



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued**

**Faculté de la Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**MÉMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Spécialité : Réseaux Electrique**

**Présenté par :**

- 1. KEMERCHOU Dhia Elhek**
- 2. HAMADA Hamza**
- 3. AOUNALLH Akram**

**Intitulé :**

**Contrôle d'un système solaire photovoltaïque par la méthode PO  
et PO hybride**

**Soutenue le : 22/06 /2025**

**Devant le jury composé de :**

**Dr : DR.SARHOUD Hachem**

**Président**

**Dr : DR.KAID Imad Edine**

**Examineur**

**Dr : Dr. MAMMERI Oussama**

**Encadreur**

**Année académique : 2024/2025**



## REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma plus profonde gratitude à mon directeur de mémoire, **Dr. MAMMERI Oussama**, pour sa disponibilité, ses conseils éclairés, sa rigueur scientifique et son accompagnement tout au long de ce travail. Son expertise et sa bienveillance ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers l'Administration de l'Université Echahid Hama Lakhdar, en particulier le Département de Génie électrique et tous ses membres, pour leur soutien et les ressources de recherche qu'ils ont mises à notre disposition.*

*Je souhaite également remercier mes collègues et amis pour leur soutien moral, leur aide précieuse et les moments de convivialité qui ont rythmé ces mois de travail.*

*Enfin, je dédie une pensée toute particulière à ma famille, pour son soutien indéfectible, sa patience et sa confiance en moi tout au long de ce parcours.*

*À tous, merci du fond du cœur.*



*Avant-Propos*

## DEDICACE

### **À mes chers parents,**

qui ont toujours été une source de force et de soutien, et qui n'ont jamais hésité à me prodiguer conseils et orientation. Je vous exprime ma plus profonde gratitude pour l'amour et l'attention que vous m'avez prodigués,

car vous avez été le fondement de cette réussite.

### **À mes estimés professeurs,**

qui ont généreusement partagé leurs connaissances et leur expérience, et m'ont constamment guidé dans la bonne direction. Merci pour votre soutien indéfectible, votre confiance en mes capacités et votre motivation à viser l'excellence.

### **À mes chers amis,**

qui m'ont accompagné à chaque étape, n'hésitant jamais à m'offrir aide et encouragements.

Merci

d'avoir toujours été là, car votre soutien a été un moteur pour surmonter les difficultés et atteindre cet objectif.

### ***Et enfin, à moi-même,***

pour ma patience et ma persévérance, et pour ne pas avoir abandonné malgré les difficultés. Je dédie ce succès à moi-même et suis fière de ce que j'ai accompli.

- **KEMERCHOU Dhia Elhak**
- **AOUNALLH Akram**
- **HAMADA Hamza**

## **Titre**

# **control d un système pv avec methode po et po hybride**

*Cette étude vise à mettre en évidence l'importance des techniques de commande dans les systèmes d'énergie solaire, notamment dans un contexte mondial marqué par la transition vers les énergies renouvelables et la réduction de la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles. Les systèmes photovoltaïques représentent une solution efficace pour la production d'électricité, en particulier dans les zones isolées. Toutefois, leur performance reste fortement influencée par des facteurs environnementaux tels que le rayonnement solaire et la température, ce qui nécessite l'utilisation de techniques de suivi intelligentes pour maximiser la puissance extraite.*

*Ce travail porte sur l'étude et la mise en œuvre de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), ainsi que sur le développement d'une méthode hybride améliorée basée sur le même principe, dans le but d'optimiser le rendement énergétique tout en réduisant les oscillations autour du point de fonctionnement optimal. Une simulation a été réalisée sous MATLAB/SIMULINK pour valider les performances des approches proposées.*

*Les résultats obtenus sous différentes conditions d'ensoleillement ont montré une amélioration significative des performances par rapport à la méthode classique, soulignant ainsi l'importance des stratégies de commande intelligentes pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire, notamment dans les zones à accès énergétique limité.*

### **Mots-clés:**

- Énergies renouvelables
- Algorithmes intelligents
- Commande de systèmes solaires
- Point de puissance maximale (MPPT)
- Méthode hybride P&O

## *Abstract*

### **Title**

# **Control the PV system with one method and another hybrid**

*Cette étude vise à mettre en évidence l'importance des techniques de commande dans les systèmes d'énergie solaire, notamment dans un contexte mondial marqué par la transition vers les énergies renouvelables et la réduction de la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles. Les systèmes photovoltaïques représentent une solution efficace pour la production d'électricité, en particulier dans les zones isolées. Toutefois, leur performance reste fortement influencée par des facteurs environnementaux tels que le rayonnement solaire et la température, ce qui nécessite l'utilisation de techniques de suivi intelligentes pour maximiser la puissance extraite.*

*Ce travail porte sur l'étude et la mise en œuvre de l'algorithme Perturb and Observe (P&O) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), ainsi que sur le développement d'une méthode hybride améliorée basée sur le même principe, dans le but d'optimiser le rendement énergétique tout en réduisant les oscillations autour du point de fonctionnement optimal. Une simulation a été réalisée sous MATLAB/SIMULINK pour valider les performances des approches proposées.*

*Les résultats obtenus sous différentes conditions d'ensoleillement ont montré une amélioration significative des performances par rapport à la méthode classique, soulignant ainsi l'importance des stratégies de commande intelligentes pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire, notamment dans les zones à accès énergétique limité.*

### **Keywords:**

- Énergies renouvelables
- Algorithmes intelligents
- Commande de systèmes solaires
- Point de puissance maximale (MPPT)
- Méthode hybride P&O

## ملخص

### العنوان

# التحكم في نظام الطاقة الكهروضوئية باستخدام طريقة po Et po hybride

تبرهن هذه الدراسة على أهمية تقنيات التحكم في أنظمة الطاقة الشمسية، لا سيما في سياق عالمي بارز من خلال التحول إلى الطاقات المتجددة وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية. تمثل الأنظمة الكهروضوئية حلاً فعالاً لإنتاج الكهرباء، خاصة في المناطق المعزولة. ومع ذلك، فإن أدائه يتأثر بالعوامل البيئية مثل الأشعة الشمسية ودرجة الحرارة، مما يتطلب استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لزيادة الطاقة الإضافية إلى أقصى حد.

يؤدي هذا العمل إلى دراسة ومنهجية خوارزمية **Perturb and Observe (P&O)** لمتابعة نقطة القوة القصوى (MPPT)، بالإضافة إلى تطوير طريقة هجينة محسنة تعتمد على نفس المبدأ، مع تحسين الأداء نشيط للغاية مما يقلل التذبذبات الناتجة عن نقطة التشغيل المثالية. تم إنشاء محاكاة باستخدام **MATLAB/SIMULINK** للتحقق من أداء المناهج المقترحة.

تؤدي النتائج إلى تحسين كبير في الأداء وفقاً للطريقة الكلاسيكية، بالإضافة إلى أهمية استراتيجيات قيادة الأذكاء لتحقيق أفضل استغلال للطاقة الشمسية، لا سيما في مناطق الوصول إلى الطاقة المحدودة.

### الكلمات المفتاحية:

- الطاقات المتجددة
- أذكاء الخوارزميات
- التحكم في الأنظمة الشمسية
- نقطة القوة القصوى (MPPT)
- طريقة الهجين P&O

# TABLE DES MATIERES

# TABLE DES MATIERES

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>LISTE DES FIGURES .....</b>    | <b>[3]</b> |
| <b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>   | <b>[4]</b> |
| <b>LISTE DES SYMBOLES .....</b>   | <b>[5]</b> |
| <b>INTRODUCTION GENERALE.....</b> | <b>[6]</b> |

## CHAPITRE I : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I.1 Introduction.....</b>                                                 | <b>2</b>  |
| <b>I.2 Énergie renouvelable en Algérie .....</b>                             | <b>5</b>  |
| <b>I.3 Qu'est-ce que l'énergie solaire ? .....</b>                           | <b>3</b>  |
| <b>I.4 Potentiel solaire en Algérie .....</b>                                | <b>7</b>  |
| <b>I.5 Rayonnement solaire et Ensoleillement.....</b>                        | <b>8</b>  |
| <b>I.5.1 Types de rayonnement solaire au sol .....</b>                       | <b>8</b>  |
| <b>I.6 La cellule photovoltaïque.....</b>                                    | <b>9</b>  |
| <b>I.6.1 Qu'est-ce qu'une cellule photovoltaïque .....</b>                   | <b>10</b> |
| <b>I.6.2 L'effet photovoltaïque .....</b>                                    | <b>10</b> |
| <b>I.6.3 Constitution de la cellule photovoltaïque .....</b>                 | <b>11</b> |
| <b>I.6.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....</b>    | <b>11</b> |
| <b>I.6.5 Technologie d'une cellule photovoltaïque .....</b>                  | <b>13</b> |
| <b>I.6.5.1 1<sup>er</sup> Génération : Cellules cristallines .....</b>       | <b>13</b> |
| <b>I.6.5.2 2<sup>eme</sup> Génération : Cellules à couches minces .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>I.6.5.3 3<sup>eme</sup> Génération.....</b>                               | <b>15</b> |
| <b>I.6.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....</b> | <b>15</b> |
| <b>I.6.6.1 Caractéristiques Courant-Tension .....</b>                        | <b>15</b> |
| <b>I.6.6.2 Caractéristiques Puissance-Tension .....</b>                      | <b>16</b> |
| <b>I.6.7 Paramètres d'une cellule photovoltaïque .....</b>                   | <b>16</b> |
| <b>I.6.8 Paramètres climatiques d'une cellule PV .....</b>                   | <b>19</b> |
| <b>I.6.8.1 Influence de l'irradiance (E) .....</b>                           | <b>19</b> |
| <b>I.6.8.2 Influence de la température (T).....</b>                          | <b>20</b> |
| <b>I.6.9 Regroupement des cellules photovoltaïques.....</b>                  | <b>20</b> |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>I.6.9.1</b> Regroupement en série.....                                 | 21 |
| <b>I.6.9.2</b> Regroupement en parallèle.....                             | 21 |
| <b>I.6.9.3</b> Regroupement hybride.....                                  | 22 |
| <b>I.6.10</b> Circuit équivalent d'une cellule.....                       | 23 |
| <b>I.7</b> Système photovoltaïque .....                                   | 23 |
| <b>I.7.1</b> Le générateur photovoltaïque .....                           | 24 |
| <b>I.7.2</b> Les types des systèmes photovoltaïques.....                  | 24 |
| <b>I.7.2.1</b> Systèmes connectés au réseau.....                          | 24 |
| <b>I.7.2.2</b> Systèmes hybrides .....                                    | 24 |
| <b>I.7.2.3</b> Systèmes autonomes.....                                    | 24 |
| <b>I.7.3</b> Les types des systèmes photovoltaïques.....                  | 25 |
| <b>I.7.3.1</b> Le convertisseur DC/DC (hacheur) .....                     | 25 |
| <b>I.7.3.2</b> Le convertisseur DC/AC (onduleur).....                     | 26 |
| <b>I.7.4</b> Protection des modules photovoltaïques .....                 | 27 |
| <b>I.7.4.1.</b> Diodes de by-pass.....                                    | 27 |
| <b>I.7.4.2.</b> Diodes anti-retours .....                                 | 28 |
| <b>I.7.5</b> Avantages et Inconvénients des systèmes photovoltaïques..... | 28 |
| <b>I.8</b> Conclusion .....                                               | 29 |

## **CHAPITRE II : Maximisation de l'efficacité énergétique dans le système PV**

|                   |                                                                              |           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>II.1</b>       | <b>Introduction .....</b>                                                    | <b>75</b> |
| <b>II.2</b>       | <b>Principe de la commande MPPT .....</b>                                    | <b>75</b> |
| <b>II.3</b>       | <b>Classification Des Commandes MPPT .....</b>                               | <b>76</b> |
| <b>II.3.1</b>     | <b>Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée .....</b> | <b>76</b> |
| <b>II.3.2</b>     | <b>Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche .....</b>    | <b>77</b> |
| <b>II.3.3</b>     | <b>Les Algorithmes MPPT .....</b>                                            | <b>78</b> |
| <b>II.3.3.1</b>   | <b>Perturbation Et Observation (P&amp;O, Perturb And Observe) .....</b>      | <b>79</b> |
| <b>II.3.3.2</b>   | <b>La Commande MPPT Flou.....</b>                                            | <b>84</b> |
| <b>II.3.3.2.1</b> | <b>Principe de la logique floue.....</b>                                     | <b>84</b> |
| <b>II.3.3.2.2</b> | <b>Théorie des ensembles flous.....</b>                                      | <b>85</b> |
| <b>II.3.3.2.3</b> | <b>Théorie des ensembles flous.....</b>                                      | <b>85</b> |
| <b>II.3.3.2.4</b> | <b>Conception du contrôleur flou .....</b>                                   | <b>86</b> |
| <b>II.3.3.2.5</b> | <b>Types des systèmes flous .....</b>                                        | <b>87</b> |
| <b>II.3.3.2.6</b> | <b>Algorithme P&amp;O MPPT Basé Sur la Logique Floue Proposé.....</b>        | <b>88</b> |

## **Chapitre III : Resultat Et Simulation Par Matlab**

|                  |                                                                                                                |            |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>III.1</b>     | <b>Modélisation de la régulation de puissance maximale des panneaux solaires via<br/>MATLAB/SIMULINK .....</b> | <b>89</b>  |
| <b>III.1.1</b>   | <b>Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&amp;O .....</b>                                              | <b>89</b>  |
| <b>III.1.1.1</b> | <b>Résultats de simulation MPPT P&amp;O .....</b>                                                              | <b>90</b>  |
| <b>III.1.2</b>   | <b>Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&amp;O optimiser par logique.....</b>                         | <b>91</b>  |
| <b>III.1.2.1</b> | <b>Résultats de simulation MPPT P&amp;O .....</b>                                                              | <b>93</b>  |
| <b>III.1.2.2</b> | <b>Résultats de simulation MPPT P&amp;O (Fuzzy).....</b>                                                       | <b>94</b>  |
| <b>III.3</b>     | <b>Conclusion .....</b>                                                                                        | <b>97</b>  |
|                  | <b>CONCLUSION GENERAL .....</b>                                                                                | <b>99</b>  |
|                  | <b>Références .....</b>                                                                                        | <b>100</b> |

# **LISTE DES FIGURES**

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

|                    |                                                                                                                   |    |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.01</b> | Champ photovoltaïque sous concentration .....                                                                     | 6  |
| <b>Figure I.02</b> | Champ photovoltaïque fixe .....                                                                                   | 6  |
| <b>Figure I.03</b> | Irradiation globale journalière au mois de Juillet sur les plans : a- horizontal et b-normal .....                | 7  |
| <b>Figure I.04</b> | Irradiation globale journalière au mois de Décembre.....                                                          | 8  |
| <b>Figure I.05</b> | Les types des rayonnements solaires .....                                                                         | 9  |
| <b>Figure I.06</b> | Construction d'un système solaire photovoltaïque .....                                                            | 10 |
| <b>Figure I.07</b> | Représentation de la cellule photovoltaïque.....                                                                  | 11 |
| <b>Figure I.08</b> | Libération d'électrons sous l'effet de photons .....                                                              | 12 |
| <b>Figure I.09</b> | Jonction P-N.....                                                                                                 | 12 |
| <b>Figure I.10</b> | Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....                                                      | 13 |
| <b>Figure I.11</b> | Cellules monocristallines .....                                                                                   | 13 |
| <b>Figure I.12</b> | Cellules polycristallines .....                                                                                   | 14 |
| <b>Figure I.13</b> | Cellules à couches minces.....                                                                                    | 14 |
| <b>Figure I.14</b> | Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule solaire .....                                                              | 15 |
| <b>Figure I.15</b> | Caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule solaire .....                                                              | 16 |
| <b>Figure I.16</b> | Les caractéristiques électriques et les paramètres physiques d'une cellule solaire .....                          | 17 |
| <b>Figure I.17</b> | Essai en circuit ouvert.....                                                                                      | 17 |
| <b>Figure I.18</b> | Essai en court-circuit .....                                                                                      | 18 |
| <b>Figure I.19</b> | Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T constante et E variable ..... | 19 |
| <b>Figure I.20</b> | Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T variable et E constant. ....  | 20 |
| <b>Figure I.21</b> | Regroupement en série des cellules photovoltaïques.....                                                           | 21 |

|                    |                                                                                                                                                 |    |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.22</b> | Regroupement en parallèle des cellules photovoltaïques.....                                                                                     | 22 |
| <b>Figure I.23</b> | Montage hybride des cellules photovoltaïques.....                                                                                               | 22 |
| <b>Figure I.24</b> | Circuit équivalent d'une cellule PV.....                                                                                                        | 23 |
| <b>Figure I.25</b> | Assemblage de cellules, du module au Générateur PV .....                                                                                        | 24 |
| <b>Figure I.26</b> | Rôle du système de conditionnement de puissance.....                                                                                            | 26 |
| <b>Figure I.27</b> | Protection d'un champ photovoltaïque composé de $N_{st}$ strings branchés en<br>parallèle comportant chacun de modules associés en séries ..... | 27 |
| <b>Figure I.28</b> | Fonctionnement des diodes bypass.....                                                                                                           | 2  |

## **CHAPITRE II: Maximisation de l'efficacité énergétique dans le systeme PV**

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.01</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charg..... | 75 |
| <b>Figure II.02</b> Principe de la commande MPPT .....                                                                                                       | 76 |
| <b>Figure II.03</b> Recherche du PPM par la méthode (P&O).....                                                                                               | 80 |
| <b>Figure II.04</b> l'algorithme de P&O classique .....                                                                                                      | 81 |
| <b>Figure IV.05</b> Divergence de la méthode P&O .....                                                                                                       | 82 |
| <b>Figure II.06</b> Algorithme du poids d'un troisième point .....                                                                                           | 83 |
| <b>Figure II.07</b> Schéma fonctionnel de la commande par logique floue.....                                                                                 | 86 |
| <b>Figure II.08</b> Fonctions d'appartenance floues .....                                                                                                    | 87 |
| <b>Figure II.09</b> Système photovoltaïque avec contrôle MPPT à logique floue .....                                                                          | 88 |

## **Chapitre III : Resultat Et Simulation Par Matlab**

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.10</b> Conception du système d'optimisation .....                                         | 89 |
| <b>Figure III.11</b> MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de puissance du panneau photovoltaïque..   | 90 |
| <b>Figure III.12</b> MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de tension du panneau photovoltaïque ..... | 90 |
| <b>Figure III.13</b> MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de courant du panneau photovoltaïque ..... | 90 |
| <b>Figure III.14</b> Conception du système d'optimisation .....                                         | 92 |
| <b>Figure III.15</b> Fuzzy logic control .....                                                          | 92 |
| <b>Figure III.16</b> Changement de l'irradiance solaire (1000, 700 ,900 W/m2).....                      | 93 |
| <b>Figure III.17</b> Puissance de sortie pour la méthode P&O Variation de l'irradiance solaire.....     | 93 |
| <b>Figure III.18</b> Tension de sortie pour la méthode P&O Variation de l'irradiance solaire.....       | 93 |
| <b>Figure III.19</b> Courant de sortie pour la méthode P&O Variation de l'irradiance solaire.....       | 94 |
| <b>Figure III.20</b> Puissance de sortie selon les deux méthodes étudiées.....                          | 94 |
| <b>Figure III.21</b> Tension de sortie selon les deux méthodes étudiées.....                            | 95 |
| <b>Figure III.22</b> Courant de sortie selon les deux méthodes étudiées.....                            | 95 |
| <b>Figure III.22</b> La fonction d'appartenance du contrôleur FL proposé pour l'algorithme MPPT.....    | 96 |

# **LISTE DES TABLEAUX**

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

|                     |                                                  |          |
|---------------------|--------------------------------------------------|----------|
| <b>Tableau I.01</b> | Répartition du potentiel solaire en Algérie..... | <b>7</b> |
|---------------------|--------------------------------------------------|----------|

## Chapitre III : Resultat Et Simulation Par Matlab

|                       |                                                |           |
|-----------------------|------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau III.02</b> | Règles FL pour la technique MPPT proposée..... | <b>96</b> |
|-----------------------|------------------------------------------------|-----------|

# **LISTE DES SYMBOLES**

## LISTE DES SYMBOLES

### Source solaire

|          |                                               |                                                        |
|----------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $E$      | [W/m <sup>2</sup> ]                           | Éclairement (souvent appelé aussi irradiance) solaire. |
| $G$      | [Wh/m <sup>2</sup> ] ou [KWh/m <sup>2</sup> ] | Irradiation solaire.                                   |
| $T$      | [°C] ou [K]                                   | Température incidente.                                 |
| $h$      | [s]                                           | Constante de Planck.                                   |
| $c$      | [m/s]                                         | Vitesse de la lumière.                                 |
| $E_{ph}$ | [J]                                           | Énergie du photon.                                     |

### Générateur photovoltaïque

|                          |     |                                                                          |
|--------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------|
| $I_{cc}$                 | [A] | Courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque.                   |
| $U_{co}$ ou $V_{co}$     | [V] | Tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.                  |
| $I_{cc}^T$               | [A] | Tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.                  |
| $V_{co}^T$ ou $U_{co}^T$ | [V] | Tension en circuit ouvert de plusieurs cellules connectées en parallèle. |
| $I_{op}$                 | [A] | Tension en circuit ouvert de plusieurs cellules connectées en parallèle. |
| $V_{op}$ ou $U_{op}$     | [V] | Tension optimale (tension à puissance photovoltaïque maximale).          |
| $I$ ou $I_{pv}$          | [A] | Courant photovoltaïque de sortie.                                        |
| $V$ ou $V_{pv}$          | [V] | Tension photovoltaïque de sortie.                                        |
| $V_t$                    | [V] | Tension thermique de la diode.                                           |
| $I_{ph}$                 | [A] | Photo-Courant (quantité de photons absorbés par la cellule).             |
| $I_D$                    | [A] | Courant de la diode.                                                     |

|             |                   |                                                                                |
|-------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| $I_O$       | [A]               | Courant de saturation de la diode.                                             |
| $I_{Si}$    | [A]               | Courant de saturation inverse de la diode.                                     |
| $I_p$       | [A]               | Courant de la résistance parallèle                                             |
| $P_{MAX}$   | [W]               | Puissance photovoltaïque maximale<br>correspondant à la coordonnée (VOP, IOP). |
| $P_{IN}$    | [W]               | Puissance photovoltaïque maximale<br>correspondant à la coordonnée (VCO, ICC). |
| $FF$        | [-]               | Facteur de forme de la conversion<br>photovoltaïque.                           |
| $\eta$      | [%]               | Rendement de la cellule solaire.                                               |
| $S$         | [m <sup>2</sup> ] | Surface de la cellule photovoltaïque.                                          |
| $R_S$       | [Ω]               | Résistance série de la cellule solaire.                                        |
| $R_P$       | [Ω]               | Résistance parallèle de la cellule solaire.                                    |
| $N_S$       | [-]               | Nombre de cellules liées en série.                                             |
| $N_P$       | [-]               | Nombre de cellules liées en série.                                             |
| $I_{ond}$   | [A]               | Le courant absorbé par l'onduleur.                                             |
| $I_{mpp}$   | [A]               | Le courant de module PV.                                                       |
| $V_{m.ond}$ | [V]               | La tension moyen de l'onduleur.                                                |

## Fuzzy

---

|                     |     |                                             |
|---------------------|-----|---------------------------------------------|
| $\mu_A(x)$          | [-] | Fonction d'appartenance d'un variable $x$ . |
| $\mu_{A \cap B}(x)$ | [-] | Intersection.                               |
| $\mu_{\neg A}(x)$   | [-] | Complément.                                 |
| $\mu_{A \cup B}(x)$ | [-] | Union.                                      |

# **INTRODUCTION GENERAL**

## **INTRODUCTION GENERAL:**

la production d'énergie électrique par les panneaux photovoltaïques reste encore soumise à plusieurs contraintes, notamment leur faible rendement, la variabilité des conditions météorologiques (irradiance et température), ainsi que la non-linéarité de leurs caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V). Pour optimiser l'exploitation de ces systèmes, il est essentiel de fonctionner au point de puissance maximale (MPPT – Maximum Power Point Tracking), qui varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.

Ainsi, le recours à des algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est indispensable pour améliorer les performances énergétiques des systèmes photovoltaïques. Parmi les méthodes les plus courantes, on retrouve la méthode Perturb and Observe (P&O), connue pour sa simplicité de mise en œuvre, bien qu'elle présente certaines limites, notamment en termes de stabilité et de précision autour du point de fonctionnement optimal.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à l'étude et à l'amélioration du contrôle d'un système photovoltaïque en utilisant la méthode P&O, ainsi qu'une version hybride optimisée de celle-ci. L'objectif principal est d'analyser et de comparer les performances de ces techniques de MPPT dans diverses conditions d'ensoleillement, afin de proposer une solution plus efficace pour maximiser la production d'énergie solaire.

### **Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque**

**Présentation des bases théoriques de l'énergie solaire, du fonctionnement des systèmes photovoltaïques et des différents composants qui les constituent.**

### **Chapitre II : Maximisation de l'efficacité énergétique dans le système PV**

**Étude comparative des techniques de suivi du point de puissance maximale, avec un focus particulier sur la méthode Perturb and Observe et son amélioration hybride, en vue d'atteindre une efficacité énergétique maximale à un coût réduit.**

### **Chapitre III : Resultat Et Simulation Par Matlab**

**étude a pour objectif principal d'évaluer l'efficacité de ces méthodes de commande, aussi bien du point de vue technique qu'économique, à travers des modélisations et simulations sous MATLAB/Simulink. Elle vise également à proposer une solution robuste et réaliste pour l'amélioration des systèmes photovoltaïques autonomes dans des environnements à fort potentiel solaire.**

## **Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque**

## I.1 Introduction

En fait, le soleil fournit toute l'énergie nécessaire à la vie sur Terre. Le défi pour un futur durable consiste à utiliser une partie minime de cette énergie pour répondre aux besoins de l'humanité. Les dernières tendances mondiales indiquent une croissance rapide de l'énergie renouvelable verte grâce à l'utilisation de l'énergie solaire. Les systèmes photovoltaïques sont considérés comme un moyen efficace de générer de l'électricité de manière non polluante.

Actuellement, les systèmes ou bien les générateurs photovoltaïques offrent une solution très fiable, abordable et durable pour générer l'électricité à grande échelle. Ainsi, l'électricité solaire photovoltaïque peut répondre à la demande croissante en électricité, ce qui contribue de manière significative à atténuer la pollution de l'environnement résultant de l'utilisation des énergies fossiles. Peu à peu, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque ne cesse d'augmenter dans le monde entier, l'une de ses applications les plus courantes étant le pompage photovoltaïque (appelé aussi le pompage solaire) de l'eau [4].

Un système de pompage solaire est essentiellement un système de pompage électrique dans lequel l'électricité est fournie par un système photovoltaïque. Le pompage solaire présente une alternative propre, simple et économe à l'électricité traditionnelle et au pompage à carburant ainsi qu'il peut entraîner à la fois des avantages socio-économiques en plus de ceux liés au climat. En raison de sa dépendance de sources d'énergie entièrement renouvelables, la technologie de pompage solaire est respectueuse de l'environnement où elle peut être utilisée pour fournir de l'eau pour l'irrigation des cultures, l'élevage du bétail et l'approvisionnement en eau potable [4-5].

Compte tenu de l'importance croissante du pompage solaire, il est devenu un sujet de grand intérêt pour de nombreuses études et recherches académiques. Par conséquent, ce chapitre présentera une étude approfondie des systèmes de pompage photovoltaïque.

### **I.2 Énergie renouvelable en Algérie**

En comparaison avec le développement du parc d'énergie renouvelable à l'échelle mondiale ou européenne, les réalisations en Algérie dans ce domaine sont très modestes.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les

3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au Sud. [22]

### I.3 Qu'est-ce que l'énergie solaire ?

L'énergie solaire est une forme d'énergie dépendante du soleil, qui peut être convertie en électricité par des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques en captant la lumière solaire.

En l'espace de 6 heures, les déserts terrestres reçoivent plus d'énergie solaire que l'humanité n'en utilise sur une année entière. Il existe plusieurs méthodes pour produire et utiliser cette énergie solaire [40] :

- **L'énergie solaire thermique**



**Figure I.1** Champ photovoltaïque sous concentration. [73]

- **L'énergie solaire photovoltaïque**



**Figure I.2** Champ photovoltaïque fixe. [74]

## I.4 Potentiel solaire en Algérie

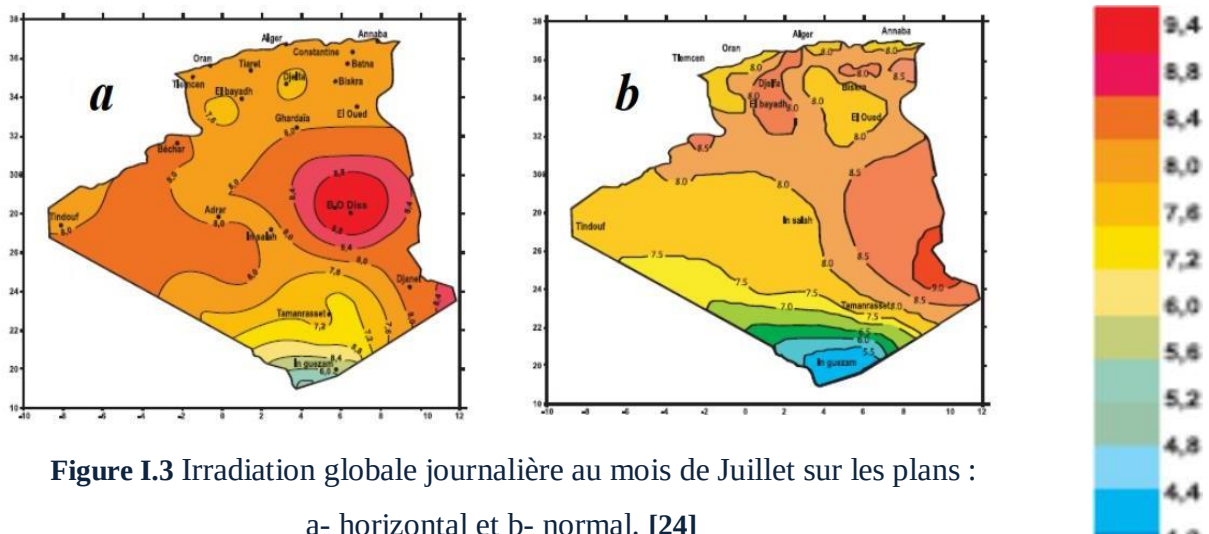
Au sud algériens, les premières expériences ont été effectuées au début des années quatre-vingt, où la première station d'énergie solaire a été installée à Melouka par une société du Royaume de Belgique, la station est aujourd'hui à l'arrêt, le recours aux énergies renouvelables au sud algérien est indispensable et prioritaire dans tout développement durable de la région, les distances existantes entre les localités, la dispersion de la population dans le sud rend le raccordement au réseau électrique très coûteux. [22]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau 1.1, selon l'ensoleillement reçu annuellement. [24]

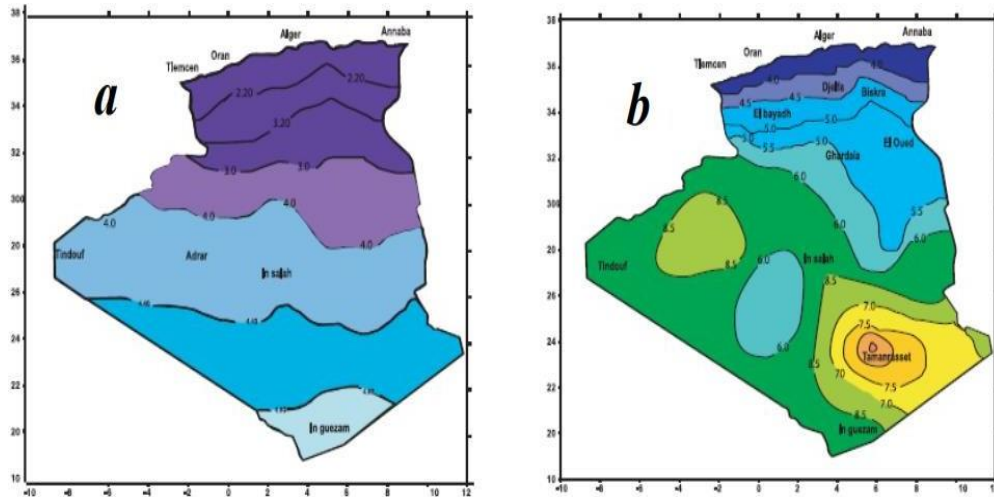
**Tableau I.1** Répartition du potentiel solaire en Algérie [24].

| Régions                                            | Région côtière | Hauts Plateaux | Sahara |
|----------------------------------------------------|----------------|----------------|--------|
| Superficie (%)                                     | 4              | 10             | 86     |
| Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)         | 2650           | 3000           | 3500   |
| Irradiation moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an) | 1700           | 1900           | 2263   |

Les figures I.3 et I.4 illustrent l'irradiation globale quotidienne sur les plans horizontal et normal en décembre et juillet, respectivement. Le gouvernement algérien, reconnaissant le vaste potentiel des énergies renouvelables dans le pays, cherche à promouvoir ce type d'énergie à travers un programme ambitieux qui sera décrit dans la page suivante.



**Figure I.3** Irradiation globale journalière au mois de Juillet sur les plans :  
a- horizontal et b- normal. [24]



**Figure I.4** Irradiation globale journalière au mois de Décembre sur les plans :  
a- horizontal et b- normal. [24]

### I.5 Rayonnement solaire et Ensoleillement

Ce que l'on désigne par énergie solaire est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil en direction de la terre. [7]

- **Irradiance (éclairage)** : exprime la puissance du rayonnement solaire incident tombant sur une surface unitaire. Notée (E) et exprimé en **[W/m²]**.
- **Irradiation** : exprime l'énergie du rayonnement solaire incident sur une surface de 1[m²]. Cela correspondant à l'intégration de l'irradiance sur une période de temps (l'heure ou la journée). Symbolisé par (G) et son unité de mesure est **[Wh/m²]** ou **[kWh/m²]**.

La terre reçoit, à raison de l'exposition au rayonnement solaire, une puissance moyenne de **1.4 [kW.m-2]** pour une surface perpendiculaire à la direction Terre-Soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion et suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu. Au niveau du sol, la puissance restante est de l'ordre de **1[kW.m-2]** sous nos latitudes. La quantité d'énergie utilisable varie entre 800 et **7[kWh.m-2]** suivant le lieu. [8]

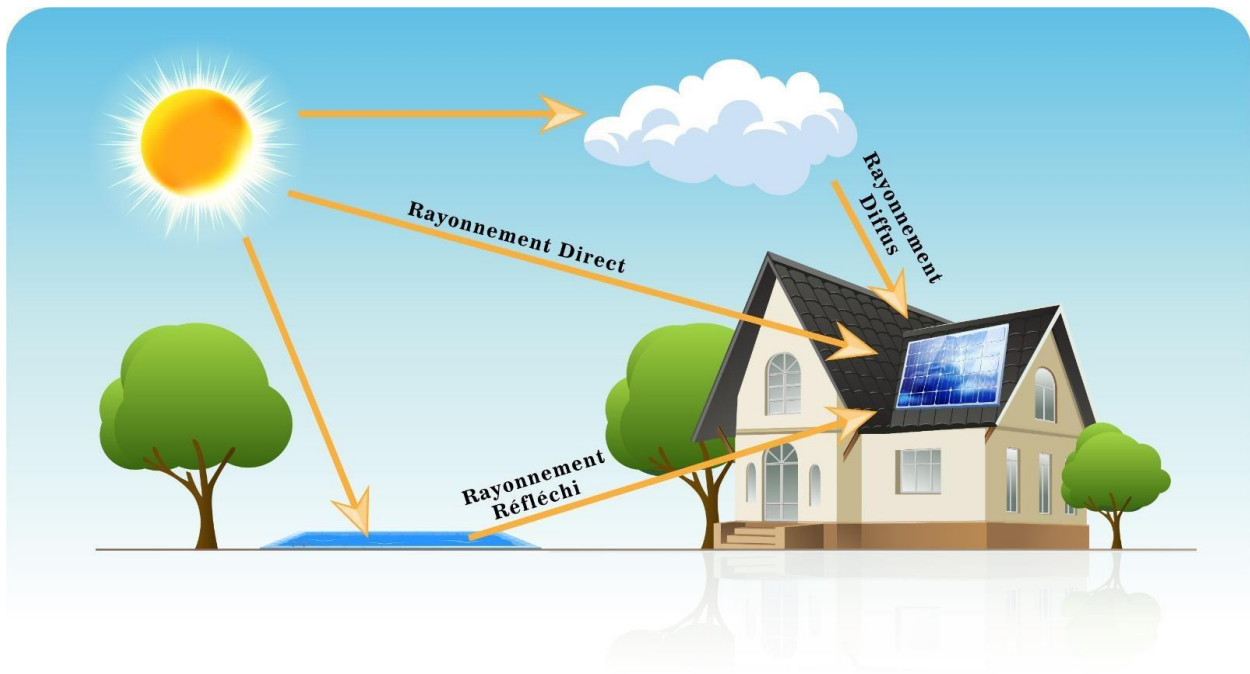
#### I.5.1 Types de rayonnement solaire au sol

Trois types de rayonnements solaires parviennent jusqu'au sol après avoir traversé l'atmosphère : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi.

## Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque :

- On entend par **rayonnement direct** le rayonnement solaire qui atteint une surface spécifique à partir d'un angle solide centré sur le disque solaire.
- Le **rayonnement diffus** est émis par des obstacles tels que les nuages, le sol et les bâtiments, et il provient de toutes les directions.
- Le **rayonnement réfléchi**, également appelé albédo, est le résultat de la collision d'un rayonnement incident, qu'il soit diffusé ou réfléchi, avec un obstacle tel que le sol ou les nuages.

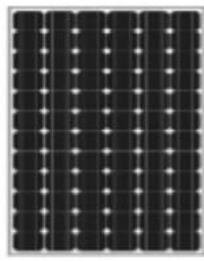
La somme de trois types donne le quatrième type de rayonnement qui est **le rayonnement global**. La figure I.5 sur la page suivante nous montre les types de rayonnement.



**Figure I.5** Les types des rayonnements solaires. [72]

### I.6 La cellule photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est produite par la transformation du rayonnement solaire grâce à des cellules photovoltaïques. Ces cellules sont regroupées pour former des modules, puis des panneaux, et enfin une centrale solaire appelée champ photovoltaïque. Ce champ est associé à des équipements complémentaires pour former un système solaire photovoltaïque.



**Cellule photovoltaïque**

**Module photovoltaïque**

**Champ photovoltaïque**

**Figure I.6** Construction d'un système solaire photovoltaïque. [10]

**Remarque !** Le terme "photovoltaïque" peut être utilisé pour décrire à la fois le phénomène physique de l'effet photovoltaïque et la technologie qui en découle.

### I.6.1 Qu'est-ce qu'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est un capteur électronique de la lumière solaire à base des matériaux semi-conducteurs. C'est l'élément élémentaire du système PV dont le rôle est de générer une tension à courant continu sous l'exposition au rayonnement solaire (photons), c'est le phénomène de l'effet PV qui est à l'origine de produire de l'électricité. [12]

### I.6.2 L'effet photovoltaïque

Le mot "photovoltaïque", abrégé en "**PV**", est formé par la combinaison de deux termes [9-12]:

- **Photo** : mot d'origine grecque qui signifie la lumière.
- **Voltaïque** : vient de volt et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique (comme sur une batterie). Le volt a été découvert par l'italien Alessandro Volta lorsqu'il a inventé la pile électrochimique à la fin du XVIIIe siècle.

En général, l'effet photovoltaïque est le résultat de trois actions qui ont lieu simultanément [9-12] :

- Collecte d'électrons libres dans un circuit électrique.
- Libération des électrons en absorbant de l'énergie des photons.
- Absorption de photons.

### I.6.3 Constitution de la cellule photovoltaïque

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.7). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. [11]

Le silicium (Si) est le matériau semi-conducteur le plus répandu dans la construction de cellules PV. Plus rarement, d'autres semi-conducteurs sont utilisés tels que : diséléniure de cuivre et d'indium ( $\text{CuInSe}_2$ , noté **CIS**), tellure de cadmium ( $\text{CdTe}$ ), ...etc. [9]

Les cellules PV se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté et situées entre deux conducteurs (électrodes) métalliques produisant un contact électrique, en plus, L'épaisseur d'une cellule PV est de l'ordre du millimètre. [12]

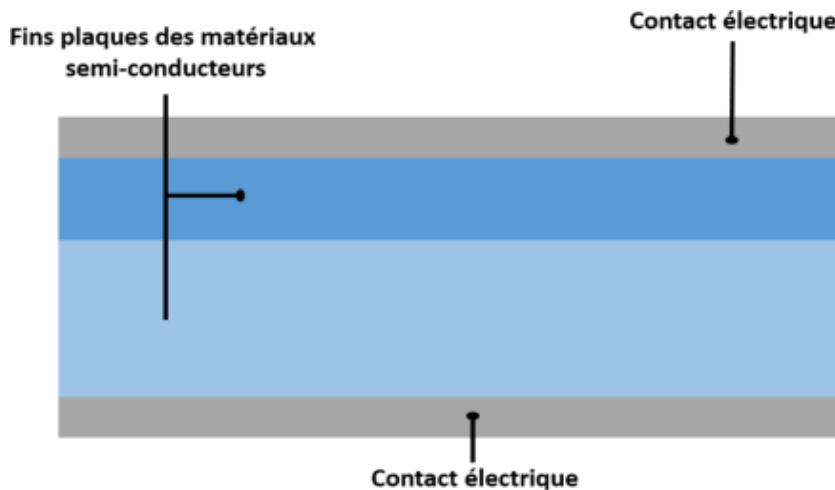
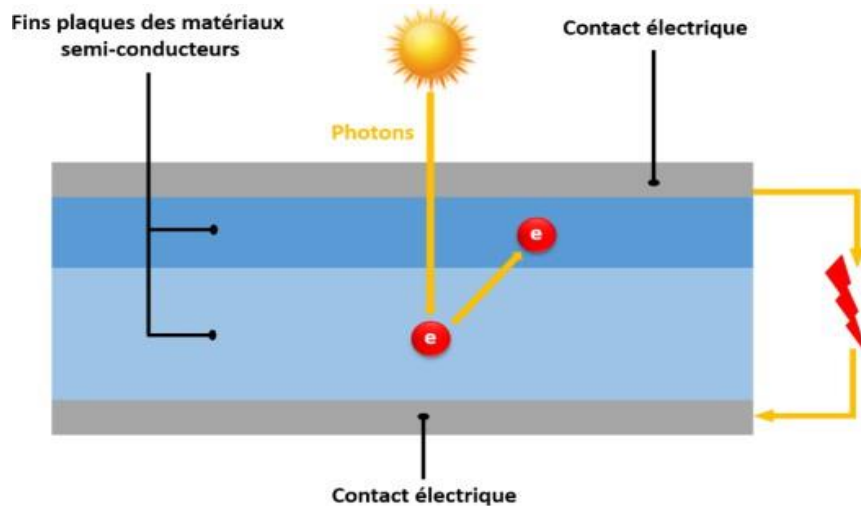


Figure I.7 Représentation de la cellule photovoltaïque. [12]

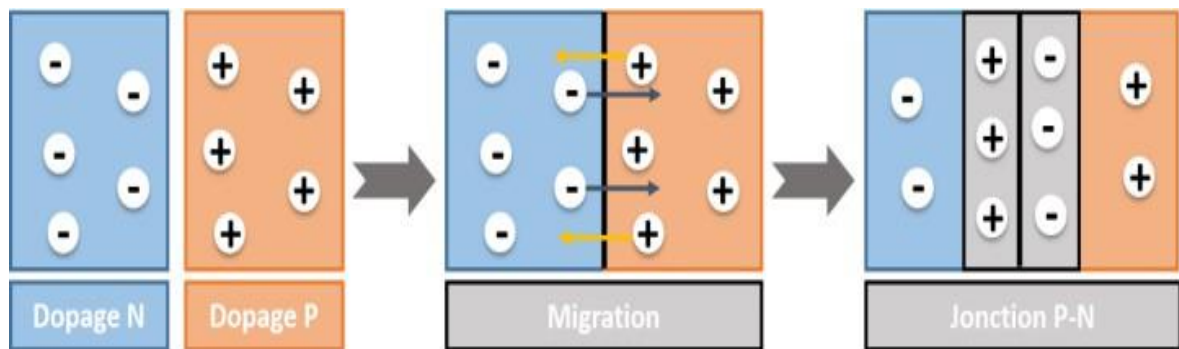
### I.6.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule solaire peut être comparée à une diode photosensible. Il fonctionne sur la base des propriétés des matériaux semi-conducteurs qui génèrent un flux d'électrons lorsqu'ils sont exposés à la lumière (photons). Lorsque les photons frappent un élément semi-conducteur (tel que le silicium), ils séparent les électrons de ses atomes. Ces électrons se déplacent au hasard à la recherche de trous disponibles où ils peuvent se repositionner. [12]



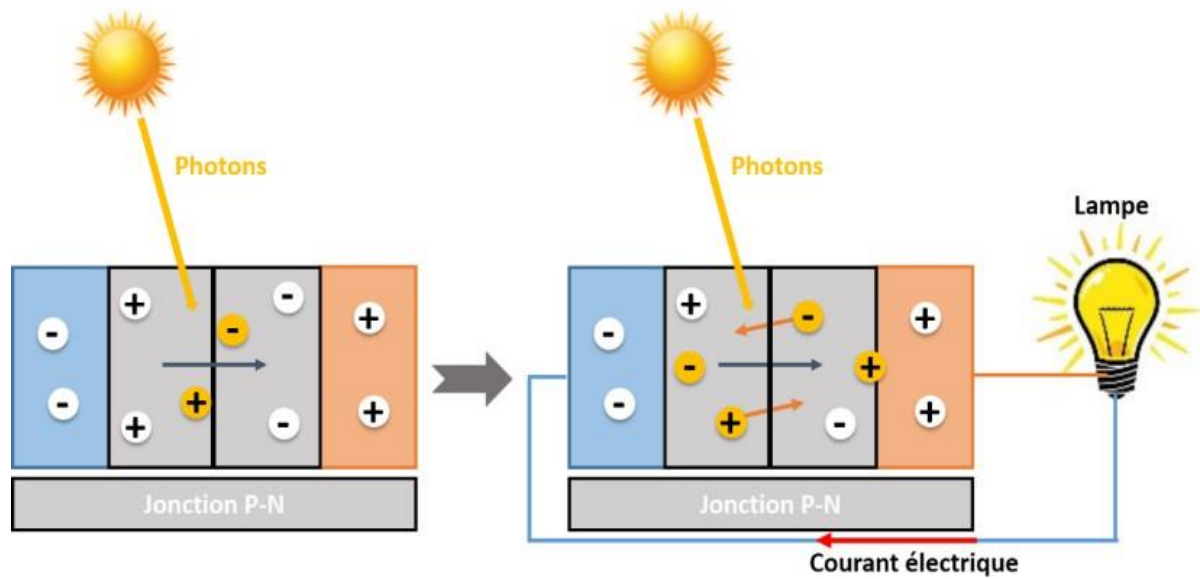
**Figure I.8** Libération d'électrons sous l'effet de photons. [12]

Mais pour qu'il y a un courant électrique, il doit que ces mouvements d'électrons vont tous dans le même sens. Pour cela, il faut associer deux couches minces d'un semi-conducteur dopées différemment. Cette double couche devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative **N**, le côté avec moins d'électrons devient la borne positive **P**. Entre les deux couches, il se crée un champ électrique. [9]



**Figure I.9** Jonction P-N. [9]

Les électrons et les trous immigrés sont collectés par des contacts électriques à l'aide de deux électrodes déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Alors, un courant continu se créer. Une couche anti-reflet, déposée sur la couche exposée au soleil, permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface (accroître la quantité de lumière absorbée). [12-13]



**Figure I.10** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [9]

### I.6.5 Technologie d'une cellule photovoltaïque

#### I.6.5.1 1<sup>er</sup> Génération : Cellules cristallines

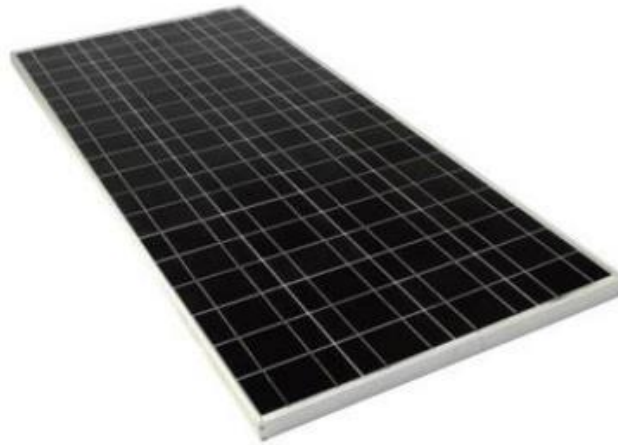
Il existe deux types de cellules cristallines : les cellules monocristallines et les cellules polycristallines : [10-14]

- **Cellule monocristalline** : une cellule simple qui possède l'un des meilleurs rendements actuel puisque celui-ci est compris entre 17% et 20% avec un rapport performance/prix intéressant. Mais, son faible rendement sous éclaircissement réduit et son coût élevé restent un point noir.



**Figure I.11** Cellules monocristallines. [10]

- **Cellule polycristallines** : moins chère que la monocristalline, elle possède un très bon rapport qualité/prix avec un rendement compris entre 16% et 18%. D'autre part, son performance diminue avec un faible éclairement.



**Figure I.12** Cellules polycristallines. [10]

### I.6.5.2 2<sup>ème</sup> Génération : Cellules à couches minces

Dans ce cas, le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (le verre par exemple) [9]. Ce sont les cellules de cette technologie que l'on retrouve dans les montres, calculatrices,...etc.

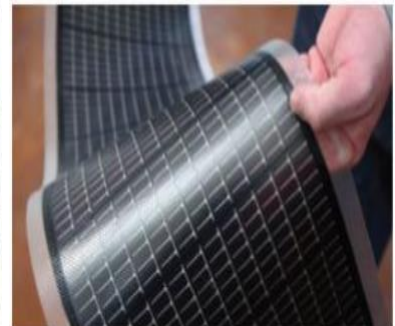
- **Cellule à amorphe silicium** : ce sont les cellules les moins performantes puisqu'elles ont un rendement compris entre 5% et 7%. Alors qu'elles sont moins coûteuses que la première génération et qu'elles fonctionnent très bien avec un éclairement faible. [10]
- **Cellule à tellure de Cadmium et à diséléniure de cuivre et d'indium** : cette technologie présente de bonnes performances avec un rendement va de 11% à 15%, mais sa qualité diminue sous éclairement direct. [10]



**Cellules CdTe**



**Cellules CIS**



**Cellules a-Si**

**Figure I.13** Cellules à couches minces. [10]

### I.6.5.3 3<sup>ème</sup> Génération

Cette génération vise principalement à améliorer le rendement de cellules actuelles. Pour atteindre cet objectif, plusieurs technologies ont été développées, dont les plus importantes sont les suivantes. [10-14-15]

- Cellule tandem.
- Cellule pérovskite.
- Cellule organique.
- Cellule à concentration.

### I.6.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques électriques représentent généralement la relation entre deux grandeurs électriques (comme le courant et la tension) dans des conditions données et se présentent souvent sous la forme de courbes. [12]

#### I.6.6.1 Caractéristiques Courant-Tension

C'est une caractéristique fondamentale de la cellule solaire. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous des conditions climatiques constantes de la façon suivante : [12]

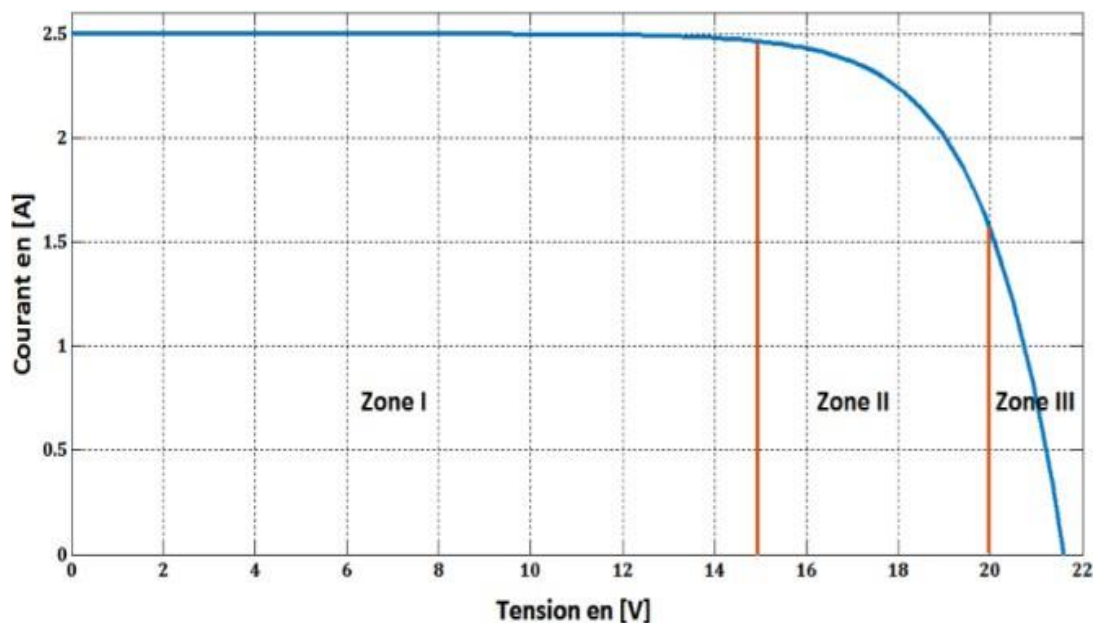
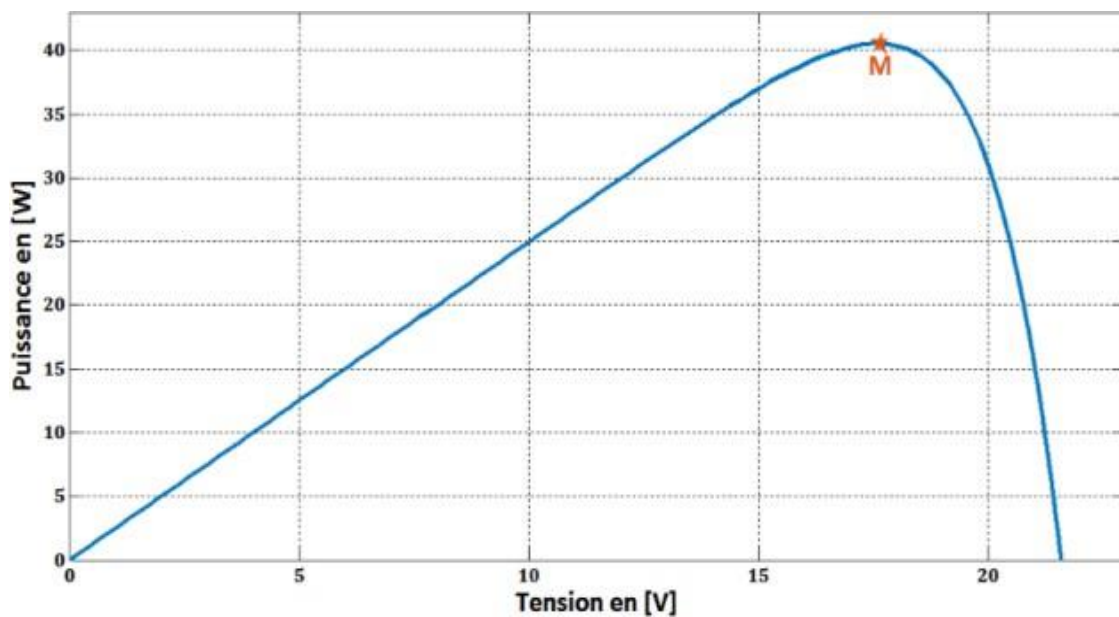


Figure I.14 Caractéristique  $I=f(U)$  d'une cellule solaire. [12]

Selon la courbe  $I=f(U)$ , c'est la charge aux bornes de la cellule qui va déterminer le point de fonctionnement de la cellule PV, c'est à dire que la caractéristique fondamentale n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement. [10-12]

### I.6.6.2 Caractéristiques Puissance-Tension

Cette caractéristique présente la puissance débitée par la cellule, c'est le produit du courant multiplié par la tension correspondante. Dans des conditions climatiques constantes, elle est représentée par la courbe dans la page suivante : [12]

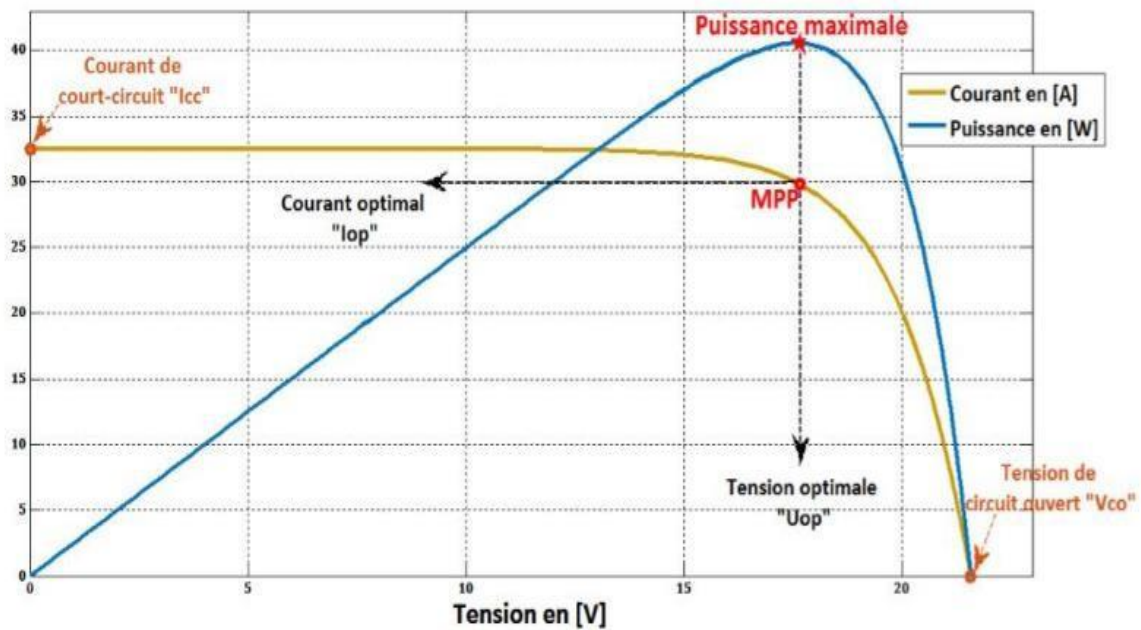


**Figure I.15** Caractéristique  $P=f(U)$  d'une cellule solaire. [12]

La figure I.15 démontre que la puissance générée est liée au point de fonctionnement, qui est déterminé par le courant et la tension imposées par la charge. Le point **M** représente le point optimal de fonctionnement, où la puissance maximale est atteinte.

### I.6.7 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

De nombreux paramètres, appelés également paramètres PV, peuvent être utilisés pour caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont déduits des caractéristiques  $I=f(U)$  et  $P=f(U)$ . En traçant ces deux caractéristiques (comme illustré dans la figure I.16), il est possible d'obtenir de nombreux paramètres physiques caractéristiques de la cellule. [10-12]

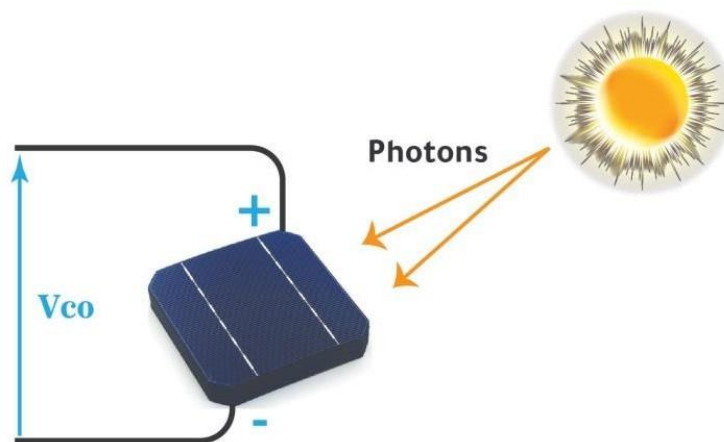


**Figure I.16** Les caractéristiques électriques et les paramètres physiques d'une cellule solaire. [12]

Les premiers paramètres visibles sur la figure I.16 sont le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le courant et la tension optimaux, ainsi que la puissance maximale.

### a) Tension de circuit ouvert (UCO)

La tension de circuit ouvert correspond à la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'elle est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque les pôles + et - ne sont connectés à aucun autre circuit électrique (aucun courant ne traverse la cellule). Dans cette configuration, la cellule ne fournit aucune puissance.



**Figure I.17** Essai en circuit ouvert. [72]

### b) Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )

C'est le courant qui traverse la cellule PV lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire que lorsque le pôle positif est relié au pôle négatif (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ( $P=U \times I$ ) est nulle.

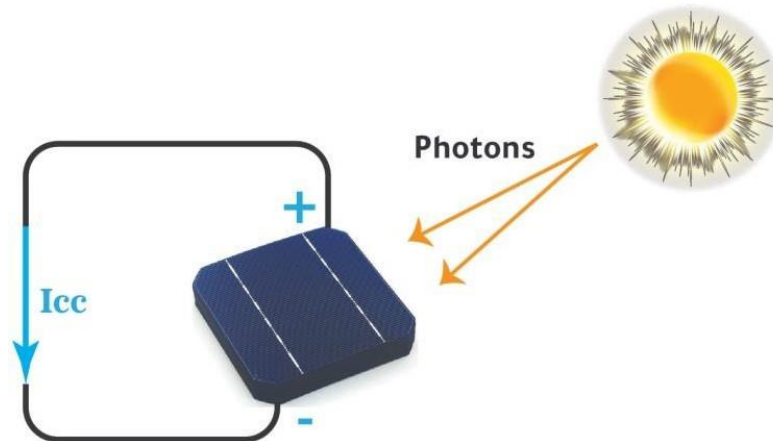


Figure I.18 Essai en court-circuit. [72]

### c) Tension optimale ( $U_{OP}$ )

C'est la tension qui correspond au maximum de la puissance de la cellule.

### d) Courant optimal ( $I_{OP}$ )

C'est le courant pour lequel la puissance est maximale.

### e) Puissance maximale ( $P_{MAX}$ )

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule PV sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement, symbolisé par **MPP** : **M**aximum **P**ower **P**oint, défini par les coordonnées ( $I_{OP}$ ,  $U_{OP}$ ) de la courbe de caractéristique courant-tension, où  $I_{OP}$  soit compris entre 0 et  $I_{CC}$  et  $U_{OP}$  soit comprise entre 0 et  $U_{CO}$ .

### f) Rendement ( $\eta$ )

Le rendement des cellules PV correspond à leur efficacité de conversion en puissance. Il est calculé en divisant la puissance maximale délivrée par la cellule par la puissance

lumineuse incidente (PIN), qui dépend elle-même de la surface de la cellule (S) et de l'éclairement incident (E)

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot U_{co}}{E \cdot S} \quad (I-1)$$

Où : FF est le facteur de forme

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{max\ ideale}} = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot U_{co}} \quad (I-2)$$

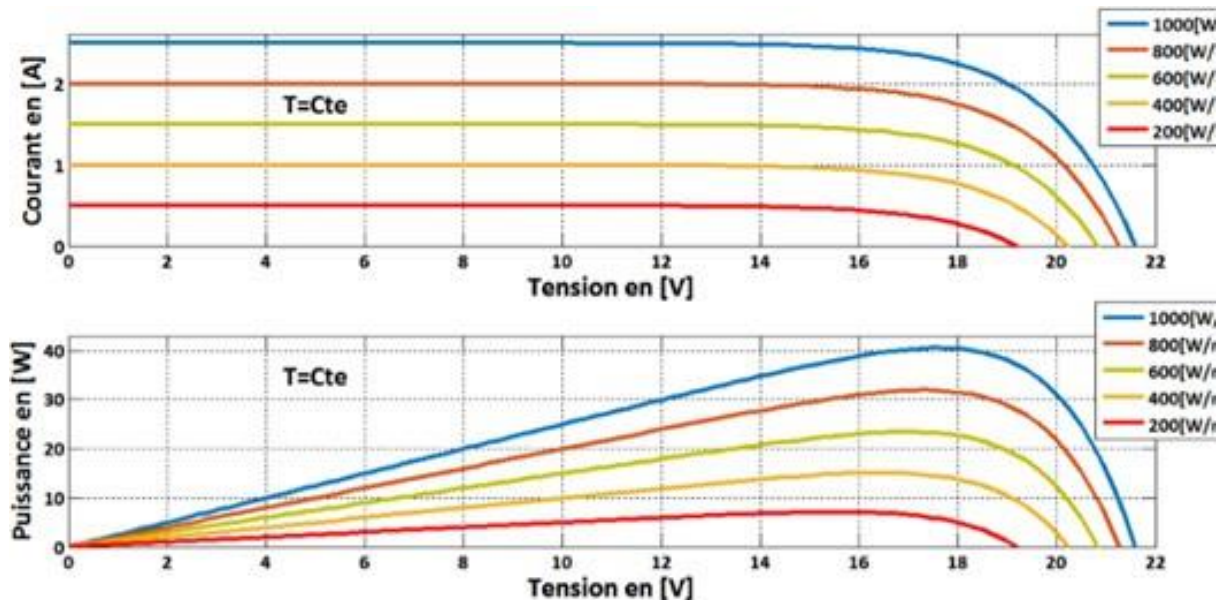
Pour améliorer le rendement, il est possible d'augmenter le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. La valeur du rendement de conversion est un indicateur clé des performances de la cellule.

### I.6.8 Paramètres climatiques d'une cellule PV

La fonction de la cellule photovoltaïque consiste à convertir le rayonnement solaire en électricité, en captant l'énergie des photons (irradiance) ainsi que la chaleur de l'atmosphère. Deux paramètres principaux influencent la conversion d'énergie de la cellule solaire, à savoir l'irradiance et la température. [9]

#### I.6.8.1 Influence de l'irradiance (E)

Les caractéristiques électriques de la cellule solaire variaient selon la quantité d'irradiance à laquelle elle était exposée, tandis que la température restait constante.

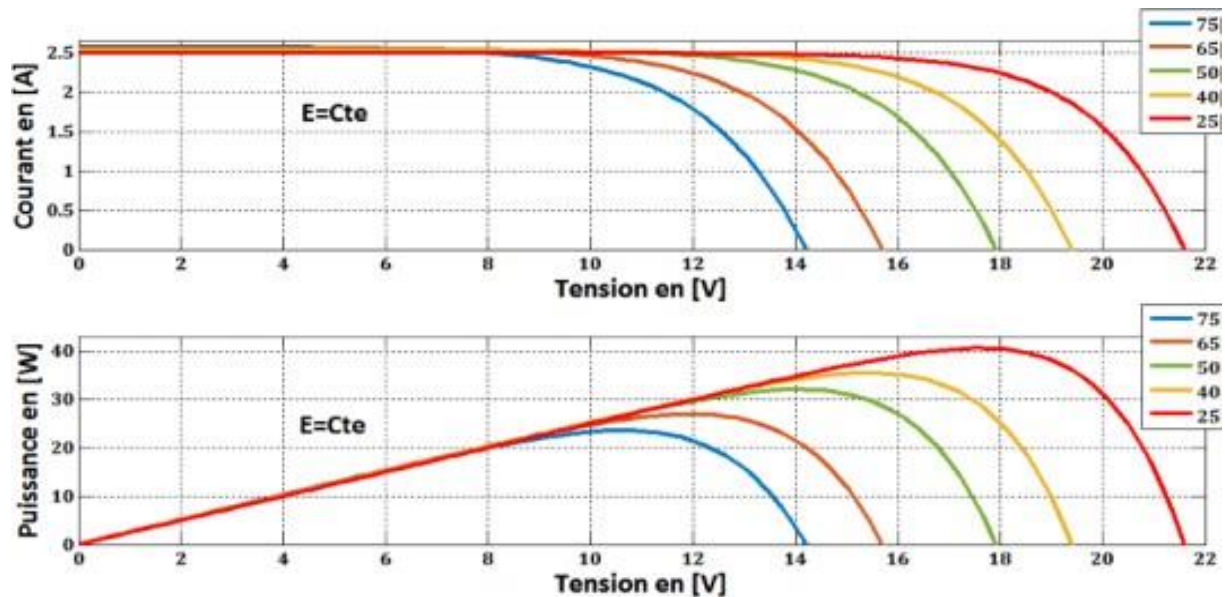


**Figure I.19** Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T constante et E variable. [12]

Il en résulte que la puissance générée par la cellule solaire augmente proportionnellement à l'irradiance. Par conséquent, on peut conclure que le rendement d'une cellule photovoltaïque augmente significativement avec l'augmentation de l'irradiance, et inversement.

### I.6.8.2 Influence de la température (T)

La figure I.20 illustre la variation des caractéristiques électriques d'une cellule solaire soumise à une température variable, mais à un éclairement constant.



**Figure I.20** Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T variable et E constant. [12]

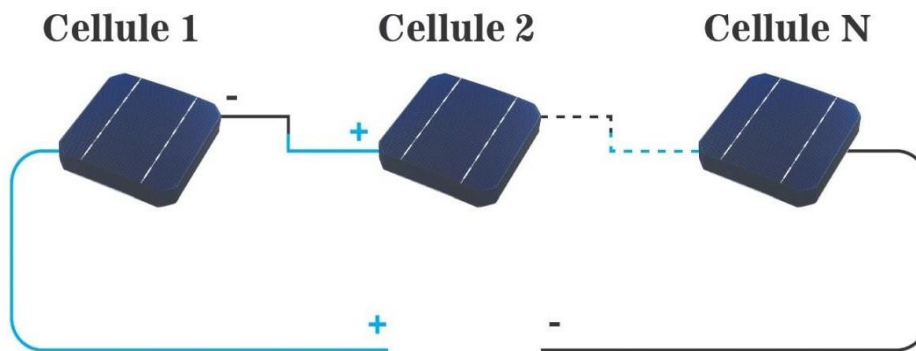
En général, l'exposition d'une cellule solaire à plus de 1000[W/m<sup>2</sup>] d'irradiance affecte le rendement de la cellule d'un très faible pourcentage tandis que la température inférieure à 25[°C] déforme les caractéristiques électriques de la cellule et réduit ainsi son rendement. Il est donc préférable, dans la pratique, de placer la cellule solaire dans un environnement où la plage d'irradiance est de 100[W/m<sup>2</sup>] à 1000[W/m<sup>2</sup>], en plus d'une température comprise entre 25[°C] et 100[°C]. [13]

### I.6.9 Regroupement des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques peuvent produire du courant électrique continu grâce à leur caractéristique de générateur dipolaire. Il est possible d'augmenter la production d'énergie en les connectant en série, en parallèle ou en combinaison des deux pour répondre aux exigences de la charge. [14-15]

### I.6.9.1 Regroupement en série

Le montage de cellules PV en série est l'option permettant d'additionner les voltages de chaque cellule en préservant un ampérage identique. Le pôle positif d'une cellule est relié au pôle négatif de la cellule suivante. Ce type de branchement s'effectue avec des cellules de même ampérage. En effet, si deux cellules d'ampérage différent sont reliées, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible. Un tel montage influe seulement sur le voltage. [14-15]



**Figure I.21** Regroupement en série des cellules photovoltaïques. [72]

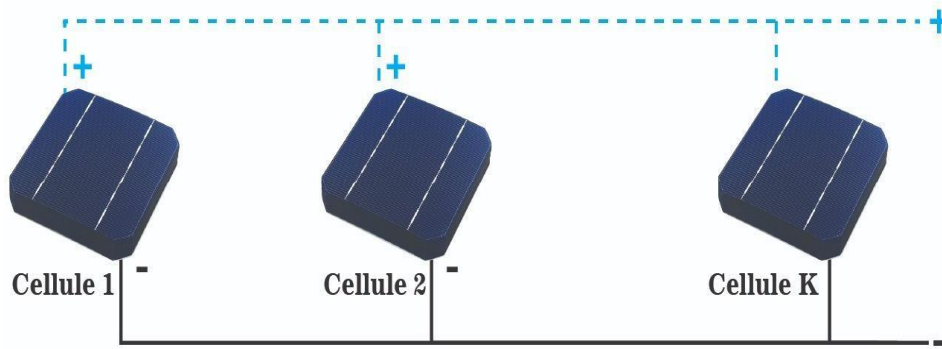
Où :  $N$  est le nombre de cellules connectées en série.

L'intensité maximale du courant de court-circuit obtenue ( $I_{cc}^T$ ), qui traverse toutes les cellules connectées en série, est limitée par celle de la cellule la plus faible. Pour la tension résultante de circuit ouvert ( $V_{oc}^T$ ), elle est égale à la somme de tensions appliquées aux bornes de chaque cellule. L'équation I.3 résume les caractéristiques électriques d'association de  $S$  cellules [12] :

$$I_{cc}^T = P \cdot I_{cc} \text{ avec } V_{co}^T = S \cdot V_{co} \quad (\text{I- 3})$$

### I.6.9.2 Regroupement en parallèle

Le raccordement en parallèle des cellules photovoltaïques augmente l'intensité tout en conservant la même tension. Cela affecte l'ampérage et non la tension. Les bornes positives et les bornes négatives de chaque cellule sont connectées ensemble. [14-15]



**Figure I.22** Regroupement en parallèle des cellules photovoltaïques. [72]

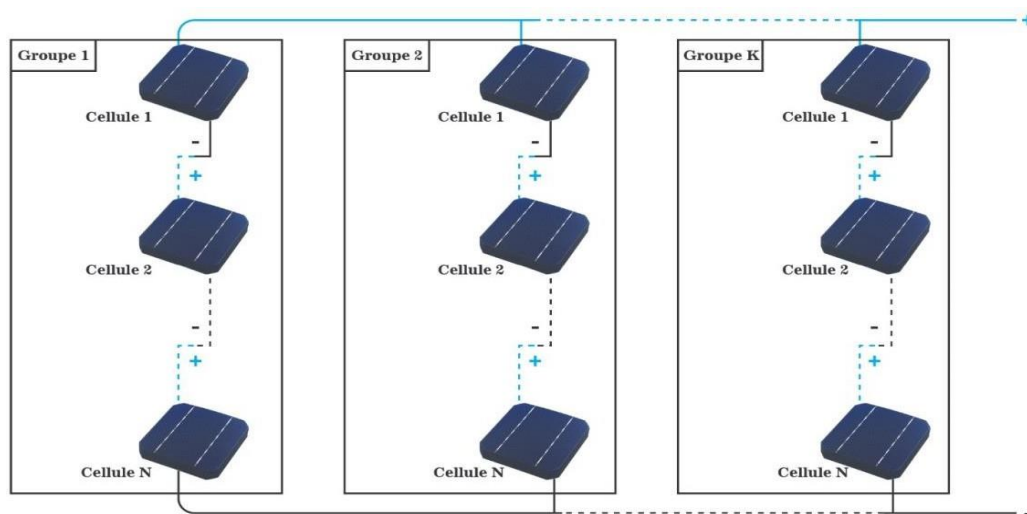
Où :  $K$  est le nombre de cellules connectées en parallèle.

La tension globale de circuit ouvert ( $V_{oc}^T$ ) est identique à celle appliquée aux bornes de chaque cellule. Les intensités des courants de court-circuit produits dans chaque branche s'ajoutent mathématiquement afin de donner l'intensité maximale ( $I_{cc}^T$ ) qui circule dans le circuit. Alors, les caractéristiques électriques de combinaison de  $P$  cellules en parallèle sont résumées par l'équation suivante [12] :

$$I_{cc}^T = P \cdot I_{cc} \text{ avec } V_{co}^T = V_{co} \quad (\text{I-4})$$

### I.6.9.3 Regroupement hybride

Le montage hybride de cellules photovoltaïques associe la connexion en série et en parallèle. Il consiste en une parallélisation de deux ou plusieurs groupes de cellules reliées en série. Ce type de raccordement a un impact sur l'intensité et la tension. [14-15]



**Figure I.23** Montage hybride des cellules photovoltaïques. [72]

La tension maximum obtenu ( $V_{oc}^T$ ) est le même que celle aux bornes de chaque groupe, chacun de ces groupes est soumis à un voltage qui est la somme des tensions produites par ses cellules constitutives. Pour protéger contre les problèmes de surcharge et surintensité, il faut que tous les groupes génèrent le même voltage.

L'intensité de courant maximale résultante ( $I_{cc}^T$ ) est la somme mathématique de l'intensité produite par chaque groupe. Toutes les cellules formant un groupe sont traversées par la même intensité qui est imposée par la cellule possédant le plus faible ampérage. Alors, les caractéristiques électriques de combinaison hybride de cellules sont résumées par l'équation suivante [12] :

$$I_{cc}^T = N_p \cdot I_{cc} \text{ avec } V_{co}^T = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{I- 5})$$

### I.6.10 Circuit équivalent d'une cellule

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 suivant [42] :

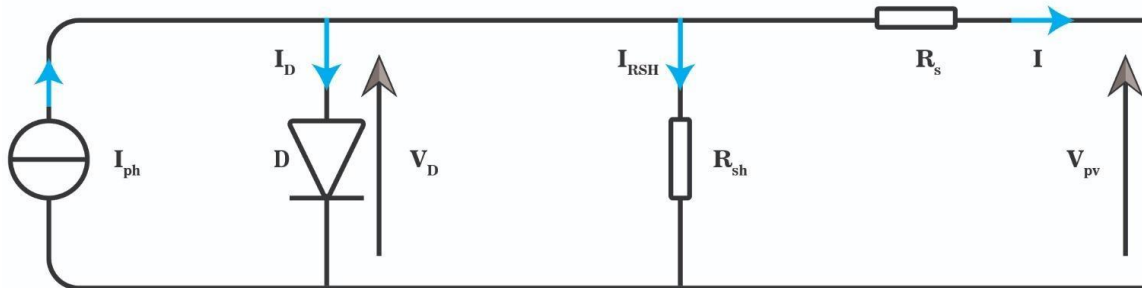


Figure I.24 Circuit équivalent d'une cellule PV. [72]

La résistance série d'une cellule est déterminée par plusieurs facteurs, notamment la résistance du semi-conducteur utilisé, la résistance de contact des grilles collectrices et la résistivité de ces grilles. Elle correspond à la résistance interne de la cellule. En revanche, la résistance shunt est causée par un courant de fuite au niveau de la jonction.

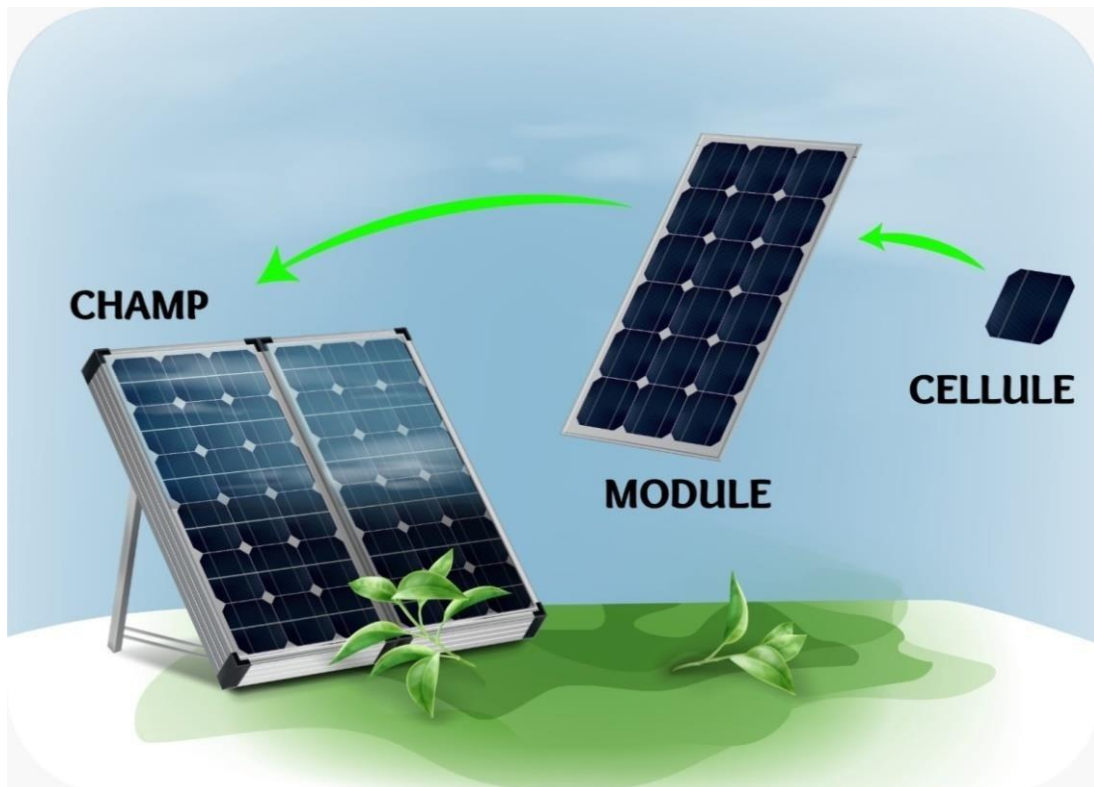
## I.7 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique utilisable. Il est généralement composé de panneaux solaires

photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'un onduleur et d'une batterie de stockage. Les panneaux solaires photovoltaïques sont constitués de cellules solaires qui absorbent la lumière du soleil et produisent de l'électricité à courant continu. Le régulateur de charge est utilisé pour protéger la batterie contre une surcharge ou une décharge excessive, tandis que l'onduleur est utilisé pour convertir l'électricité à courant continu en électricité à courant alternatif, qui peut être utilisée pour alimenter des appareils électriques ou être injectée dans le réseau électrique. La batterie de stockage est utilisée pour stocker l'énergie électrique produite par le système photovoltaïque pour une utilisation ultérieure, lorsque la production d'électricité solaire est faible ou inexistante. Les systèmes photovoltaïques sont couramment utilisés pour alimenter des maisons, des entreprises, des installations industrielles et des équipements éloignés de tout réseau électrique. [10-12]

### I.7.1 Le générateur photovoltaïque

Un ou plusieurs modules photovoltaïques forment le champ photovoltaïque (figure I.25) Ils transforment l'énergie des rayons lumineux en énergie électrique. La durée de vie des modules solaires photovoltaïques est estimée de 20 à 30 ans. [46]



**Figure I.25** Assemblage de cellules, du module au Générateur PV. [72]

L'emplacement du générateur photovoltaïque devra respecter les contraintes suivantes [46]:

- Orientation et inclinaison : les modules doivent être orientés au sud dans l'hémisphère Nord et au nord dans l'hémisphère Sud.
- Exposition aux rayons solaires toute la journée en toute saison.
- Accès facile pour le nettoyage.
- Proximité avec la régulation, le stockage et les récepteurs.
- Fixations solides pour résister aux vents : les modules sont généralement fixés soit au sol, soit en toiture, soit en façade.

### **I.7.2 Les types des systèmes photovoltaïques**

Les systèmes photovoltaïques se présentent sous trois formes : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau. Les deux premiers sont utilisés dans des régions éloignées et isolées, car ils sont indépendants du réseau électrique de distribution. [10, 12]

#### **I.7.2.1 Systèmes connectés au réseau**

Les systèmes de production d'énergie PV connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [10, 12].

#### **I.7.2.2 Systèmes hybrides**

Les systèmes d'énergie hybride combinent au moins deux sources d'énergie renouvelable avec une ou plusieurs sources d'énergie classique. Bien que les sources d'énergie renouvelable et classique ne fournissent pas une puissance constante, leur combinaison permet d'obtenir une production électrique continue en tirant parti de leurs complémentarités. Les différentes sources d'un système hybride peuvent être reliées de deux manières pour assurer une alimentation en électricité continue ou alternative [10, 12].

#### **I.7.2.3 Systèmes autonomes**

Ces systèmes photovoltaïques sont les plus courants et les plus simples ; ils fonctionnent de manière autonome sans nécessiter d'autres sources d'énergie [10, 12].

### I.7.3 Système de conditionnement de puissance

Le système de conditionnement de puissance est un système (une unité) intermédiaire d'adaptation destiné pour assurer le fonctionnement d'une charge hydraulique en fonction de la puissance PV disponible. [5]

Selon la nature de la charge hydraulique (DC ou AC), l'unité de conditionnement est plus souvent un convertisseur statique de type hacheur ou onduleur, en plus d'une batterie d'accumulation qui compense l'énergie produite par le système PV en cas de panne ou d'absence de rayonnement solaire dû à l'obscurité ou aux mauvaises conditions météorologiques. [5-17]

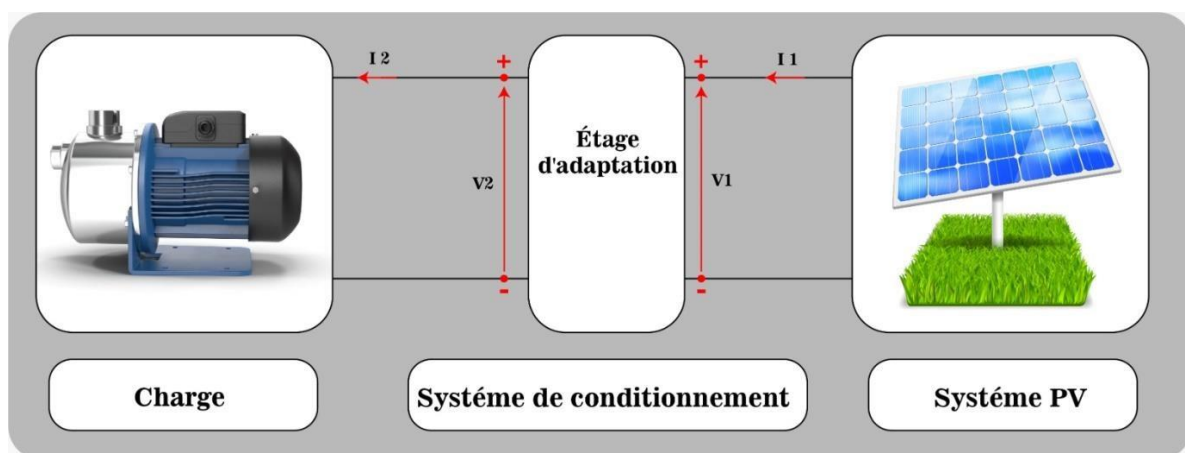


Figure I.26 Rôle du système de conditionnement de puissance. [72]

#### I.7.3.1 Le convertisseur DC/DC (hacheur)

Le convertisseur, appelé souvent « hacheur », apparaît dans toutes les configurations sauf pour le système à couplage direct ou pour certains cas d'applications où la charge est à courant alternatif. C'est un composant essentiel dans les systèmes photovoltaïques y compris le pompage solaire photovoltaïque. Il permet d'adapter la tension à des récepteurs fonctionnant à une tension continue différente à celle du panneau photovoltaïque ; et en plus, de maximiser la puissance issue de ce dernier. Le hacheur peut être réalisé avec un interrupteur électronique commandable tel que les thyristors GTO ou des transistors à effet de champ bipolaire associé à une diode de roue libre [49].

Les trois configurations les plus courantes du hacheur sont :

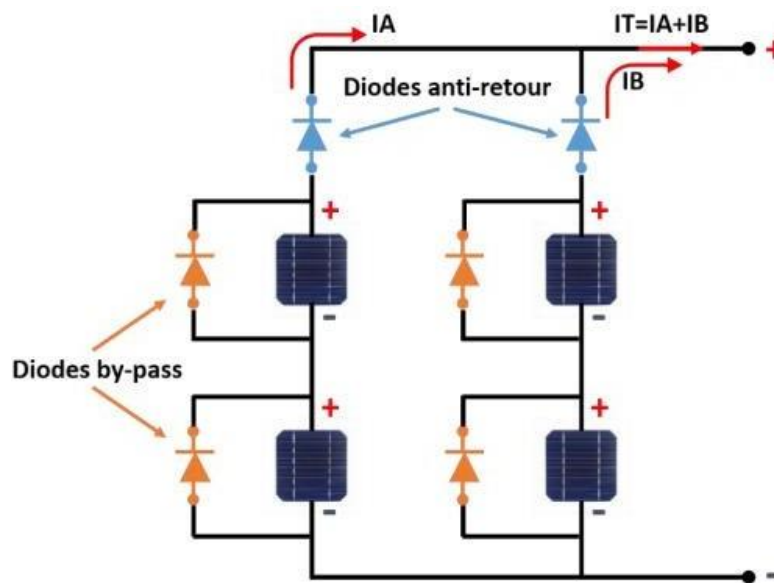
- Convertisseur abaisseur « BUCK ».
- Convertisseur élévateur « BOOST ».
- Convertisseur abaisseur-élévateur « BUCK-BOOST ».

### I.7.3.2 Le convertisseur DC/AC (onduleur)

Un convertisseur DC/AC (ou onduleur) est un dispositif qui assure la conversion de la tension continue fournie, soit directement par les panneaux photovoltaïques ou par les batteries à la sortie du convertisseur DC/DC (hacheur), pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant à une tension alternative (moteur ou réseau électrique à courant alternatif). En plus, il peut aussi assurer la commande de maximisation de la puissance du générateur photovoltaïque (MPPT). Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe à alimenter (puissance et tension) [49].

### I.7.4 Protection des modules photovoltaïques

Lors de la conception des installations photovoltaïques, leur protection électrique doit être élaborée afin d'augmenter leur durabilité en évitant les défauts destructeurs dus au mauvais raccordement et au mauvais fonctionnement des générateurs photovoltaïques. Cela se fait en utilisant deux types de protection dans les installations photovoltaïques : la diode by-pass et la diode anti-retour, comme illustré à la Figure (I.27)

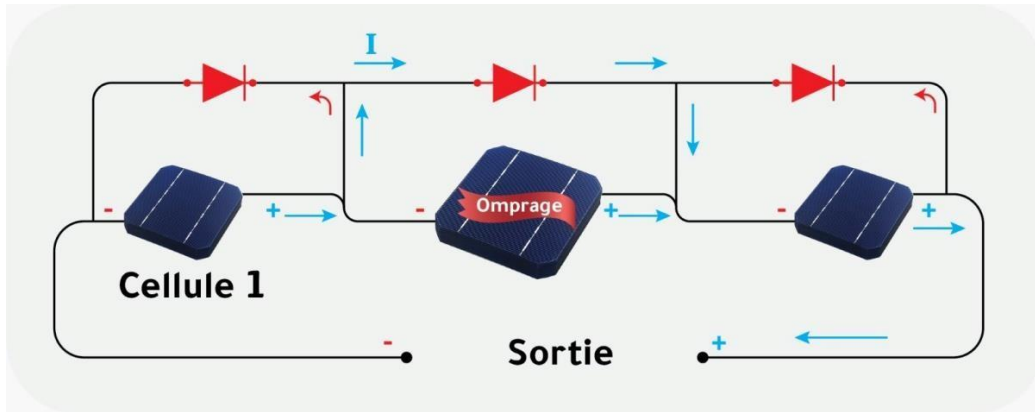


**Figure I.27** Protection d'un champ photovoltaïque composé de  $N_{st}$  strings branchés en parallèle comportant chacun de modules associés en séries. [72]

#### I.7.4.1 Diodes de by-pass

Les diodes by-pass sont conçues pour protéger les cellules PV combinées en série. Elles peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène, évitant ainsi l'apparition de points chauds (phénomène de hot spot) et la destruction des cellules mal éclairées [9-13].

Pratiquement, La diode by-pass est installée en dérivation et en polarité inverse (assemblage antiparallèle) avec une ou plusieurs cellules. Si une cellule ou un groupe de cellules est ombragé, le courant passera par la diode by-pass, ce qui permet ainsi d'éviter un échauffement trop intense de ces cellules. En fait, une diode by-pass est installée en anti-parallèle à une branche de 18 cellules au silicium cristallin associées en série [9].



**Figure I.28** Fonctionnement des diodes by-pass. [72]

### I.7.4.2 Diodes anti-retours

La diode anti-retour, c'est un dispositif unidirectionnel développé pour faire la protection de cellules PV regroupées en parallèle. Son rôle est d'empêcher le phénomène du courant de retour (le courant négatif) dans les modules. Le phénomène du courant de retour peut apparaître lorsque deux cellules ou plus de voltage différent sont branchées en parallèle, ou bien si une cellule alimente une charge d'impédance très élevée sous mauvaises conditions météorologiques (faible éclairement et haute température) [9-13].

En pratique, la diode anti-retour est mise en série avec une branche de cellules liées en série afin d'éviter chaque courant négatif pouvant la traverser en raison du déséquilibre de tension entre les branches du module PV ou bien entre le module lui-même et la charge [9].

### I.7.5 Avantages et Inconvénients des systèmes photovoltaïques

Bien que plusieurs sources de production d'énergie électrique soient disponibles, le photovoltaïque est l'un des plus importants en raison de sa grande variété d'options. Cependant, certains obstacles ont freiné son développement. Ci-dessous, nous examinerons les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques. [10-15]

#### Les avantages :

- Maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée.

## Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque :

---

- Equipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte, aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est un système purement propre et écologique.
- Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- Il est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.

### Les inconvénients :

- Les taux de rendement des panneaux photovoltaïques sont encore relativement faibles.
- Coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.
- Fabrication de panneaux photovoltaïques à haute technologie nécessite énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.

## I.8 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, il apparaît que la technologie du pompage photovoltaïque présente un grand potentiel d'amélioration en termes de contrôle, étant donné qu'elle résulte principalement de la combinaison de différentes technologies (photovoltaïque, motopompe, etc.) avec des techniques de contrôle modernes. Cette caractéristique permet une grande variété d'applications de la technologie de pompage solaire dans de nombreux domaines, avec des performances élevées et des coûts réduits.

Nous avons débuté notre étude en nous intéressant à l'énergie solaire et aux différents types de rayonnements solaires, notamment le rayonnement direct, diffus et l'albédo. Nous avons également examiné de manière générale l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que les différentes manières d'utiliser un système solaire photovoltaïque (autonome, hybride, raccordé au réseau), en soulignant les avantages et inconvénients de chaque méthode dans l'utilisation de l'énergie photovoltaïque.

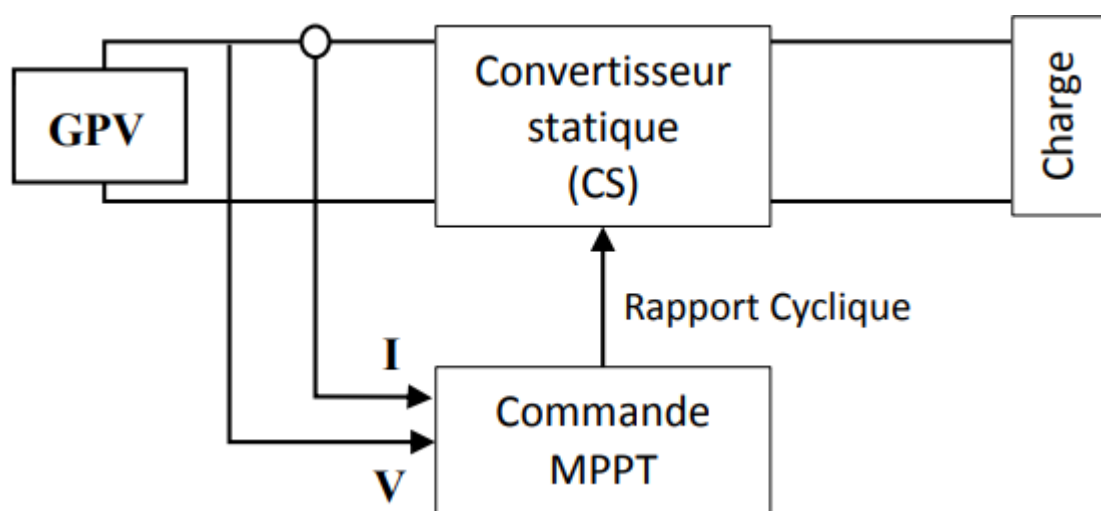
## **CHAPITRE II: Maximisation de l'efficacité énergétique** **dans le systeme PV**

### II.1 Introduction

Il existe des stratégies de commande spécifiques conçues pour amener les dispositifs à fonctionner à leur performance maximale, même si le point de performance maximal est inconnu à l'avance, ou s'il a été modifié sans préavis ou sans explication. Dans le cas des sources d'énergie, cela correspond à leur point de puissance maximale. Ces techniques de commande sont communément appelées « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) dans la littérature technique. Le principe de ces techniques est de trouver le point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge, de manière à maximiser le transfert de puissance. [51]

### II.2 Principe de la commande MPPT

En utilisant une commande MPPT associée à un étage intermédiaire d'adaptation, il est possible de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à produire en permanence sa puissance maximale, comme le stipule sa définition. Ainsi, quelle que soit la variation des conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur permet de placer le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{PPM}$  et  $I_{PPM}$ ). Pour optimiser la chaîne de conversion photovoltaïque, un convertisseur statique (CS) est utilisé et est commandé par la commande MPPT [54]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure IV.1.



**Figure II.1** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge. [54]

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPPT [55].

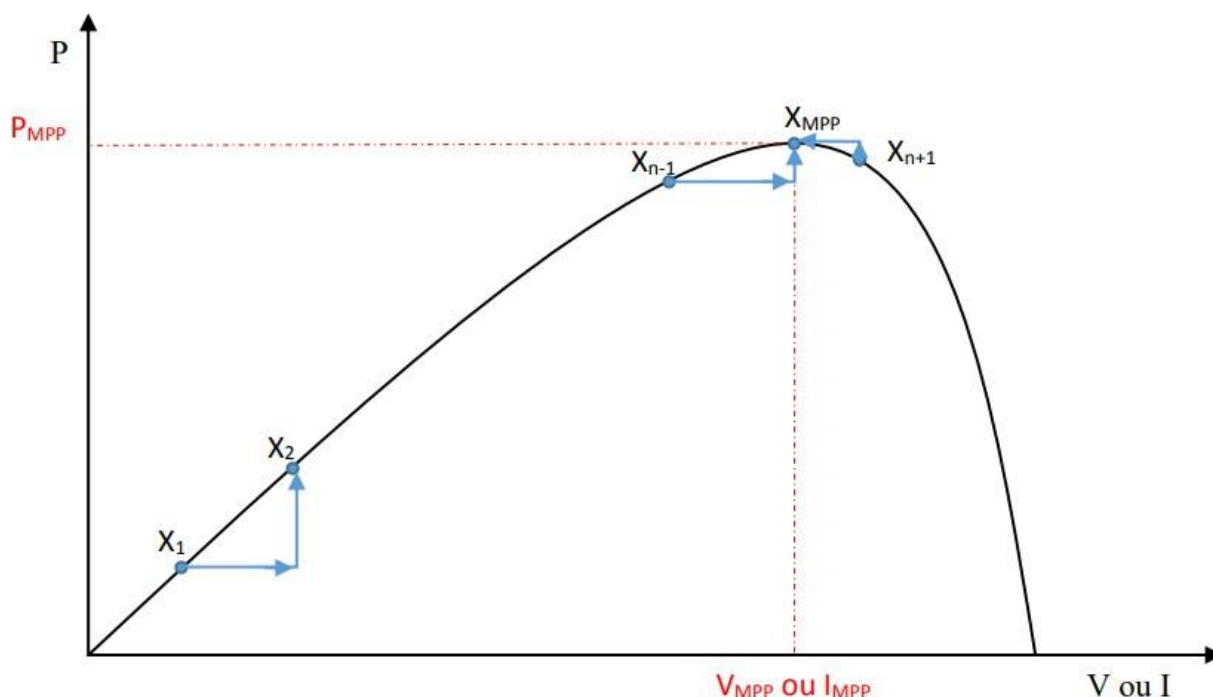


Figure II.2 Principe de la commande MPPT. [54]

### II.3 Classification Des Commandes MPPT

En général, les commandes MPPT peuvent être classées en fonction de leur implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Toutefois, il est plus pertinent de les classer en fonction du type de recherche effectuée et des paramètres d'entrée de la commande MPPT.

#### II.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée

##### 1) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le

GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal ( $V_{OPT}$  et  $I_{OPT}$ ) et les paramètres caractéristiques du module PV ( $V_{OC}$  et  $I_{CC}$ ). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [56].

### 2) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de  $P_{max}$  est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [54].

### II.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

#### 1) MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [54-57].

#### 2) MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des

changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [54-57].

### II.3.3 Les algorithmes MPPT

Les algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont utilisés pour maximiser la production d'énergie des panneaux solaires en ajustant leur point de fonctionnement optimal en fonction des conditions de lumière et de température. Voici quelques exemples d'algorithmes MPPT :

**Perturbation et observation (P&O) :** Cet algorithme mesure la puissance de sortie du panneau solaire à intervalles réguliers et modifie la tension d'entrée du convertisseur DC-DC jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Il perturbe la tension de manière répétée en ajoutant ou en soustrayant un petit montant de tension, puis observe la puissance de sortie pour déterminer si la tension doit être augmentée ou diminuée.

**Incrémentation conductance (InC) :** L'algorithme Incrémentation conductance mesure la conductance instantanée du panneau solaire et ajuste la tension d'entrée pour maximiser la conductance. La conductance est déterminée en calculant la pente de la courbe caractéristique courant-tension du panneau solaire.

**Perturbation adaptative en boucle fermée (ALP) :** L'algorithme ALP utilise une perturbation en boucle fermée pour déterminer le point de puissance maximale. Il mesure la puissance de sortie et ajuste la tension d'entrée jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Le contrôleur ajuste ensuite la fréquence de la perturbation en fonction de l'écart de puissance par rapport au point de puissance maximale pour réduire le temps de réponse.

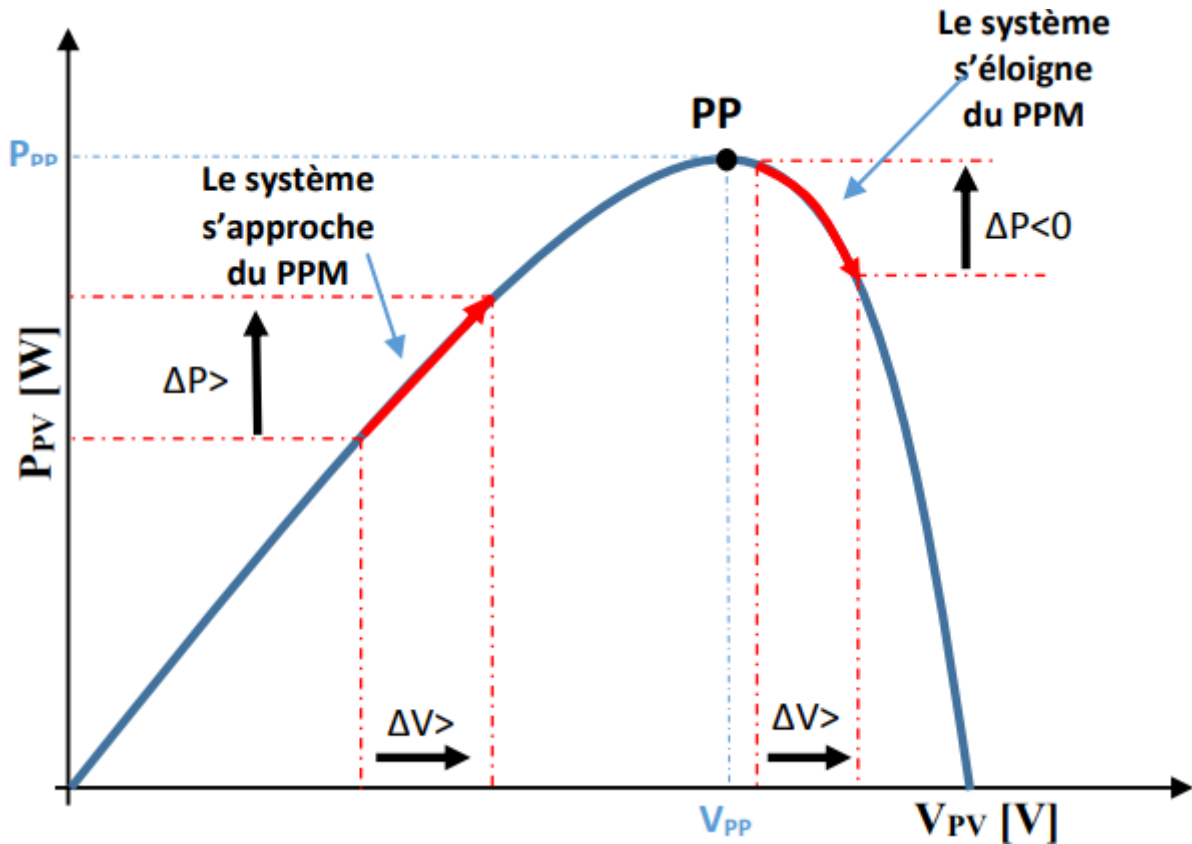
**Fuzzy logic (FL) :** L'algorithme FL utilise des règles de logique floue pour ajuster la tension d'entrée du convertisseur DC-DC. Les règles sont définies en fonction des mesures de tension et de courant du panneau solaire, ainsi que des valeurs de référence pour la puissance et la tension.

Ces algorithmes peuvent être utilisés dans des systèmes autonomes ou connectés au réseau pour maximiser l'efficacité énergétique des panneaux solaires.

### II.3.3.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension  $V_{ref}$ , ou du courant  $I_{ref}$ , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ( $P=VI$ ) [54]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [58].

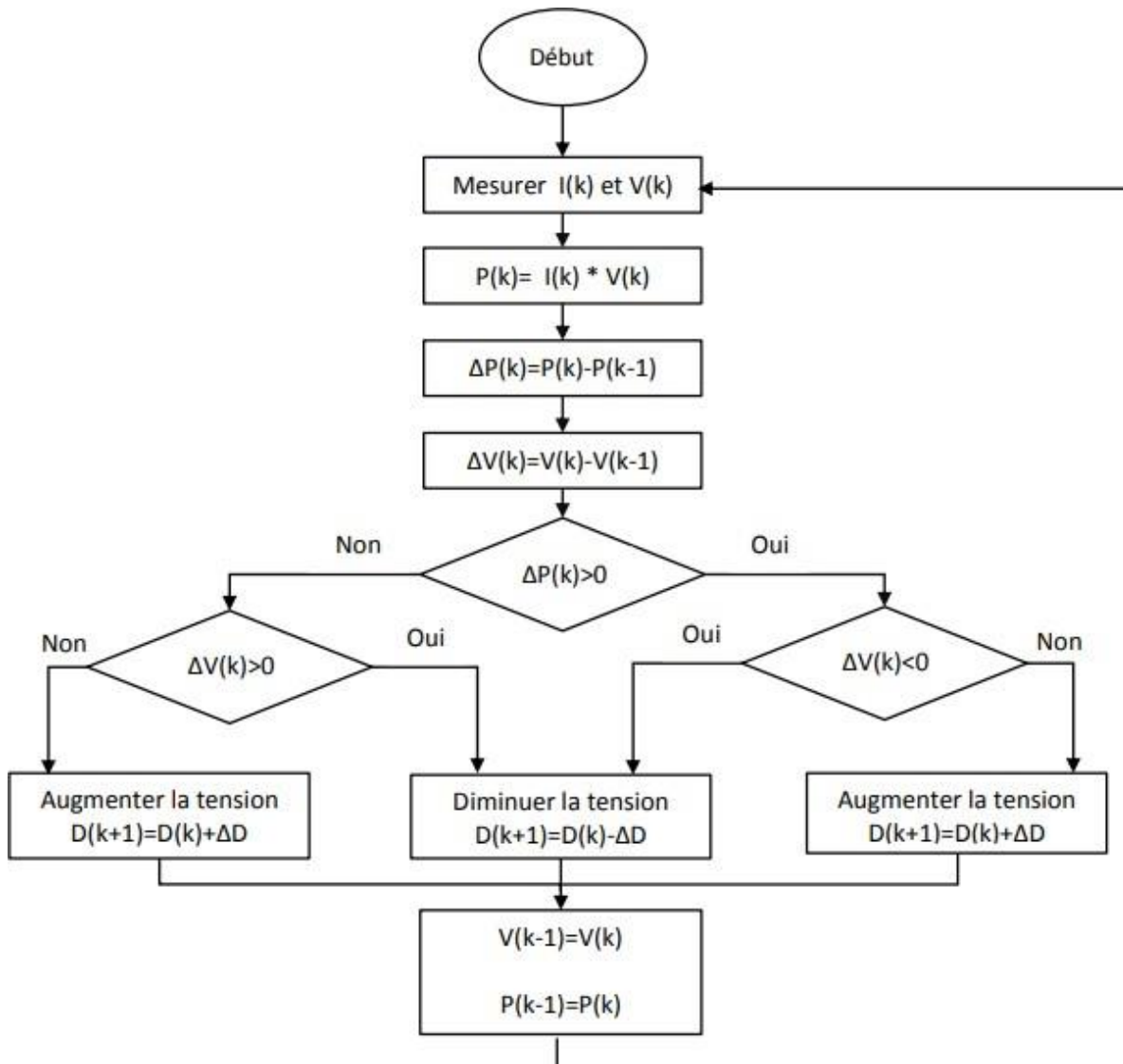
Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension  $V_{PV}$ , ce qui engendre une variation de la puissance. Figure IV.5 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , 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  $P(V)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [54].



**Figure II.3** Recherche du PPM par la méthode (P&O). [54]

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $p(v)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [59].

La Figure IV.4 dans la page suivante illustre l'algorithme traditionnel d'un contrôleur MPPT basé sur la méthode Perturbation et Observation (P&O), dans lequel la variation de la puissance est évaluée après chaque perturbation de la tension d'entrée.



**Figure II.4** L'algorithme de P&O classique. [54]

Bien que la méthode P&O soit populaire en raison de sa simplicité d'implémentation, elle présente certains inconvénients tels que des oscillations persistantes autour du Point de Puissance Maximale (PPM) lorsque le système atteint son état stationnaire. Cela est dû à la nécessité de répéter périodiquement la procédure de recherche du PPM, ce qui force le système à osciller constamment autour de cette valeur optimale [60]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [54] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure III.7. Commenant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation  $\Delta V$  dans la tension  $V$  amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de  $P_1$  à  $P_2$ , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. [59]

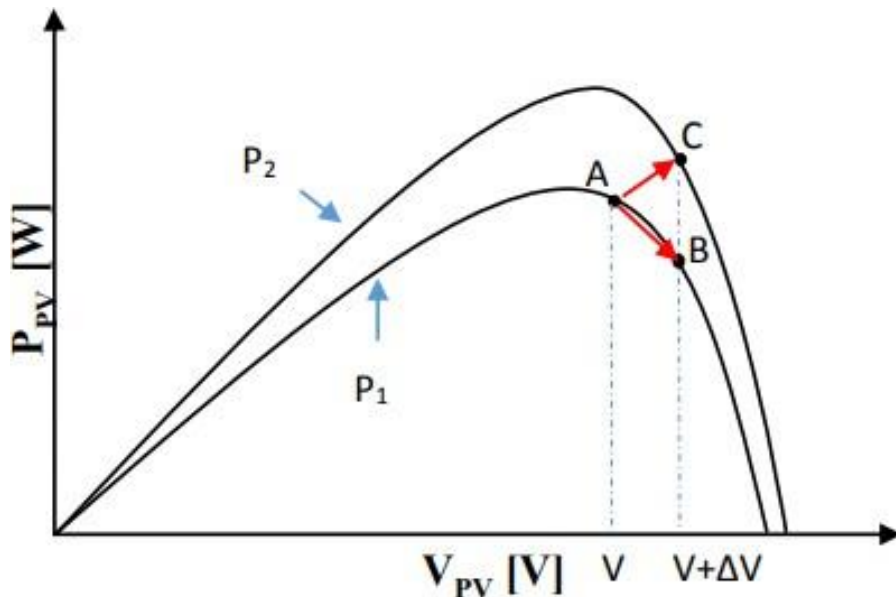
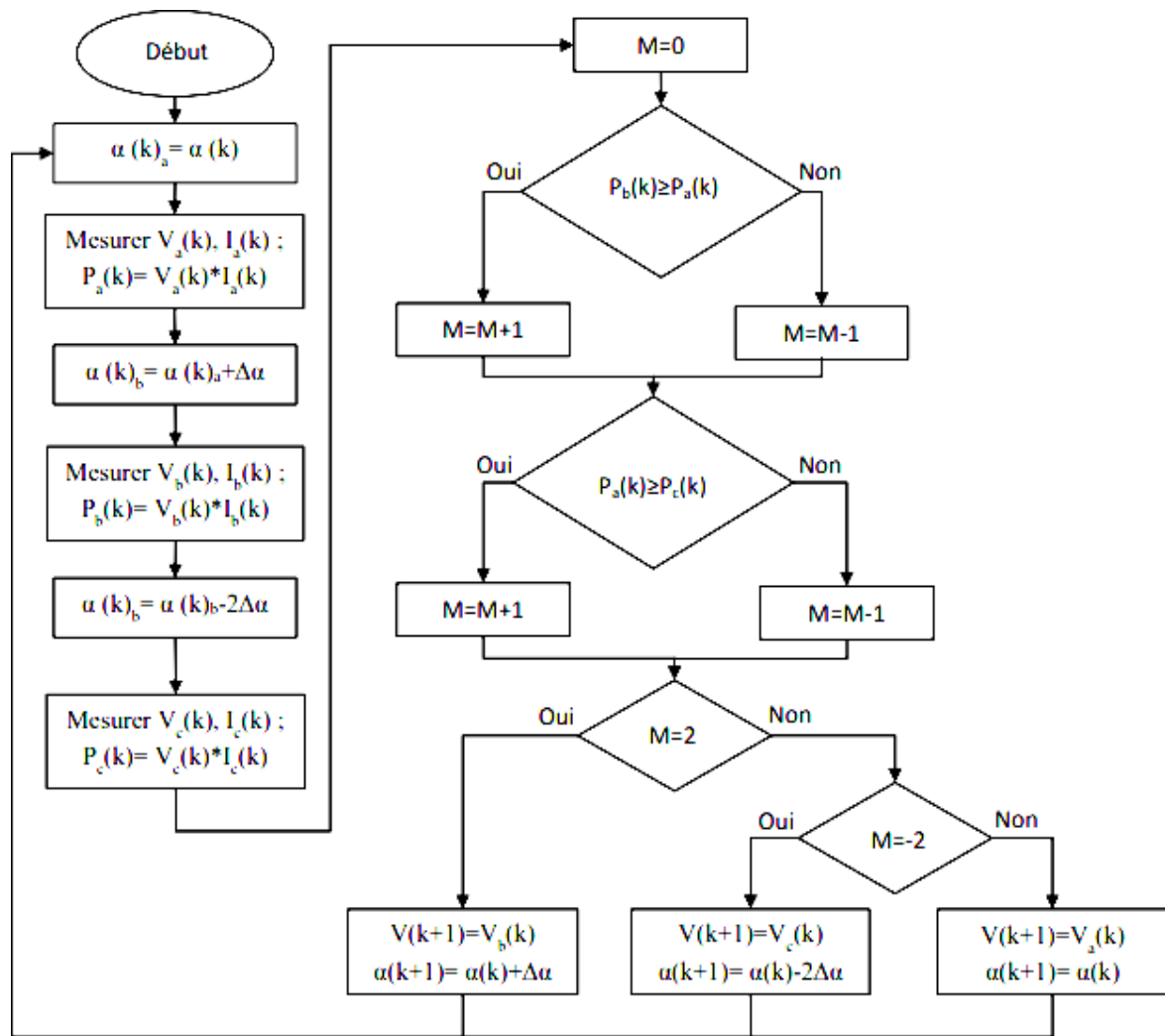


Figure II.5 Divergence de la méthode P&O. [54]

Afin de pallier les limites de la méthode P&O de base, des variantes améliorées de l'algorithme ont été développées :

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la Figure III.8 avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [56].



**Figure II.6** Algorithme du poids d'un troisième point. [54]

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode p&o classique sauf que le pas de perturbation est variable .où plusieurs échantillons de puissance  $P_{pv}$  est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manier qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. Certain études propose que le pas soit [54]:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \right| \quad (\text{II-1})$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

### II.3.3.2 La Commande MPPT Flou

Grâce aux avancées de l'informatique et à la puissance des microprocesseurs, il est possible d'utiliser la commande par logique floue (LF) dans le contrôleur MPPT. Bien que cette méthode ne soit pas obligatoire pour le modèle de système, elle offre de meilleures performances en permettant de traiter parfaitement les changements de point de fonctionnement, les non-linéarités et les incertitudes telles que les quantités physiques non modélisées [5]. Cependant, pour utiliser la LF, le concepteur doit avoir une connaissance préalable de la façon dont le produit réagit aux entrées, de manière qualitative.

#### II.3.3.2.1 Principe de la logique floue

En 1965, le professeur Lotfi Zadeh a proposé la logique floue, une branche des mathématiques qui permet aux ordinateurs de modéliser le monde réel de manière similaire aux êtres humains [15]. La logique floue s'intéresse à la quantification et au raisonnement en utilisant un langage qui permet des définitions ambiguës, telles que "beaucoup", "peu", "petit", "haut" ou "dangereux". Elle est particulièrement utile pour traiter des situations où la question posée et la réponse obtenue impliquent des concepts imprécis ou vagues.

La logique floue postule que le raisonnement approximatif est une généralisation du raisonnement exact, et que tout peut être considéré comme un degré. Ainsi, tout système logique peut être formulé de manière floue. Dans cette approche, les connaissances sont considérées comme une collection de contraintes souples ou imprécises portant sur un ensemble de variables [17]. L'inférence est un processus de propagation de contraintes élastiques. La logique floue permet d'accommoder le concept de vérité partielle : des valeurs entre complètement vrai et complètement faux sont admises [5]. Elle supporte des modes de raisonnement approximatifs plutôt qu'exacts. Son importance provient du fait que le raisonnement humain est approximatif.

La définition de Zadeh [15-17]:

*Fuzzy Logic is determined as a set of mathematical principles for knowledge representation based on degrees of membership rather than on crisp membership of classical binary logic.*

### II.3.3.2.2 Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous se fonde sur la notion d'appartenance partielle, ce qui signifie que chaque élément peut appartenir partiellement ou de manière graduelle aux ensembles flous qui ont été définis. [15]

On peut définir un ensemble flou  $A$  dans  $X$  en utilisant une fonction d'appartenance qui attribue à chaque élément  $x$  de  $X$  un degré d'appartenance  $\mu_A(x)$  compris entre 0 et 1. Ce degré mesure dans quelle mesure l'élément  $x$  appartient à l'ensemble  $A$  [2]. Donc un ensemble flou peut être représenté par un ensemble de paires ordonnées comme suit :

$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in X\} \quad (\text{II-2})$$

Où

$X$  : Univers de discours (intervalle de variation de variable  $x$ ), il peut contenir des valeurs discrètes ou continues.

$\mu_A(x)$  : Fonction d'appartenance d'un variable  $x$ .

- Si  $X$  est continue :

$$A = \frac{\int \mu_A(x)}{x} \quad (\text{II-3})$$

- Si  $X$  est discrète :

$$A = \frac{\sum \mu_A(x)}{x} \quad (\text{II-4})$$

### II.3.3.2.3 Théorie des ensembles flous

Les opérateurs flous décrivent l'interaction entre des ensembles flous. Dans ce paragraphe, nous examinerons quelques opérations courantes telles que le complément, l'intersection et l'union [2].

- **Intersection** de deux ensembles, en logique floue, est un peu différente des méthodes classiques. Elle cherche à savoir de combien un élément est-il dans les deux ensembles. Alors pour calculer l'intersection, la valeur minimale d'appartenance est utilisée :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{II-5})$$

- **Complément** permet de vérifier de combien un élément n'appartient pas à un ensemble. Si  $A$  est l'ensemble flou, son complément ( $\neg A$ ) est :

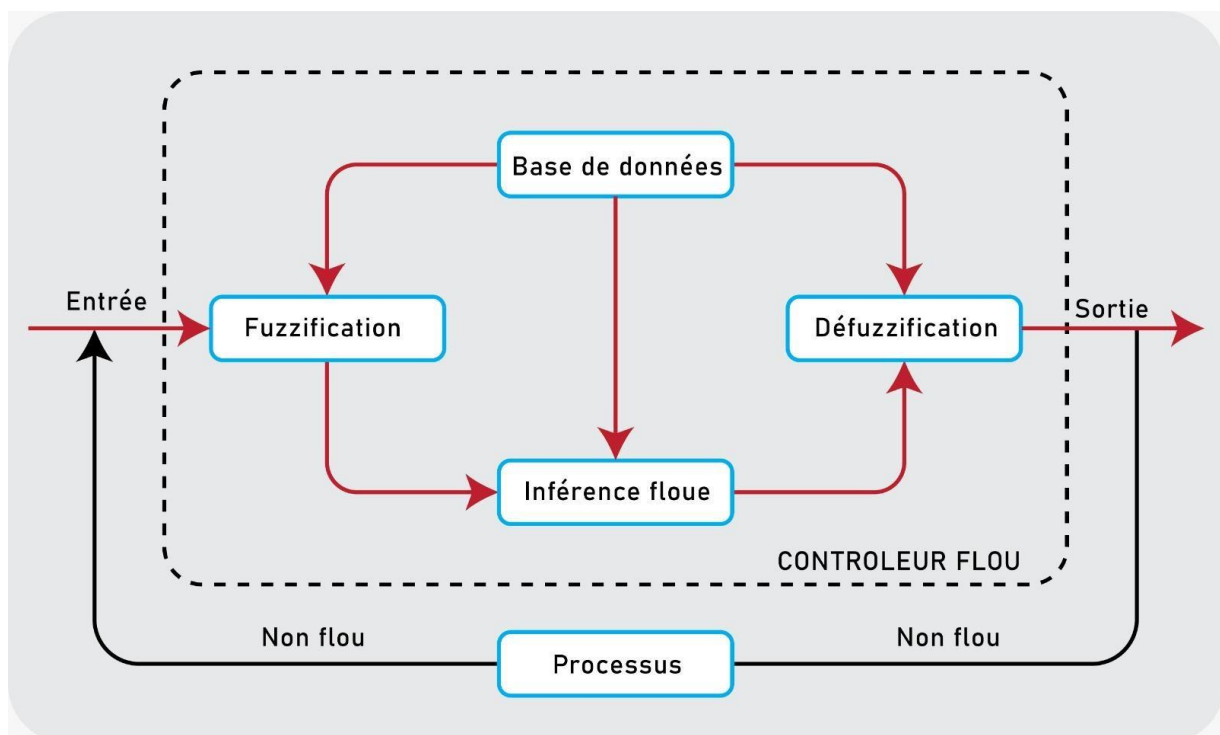
$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II- 6})$$

- **Union** en logique floue, est le contraire de l'intersection. Le processus de l'union cherche à savoir de combien un élément est-il dans l'un des deux ensembles. Alors, la valeur maximale d'appartenance doit utiliser :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{II-7})$$

### II.3.3.2.4 Conception du contrôleur flou

La Figure IV.2 sur la page suivante présente le processus d'un contrôleur LF qui se compose de trois blocs fonctionnels : la *fuzzification*, l'*inférence des règles* et la *défuzzification*. De plus, il y a une base de données appelée le tableau des règles qui contient les règles conçues. L'inférence floue (ou inférence des règles) est le processus par lequel le contrôleur LF effectue des calculs à partir du tableau des règles pour générer la sortie [2-15].



**Figure II.7** Schéma fonctionnel de la commande par logique floue. [72]

- **La fuzzification** est la première étape du processus, elle consiste à convertir les valeurs d'entrée, souvent numériques et précises, en variables floues qui peuvent prendre des

valeurs dans un intervalle continu. Cela permet de prendre en compte les imprécisions et les incertitudes dans les valeurs d'entrée [2-15].

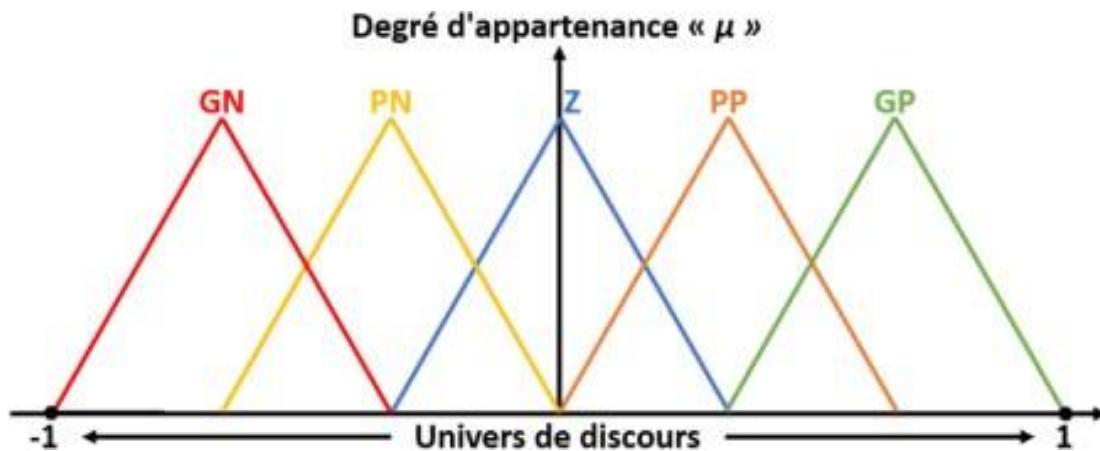


Figure II.8 Fonctions d'appartenance floues. [15]

- **L'inférence des règles** est la deuxième étape, elle permet de prendre des décisions en utilisant des règles floues. Les règles sont généralement exprimées sous forme de «si-alors», où les conditions sont des variables floues d'entrée et la décision est une variable floue de sortie. L'inférence des règles utilise ces règles pour produire une sortie floue qui décrit la décision à prendre [2-15].
- **La défuzzification** est la dernière étape, elle consiste à convertir la sortie floue en une valeur numérique précise qui peut être utilisée pour contrôler le système. Cette étape est réalisée en trouvant le centre de gravité (ou centre de masse) de la sortie floue, ce qui permet d'obtenir une valeur numérique qui représente la décision à prendre [2-15].

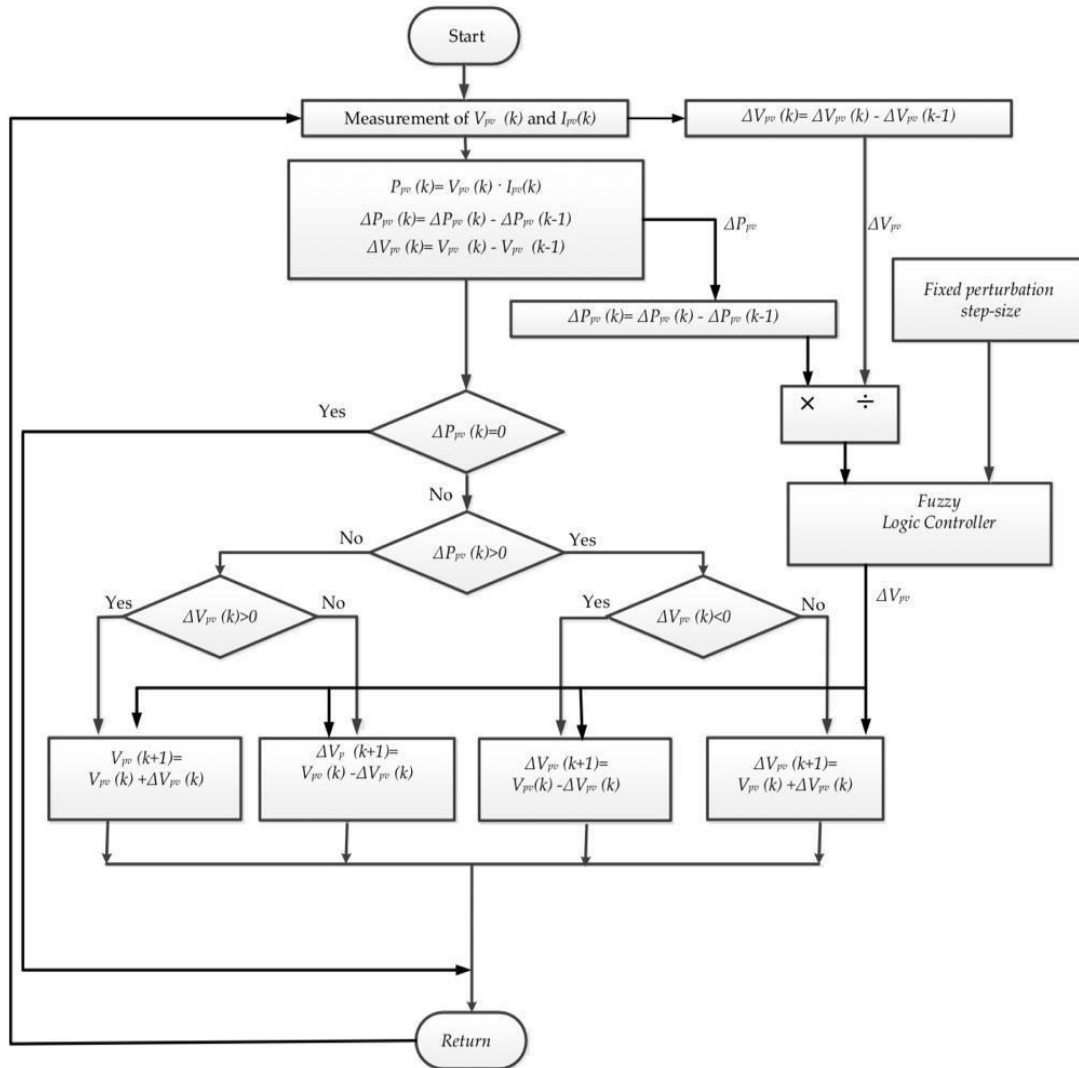
### II.3.3.2.5 Types des systèmes flous

Deux catégories de systèmes flous sont identifiées en fonction de la syntaxe utilisée pour écrire les règles floues SI-ALORS.

- **Système flou de Takagi-Sugeno (TS)** : On dit que c'est un type procédural où seule l'entrée est floue. La sortie, qui représente la commande, est soit une constante réelle, soit une expression polynomiale non floue [2].
- **Système flou de Mamdani** : Ce type de système flou présente à la fois une entrée et une sortie floues. Après l'inférence, le résultat est représenté par un ensemble flou caractérisé par sa fonction d'appartenance. Pour obtenir une valeur réelle de la commande à appliquer, une étape de défuzzification est nécessaire [2].

### II.3.3.2.6 Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue Proposé

Comme la méthode P & O conventionnelle fonctionne généralement sur une perturbation de taille de pas fixe, il existe un conflit entre la minimisation de l'oscillation de la puissance de sortie de la matrice PV autour du MPP et la convergence du temps de montée vers le MPP lors de l'utilisation d'un MPPT de taille de pas fixe. Une grande taille de pas garantit une réponse dynamique plus rapide à un changement soudain de l'irradiance solaire, mais entraîne une oscillation excessive en régime permanent de la puissance de sortie du générateur PHOTOVOLTAÏQUE autour du MPP et entraîne une perte de puissance. La petite taille de pas assure moins d'oscillation de la puissance de sortie du réseau PHOTOVOLTAÏQUE autour du MPP, mais entraîne une réponse dynamique plus lente à un changement soudain de l'irradiance solaire. [69]



**Figure II.9** Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue. [69]

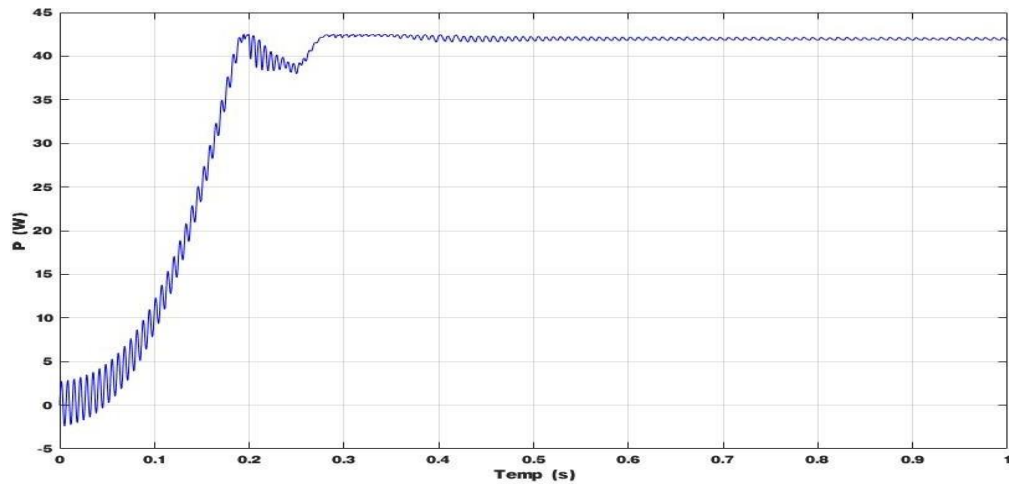
### III.1.1 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O:

La simulation du générateur photovoltaïque a été réalisée dans l'environnement MATLAB, avec une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C. L'algorithme MPPT a été implémenté en utilisant le codage de l'organigramme, ce qui a permis de faciliter la compréhension et la mise en œuvre des modifications dans l'algorithme conventionnel.

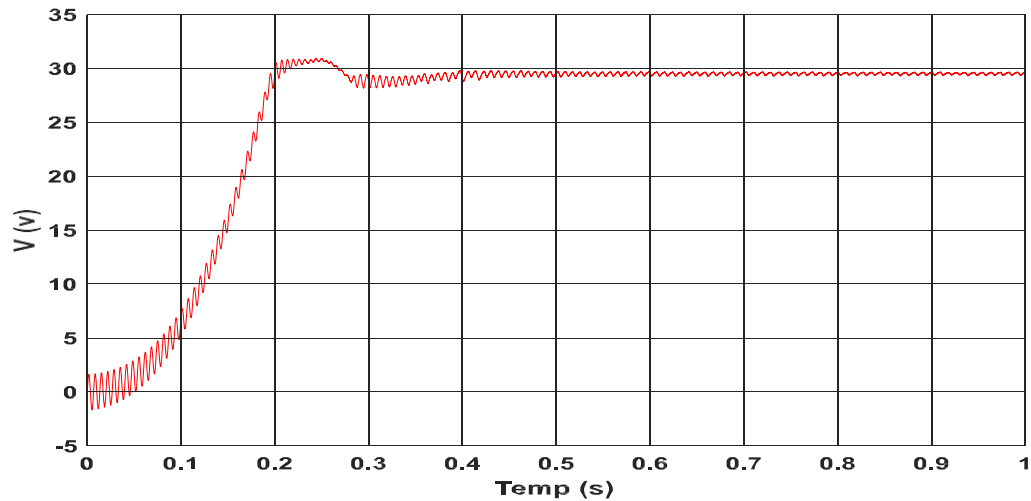
[illegible]

89

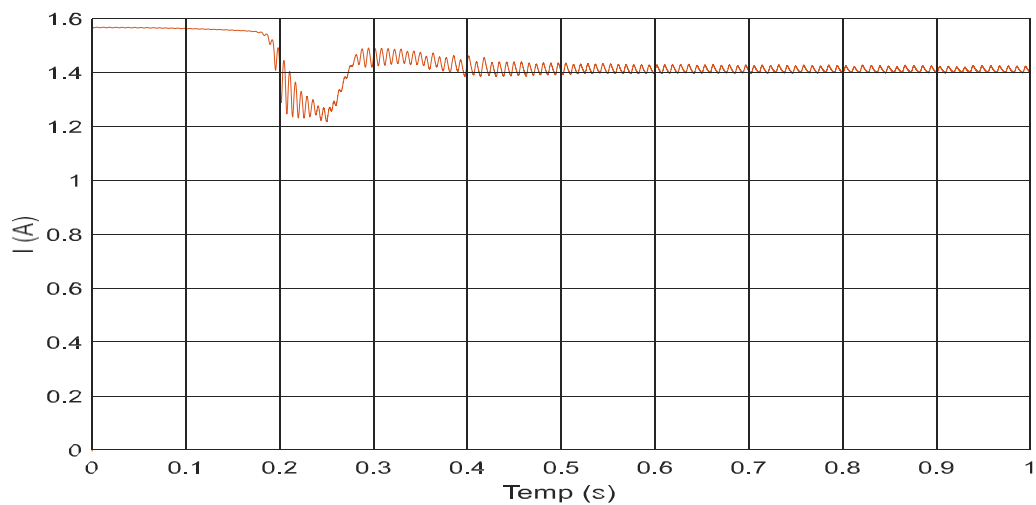
### III.1.1.1 Résultats de simulation MPPT P&O



**Figure III.11** MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de puissance du panneau photovoltaïque.



**Figure III.12** MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de tension du panneau photovoltaïque.



**Figure III.13** MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de courant du panneau photovoltaïque.

Les résultats que nous avons observés confirment le bon fonctionnement de l'unité de contrôle (P&O). Le contrôleur P&O présente un temps de réponse rapide.

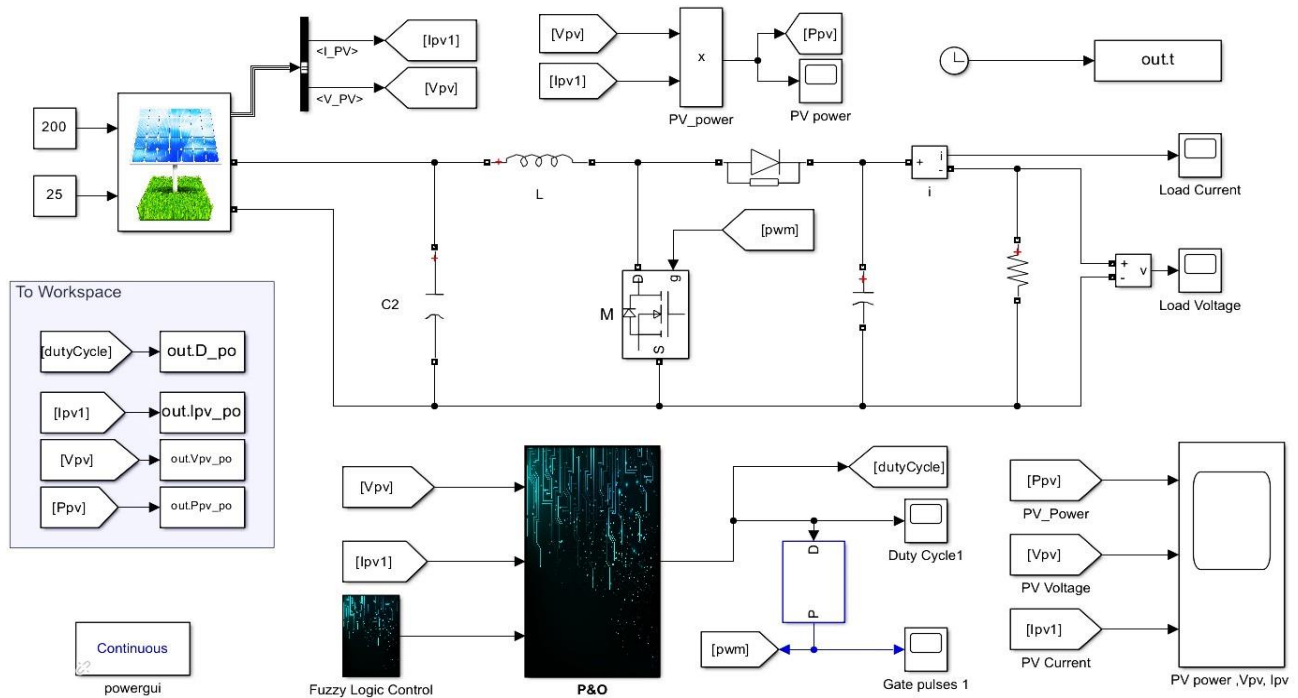
En raison de sa simplicité et de sa rentabilité, le MPPT P&O peut être facilement implémenté pour suivre le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Cependant, cette méthode présente certains inconvénients, tels qu'un suivi médiocre, notamment lors de changements soudains d'irradiance, et une convergence lente vers le point de puissance maximale. De plus, cette méthode entraîne des oscillations continues de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque autour du point de puissance maximale en régime permanent. [69]

#### **III.1.2 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O optimiser par logique floue**

La figure sur la page suivante montre le contrôle du générateur PV en utilisant l'algorithme P&O optimisé par la logique floue (FLC) qui a été étudié et développé à l'aide des outils de la bibliothèque de logique floue dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

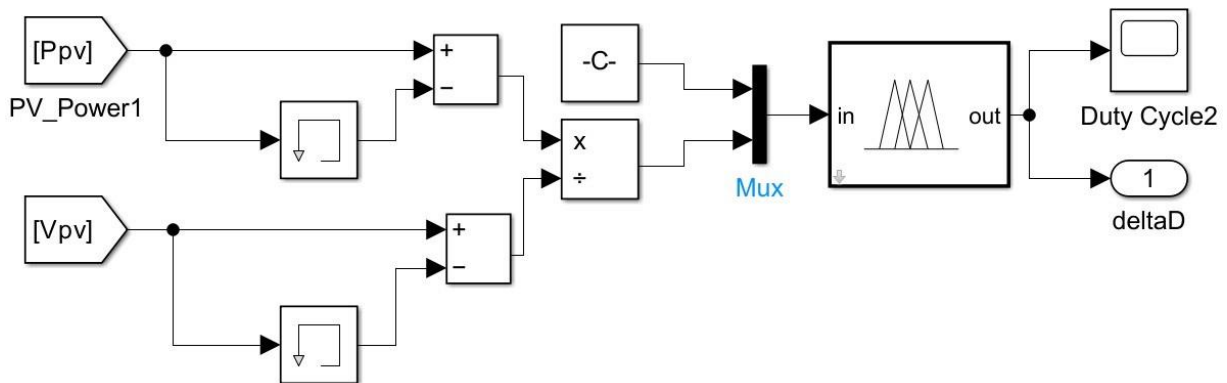
Ce modèle est constitué d'un module de génération photovoltaïque et d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec un générateur PWM, qui est connectée à une charge. Le tout a été implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink.

La simulation du générateur photovoltaïque a été réalisée dans l'environnement MATLAB, avec une irradiation de 1000, 900, 700 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C. L'algorithme MPPT a été implémenté en utilisant le codage de l'organigramme, ce qui a permis de faciliter la compréhension et la mise en œuvre des modifications dans l'algorithme conventionnel.



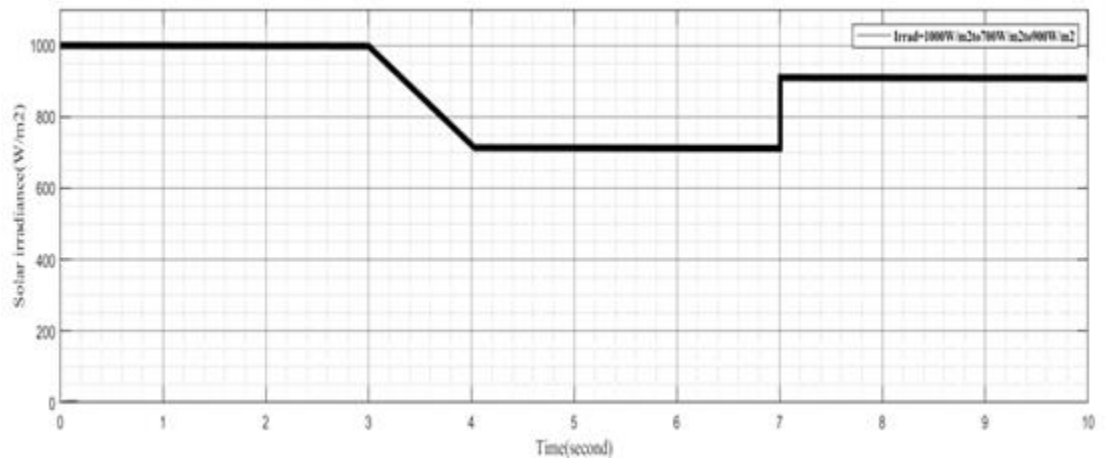
**Figure III.14** Conception du système d'optimisation.

La figure III.15 présente le schéma de blocs (fuzzy logic control) réalisé à l'aide de MATLAB/SIMULINK.

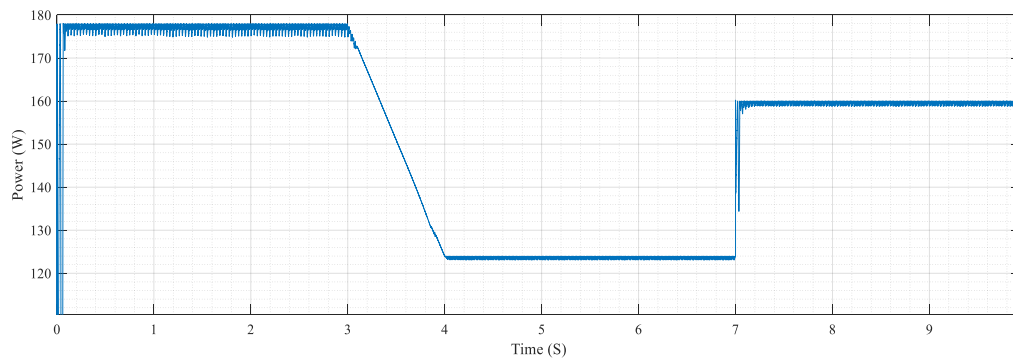


**Figure III.15** Fuzzy logic control.

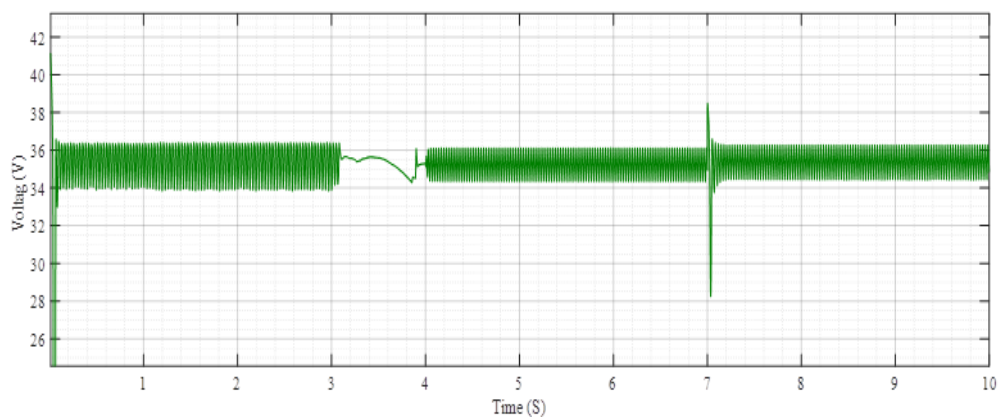
#### III.1.2.1 Résultats de simulation MPPT P&O



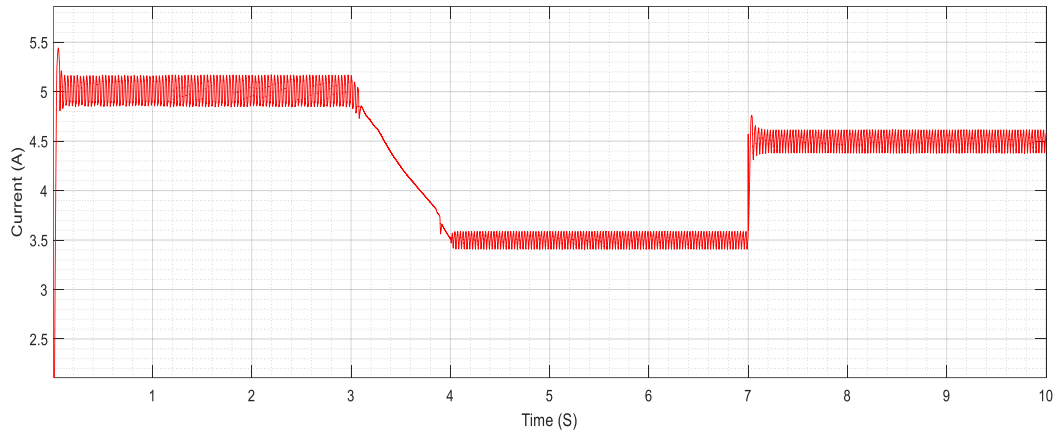
**Figure III.16** Changement de l'irradiance solaire (1000, 700 ,900 W/m2)



**Figure III.17** Puissance de sortie pour la méthode P&O Variation de l'irradiance solaire (1000, 700 ,900 W/m2)

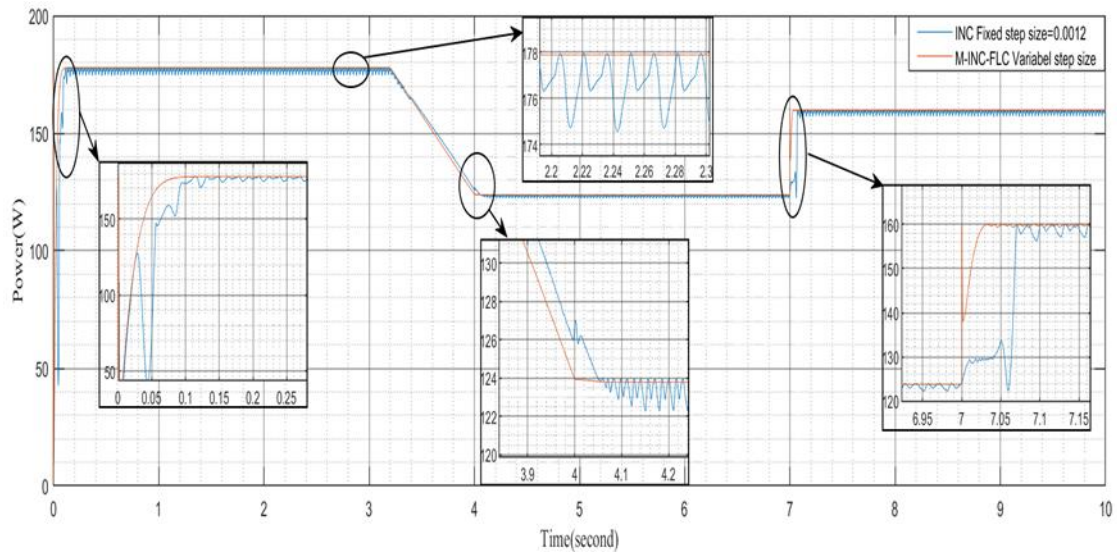


**Figure III.18** Tension de sortie pour la méthode P&O Variation de l'irradiance solaire (1000, 700 ,900 W/m2)

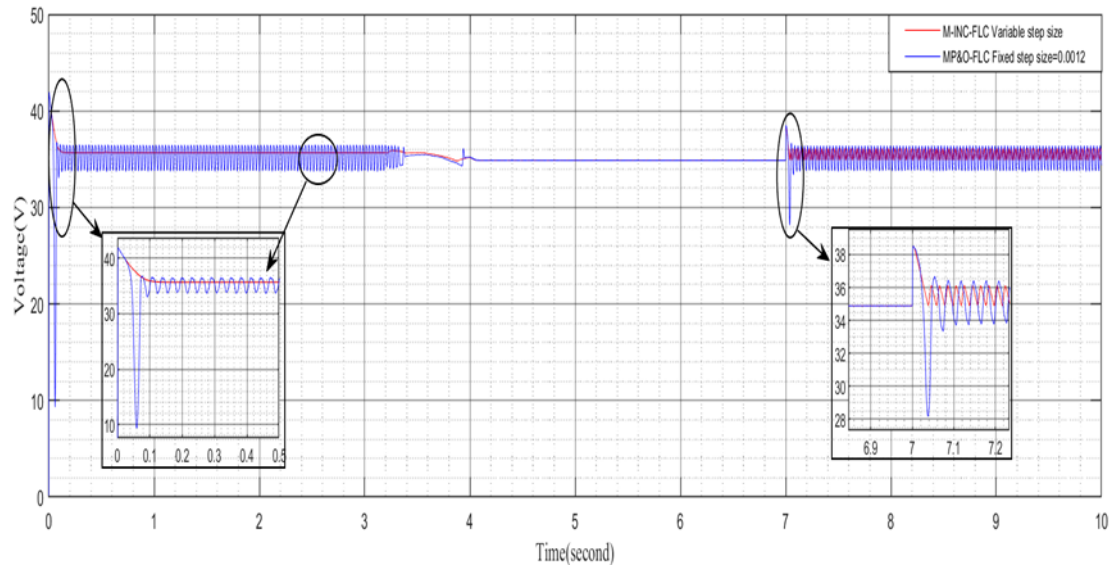


**Figure III.19** Courant de sortie pour la méthode P&O Variation de l'irradiance solaire (1000, 700 ,900 W/m2)

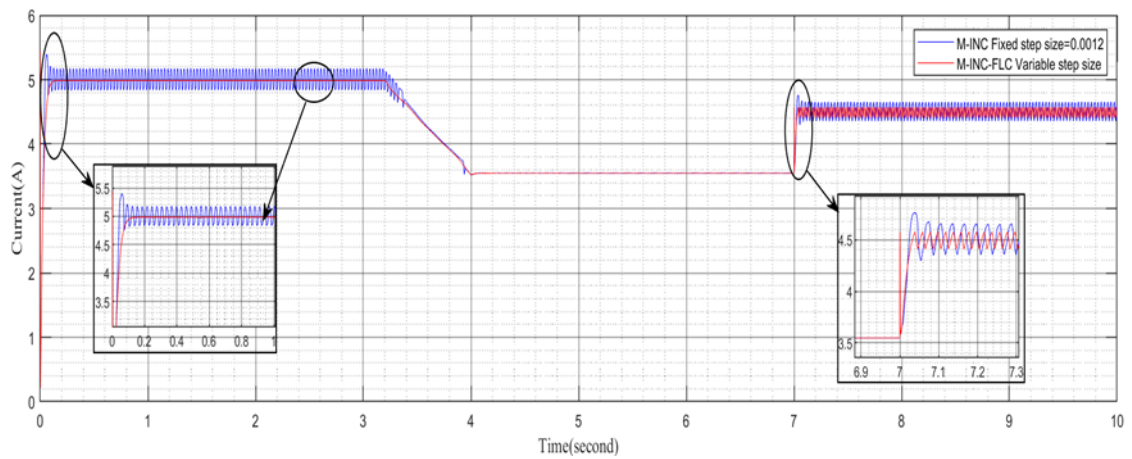
### III.1.2.2 Résultats de simulation MPPT P&O (Fuzzy):



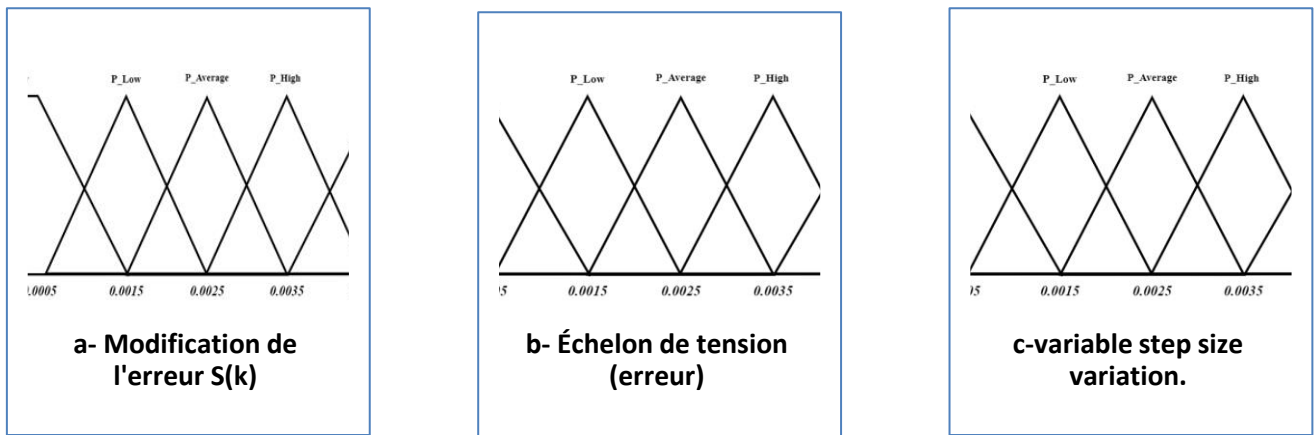
**Figure III.20** Puissance de sortie selon les deux méthodes étudiées



**Figure III.21** Tension de sortie selon les deux méthodes étudiées.



**Figure III.22** Courant de sortie selon les deux méthodes étudiées.



**Figure III.22** La fonction d'appartenance du contrôleur FL proposé pour l'algorithme MPPT à pas variable.

| $\Delta e = S(k)$ \ E = Voltage step | PVL | PL  | PA  | PH  | PVH |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| PVL                                  | PVH | PVL | PVL | PL  | PL  |
| PL                                   | PVH | PVL | PVL | PL  | PL  |
| PA                                   | PL  | PL  | PL  | PVH | PVH |
| PH                                   | PL  | PVH | PL  | PVL | PVH |
| PVH                                  | PVL | PVL | PVH | PH  | PVH |

**Tableau III.02** Règles FL pour la technique MPPT proposée

Le convertisseur de puissance associé peut modifier automatiquement le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque conformément à l'algorithme MPPT INC à pas variable recommandé, qui utilise une méthode FL pour déterminer le pas variable. Ceci est réalisé en fournissant une tension de référence à pas variable, ou  $V_{pv}$ , au convertisseur de puissance associé. À l'aide d'une structure d'opération Max-Min et de la méthode FL basée sur les règles de Mamdani, l'action de contrôle du pas variable a été identifiée. Le contrôleur FL est composé de cinq composants, comme illustré **Figure III.22**. Vingt-cinq régulations et les opérateurs « si » et « alors » ont été utilisés pour développer le contrôleur. De plus, comme le montre **Tableau III.02**, on observe une moyenne positive (PA), une valeur positive basse (PL) et une valeur positive très basse (PVL).

#### **III.3 Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons introduit deux approches de commande pour le suivi du point de puissance maximal (MPPT). Nous avons présenté la méthode traditionnelle, à savoir l'algorithme P&O, ainsi que la méthode intelligente de commande MPPT floue. Pour mener nos expérimentations, nous avons mis en place les différents blocs de simulation nécessaires à l'aide du MATLAB /Simulink.

En utilisant des valeurs constantes d'ensoleillement et de température, nous avons obtenu des résultats comparatifs pour les deux approches : la commande MPPT p&o optimisée par logique floue et l'algorithme MPPT P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement de l'algorithme MPPT P&O, mais ils révèlent également une amélioration notable grâce à la méthode P&O optimisée par la logique floue.

La simulation de la commande MPPT P&O optimisée par la logique floue a démontré des performances supérieures, notamment un temps de réponse rapide et une erreur très faible en régime stationnaire.

# **CONCLUSION GENERAL**

Dans cet article, nous examinons en détail les principes de fonctionnement des systèmes photovoltaïques (PV), leurs limites associées et différentes méthodes MPPT, en nous concentrant sur l'algorithme de Perturbation et Surveillance (P&O) et ses variantes hybrides. Après avoir modélisé l'ensemble du système dans un environnement de simulation, nous avons mis en œuvre et comparé plusieurs stratégies de contrôle visant à améliorer la stabilité, la vitesse de convergence et l'efficacité énergétique globale du système.

Les résultats obtenus démontrent que, malgré sa simplicité et sa popularité, la méthode P&O conventionnelle présente certaines limites, notamment les fluctuations autour du point de puissance maximale et sa sensibilité aux variations rapides des conditions solaires. L'approche hybride proposée pallie ces inconvénients en améliorant les performances dynamiques du système, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique.

En conclusion, cette étude souligne l'importance des algorithmes MPPT pour le développement de systèmes PV plus intelligents et plus performants. Les travaux réalisés ouvrent également la voie à plusieurs perspectives de recherche, notamment l'intégration de techniques d'intelligence artificielle (telles que les réseaux de neurones ou la logique floue), ou encore le contrôle prédictif des systèmes photovoltaïques connectés au réseau ou couplés à des systèmes de stockage d'énergie.

# Références

# Références:

- [1] Clarence Semessou, AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX DE SITES ET SYSTEMES ENERGETIQUES ADAPTES AUX BESOINS DU BENIN, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Université Bordeaux 1 ED 209, DECEMBRE 2011.
- [2] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, "Solar photovoltaic water pumping system-A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1038-1067, Jun. 2016.
- [3] A. Moumi, N. Hamani , N. Moumi et A. Z. Mokhtari, « Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de biskra » , SIPE8, 11 et 12 Novembre 2006, Béchar, Algérie.
- [4] K. Meah, S. Fletcher, and S. Ula, "Solar photovoltaic water pumping for remote locations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2, pp. 472-487, 2008/02/01/, 2008.
- [5] I. Yahyaoui. "Specifications of photovoltaic pumping systems in agriculture : sizing, fuzzy energy management and economic sensitivity analysis,"  
<http://www.mylibrary.com?id=968686>.
- [6] Energy Output Estimation for Small-Scale Wind Power Gerarators Using Weibull-Representative Wind Data". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91 :693-707.
- [7] M. Iqbal. "An Introduction To Solar Radiation,"  
<http://qut.eblib.com.au/patron/FullRecord.aspx?p=1154970>.
- [8] F. Vignola, J. Michalsky, and T. Stoffel. "Solar and Infrared Radiation Measurements, Second Edition,"  
<https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5841776>
- [9] S. Kalogirou. "Mcevoy's handbook of photovoltaics fundamentals and applications."
- [10] P. Breeze, Solar power generation, 2016.
- [11] B. Fléche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 200
- [12] A. P. Kirk, Solar photovoltaic cells : photons to electricity, London: Academic Press, 2015.

- [13] N. Kumar Moluguri, C. Rama Murthy, and V. Harshavardhan, "Solar Energy System and Design - Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 3, no. 10, Part B, pp., 2016/01/01/, 2016.
- [14] A. E. Dixon, and J. D. Leslie. "Solar Energy Conversion : an Introductory Course," <http://qut.eblib.com.au/patron/FullRecord.aspx?p=1630131>.
- [15] S. International Solar Energy, and Congress, "Advances in solar energy technology : Book of abstracts. Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Hamburg, Federal Republic of Germany, 13-18 September 1987."
- [16] M. J. Mohana Rao, M. Kumar Sahu, and P. Kumar Subudhi, "Pv based water pumping system for agricultural sector," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, Part 1, pp. 1008-1016, 2018/01/01/, 2018.
- [17] T. T. Chandratilleke, and J. C. Ho, "A study of a photovoltaic array for water pumping," *Solar & Wind Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 59-71, 1986/01/01/, 1986.
- [18] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy « le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et techniciens » Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage français, 1998
- [19] Fondation Energie pour le monde et peuples solidaires, « Energie solaire photovoltaïque », Paris, juin 2005
- [20] A. H. A. Al-Waeli, K. Sopian, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, "Novel criteria for assessing PV/T solar energy production," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 16, pp. 100547, 2019/12/01/, 2019.
- [21] FERRAI.A, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village » Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [22] KARA, Abdelfattah. *Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie*. Diss. 2016.
- [23] B. Rapporteur, "Thèse de Doctorat en Sciences Yahia BAKELLI Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome," 2012.
- [24] M. N. Bahadori, "Solar water pumping," *Solar Energy*, vol. 21, no. 4, pp. 307-316, 1978/01/01/, 1978.
- [25] B. Azoui et M. Djarallah, « Dimensionnement et expérimentation d'un système photovoltaïque de pompage d'eau utilisant un moteur à aimants permanents sans balais

- collecteur », Journée d'Etude sur l'Energie Solaire, Mardi 01 mars 2005, Bejaia.
- [26] B. A. Bachir, "Dimensionnement d ' un Système de Pompage Photovoltaïque," 2017.
  - [27] A.-K. Daud, and M. M. Mahmoud, "Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 701-714, 2005/04/01/, 2005.
  - [28] N BAHACHE Amélioration des performances d'un système photovoltaïque par la technique d'optimisation Gray Wolf- 2022 - [dspace.univ-msila.dz](http://dspace.univ-msila.dz)
  - [29] Ahmed O. Bagré. « Cours sur le pompage photovoltaïque et le dimensionnement de système PV »
  - [30] D. E. Master, S. Genie, and E. Et, "PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES LOCALITES RURALES DU BENIN : CAS DE ADJAKPATA," 2017.
  - [31] T. Faris and O. H. Hammou, "Thème Dimensionnement d ' un système de pompage d ' eau photovoltaïque destiné à l ' irrigation ( Cas de la région de M ' sila )".
  - [32] Philippe Belleudy « hydrogéologie », octobre 2004
  - [33] ETUDE ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES LOCALITES RURALES DU BENIN : CAS DE ADJAKPATA [www.2ie-edu.org](http://www.2ie-edu.org)
  - [34] P. Claux, « Atlas solaire français », PYC éditions, 1982.
  - [35] <https://acsolue-energie.fr/2021/08/05/composition-et-assemblage-dun-panneau-photovoltaique/>
  - [36] B. Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.
  - [37] OUMNAD, "Électronique fondamentale" , École Mohammedia Des Ingénieurs, Site internet, [Http://Z.Oumnad.123.Fr](http://Z.Oumnad.123.Fr).
  - [38] AFIA SEIDOU Imorou, « Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du bénin : cas de adjakpata », Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2ie avec le grade de master, Promotion [2015/2016] Institut International d'Ingénierie. BURKINA.
  - [39] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de

Pompage Photovoltaïque ».

- [40] G.H. Hart. « Residential photovoltaic system simulation electrical aspect ». IEEE, pp. 281- 288, 1982.
- [41] HAMDI Abderrazzak, « Conception et dimensionnement d'un système Photovoltaïque pour habitation et pompage », Mémoire de master 2017 – 2018, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [42] E. Electronique, “En Electronique CONTRIBUTION A L ' OPTIMISATION D ' ENERGIE”.
- [43] Kato, K., & Koizumi, H. (2015, May). A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer. In 2015 IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS) (pp. 241-244). IEEE.
- [44] Aicha Djalab. (2020). Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle : application sur un système photovoltaïque, Thèse de Doctorat, Ziane Achour University of Djelfa.
- [45] Tarak Benslimane. (2020). Systèmes de conversion de l'énergie Photovoltaïque, Cour de master en Energies Renouvelables en Electrotechnique, 2021, Université de M'sila.
- [46] A. Hamidat, « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation ». Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences. Université de Tlemcen. Algérie. 2004.
- [47] A. Saadi, «Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [48] 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.
- [49] K. Benlarbi « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thème de Magister, Université de Batna 2003.
- [50] R. Algerienne, D. Et, F. D. E. Technologie, D. D. E. G. Electrique, D. E. M. En, and G. Electrique, “Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV,” pp. 2015–2016, 2016.
- [51] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [52] M. Angel Cid Pastor, « conception et realisation de modules photovoltaïques electroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006

- [53] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [54] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi “active power control for a single-phase grid connected pv system ” , international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [55] Akihiro Oi, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of california polytechnic state university, 2005
- [56] Aamarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en electrotechnique option ,2014
- [57] C. L. Martin, and D. Y. Goswami. "Solar Energy Pocket Reference," <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5630618>.
- [58] M. Oussama and O. Lamine, “System Pompage photovoltaïque et d ' arrosage pastoral sur un site de la wilya D ' EL -OUED . System Photovoltaic pumping and pastoral irrigation on a site of the wilya of EL-OUED .,” pp. 1–8.
- [59] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy « le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et techniciens » Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage français, 1998
- [60] <https://www.climatsetvoyages.com/climat/algerie/el-oued>
- [61] W. D. E. L. Oued, “MONOGRAPHIE”.
- [62] <https://fr.weatherspark.com/y/53031/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Oued-Souf- Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>
- [63] S. Agronomiques, “MEMOIRE DE FIN D ' ETUDE En vue de l ' obtention du diplôme de Master Académique en,” 2020.
- [64] U. Echahid, H. Lakhdar D'el-Oued, F. De Technologie, D. De, and G. Electrique, “REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique MASTER ACADEMIQUE,” 2018.
- [65] J. Macaulay and Z. Zhou, “A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system,” *Energies*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.3390/en11061340.