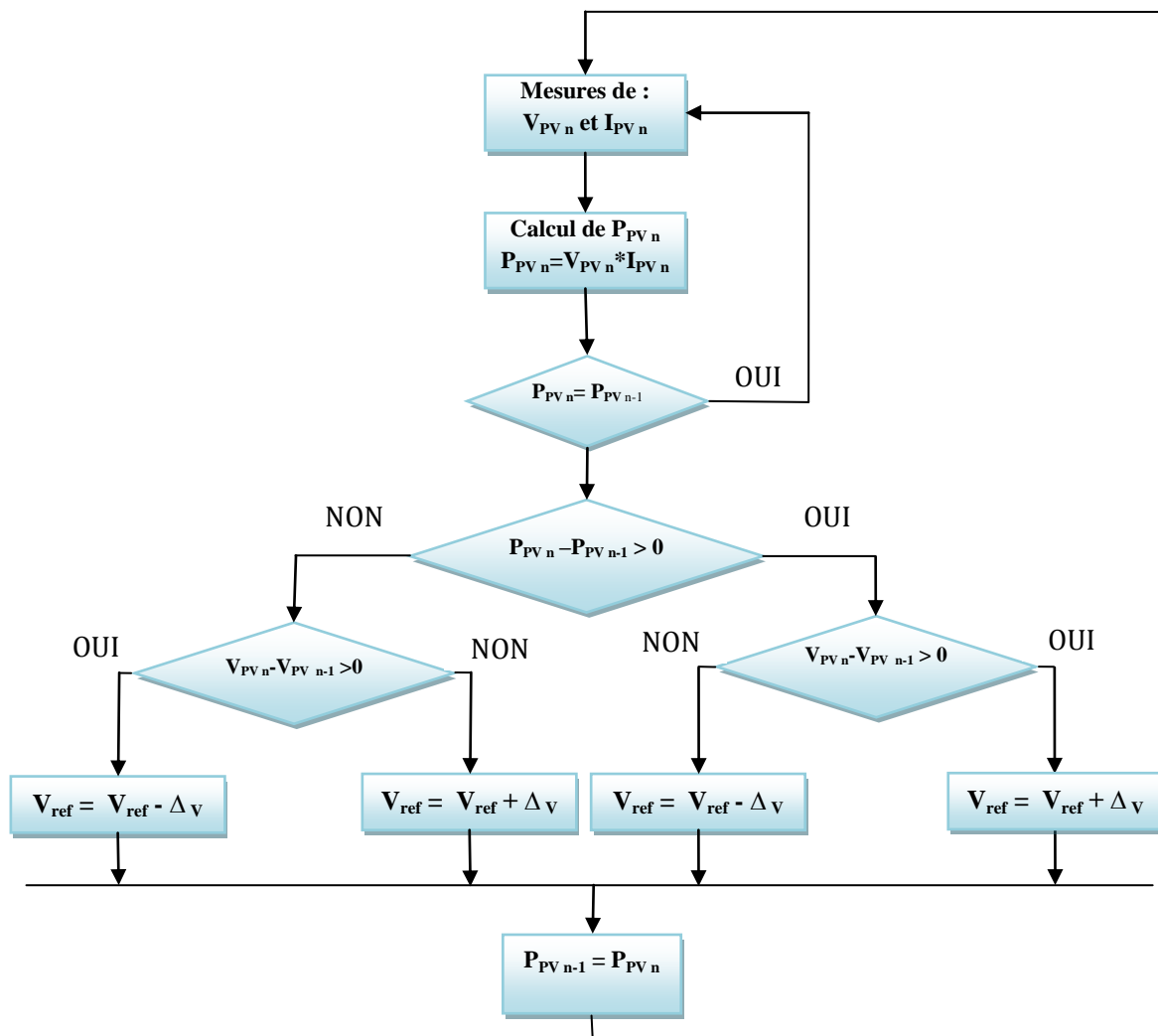


Figure II.7 Algorithme de la méthode P&O.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par 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 valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure II.8.

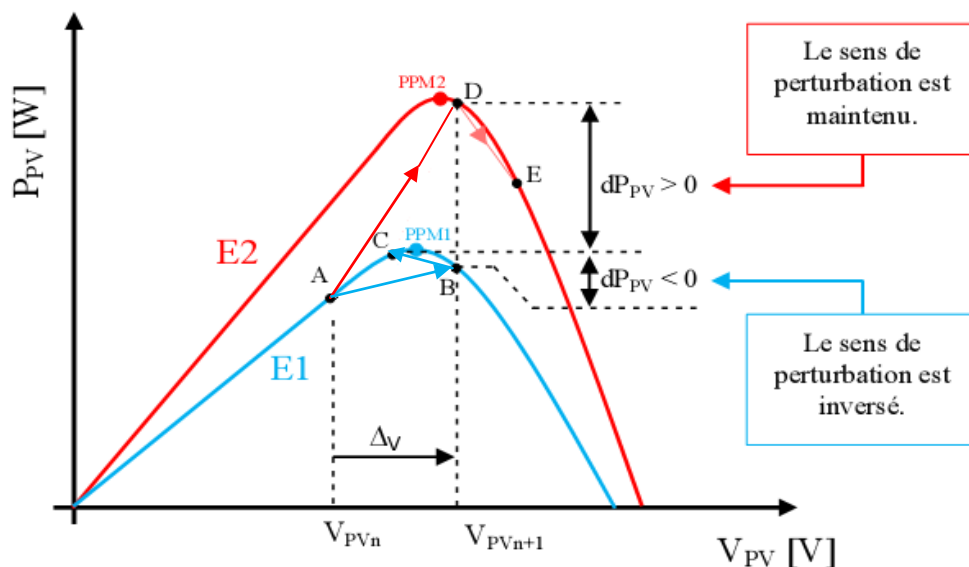


Figure II.8 Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. suite à une perturbation de tension de valeur  $\Delta V$ , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. on peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques  $P(V)$  du module de  $E_1$  à  $E_2$ ), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non- optimisation de la puissance momentanée.

Cependant, dans le pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables de fortes lacunes au niveau de la commande [1].


**II.9 CONCLUSION :**

Dans le présent chapitre nous avons abordé les bases de poursuite la puissance maximale. Après avoir donné un aperçu sur les différents modes de connexion du GPV- Charge et types de commandes MPPT. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'étude de l'algorithme P&O de types numérique.

# CHAPITRE III

---

## Optimisation par Essaim Particulaire (SWARM)



# *Optimisation par Essaim Particulaire (SWARM)*

## **III.1 INTRODUCTION :**

La résolution de problèmes d'optimisation est devenue un sujet central en recherche opérationnelle, le nombre de problèmes d'aide à la décision pouvant être formalisée sous la forme d'un problème d'optimisation.

Les métaheuristiques sont une famille d'algorithmes stochastiques destinés à résoudre des problèmes d'optimisation. Leur particularité réside dans le fait que celle-ci sont adaptables à un grand nombre de problèmes sans changement majeurs dans leurs algorithmes [20].

Ce chapitre présente l'intérêt particulier à une méthode métaheuristique apparue dernièrement : la méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP), qui constitue le sujet principal de notre travail.

## **III.2 OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES:**

### **III.2.1 Origines :**

L'**optimisation par essaim de particules** (*Particle Swarm Optimization* (PSO) en anglais) est une méthode d'optimisation stochastique, pour les fonctions non-linéaires, basée sur la reproduction d'un comportement social et développée par le Dr. EBERHART et le Dr. KENNEDY en 1995.

L'origine de cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de REYNOLD, HEPPNER ET GRENANDER. Ces simulations ont mis en valeur la capacité des individus d'un groupe en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage.

D'autre part, ces simulations ont également révélé l'importance du mimétisme dans la compétition qui oppose les individus à la recherche de la nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersés de façon aléatoire dans un espace de recherche, et dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont alors chercher à le reproduire.

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus.

Les essaims de particules sont essentiellement utilisés afin de trouver l'optimum de fonctions non-linéaires. Pour cette raison, cette méthode est utile pour optimiser l'entraînement des réseaux de neurones [21].

### **III.2.2 Principe :**

L'Optimisation par Essaim de Particules repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, que nous appellerons dès lors des particules, qui se déplacent dans l'espace de recherche et constituent, chacune, une solution potentielle.

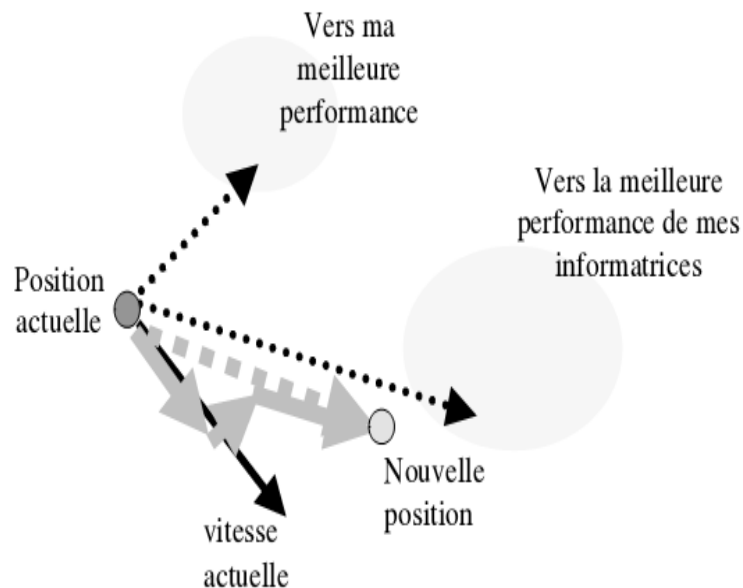
Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. A partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage.

A partir d'optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va, normalement, converger vers la solution optimale globale du problème traité [21].

### III.2.3 Principales caractéristiques :

Ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué
- il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution) [22].



**Figure III.1** Schéma de principe du déplacement d'une particule. Pour réaliser son prochain mouvement, chaque particule combine trois tendances : suivre sa vitesse propre, revenir vers sa meilleure performance, aller vers la meilleure performance de ses informatrices.

### III.2.4 Formalisation :

Un essaim de particule est caractérisé par :

- a) le **nombre de particules** de l'essaim, noté  $nb$ .
- b) la **vitesse maximale** d'une particule, noté  $\vec{V}_{max}$ .
- c) la **topologie et la taille du voisinage** d'une particule qui définissent son réseau social.
- d) l'**inertie** d'une particule, notée  $w$

e) **les coefficients de confiance**, notés  $\rho_1$  et  $\rho_2$ , qui pondèrent le comportement conservateur (la tendance à retourner vers la meilleure solution visitée) et le panurgisme (la tendance à suivre le voisinage).

Une particule est caractérisée, à l'instant  $t$ , par :

- $\vec{x}_i(t)$  : sa position dans l'espace de recherche ;
- $\vec{v}_i(t)$  : sa vitesse;
- $\vec{x}_{pbest}$  : la position actuelle de la meilleure solution par laquelle elle est passée;
- $\vec{x}_{gbest}$  : la position de la meilleure solution connue de son voisinage;
- $pbest$  : la valeur de fitness de sa meilleure solution;
- $gbest$  : la valeur de fitness de sa meilleure solution connu du voisinage.

### III.2.5 Configuration de la méthode :

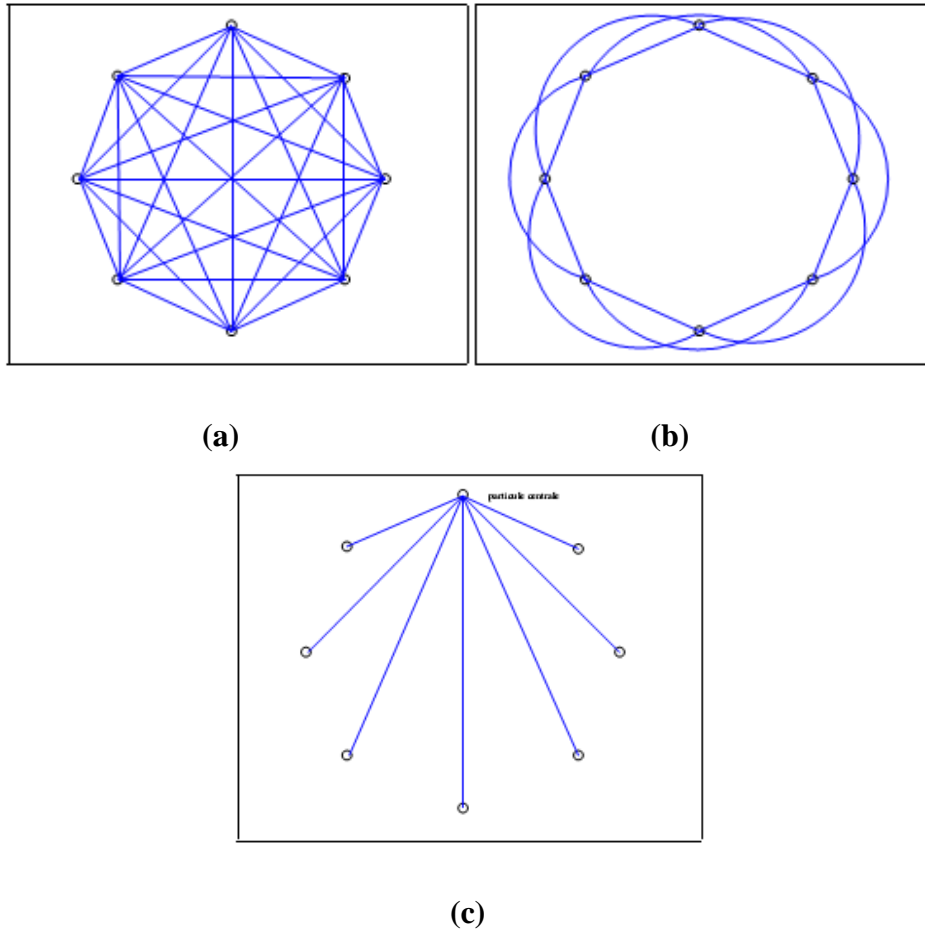
#### III.2.5.1 Nombre de particules :

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres : la taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre [21].

#### III.2.5.2 Topologie du voisinage :

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. Différents voisinages ont été étudiés (Kennedy, 1999) et sont considérés en fonction des identificateurs des particules et non des informations topologiques comme les distances euclidiennes dans l'espace de recherche :

- Topologie en étoile (Figure III.2 (a)) : le réseau social est complet, chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée  $gbest$  et communique avec les autres.
- Topologie en anneau (Figure III.2 (b)) : chaque particule communique avec  $n$  ( $n = 3$ ) voisines immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée  $pbest$ .
- Topologie en rayon (Figure III.2 (c)) : une particule "centrale" est connectée à tous les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres [23].



**Figure III.2** Trois topologies différentes. a) Etoile  
b) Anneau c) Rayon.

### III.2.5.3 Coefficient de confiance :

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. Les variables aléatoires  $\rho_1$  et  $\rho_2$  peuvent être définies de la façon suivante :

$$\rho_1 = r_1 \cdot c_1 \quad (\text{III.1})$$

$$\rho_2 = r_2 \cdot c_2 \quad (\text{III.2})$$

Où  $r_1$  et  $r_2$  suivent une loi uniforme sur  $[0...1]$  et  $c_1$  et  $c_2$  sont constantes positives déterminées de façon empirique et suivant la relation  $c_1 + c_2 \leq 4$  [18].

### III.2.5.4 Vitesse maximale et coefficient de constriction :

Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de recherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, il peut être nécessaire de fixer une vitesse maximale  $\vec{v}_{\max}$  pour améliorer la convergence de l'algorithme.

Cependant, on peut s'en passer si on utilise un coefficient de constriction introduit par Maurice CLERC- et qui permet de resserrer l'espace de recherche.

L'équation de la vitesse :

$$k = 1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\sqrt{|\rho^2 - 4\rho|}}{2} \quad (\text{III.3})$$

Avec  $\rho_1 + \rho_2 < 4$

$$\vec{v}_i(t) = k \left( \vec{v}_i(t-1) + \rho_1 \cdot (\vec{x}_{pbest} - \vec{x}_i(t)) + \rho_2 \cdot (\vec{x}_{gbest} - \vec{x}_i(t)) \right) \quad (\text{III.4})$$

Les études de SHI et EBRAHART indiquent que l'utilisation d'un coefficient de constriction donne généralement un meilleur taux de convergence sans avoir à fixer de vitesse maximale. Cependant, dans certains cas, le coefficient de constriction seul ne permet pas la convergence vers la solution optimale pour un nombre d'itérations donné. Pour résoudre ce problème, il peut être intéressant de fixer  $v_{\max} = x_{\max}$  en plus du coefficient de constriction, ce qui, selon les études de SHI et EBRAHART, permet d'améliorer les performances globales de l'algorithme [21].

### III.2.5.5 Facteur d'inertie

Le facteur d'inertie  $w$  - introduit par SHI et EBE RHART - permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de la méthode. Une grande valeur de  $w$  ( $>1$ ) est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc d'exploration globale. Par contre, une faible valeur de  $w$  ( $< 1$ ) est synonyme de faible amplitude de mouvement et donc d'exploration locale. Fixer ce facteur, revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale.

Le calcul de la vitesse est alors défini par :

$$\vec{v}_i(t) = \mathcal{W} \cdot \vec{v}_i(t-1) + \rho_1 \cdot (\vec{x}_{pbest} - \vec{x}_i(t)) + \rho_2 \cdot (\vec{x}_{gbest} - \vec{x}_i(t)) \quad (\text{III.5})$$

La position est modifiée en ajoutant une vitesse à sa position courante :

$$\vec{x}_i = \vec{x}_i(t + 1) + \vec{v}_i(t) \quad \text{(III.6)}$$

La taille du facteur d'inertie influence directement la taille de l'hyper-espace exploré et aucune valeur de  $w$  ne peut garantir la convergence vers la solution optimale.

Les études menées par SHI et EBERHART indiquent une meilleure convergence pour  $w \in [0.8, 1.2]$ . Au delà de 1.2 l'algorithme tend à avoir certaines difficultés à converger.

Enfin, il est également possible de faire diminuer le facteur d'inertie au cours du temps, un peu à la manière de la température dans un algorithme de recuit simulé (Simulated Annealing). De bons résultats ont été trouvés pour une valeur décroissant linéairement de 0.9 à 0.4 [21].

#### III.2.5.6 Initialisation de l'essaim :

La position des particules ainsi que leur vitesse initiale doivent être initialisés aléatoirement selon une loi uniforme sur  $[0..1]$ . Cependant, en ce qui concerne la position des particules, est préférable d'utiliser un générateur de séquence de SOBOL, qui est plus pertinent dans la position homogène des particules dans un espace de dimension  $n$ .

#### III.2.5.7 Critères d'arrêt :

Comme indiqué précédemment, la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération (que nous noterons  $\text{nbIter}_{\max}$ ).

L'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivant n'a pas été atteint :

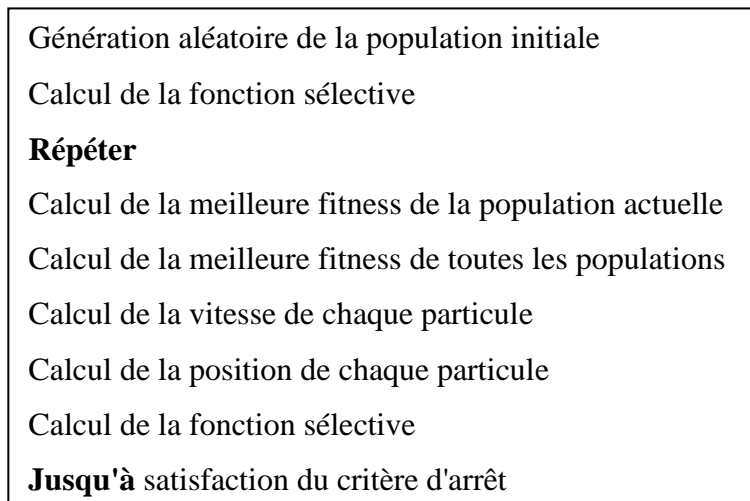
- $\text{nbIter}_{\max}$  a été atteint ;
- la variation de la vitesse est proche de 0 ;
- le fitness de solution est suffisant [21].

#### III.2.6 Les étapes de la méthode d'Optimisation "SWARM" :

L'algorithme de cette méthode peut être décrit comme suit :

- **1<sup>ère</sup> étape** : Initialisation des coefficients  $c_1$  et  $c_2$ , le coefficient d'inertie ( $w$ ).

- **2<sup>ème</sup> étape** : la création de la population initiale aléatoirement et le calcul de la fitness de chaque particule ( $P_{best}$ ) : la meilleure position de la particule  $i$  dans la population actuelle; ( $P_{gbest}$ ) : la meilleure position dans toutes les populations (la meilleure des meilleures).
- **3<sup>ème</sup> étape** : calcul de la nouvelle vitesse et nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules (III.5) et (III.6).
- **4<sup>ème</sup> étape** : calcul de la meilleure fitness de la population actuelle et comparer par la précédente pour trouver la meilleure de toutes les populations ( $P_{gbest}$ ).
- **5<sup>ème</sup> étape** : incrémentation du nombre d'itération  $t = t+1$ .
- **6<sup>ème</sup> étape** : si un critère d'arrêt est satisfait aller à la 7<sup>ème</sup> étape. Autrement, aller à la 3<sup>ème</sup> étape.
- **7<sup>ème</sup> étape** : la position enregistrée dans ( $P_{gbest}$ ) est la solution optimale [24].



**Figure III.3** Optimisation par Essaim de Particule

Ces algorithmes peuvent être résumés aux opérations indiquées sur l'organigramme de la figure III.4

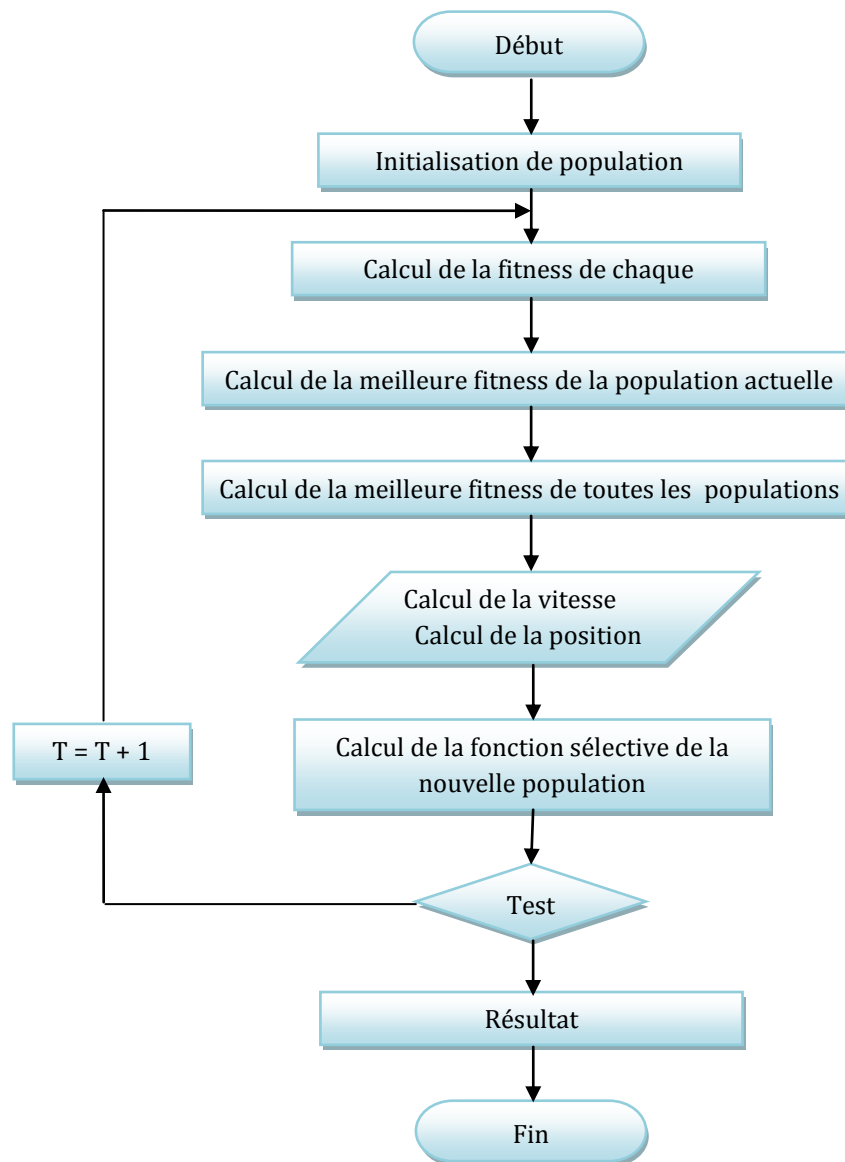


Figure III.4 Organigramme de PSO

### III.3 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, un intérêt particulier a été porté à la méthode d'optimisation par essaim particulaire. Cette jeune méthode, inspirée des déplacements d'animaux en essaims, a rencontré un vif succès depuis sa création. Le chapitre suivant va mettre en œuvre d'une manière pratique l'application de PSO à l'optimisation d'un système photovoltaïque.

# CHAPITRE IV

---

*Application,  
résultats et discussion*



# *Application, résultats et discussion*

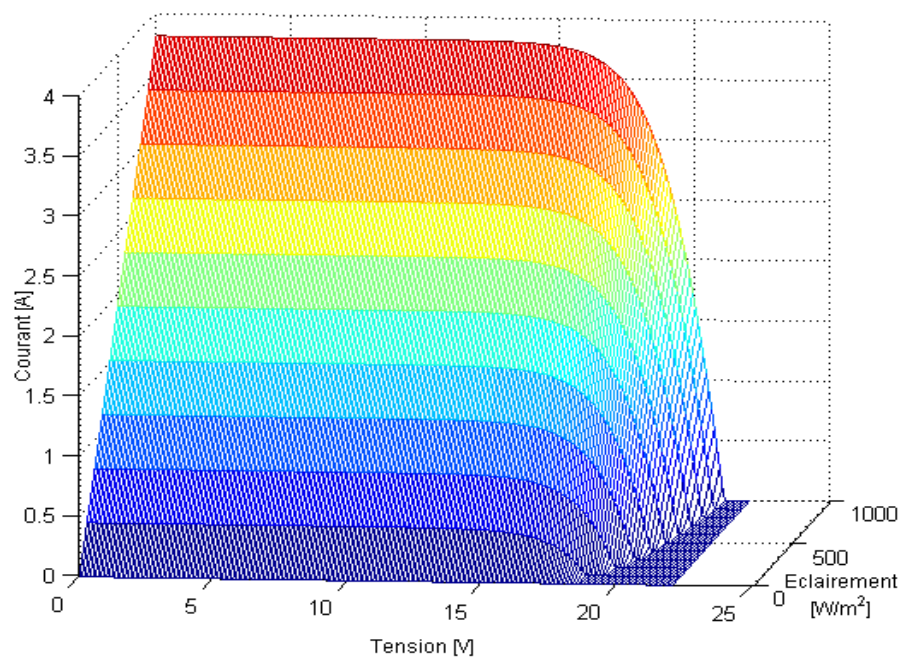
## **IV.1 INTRODUCTION**

En raison de changement du point de puissance maximale de fonctionnement en fonction de l'éclairement et de la température (conditions climatiques) une grande importance est donnée au suiveur du point de puissance maximum. Ainsi, les techniques heuristiques basées sur le concept de l'optimisation sont de nos jours de grande importance en raison de leur adaptabilité avec les systèmes photovoltaïques [11].

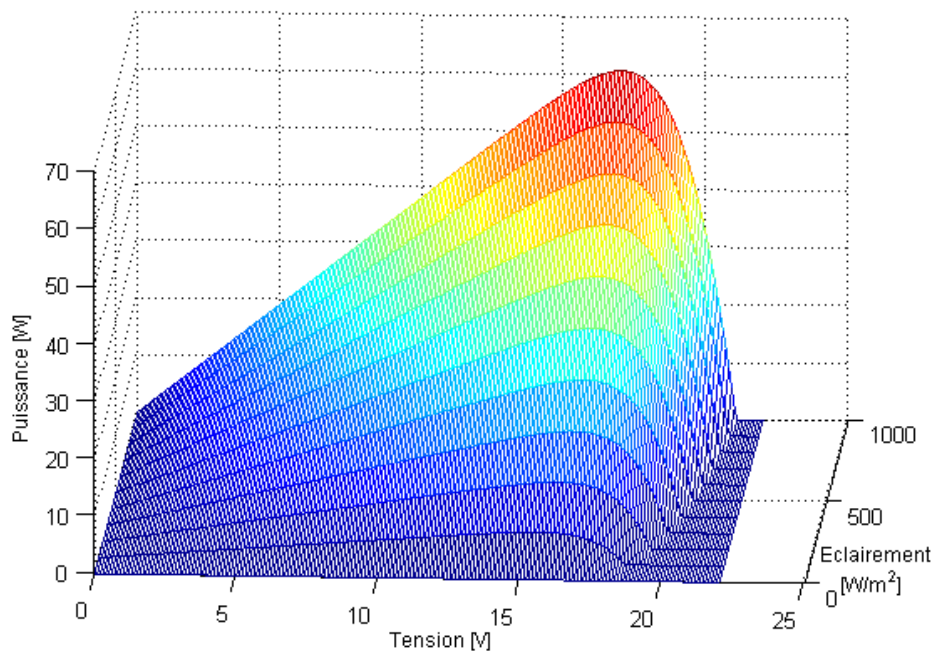
Dans ce contexte, l'objectif de ce chapitre est l'élaboration d'une structure de commande MPPT basé sur PSO (MPPT-PSO), afin d'atteindre le PPM quelques soient les conditions météorologiques. On donne les observations, les interprétations des résultats et on termine par les conclusions qu'on peut tirer à partir de ces résultats.

De nos jours, les techniques d'optimisation sont appliquées progressivement dans le domaine de l'engineering en raison de leur utilité. Parmi ces techniques, nous trouvons celle de l'algorithme d'Optimisation par Essaim de Particules qui donne des résultats plus rigoureux en comparaison avec les autres techniques d'optimisation. En jetant un regard rapide sur les caractéristiques courant-tension I-V (figure IV.1-a) et puissance-tension P-V (figure IV.1-b) des rayons photovoltaïques d'un module solaire référencé MSX60 qui est fait l'objet de notre étude expérimentale. Un module est constitué de 36 cellules en séries polycristallin dont les caractéristiques sont données dans l'annexe [A].

Nous constatons clairement la dépendance de la puissance générée d'un système photovoltaïque de l'éclairement et de la température.



(a)



(b)

**Figure IV.1** Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairements.

a) courant- tension b) tension-puissance.

Dans ce qui suit, nous présentons une application d'un algorithme P&O et PSO continu sur un système photovoltaïque, ce qui nous permettra de suivre instantanément le

point de puissance maximum. Ce dernier change instantanément avec l'éclairement et la température, ce qui implique un ajustement continu de la tension de sortie pour réaliser le transfert de la puissance maximum à la charge. La justification de cette application est due au fait que les caractéristiques courant-tension et puissance-tension (Figure IV.1) sont non linéaires en raison d'un côté de la non linéarité des systèmes photovoltaïques, et en raison de la variation instantanée de la température et l'éclairement de l'autre côté, ce qui fait qu'en réalité les deux caractéristiques précédents possèdent beaucoup de fluctuations.

#### IV.2 TECHNIQUE MPPT-PSO:

On a déjà présenté l'organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O) dans le chapitre II. Alors, on va faire une description générale du technique PSO et on illustre dans l'annexe l'organigramme simplifié qu'on a écrit dans *l'Environnement MATLAB*.

Le meilleur choix de différents paramètres de notre algorithme sont :

$c_1 = 0.5$ ,  $c_2 = 0.5$ , Le nombre des particules est 20, le nombre de générations est 30 et le facteur d'inertie a été gardé entre  $w_{min} = 0.4$  et  $w_{max} = 0.9$  par la fonction suivant :

$$w(it) = w_{max} - \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{it_{max}} \right) * it \quad (IV.1)$$

Notre objectif est cherche de solution optimale en termes des variables (courant et tension) qui donne la puissance maximale sous différents condition climatiques. On *peut donc dire* que la fonction d'objective est représentée par la puissance.

Pour optimisée (vers la maximisation) la fonction d'objective F (la puissance) on utilise la fonction de fitness comme suit :

$$fitness = \begin{cases} P(V, I)/P_{max} & , \text{ si } P_{max} > P \\ 1 & , \text{ si non} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Les étapes de technique MPPT-PSO pour trouver la valeur globale maximale ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ) sont les suivantes :

##### **Etape 1 : Introduction de toutes les données**

Introduire toutes les données concernant le modèle du module photovoltaïque choisi, les limites des tensions et courants et les choix de différents paramètres de PSO (le nombre d'itération, le nombre des particules, le coefficient d'inertie  $w$  et l'intensité d'attraction  $c_1$  et  $c_2$ ).

**Etape 2 : La population initiale**

La création aléatoire de l'essaim initial, cet essaim est un ensemble des particules contient les valeurs acceptables de variables du problème (I, V).

**Etape 3 : évaluation de la fonction objective :**

Calculer la position pour chaque particule par la fonction fitness d'évaluation qui représente dans notre cas la puissance du module PV ( $P = V \cdot I$ ).

**Etape 4 :** calcul de la meilleure position de chaque particule et la meilleure position dans toutes les générations.

On trouve les deux meilleures positions, la première c'est la meilleure position de chaque particule ( $V_{ibest}$ ,  $I_{ibest}$ ). L'autre, la meilleure position de toutes les générations jusqu'ici ( $V_{gbest}$ ,  $I_{gbest}$ ).

**Etape 5 : la modification de la vitesse et de la position**

Calcule les nouvelles vitesses et positions de chaque particule par les équations III.5 et III.6.

**Etape 6 : Vérification du critère d'arrêt**

Si un critère d'arrêt est satisfait passer à l'étape 7, autrement aller à l'étape 3.

**Etape 7 : Affichage**

Enregistrement des valeurs optimales  $P_{opt}$  ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ).

**IV.3 TESTS ET APPLICATIONS :****IV.3.1 1<sup>er</sup> test : Comparaison entre MPPT-PSO et P&O:**

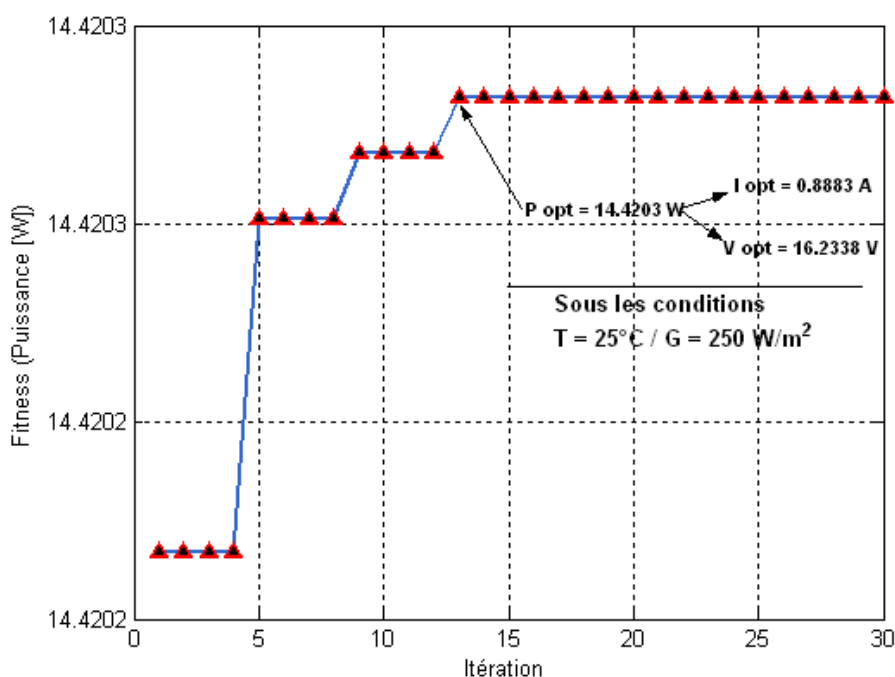
Dans cette section, notre objectif est de réaliser une comparaison directe entre les deux types MPPT-PSO et P&O (MPPT classique) sous les mêmes conditions climatiques de l'éclairement et de la température.

Les résultats d'optimisation de deux techniques sont reportés sur *Les tableaux* IV.1 IV.2 IV.3.

Nous voyons clairement la variation et changement du MPP avec l'ensoleillement et la température ou bien les deux simultanément (Figure IV.3, IV.4, IV.5). Dans chaque courbe le point de puissance maximale *sera indiquée par* le signe "o".

Les résultats de ces problèmes d'optimisation montrent que notre technique (MPPT-PSO) offre la possibilité de résoudre avec une grande précision et un temps de réponse rapide par rapport les techniques traditionnelles (perturbation et observation dans notre cas).

La convergence de la solution optimale en utilisant l'Optimisation par *Essaim de Particules* (OEP) est illustrée dans la figure IV.2 où seulement environ 13 itérations ont été nécessaires pour trouver la solution optimale.



**Figure IV.2** La convergence par (OEP) pour  $T = 25^\circ\text{C}$  et  $E = 250 \text{ w/m}^2$ .

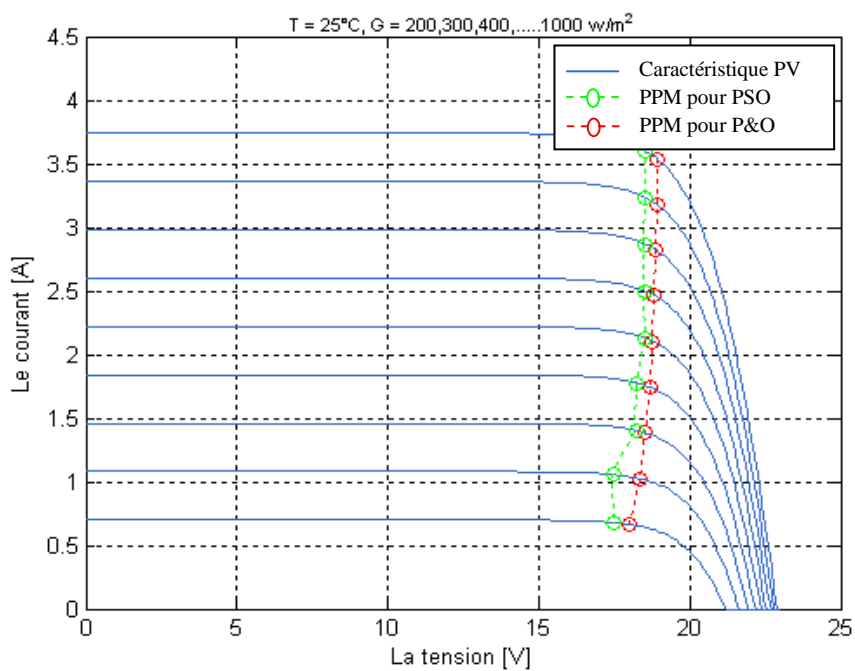
#### IV.3.1.1 Effet de l'éclairement :

Nous allons tester les techniques pour un changement de l'ensoleillement de  $100 \text{ w/m}^2$  à  $1000 \text{ w/m}^2$  dont la température est maintenue constante  $25^\circ\text{C}$ .

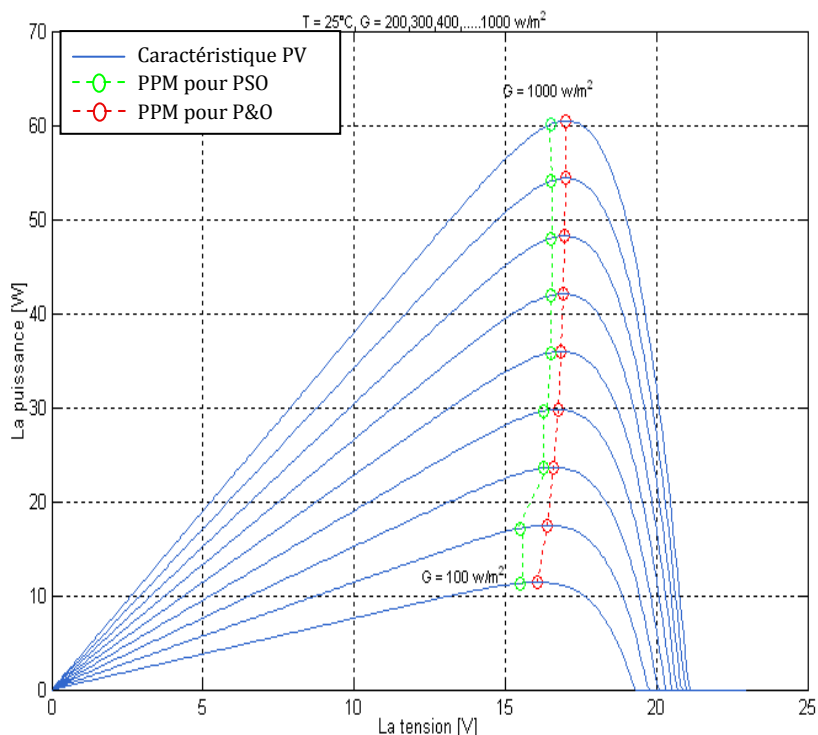
**Table IV.1** Résultats de l'optimisation avec différents éclairement et température

constante égale à 25°.

Eclairment [ $w/m^2$ ]	$V_{OPT}$ [V]		$I_{OPT}$ [A]		$P_{max}$ [w]	
	<i>PSO</i>	<i>P&amp;O</i>	<i>PSO</i>	<i>P&amp;O</i>	<i>PSO</i>	<i>P&amp;O</i>
<b>100</b>	15.4117	14.5000	0.3543	0.3687	<b>5.4605</b>	5.3455
<b>300</b>	16.3797	15.5000	1.0664	1.1063	<b>17.4667</b>	17.1479
<b>500</b>	16.7355	16.2500	1.7784	1.8206	<b>29.7619</b>	29.5848
<b>600</b>	16.8372	16.5000	2.1341	2.1713	<b>35.9317</b>	35.8258
<b>900</b>	16.9959	16.5000	3.1992	3.2759	<b>54.3728</b>	54.0528
<b>1000</b>	17.0174	16.5000	3.5536	3.6419	<b>60.4728</b>	60.0906



(a)



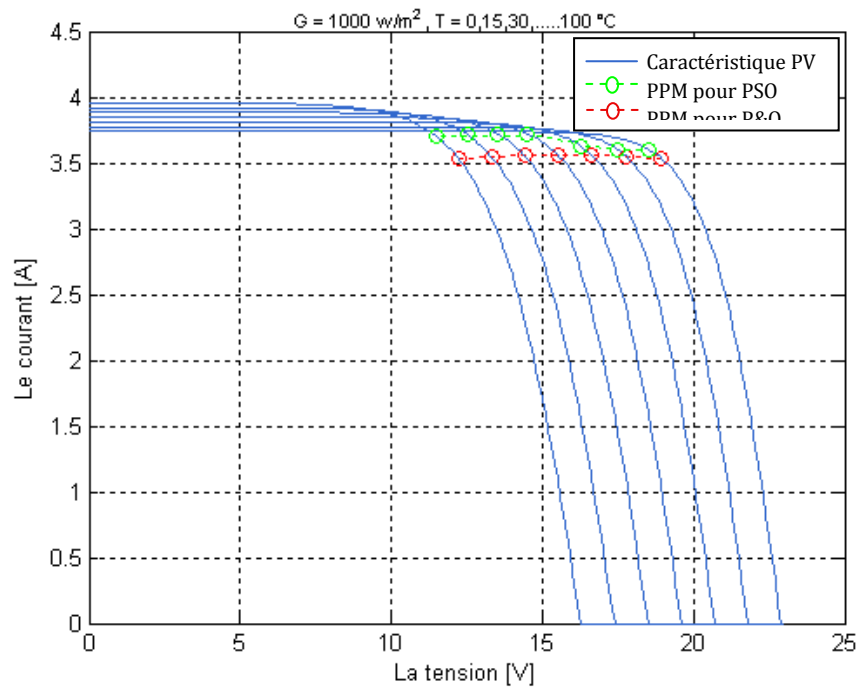
a) courant-tension b) puissance-tension.

**IV.3.1.2. Effet de la température :**

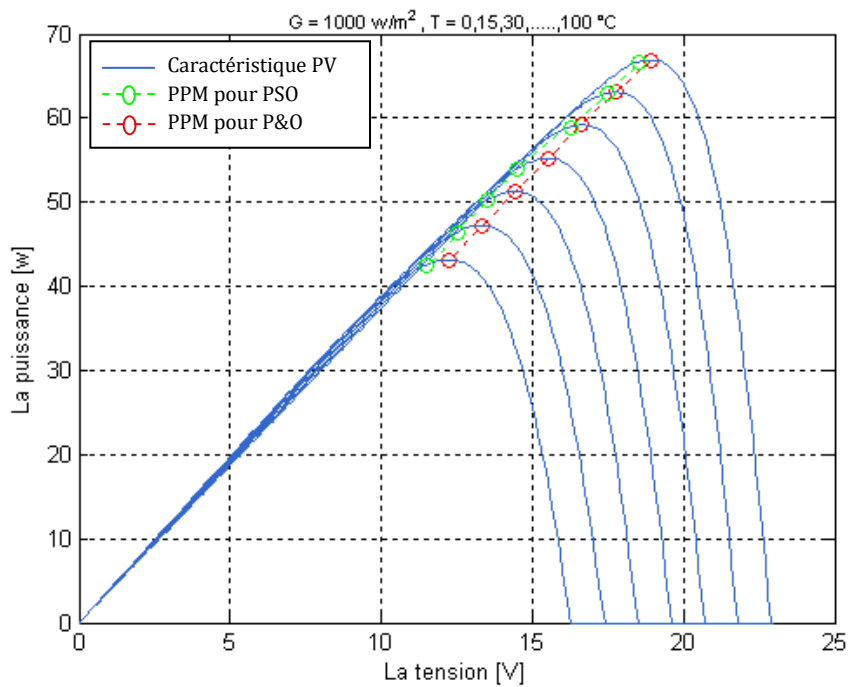
Il est important de tester les techniques sous différents valeurs de température à partir de 0 °C jusqu'à 100 °C et l'éclairement est maintenu constant à 1000 w/m<sup>2</sup>.

**Table IV.2** Résultat de l'optimisation avec une température variable et un éclairement constant égal à 1000 w/m

Température [°C]	V <sub>OPT</sub> [V]		I <sub>OPT</sub> [A]		P <sub>max</sub> [w]	
	PSO	P&O	PSO	P&O	PSO	P&O
<b>0</b>	18.9080	18.5000	3.5390	3.6030	<b>66.9145</b>	66.6549
<b>25</b>	17.0174	16.5000	3.5536	3.6419	<b>60.4728</b>	60.0906
<b>50</b>	15.1511	14.5000	3.5573	3.6787	<b>53.8965</b>	53.3406
<b>75</b>	13.3147	12.5000	3.5465	3.7134	<b>47.2206</b>	46.4170
<b>100</b>	11.5169	10.5000	3.5157	3.7460	<b>40.4902</b>	39.3325



(a)



(b)

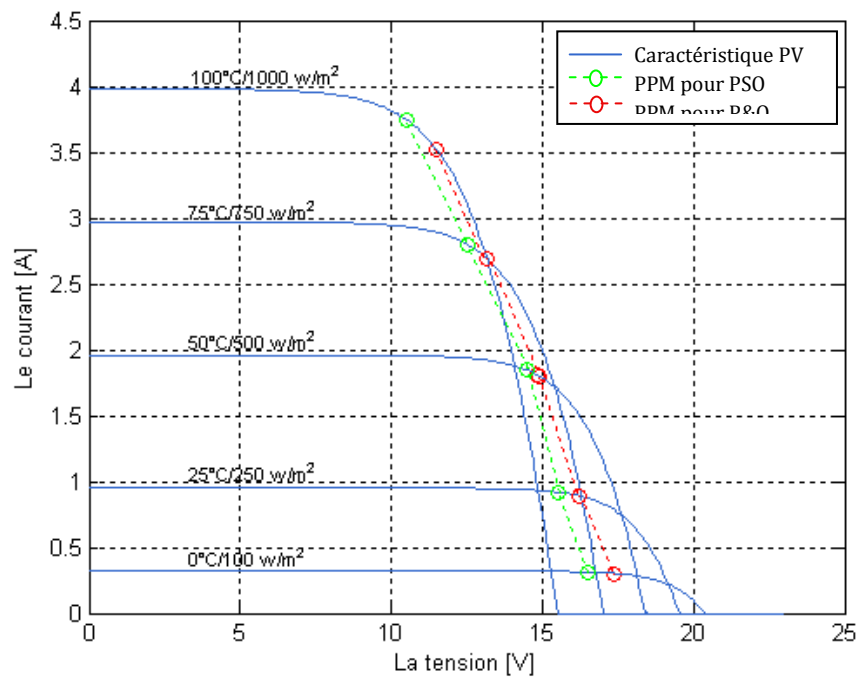
**Figure IV.4** Variation PPMT sous différents valeurs de la température:  
 a) courant-tension b) puissance-tension

**IV.3.1.3. Effet simultané de l'éclairement et de la température**

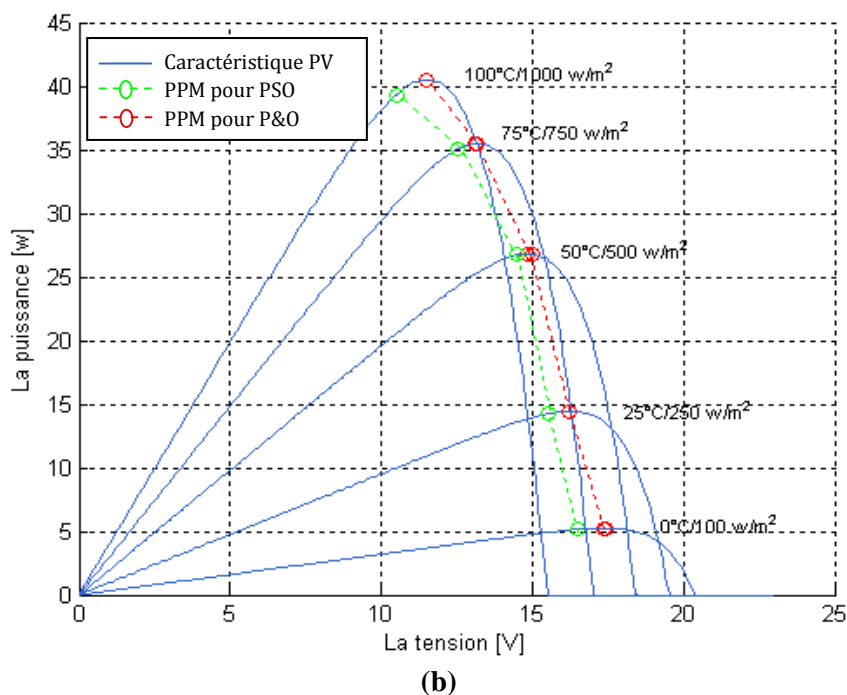
Nous allons varier simultanément les deux conditions météorologiques (G et T).

**Table IV.3** Résultats de l'optimisation avec la température et l'éclairement qui varient en même temps.

Température [°C]	Eclairement [w/m <sup>2</sup> ]	V <sub>OPT</sub> [V]		I <sub>OPT</sub> [A]		P <sub>max</sub> [w]	
		PSO	P&O	PSO	P&O	PSO	P&O
<b>0</b>	<b>100</b>	17.3572	16.5000	0.3022	0.3123	<b>5.2454</b>	5.1532
<b>25</b>	<b>250</b>	16.2338	15.5000	0.8883	0.9179	<b>14.4203</b>	14.2273
<b>50</b>	<b>500</b>	14.8174	14.5000	1.8079	1.8422	<b>26.7885</b>	26.7122
<b>75</b>	<b>750</b>	13.1864	12.5000	2.6894	2.8007	<b>35.4632</b>	35.0082
<b>100</b>	<b>1000</b>	11.5169	10.5000	3.5157	3.7460	<b>40.4902</b>	39.3325



(a)



**Figure IV.5** PPM avec Variation dans la température et l'éclairement au même temps :  
 a) courant-tension b) puissance-tension.

#### IV.3.2 2<sup>ème</sup> test : Simulations en temps réel

D'abord, pour simuler le système, il est nécessaire d'utiliser les données d'ensoleillement et température d'une location spécifique durant 24 heures. Cette simulation permet de tester le modèle d'une manière suffisante. Pour cela, nous avons choisi les données à travers la région de Golden, Colorado en 14 Juillet 2009 et 14 Mars 2010 parce que ces données sont disponibles à faire, en plus, on y confiant de son exactitude [25].

La première journée du 14 Juillet 2009 présente un bon ensoleillement tout au long de la journée avec de petites variations d'irradiations lumineuses entre 12h et 14h et en fin d'après-midi. Au contraire, la deuxième journée du 14 Mars 2010 fut très nuageuse où l'éclairement peut atteindre la valeur  $G = 356.35 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 1.226 \text{ }^\circ\text{C}$  à l'instant  $t = 8\text{h}27$ . (Figures IV.6 et IV.7).

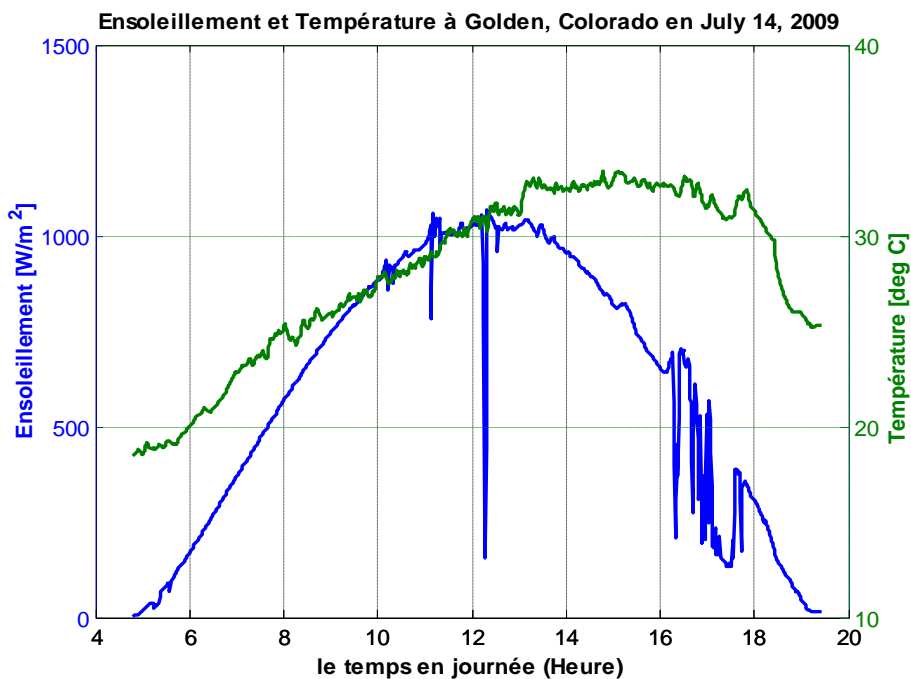


Figure IV.6 Données d'ensoleillement et température d'un jour ensoleillé.

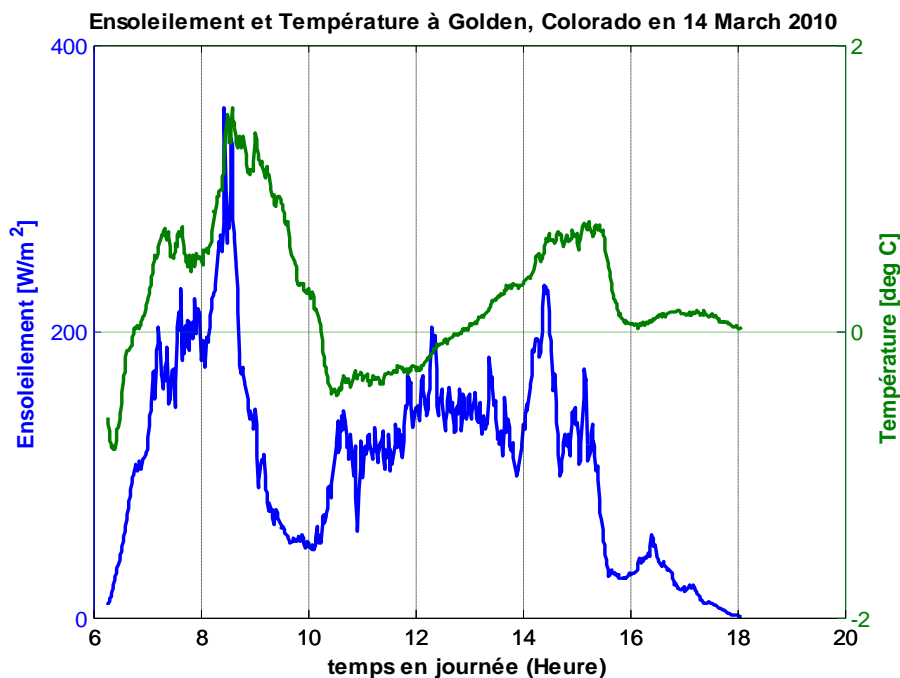


Figure IV.7 Données d'ensoleillement et température d'un Jour nuageux.

**A. Simulation 1 : jour ensoleillé**

Les figures IV.8 et IV.9 montrent respectivement l'évaluation de la tension, courant optimaux et la puissance effectués par la commande MPPT-PSO au cours d'une journée

très ensoleillée (14 Juillet 2009) sans trop de nuages ni de changements rapides du niveau d'irradiation.

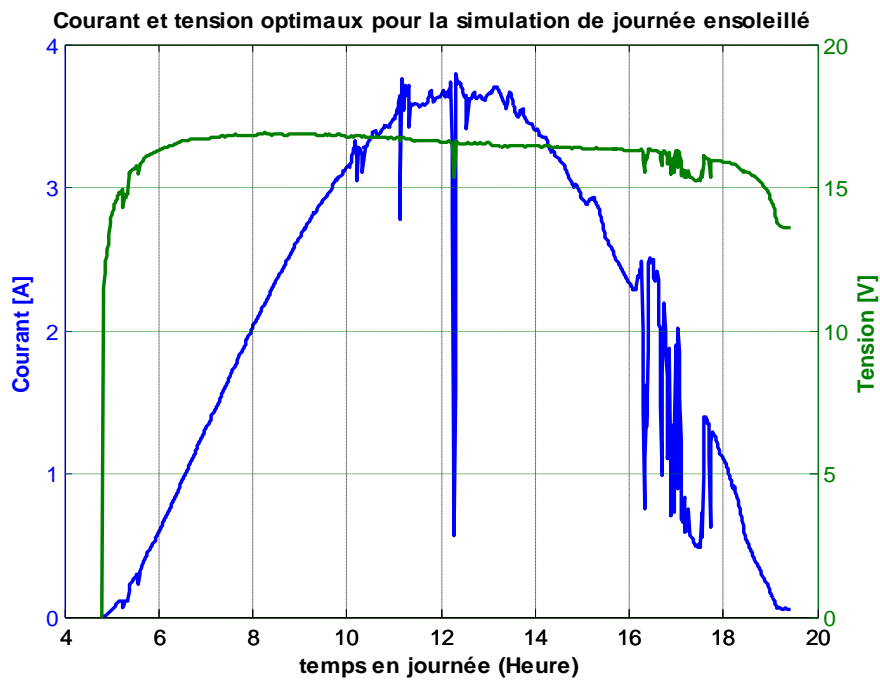


Figure IV.8 Courant et tension optimaux d'un jour ensoleillé.

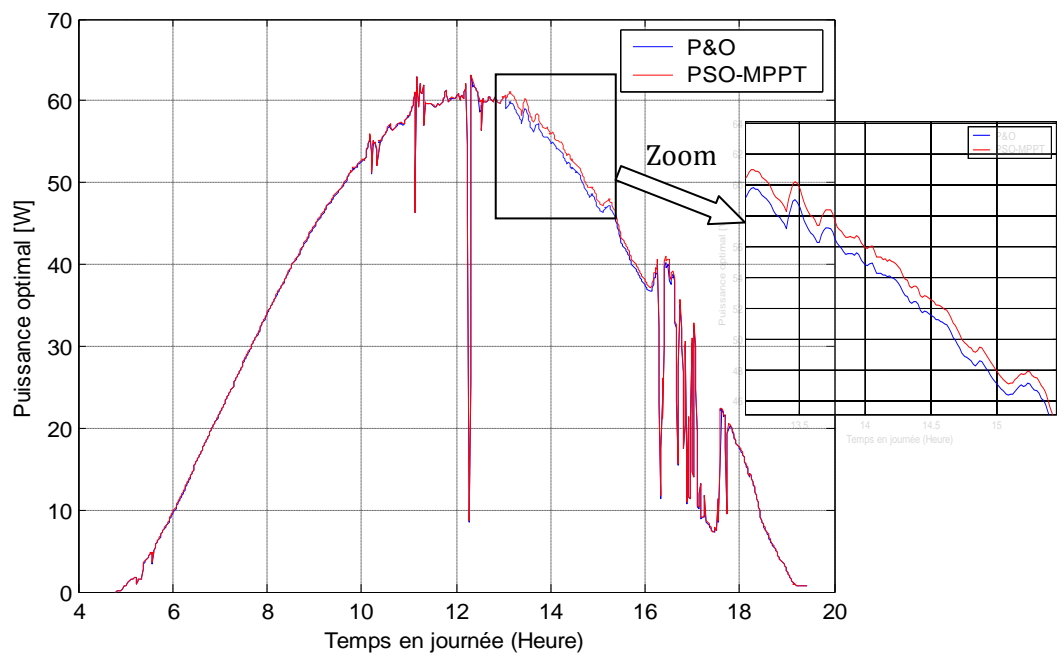


Figure IV.9 puissance optimale d'un jour ensoleillé.

A partir de 4h.43, on peut observer sur la figure IV.8 que La variation du courant optimal chaque instant suit la variation de l'éclairement dirigé vers le module PV, elle augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum aux alentours de 12h avant la diminution jusqu'au soir. C'est pour cela qu'ils ont la même forme. Nous voyons aussi que la tension varie peu tout ou long de la journée car la variation de la température était lente. On remarque en figure IV.9 que la variation de la puissance optimale augmente ainsi graduellement en fonction du niveau d'ensoleillement jusqu'à atteindre un maximum à 12h09  $P_{\max} = 60.2805 \text{ W}$  ( $I_{\max} = 3.6181$ ,  $V_{\max} = 16.6608 \text{ V}$ ) sous les conditions :  $G = 1012$ ,  $T = 30.06^\circ\text{C}$  avant de diminuer jusqu'au soir avec une chute de puissance importante ente 12h et 14h, 16h et 18h (liée au passage nuageux).

### B. Simulation 2 : jour nuageux

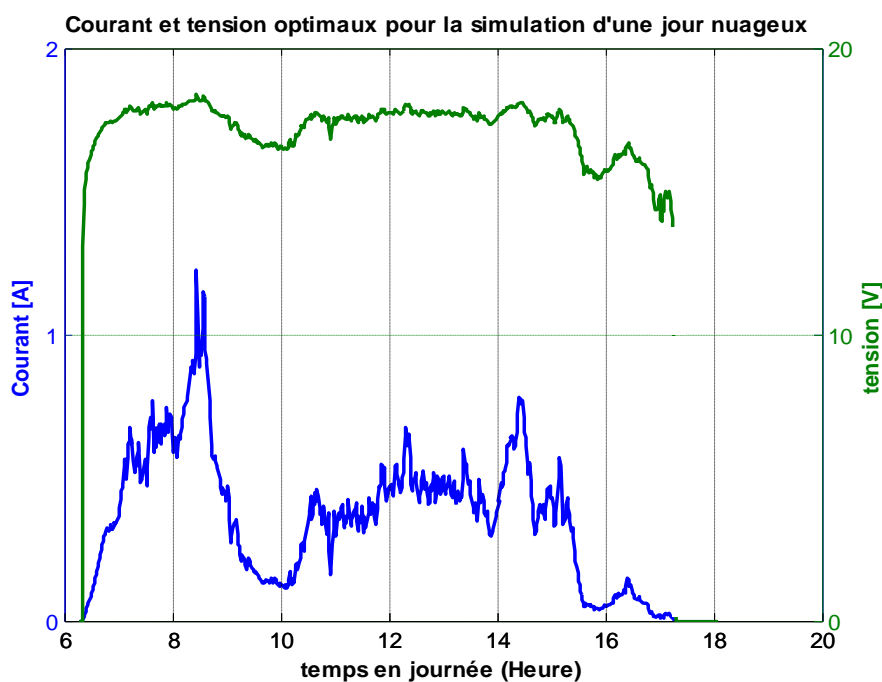
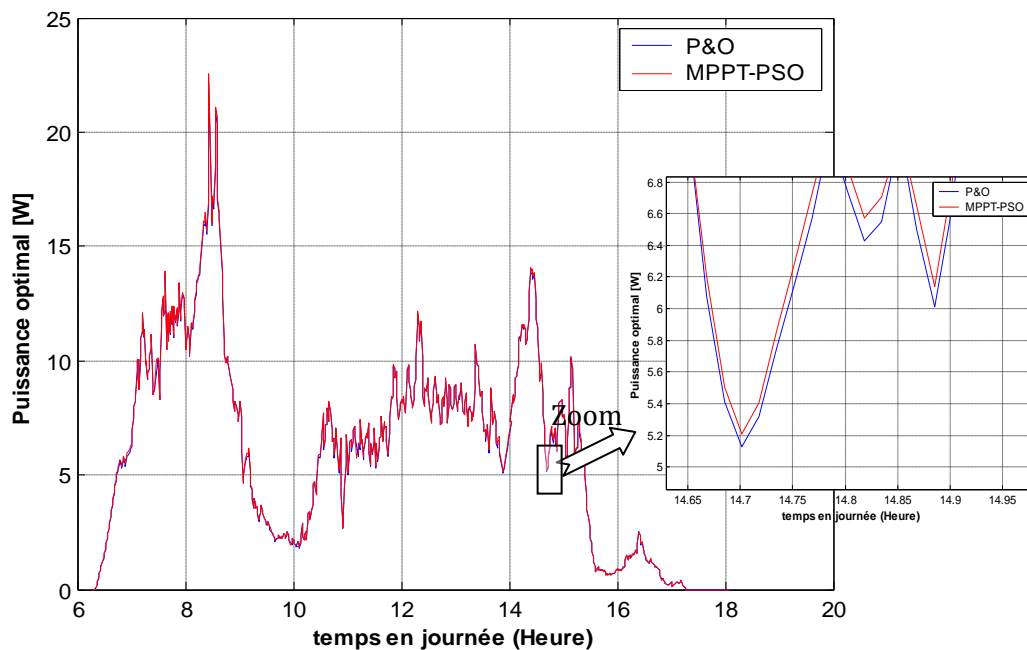


Figure IV.10 Courant et tension optimaux d'un jour nuageux.



**Figure IV.11** puissance optimale d'un jour nuageux.

Il est clair sur la figure IV.10 que la variation du courant optimal suit l'éclairement. Il augmente un peu en début de matinée. Par contre, en milieu de journée le point de fonctionnement du panneau PPM diminue.

On remarque sur la figure IV.11 qu'en début de matinée comme en soirée, le module PV fournit une puissance très faible comparable avec une journée ensoleillée où le système fonctionne mieux sous ses conditions. Toute fois, la diminution significative de l'énergie produite est peut être liée aux autres facteurs (neige par exemple), dont nous pouvons trouver le maximum de l'énergie produite durant ce jour :  $P_{\max} = 22.5545 \text{ W}$  ( $I_{\max} = 1.2275 \text{ A}$ ,  $V_{\max} = 18.3744 \text{ V}$ ) sous les conditions :  $G = 267.58 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 0.984$

#### IV.4 CONCLUSION :

Ce chapitre présente une nouvelle technique d'optimisation MPPT-PSO, qui calcule instantanément le point de puissance maximum PPM d'un module photovoltaïque afin de maximiser le profit en termes de la puissance instantanément. A cause du changement instantané des caractéristiques I-V et P-V, on peut dire que cette méthode heuristique est la meilleure technique utilisée pour suivre réellement la puissance optimale et avec une bonne précision le MPPT-PSO en compare aux autres MPPT classique.

# Conclusion Générale

---



## *Conclusion générale*

A la fin de ce modeste travail on peut dire que notre contribution a été axée sur l'énergie solaire qui en plus d'être renouvelable est aussi d'une flexibilité utile, cette énergie est fournie par des générateurs photovoltaïque caractérisés par un point où la puissance est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques, un mécanisme de poursuite s'avère indispensable pour une efficacité meilleure du générateur.

A travers ce projet, les Particules SWARM d'Optimisation est proposée afin de maximiser le profit en termes d'énergie alimentant la charge ce qui signifie la minimisation des pertes d'énergie.

Cette méthode heuristique utilisée pour rechercher l'optimum ou un quasi-optimum d'une fonction objective. Elle est basée sur une population de particules qui explorent l'espace d'un problème. Chaque particule au moment  $t$  est définie par sa position dans l'espace de recherche, où elle évalue la valeur de la fonction à optimiser, et par sa vitesse. Le mouvement de chaque particule est dirigé par l'attraction vers la meilleure position qu'elle a trouvé jusqu'à présent appelée *optimum local* et par l'attraction vers la meilleure position trouvée par les autres particules appelée *optimum global*.

De toute évidence, la validation de telles méthodes nous a permis de dire que la technique MPPT-PSO est une méthode globale sert à exploiter au mieux la puissance délivrée par le module photovoltaïque, c'est-à-dire de suivre instantanément le PPM lors des variations dans les conditions de travail, grâce à la rapidité et la simplicité, elle converge rapidement à la solution optimale avec un nombre d'itération minimale.

Alors, on peut dire que les résultats obtenus a partir de notre application pratique de la programmation sont très satisfaisants.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse 15 Décembre 2008.
- [2] Z. Bendjellouli, "Contribution à la modélisation d'une cellule", Mémoire de Magistère, Université de Bechar, 28 Juin 2009.
- [3] M. Belhadj, " Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ", Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, 2007/2008.
- [4] S. Ameziane, " Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien", Mémoire de Magistère, Université de Batna, Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE Batna 01 juillet 2009.
- [5] I. Chabani et O. Belila, " L'intégration du photovoltaïque au réseau électrique problèmes et perspectives ", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra, Promotion 2006.
- [6] H. Mehires et M.C. Sekal, "Mis en œuvre d'un ordinateur mono carte pour la caractérisation d'un générateur", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2007.
- [7] S. Rodriguez, "Réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur photovoltaïque à partir d'un girateur de puissance", Diplôme : Ingénieur Technique Industriel, Université ROVIRA I VIRGILI, Espagne Juin 2008.
- [8] A. Tsamda et K. Mahmoud, " Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques ", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2007.

- [9] M. Boudjema et N. Belhaouas, "Commande d'une poursuite du point de puissance maximum MPPT par les Réseaux de Neurones et implémentation sur FPGA et DSP", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2007.
- [10] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model", Journal of Electrical & Electronics Engineering. Australia, IE Aust. Vol.21.No.1. 2001, PP.49-56.
- [11] D. Bellala, "Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna.
- [12] I.Vechiu, " Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de Doctorat, Université de Havre, France 15 Décembre 2005.
- [13] A. Benmosbah et C.A. Mecheraoui, " Implémentation sur FPGA des méthodes MPPT ' P&O' et ' Floue optimisée par les Algorithmes Génétiques' " Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2006.
- [14] M. Djarallah, "Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna 16 janvier 2008.
- [15] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [16] B. Flèche-D. Delagnes, "Energie solaire photovoltaïque", Juin 2007.
- [17] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse 20 Janvier 2009.

- [18] B. Baker, I. Hechifa, T. Mesai Belgacem "Générateur photovoltaïque" mémoire de fin d'étude LMD, option CDSE, Centre universitaire d'El-Oued 2008/2009.
- [19] A. Aziz, "Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse 28 Novembre 2006.
- [20] Y. Cooren, "Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire. Applications en génie médical et en électronique", Thèse de Doctorat en Sciences de l'Université de Paris 12 Val de Marne, Version 1-8 mars 2010.
- [21] G. Calas, "Optimisation par essaim de particules", EPITA : Ecole d'Ingénieurs en Informatique, France 2009.
- [22] R. Labdani, " Optimisation de l'écoulement de puissance dans un marche de l'électricité libère par essais de particules ", Mémoire de Magistère, Centre Universitaire Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 18 Avril 2007.
- [23] A. Dutot et D. Olivier, "Optimisation par essaim de Particules. Application au Problème des n-Reines, Université du Havre, France
- [24] M. H. Aroua, M. S. Boughazala et S. Tamer, "Dispatching économique optimale par la méthode SWARM (PSO)", Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Option: Réseaux Electriques. Centre Universitaire d' El-Oued. Promotion Juin 2009.
- [25] National Renewable Energy Laboratory (NREL) Daily plot and Raw Data Files March 14, 2010 and 14 July 2009 (downloaded from [http://www.nrel.gov/mide/srrl\\_bms](http://www.nrel.gov/mide/srrl_bms)).

**ANNEXE A :**

Fiche technique d'un module MSX-60, sous ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T = 25^\circ\text{C}$ )

<b>Spécification du module solaire (donnée du fabricant)</b>	
Température des conditions standards ou de références ( $T_{\text{ref}}$ )	$25^\circ\text{C}$
Eclairement des conditions standards ou de références ( $G_{\text{ref}}$ )	$1000 \text{ W/m}^2$
Puissance crête maximale ( $P_m$ )	60W
Tension de crête maximale ( $V_m$ )	17.1V
Courant de crête maximale ( $I_m$ )	.35A
Courant de court-circuit ( $I_{\text{sc}}$ )	3.8A
La tension de circuit ouvert	21.1V
Tolérance sur puissance de crête	$-0.38\text{W}/^\circ\text{C}$
Température nominale de fonctionnement (NOCT)	$49^\circ\text{C}$

**ANNEX B :**

Organigramme de calcul de PPM par la méthode SWARM

