

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج  
Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département Electromécanique

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de MASTER

**En :** Electromécanique

**Spécialité :** Electromécanique

**Par :** - OUNIS Mohamed Tahar

- KEMASSI Abdelkader

## Sujet

***Amélioration des Algorithmes Conventionnels d'Extraction  
de la Puissance Maximale d'un Système Solaire Autonome  
Grâce à l'Intégration de la Logique Floue***

Soutenu publiquement, le 28/06/2026, devant le jury composé de :

|                  |     |          |           |
|------------------|-----|----------|-----------|
| Mr. SLAMA Fateh  | MCB | Univ-BBA | Président |
| Mr. CHOUDER Adel | MCB | Univ-BBA | Examineur |
| Mr. AISSA Oualid | MCA | Univ-BBA | Encadrant |

Année Universitaire 2025/2026

# Remerciement

*Nous remercions tout d'abord **ALLAH** qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions aussi notre encadreur le **Dr. Aissa Oualid** pour son accompagnement, ses conseils et sa disponibilité tout au long de notre mémoire de fin d'études.*

*Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury, le président : **Dr. Slama Fateh** et l'examineur : **Dr. Chouder Adel** pour avoir accepté d'examiner notre travail. Leurs commentaires pertinents et leurs suggestions constructives ont grandement contribué à l'amélioration et à l'enrichissement de ce mémoire de fin d'études.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département Électromécanique pour la richesse de leur enseignement et leur professionnalisme. Nos remerciements s'adressent aussi à nos collègues et tous les étudiants de la promotion pour les moments de partage et d'entraide.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce mémoire de fin d'études.*

# *Dédicace*

*Nous dédions ce travail à nos deux plus chères personnes au monde qui  
sont nos parents, pour leurs amours, leurs encouragements, leurs conseils,  
leurs sacrifices, leurs patiences et leurs confiances.*

*À nos frères et nos sœurs.*

*À nos familles, sans oublier nos chers amis.*

*Nous les remercions du fond de nos cœurs.*

## *Liste des figures*

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.1</b> Énergie solaire [3].                                                                              | 3  |
| <b>Figure 1.2</b> Énergie éolienne [3].                                                                             | 4  |
| <b>Figure 1.3</b> Énergie hydraulique [1].                                                                          | 4  |
| <b>Figure 1.4:</b> Énergie biomasse [3].                                                                            | 5  |
| <b>Figure 1.5</b> Énergie géothermique [3].                                                                         | 6  |
| <b>Figure 1.6</b> Énergie marine [1].                                                                               | 6  |
| <b>Figure 1.7</b> Evolution de la production énergétique [1].                                                       | 7  |
| <b>Figure 1.8</b> Evolution de l'énergie solaire [1].                                                               | 8  |
| <b>Figure 1.9</b> Fonctionnement de la cellule photovoltaïque [4].                                                  | 9  |
| <b>Figure 1.10</b> Cellules monocristallines et multi-cristallines [2].                                             | 10 |
| <b>Figure 1.11</b> Couches minces [1].                                                                              | 11 |
| <b>Figure 1.12</b> Cellule PV de type organique [7].                                                                | 12 |
| <b>Figure 1.13</b> Connexion des cellules en série [1].                                                             | 13 |
| <b>Figure 1.14</b> Connexion des cellules en parallèle [1].                                                         | 13 |
| <b>Figure 1.15</b> Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque [1].                                             | 14 |
| <b>Figure 1.16</b> Système PV autonome [13].                                                                        | 17 |
| <b>Figure 1.17</b> Système PV connecté au réseau [1].                                                               | 18 |
| <b>Figure 1.18</b> Système PV hybride [15].                                                                         | 19 |
| <b>Figure 2.1</b> Schéma simplifié d'un système PV autonome [18].                                                   | 23 |
| <b>Figure 2.2</b> Schéma électrique d'un hacheur abaisseur [19].                                                    | 24 |
| <b>Figure 2.3</b> Schéma électrique d'un hacheur élévateur [19].                                                    | 25 |
| <b>Figure 2.4</b> Schéma électrique d'un hacheur abaisseur-élévateur [19].                                          | 25 |
| <b>Figure 2.5</b> Schéma électrique du hacheur élévateur durant la phase d'accumulation [19].                       | 26 |
| <b>Figure 2.6</b> Schéma électrique du hacheur élévateur durant la phase active [19].                               | 26 |
| <b>Figure 2.7</b> Chaîne de conversion de l'énergie solaire comprenant une commande MPPT [20].                      | 28 |
| <b>Figure 2.8</b> Schéma illustratif du principe de la méthode MPPT de type P&O [1].                                | 29 |
| <b>Figure 2.9</b> Organigramme illustratif du fonctionnement de l'algorithme MPPT de type P&O [22].                 | 29 |
| <b>Figure 2.10</b> Organigramme illustratif du fonctionnement de l'algorithme MPPT de type IncCond [23].            | 31 |
| <b>Figure 2.11</b> Architecture de base du contrôleur MPPT flou [24].                                               | 32 |
| <b>Figure 2.12</b> Fonctions d'appartenance des entrées ( $E$ et $\Delta E$ ) et de la sortie $\Delta D$ [20].      | 33 |
| <b>Figure 3.1</b> Effet de la variation de la température sur les caractéristiques I-V et P-V du GPV.               | 37 |
| <b>Figure 3.2</b> Effet de la variation de l'irradiation sur la caractéristique I-V et P-V du GPV.                  | 37 |
| <b>Figure 3.3</b> Schéma de simulation du système PV autonome intégrant une commande MPPT basée sur la méthode P&O. | 38 |

---

## Liste des tableaux

---

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 3.4</b> Schéma de simulation du système PV autonome intégrant une commande MPPT basée sur la méthode IncCond.                 | 38 |
| <b>Figure 3.5</b> Résultats de la technique MPPT-P&O pour un profil de températures variables : tension et courant photovoltaïques.     | 39 |
| <b>Figure 3.6</b> Résultat de la technique MPPT-P&O pour un profil de températures variables : puissance photovoltaïque.                | 40 |
| <b>Figure 3.7</b> Résultats de la technique MPPT-P&O pour un profil d'irradiations variables: tension et courant photovoltaïques.       | 41 |
| <b>Figure 3.8</b> Résultat de la technique MPPT-P&O pour un profil d'irradiations variables: puissance photovoltaïque.                  | 41 |
| <b>Figure 3.9</b> Résultat de simulation de la technique MPPT-P&O lors de la variation de la charge.                                    | 42 |
| <b>Figure 3.10</b> Résultats de la technique MPPT-IncCond pour un profil de températures variables: tension et courant photovoltaïques. | 43 |
| <b>Figure 3.11</b> Résultat de la technique MPPT-IncCond pour un profil de températures variables: puissance photovoltaïque.            | 43 |
| <b>Figure 3.12</b> Résultats de la technique MPPT-IncCond pour un profil d'irradiations variables: tension et courant photovoltaïques.  | 44 |
| <b>Figure 3.13</b> Résultat de la technique MPPT-IncCond pour un profil d'irradiations variables: puissance photovoltaïque.             | 44 |
| <b>Figure 3.14</b> Résultat de simulation de la technique MPPT-IncCond lors de la variation de la charge.                               | 45 |
| <b>Figure 3.15</b> Schéma de simulation du système PV autonome intégrant une commande MPPT basée sur la logique floue.                  | 46 |
| <b>Figure 3.16</b> Résultats de la technique MPPT-Floue pour un profil de températures variables: tension et courant photovoltaïques.   | 47 |
| <b>Figure 3.17</b> Résultat de la technique MPPT-Floue pour un profil de températures variables: puissance photovoltaïque.              | 47 |
| <b>Figure 3.18</b> Résultats de la technique MPPT-Floue pour un profil d'irradiations variables: tension et courant photovoltaïques.    | 48 |
| <b>Figure 3.19</b> : Résultat de la technique MPPT-Floue pour un profil d'irradiations variables : puissance photovoltaïque.            | 49 |
| <b>Figure 3.20</b> Résultat de simulation de la technique MPPT-Floue lors de la variation de la charge.                                 | 49 |
| <b>Figure 3.21</b> Comparaison des techniques MPPTs P&O, IncCond et Floue sous un profil de températures variables.                     | 50 |
| <b>Figure 3.22</b> Comparaison des techniques MPPTs P&O, IncCond et Floue sous un profil d'irradiations variables.                      | 51 |
| <b>Figure 3.23</b> Etude comparative des MPPTs P&O, IncCond et Logique Floue.                                                           | 51 |
| <b>Figure 3.24</b> Comparaison des techniques MPPTs P&O, IncCond et Floue lors de la variation de la charge.                            | 52 |

---

### *Liste des tableaux*

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 2.1 :</b> Composants et caractéristiques d'un système photovoltaïque autonome [18]. | 23 |
| <b>Tableau 2.2 :</b> Tableau des règles floue [9].                                             | 33 |
| <b>Tableau 3.1:</b> Etude comparative.                                                         | 51 |

### *Liste des symboles*

|                         |                                                                           |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>                | Facteur d'idéalité de la jonction                                         |
| <b>C</b>                | le gain de correction du rapport cyclique                                 |
| <b>C<sub>1</sub></b>    | Condensateur d'entrée                                                     |
| <b>C<sub>2</sub></b>    | Condensateur de sortie                                                    |
| <b>E</b>                | Erreur                                                                    |
| <b>E<sub>go</sub></b>   | Energie de gap du semi-conducteur                                         |
| <b>G</b>                | Irradiation ( $\text{W}/\text{m}^2$ )                                     |
| <b>I<sub>0</sub></b>    | Courant de saturation                                                     |
| <b>I<sub>C1</sub></b>   | Courant du condensateur                                                   |
| <b>I<sub>C2</sub></b>   | Courant du condensateur                                                   |
| <b>I<sub>d</sub></b>    | Courant de la diode                                                       |
| <b>I<sub>cell</sub></b> | Courant de la cellule photovoltaïque                                      |
| <b>I<sub>K</sub></b>    | Courant de l'interrupteur                                                 |
| <b>I<sub>L</sub></b>    | Courant de l'inductance                                                   |
| <b>I<sub>ph</sub></b>   | Photo courant                                                             |
| <b>I<sub>p</sub></b>    | Courant de fuite à travers la résistance shunt                            |
| <b>I<sub>s</sub></b>    | Courant de sortie                                                         |
| <b>I<sub>sc</sub></b>   | Courant de court-circuit du panneau à 25 °C et 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ |
| <b>I<sub>rs</sub></b>   | Courant de saturation inverse de la diode                                 |
| <b>I<sub>pv</sub></b>   | Courant du panneau photovoltaïque                                         |
| <b>K</b>                | Constante de Boltzmann                                                    |
| <b>K</b>                | Interrupteur                                                              |
| <b>K<sub>i</sub></b>    | Coefficient de température du courant de court-circuit                    |
| <b>L</b>                | Inductance                                                                |
| <b>n</b>                | Constante d'idéalité de la jonction                                       |
| <b>N<sub>s</sub></b>    | Nombre de cellules connectées en série                                    |
| <b>P<sub>m</sub></b>    | Puissance maximale                                                        |
| <b>P<sub>pv</sub></b>   | Puissance photovoltaïque                                                  |
| <b>P<sub>out</sub></b>  | Puissance de sortie                                                       |
| <b>q</b>                | Charge de l'électron                                                      |
| <b>R<sub>s</sub></b>    | Résistance série                                                          |
| <b>R<sub>sh</sub></b>   | Résistance shunt                                                          |

---

## Liste des symboles

---

|                        |                                                |
|------------------------|------------------------------------------------|
| <b>T</b>               | Température ambiante                           |
| <b>T<sub>ref</sub></b> | Température de référence                       |
| <b>u</b>               | Paramètre de la position du commutateur        |
| <b>V<sub>oc</sub></b>  | Tension de circuit ouvert du module            |
| <b>V<sub>D</sub></b>   | Tension de la diode                            |
| <b>V<sub>e</sub></b>   | Tension d'entrée                               |
| <b>V<sub>K</sub></b>   | Tension de l'interrupteur                      |
| <b>V<sub>L</sub></b>   | Tension de l'inductance                        |
| <b>V<sub>pv</sub></b>  | Tension photovoltaïque                         |
| <b>V<sub>s</sub></b>   | Tension de sortie                              |
| <b>D</b>               | Rapport cyclique                               |
| <b>ΔE</b>              | Variation de l'erreur                          |
| <b>ΔI<sub>pv</sub></b> | Variation du courant du panneau photovoltaïque |
| <b>ΔP<sub>pv</sub></b> | Variation de la Puissance photovoltaïque       |
| <b>ΔV<sub>pv</sub></b> | Variation de la tension photovoltaïque         |
| <b>η</b>               | Efficacité                                     |

---

### *Liste des abréviations*

|                |                                                        |
|----------------|--------------------------------------------------------|
| <b>DC/AC</b>   | Convertisseur de courant continu en courant alternatif |
| <b>DC/DC</b>   | Convertisseur de courant continu en courant continu    |
| <b>GPV</b>     | Générateur photovoltaïque                              |
| <b>IncCond</b> | Incremental Conductance                                |
| <b>Impp</b>    | Courant au point de puissance maximale                 |
| <b>LF</b>      | Logique Floue                                          |
| <b>MPPT</b>    | Maximum Power Point Tracking                           |
| <b>NG</b>      | Négatif Grand                                          |
| <b>NP</b>      | Négatif Petit                                          |
| <b>PG</b>      | Positif Grand                                          |
| <b>P&amp;O</b> | Perturbe et Observe                                    |
| <b>PPM</b>     | Point de puissance maximale                            |
| <b>PV</b>      | Photovoltaïque                                         |
| <b>PP</b>      | Positif Petit                                          |
| <b>STC</b>     | Standard Test Condition                                |
| <b>Vmpp</b>    | Tension au point de puissance maximale                 |
| <b>Z</b>       | Zéro                                                   |

### المخلص:

يقدم مشروع التخرج هذا دراسة معمقة لنظام كهروضوئي مستقل، يهدف إلى تحسين عملية استخراج القدرة القصوى وتعزيز الأداء الديناميكي للمولد الشمسي. وتركز الدراسة على تحليل ومحاكاة ثلاث تقنيات مختلفة لتتبع نقطة القدرة القصوى. تعتمد التقنية الأولى على الطريقة التقليدية المعروفة بالاضطراب والملاحظة، بينما تستند التقنية الثانية إلى خوارزمية التوصيل التزايدي، في حين تعتمد التقنية الثالثة على مقارنة ذكية قائمة على المنطق الضبابي. وقد تم تقييم أداء هذه الاستراتيجيات ومقارنتها من خلال محاكاة رقمية باستخدام برنامج MATLAB/Simulink، مع مراعاة تأثير التغيرات السريعة في الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة والحمل الكهربائي. وقد أظهرت النتائج المتحصل عليها فعالية التقنيات الثلاث المدروسة في تتبع نقطة القدرة القصوى. إلا أن استراتيجية MPPT المعتمدة على المنطق الضبابي حققت أداءً متفوقاً مقارنةً بالاستراتيجيات الأخرى، حيث تميزت بسرعة أكبر في الوصول إلى نقطة التشغيل المثلى، واستقرار أعلى، وانخفاض ملحوظ في التذبذبات، فضلاً عن قدرتها العالية على التكيف مع الاضطرابات المناخية الحادة والتغيرات المفاجئة في الأحمال.

**الكلمات المفتاحية:** نظام كهروضوئي مستقل، تتبع نقطة القدرة القصوى، الكفاءة الطاقوية، الاضطراب والملاحظة، التوصيل التزايدي، المنطق الضبابي، MATLAB/Simulink.

### Résumé:

Ce mémoire de fin d'études présente une étude approfondie d'un système photovoltaïque autonome visant à améliorer l'efficacité de l'extraction de la puissance maximale et à optimiser les performances dynamiques du générateur solaire. Il porte sur la simulation de trois techniques différentes de suivi du point de puissance maximale. La première repose sur la méthode classique de Perturbation et Observation (P&O), la deuxième utilise l'algorithme de la Conductance Incrémentale (IncCond), tandis que la troisième s'appuie sur une approche intelligente fondée sur la logique floue. Les performances des différentes stratégies ont été testées et évaluées à travers des simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink sous des variations rapides d'irradiations solaires, de températures et de charges. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité des trois techniques étudiées. Toutefois, la stratégie MPPT basée sur la logique floue a montré une nette supériorité en termes de rapidité de convergence vers le point de fonctionnement optimal, de haute stabilité, de réduction des oscillations et de capacité d'adaptation aux perturbations météorologiques et de charges sévères.

**Mots-clés:** Système photovoltaïque autonome, MPPT, Efficacité énergétique, P&O, IncCond, Logique Floue, MATLAB/Simulink.

## Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Liste des abréviations

Résumés

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale                                                           | 1  |
| 1 Chapitre 01                                                                   | 2  |
| 1.1. Introduction                                                               | 3  |
| 1.2. Aperçu des énergies renouvelables                                          | 3  |
| 1.3. Exploitation de l'énergie solaire à l'échelle mondiale                     | 6  |
| 1.3.1. Évolution de la production énergétique                                   | 7  |
| 1.4. Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique                      | 8  |
| 1.4.1. Description et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque   | 9  |
| 1.4.2. Technologies des cellules photovoltaïques                                | 10 |
| 1.4.2.1. Silicium                                                               | 10 |
| 1.4.2.2. Couches minces                                                         | 11 |
| 1.4.2.3. Cellules organiques et plastiques                                      | 12 |
| 1.5. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque                     | 14 |
| a) Photo-courant ( $I_{ph}$ )                                                   | 15 |
| b) Courant de saturation ( $I_0$ )                                              | 15 |
| c) Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite ( $I_{rs}$ )) | 16 |
| d) Courant de la résistance shunt ( $I_p$ )                                     | 16 |
| 1.6. Générateur photovoltaïque                                                  | 16 |
| 1.7. Types de systèmes photovoltaïques                                          | 17 |
| 1.7.1. Système PV autonome                                                      | 17 |
| 1.7.2. Systèmes PV connectés au réseau                                          | 17 |
| 1.7.3. Systèmes PV hybrides                                                     | 18 |
| 1.8. <del>Avantages et limites des systèmes photovoltaïques</del>               | 19 |

## Sommaire

---

|                             |                                                                                      |    |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.8.1.                      | Avantages des systèmes photovoltaïques                                               | 19 |
| 1.8.2.                      | Limites des systèmes photovoltaïques                                                 | 19 |
| 1.9.                        | Conclusion                                                                           | 20 |
| 2                           | Chapitre 02                                                                          | 21 |
| 2.1.                        | Introduction                                                                         | 22 |
| 2.2.                        | Description générale du système photovoltaïque autonome                              | 22 |
| 2.3.                        | Analyse des architectures de conversion DC/DC                                        | 23 |
| 2.3.1.                      | Convertisseur DC/DC abaisseur (Buck)                                                 | 24 |
| 2.3.2.                      | Convertisseur DC/DC élévateur (Boost)                                                | 24 |
| 2.3.3.                      | Convertisseur DC/DC abaisseur–élévateur (Buck-Boost)                                 | 25 |
| 2.4.                        | Modélisation mathématique du convertisseur DC/DC élévateur                           | 26 |
| 2.5.                        | Principe et importance de la commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques         | 28 |
| 2.6.                        | Méthodes MPPT <sub>s</sub> classique et intelligent                                  | 28 |
| 2.6.1.                      | MPPT de type Perturber et Observer (P&O)                                             | 28 |
| 2.6.2.                      | MPPT de type Incremental Conductance (IncCond)                                       | 30 |
| 2.6.3.                      | MPPT de type logique floue                                                           | 31 |
| 2.7.                        | Conclusion                                                                           | 34 |
| 3                           | Chapitre 03                                                                          | 35 |
| 3.1                         | Introduction                                                                         | 36 |
| 3.2                         | Résultats du panneau solaire                                                         | 36 |
| 3.3                         | Résultats de simulations des stratégies MPPTs classiques appliquées (P&O et IncCond) | 38 |
| 3.3.1                       | Résultats de la stratégie MPPT-P&O                                                   | 39 |
| 3.3.2                       | Résultats de la stratégie MPPT-IncCond                                               | 42 |
| 3.4                         | Résultats de la simulation de la stratégie MPPT intelligente (Logique Floue)         | 45 |
| 3.5                         | Etude comparative (résultats et discussions)                                         | 50 |
| 3.6                         | Conclusion                                                                           | 53 |
| Conclusion générale         |                                                                                      |    |
| Références bibliographiques |                                                                                      |    |
| Annexe A                    |                                                                                      |    |

---

# ***Introduction générale***



## Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources fossiles et aux enjeux climatiques grandissants, l'humanité est confrontée à un défi énergétique d'ampleur mondiale [1]-[3]. Face à ce paradigme, les énergies renouvelables s'imposent comme des solutions incontournables pour assurer une transition énergétique durable. Parmi-elles, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue par son potentiel considérable, la ressource reçue par la Terre étant largement supérieure aux besoins de l'humanité [1], [2]. Reposant sur la conversion directe de l'énergie solaire en électricité par le biais de l'effet photovoltaïque, cette technologie offre plusieurs avantages majeurs [4], [5] : une disponibilité infinie de la ressource, une absence d'émissions polluantes lors du fonctionnement et une modularité remarquable facilitant son déploiement à diverses échelles. Cependant, les performances des systèmes photovoltaïques dépendent fortement des conditions environnementales, notamment de l'irradiation solaire et de la température ambiante [4].

Le recours aux techniques de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking – MPPT) s'avère ainsi indispensable pour piloter le convertisseur DC/DC et maximiser le transfert d'énergie [1], [3]. Parmi les différentes stratégies MPPT, l'algorithme Perturber et Observer (P&O) largement imposé comme une solution référence en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Toutefois, ses performances sont limitées par des oscillations autour du point optimal en régime permanent et par une mauvaise convergence lors de variations climatiques brusques [1], [6]. Pour pallier ces problèmes, la méthode de la Conductance Incrémentale (IncCond) a été développée ; Elle permet un suivi plus précis du point de puissance maximale en exploitant la pente de la courbe P-V, bien que sa mise en œuvre soit plus complexe [6]. Par ailleurs, les techniques issues de l'intelligence artificielle, comme la logique floue (Fuzzy Logic), émergent comme des alternatives prometteuses. La logique floue est capable de gérer efficacement les non-linéarités des systèmes photovoltaïques sans nécessité de la connaissance du modèle mathématique du système traité, Elle offre une rapidité de convergence, une stabilité accrue et une robustesse remarquable face aux changements climatiques [6].

Afin d'évaluer et d'optimiser les performances des différentes stratégies MPPT, à savoir l'algorithme P&O, la méthode IncCond ainsi que l'approche basée sur la logique floue, le présent mémoire de fin d'études est structuré en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre a présenté les principales sources d'énergies renouvelables, avec un intérêt particulier porté à l'énergie solaire et aux systèmes photovoltaïques. Le fonctionnement, la modélisation et les différentes technologies des cellules photovoltaïques ont été étudiés, suivis

d'une présentation des principaux types de systèmes photovoltaïques. Enfin, leurs avantages et leurs limites ont été analysés afin d'évaluer leurs pertinences dans les applications énergétiques modernes.

- Le deuxième chapitre comporte l'étude de trois méthodes de poursuite du point de puissance maximale appliquées à un système photovoltaïque autonome, à savoir les approches classiques : P&O et IncCond, ainsi qu'une méthode intelligente basée sur la logique floue. Il contient également la modélisation mathématique du système solaire associé à un hacheur élévateur (Boost). Enfin, les différentes méthodes MPPTs traitées sont décrites et discutées dans ce chapitre. En particulier, l'approche MPPT floue qui est présentée à travers ses principaux mécanismes de fonctionnement, tels que la fuzzification, les fonctions d'appartenance, les règles d'inférence et le processus de défuzzification, afin de surpasser les limitations des MPPTs classiques en cas de variations climatiques brusques et changeantes.
- Le troisième chapitre vise à évaluer, analyser et comparer les performances de trois algorithmes MPPTs (P&O, IncCond et floue) dans différentes conditions de fonctionnement, notamment les variations de températures, d'irradiations et de charges d'un système photovoltaïque autonome. Les simulations sont réalisées sous l'environnement MATLAB/Simulink afin d'examiner et de juger leur comportement. Une étude comparative finale permet de mettre en évidence l'efficacité et la robustesse de chaque méthode dans le cadre de la gestion optimale de l'énergie solaire.
- Enfin, une conclusion générale est donnée, accompagnée de perspectives pour des travaux futurs.

***Chapitre 01:***  
***Concepts et principes des***  
***systèmes solaires***  
***photovoltaïques***

## 1.1. Introduction

Aujourd'hui, l'humanité vit un tournant historique en délaissant les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), dont les réserves s'épuisent et dont la combustion dérègle notre climat, au profit des énergies renouvelables. Dans ce grand chantier de la transition énergétique, le solaire photovoltaïque s'est imposé comme la solution phare [1]. Cette technologie qui transforme directement la lumière en électricité sans bruit ni pollution, connaît la croissance la plus rapide au monde depuis vingt ans. Son immense succès repose sur sa modularité unique, capable d'alimenter aussi bien une petite calculatrice qu'une ville entière, tout en permettant à chacun de produire sa propre énergie de manière décentralisée [2]. Fiable, de moins en moins coûteux et garanti pour fonctionner plus de deux décennies, le système photovoltaïque n'est plus une simple alternative écologique, mais le nouveau pilier solide et durable de notre sécurité énergétique mondiale [1], [2].

## 1.2. Aperçu des énergies renouvelables

On appelle énergie renouvelable une source d'énergie qui provient de phénomènes naturels réguliers et inépuisables. Contrairement aux énergies fossiles (comme le pétrole ou le charbon) qui mettent des millions d'années à se former, les énergies renouvelables se renouvellent en permanence à l'échelle d'une vie humaine. C'est une énergie de "flux" : tant que la terre tourne, que le soleil brille et que le vent souffle, nous pouvons en produire sans jamais vider le réservoir de la planète. On distingue plusieurs familles d'énergies renouvelables selon leur origine [1] - [3] :

### a) Énergie solaire (la force de la lumière) :

C'est la source qui connaît la progression la plus rapide au monde. Elle capte l'énergie envoyée par le Soleil [1].



Figure 1.1 Énergie solaire [3].

- **Fonctionnement** : Le photovoltaïque utilise des panneaux (souvent en silicium) pour transformer la lumière directement en électricité.
- **Domaines d'application** : Des calculatrices de poches aux toits des maisons, jusqu'aux immenses centrales dans les déserts.

**b) Énergie éolienne (la force du vent) :**

Héritière des anciens moulins, elle transforme le mouvement de l'air en courant électrique [1].

- **Fonctionnement** : Le vent fait tourner des pales géantes. Ce mouvement active un générateur (une sorte de grosse dynamo) situé en haut du mât.
- **Domaines d'application** : Les parcs terrestres (dans les plaines) et les parcs en mer (offshore), là où le vent est le plus puissant.



**Figure 1.2** Énergie éolienne [3].

**c) Énergie hydraulique (la force de l'eau) :**

C'est la plus ancienne et la première source d'électricité verte au monde [1].



**Figure 1.3** Énergie hydraulique [1].

- **Fonctionnement** : On utilise la force des chutes d'eau ou le débit des fleuves pour faire tourner des turbines.
- **Domaines d'application** : Les grands barrages de montagne qui servent de "piles géantes" pour stocker l'énergie, ou les petites centrales au fil de l'eau.

**d) Énergie de la biomasse (la force du vivant) :**

Elle provient de la transformation des matières organiques (plantes, bois, déchets) [1].

- **Fonctionnement** : On peut brûler le bois pour se chauffer, ou transformer les déchets agricoles en gaz (méthanisation) pour produire de l'électricité ou du carburant.
- **Domaines d'application** : Chauffage domestique, usines de valorisation des déchets et biocarburants pour les transports.

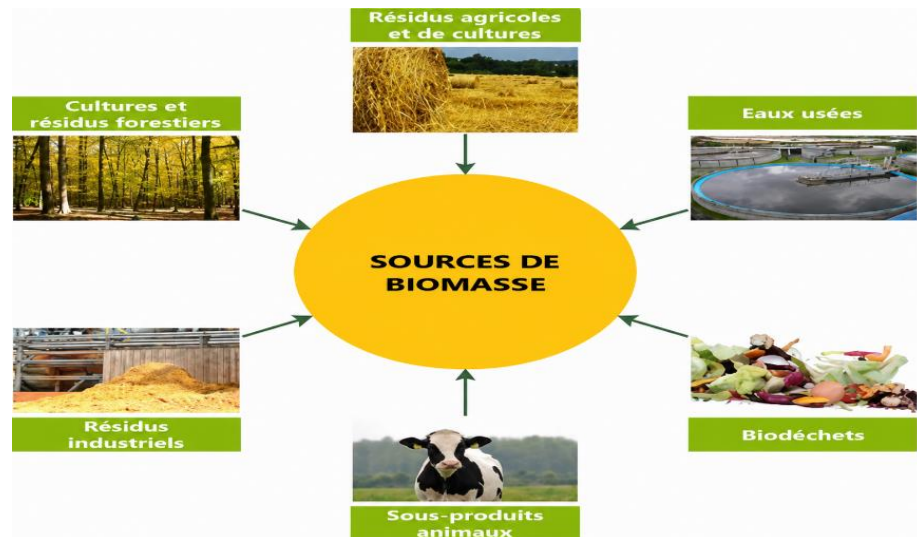


Figure 1.4:Énergie biomasse [3].

**e) Énergie géothermique (la force de la terre) :**

C'est la seule énergie qui ne dépend pas du ciel, mais de ce qui se trouve sous nos pieds [1].

- **Fonctionnement** : On puise la chaleur naturelle des profondeurs de la terre (eau chaude ou vapeur) pour chauffer des bâtiments ou faire tourner des turbines.
- **Domaines d'application** : Chauffage de quartiers entiers (réseaux de chaleur) ou centrales électriques dans les zones volcaniques.

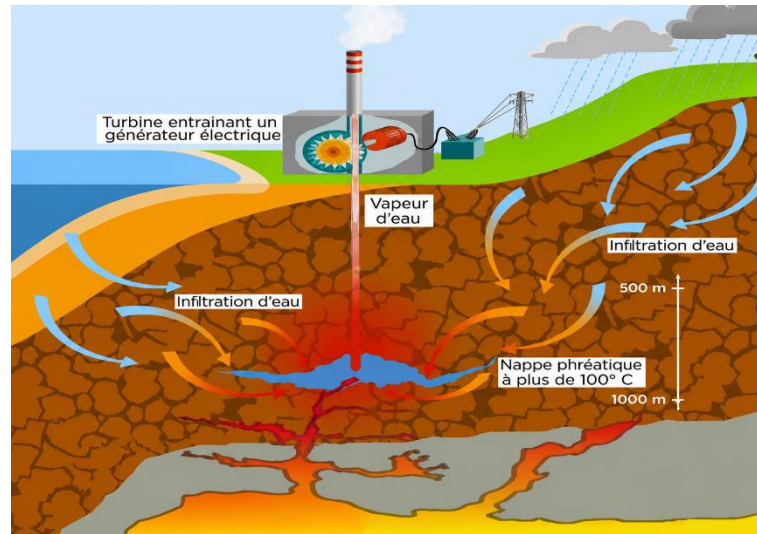


Figure 1.5 Énergie géothermique [3].

#### f) Énergie marine (la force des océans) :

C'est la technologie utilisant les mouvements immenses de la mer [1].

- **Fonctionnement** : Elle utilise les marées, les vagues ou les courants sous-marins.
- **Domaines d'application** : Projets pilotes le long des côtes à fort courant ou fortes marées.



Figure 1.6 Énergie marine [1].

### 1.3. Exploitation de l'énergie solaire à l'échelle mondiale

Le photovoltaïque représente aujourd'hui la filière de production d'électricité connaissant la croissance la plus rapide depuis 19 années consécutives. En valeur absolue, il s'agit également de la source d'énergie dont la production a le plus augmenté en 2022 et 2023, dépassant l'ensemble des autres filières énergétiques. Par ailleurs, la part de l'énergie solaire dans le mix électrique mondial a

suivi cette dynamique, passant de 0.01% en 2000 à environ 5,90% en 2023, ce qui traduit la reconnaissance croissante de cette source d'énergie renouvelable comme un pilier essentiel de la production énergétique mondiale [1].

Les figures 1.7 et 1.8 présentent les histogrammes obtenus à partir des données collectées sur la période 2000–2023. Ces représentations graphiques mettent en évidence l'évolution de la production énergétique solaire ainsi que la progression de sa part dans le mix électrique mondial au cours de cette période.

### 1.3.1. Évolution de la production énergétique

Le graphe de la figure 1.7 montre une progression spectaculaire de la production énergétique sur la période de 23 ans. On observe :

- Une croissance relativement modérée entre 2000 et 2009 ;
- Une accélération marquée à partir de 2010 ;
- Une augmentation particulièrement forte entre 2019 et 2023.

La production a augmenté de manière exponentielle, passant de seulement 1,03 TWh en 2000 à TWh 1509.90 en 2023, soit une multiplication par plus de 1465 en 23 ans.

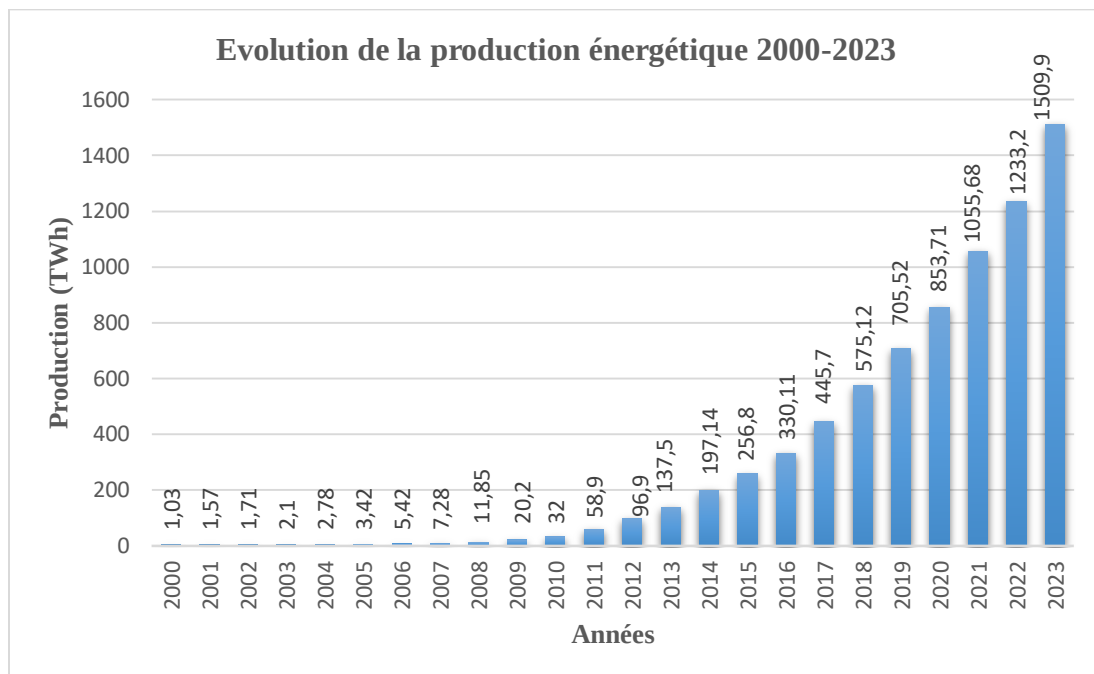


Figure 1.7 Evolution de la production énergétique [1].

### 1.3.2. Évolution de la part de l'énergie solaire

Le second graphique présente l'évolution de la contribution de l'énergie solaire au mix énergétique mondial sur la période étudiée (figure 1.8). En 2000, la part de l'énergie solaire était quasiment nulle, représentant seulement 0,001% de la production totale. Au fil des années, une progression continue est observée, traduisant le développement progressif des technologies photovoltaïques et l'augmentation des investissements dans les énergies renouvelables. En 2023, la part du solaire atteint environ 5,53 %, confirmant son intégration croissante dans le système énergétique mondial. Cette évolution met clairement en évidence l'importance grandissante de l'énergie solaire dans le mix énergétique.

Les deux graphiques montrent également une corrélation entre l'augmentation globale de la production énergétique et la croissance de la part du solaire. Cela indique que l'énergie solaire a contribué de manière significative à l'expansion de la production énergétique totale au cours de cette période, reflétant des investissements soutenus dans les technologies renouvelables et une transition progressive vers des sources d'énergie plus propres et durables [1].

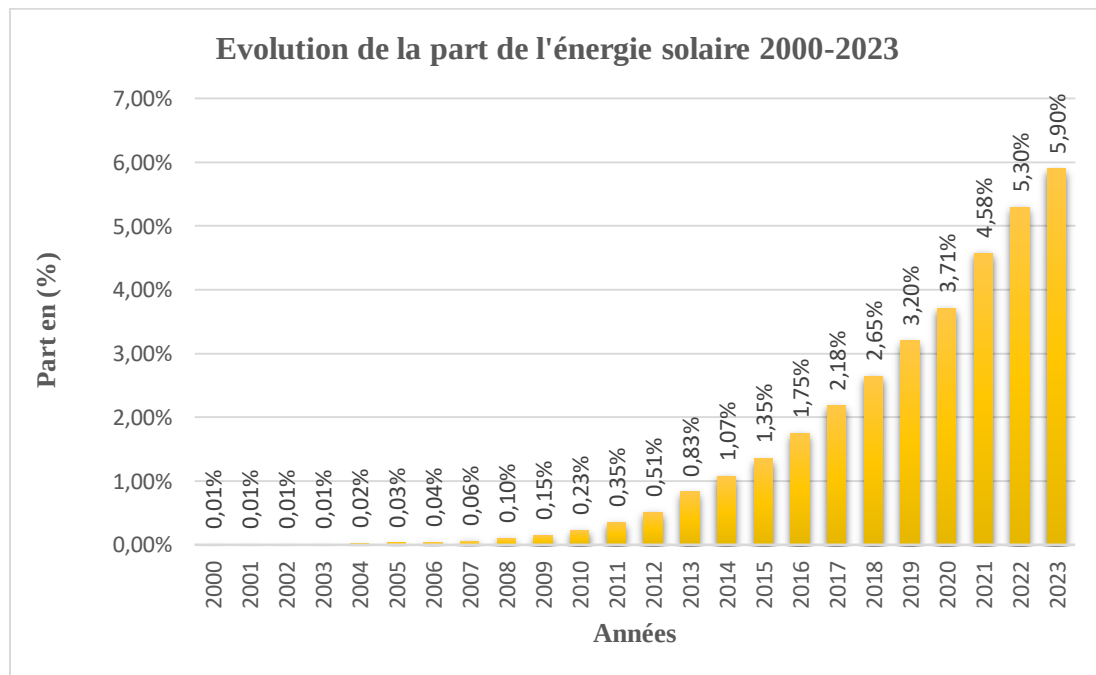


Figure 1.8 Evolution de l'énergie solaire [1].

### 1.4. Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

L'effet photovoltaïque représente le mécanisme de base de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Lorsqu'un rayonnement lumineux, composé de photons, atteint une cellule

photovoltaïque, ces photons cèdent leur énergie aux électrons du semi-conducteur, généralement le silicium, entraînant leur excitation et leur déplacement, ce qui génère un courant électrique [1].

#### 1.4.1. Description et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif permettant de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Comme le montre la figure 1.9, cette conversion repose sur trois mécanismes fondamentaux [1], [4] :

- L'absorption de l'énergie solaire (photons) par le matériau constituant la cellule,
- La transformation de l'énergie photonique en énergie électrique par la création de paires électron-trou dans un matériau semi-conducteur,
- La collecte des charges électriques générées afin de produire un courant électrique.

Ainsi, le matériau utilisé dans la fabrication de la cellule photovoltaïque doit posséder des niveaux d'énergie adaptés et une conductivité suffisante pour permettre la circulation du courant électrique. C'est pour cette raison que les semi-conducteurs, notamment le silicium, sont largement utilisés dans l'industrie photovoltaïque [1]. Afin de collecter les électrons générés, un champ électrique interne est créé dans la cellule pour assurer la séparation des paires électron-trou. Ce champ électrique est généralement obtenu grâce à une jonction PN, qui constitue la structure la plus couramment utilisée dans les cellules photovoltaïques [4].

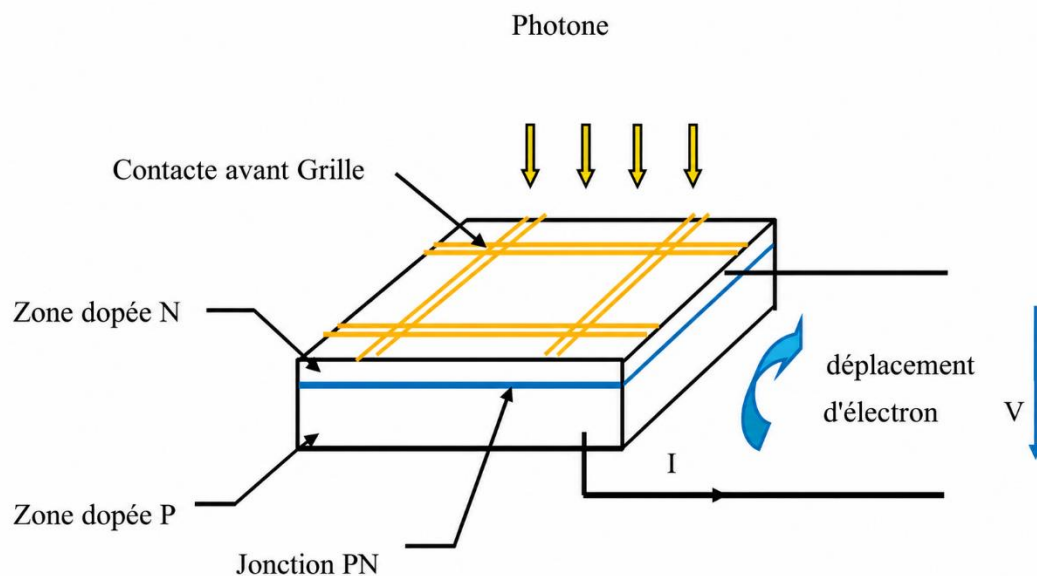


Figure 1.9 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque [4].

### 1.4.2. Technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de divers matériaux semi-conducteurs. À l'heure actuelle, on distingue trois grandes familles technologiques : le silicium cristallin, les technologies à couches minces et les cellules photovoltaïques organiques [1], [4]-[6].

#### 1.4.2.1. Silicium

Le silicium cristallin domine largement le marché photovoltaïque avec une part supérieure à 80%. Bien que la disparition de cette technologie, jugée gourmande en matière première, ait été annoncée depuis plusieurs années, les progrès technologiques réalisés au cours de la dernière décennie ont permis à cette filière de maintenir sa position dominante sur le marché. En raison de son développement rapide et de l'amélioration continue de ses performances, cette technologie devrait conserver sa place prépondérante encore pendant plusieurs années [5]. Elle regroupe principalement deux types de technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin.

Le silicium monocristallin est relativement difficile à produire, car il nécessite un niveau de pureté très élevé, impliquant plusieurs étapes de purification complexes et coûteuses. Ces procédés de fabrication rendent cette technologie plus onéreuse que les autres. Toutefois, elle offre le meilleur rendement, généralement compris entre 12% et 18% pour les cellules industrielles. Malgré ses performances élevées, son coût important constitue un frein à son développement, ce qui explique la progression du silicium multi-cristallin, plus économique, sur le marché photovoltaïque [4].

Le silicium multi-cristallin occupe une place prépondérante dans le domaine photovoltaïque, représentant à lui seul près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui leur confère une structure hétérogène. Leur rendement, légèrement inférieur à celui du silicium monocristallin, varie généralement entre 10% et 14% selon les fabricants. En revanche, leur procédé de fabrication plus simple permet de réduire considérablement les coûts de production, ce qui explique leur large adoption [4].

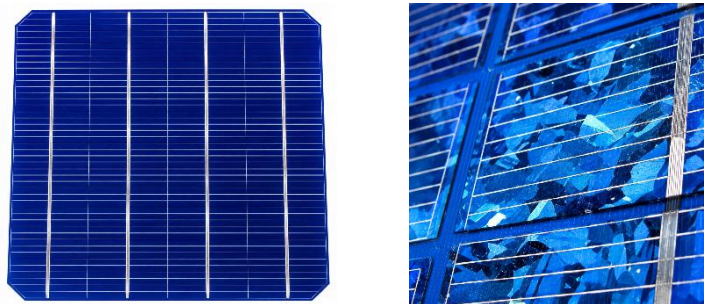


**Figure 1.10** Cellules monocristallines et multi-cristallines [2].

L'un des principaux inconvénients communs aux technologies monocristalline et multicristalline réside dans la quantité importante de matière première utilisée. En effet, les lingots de silicium sont découpés en tranches de 150 à 300 microns à l'aide de scies à fils. Le diamètre du fil de découpe, d'environ 180 microns, entraîne une perte de matière première pouvant atteindre près de 50%, ce qui constitue un facteur limitant en termes de rendement de fabrication et de coût [5].

#### 1.4.2.2. Couches minces

Malgré les progrès réalisés dans le développement des cellules photovoltaïques et leur large disponibilité, le coût du kilowatt-crête demeure encore un frein important à leur généralisation à grande échelle. Le kilowatt-crête est l'unité utilisée pour exprimer la puissance d'un générateur photovoltaïque dans les Conditions de Test Standard (STC), correspondant à un ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$  [1].

Afin de réduire les coûts de production, de nombreux travaux de recherche se sont orientés vers le développement de nouvelles technologies de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matériaux utilisés et à simplifier les procédés de fabrication. Ces technologies, connues sous le nom de cellules à couches minces, reposent sur des techniques de dépôt de matériaux semi-conducteurs en couches très fines sur des substrats, permettant de réduire l'épaisseur des cellules et d'optimiser l'utilisation de la matière première [5].

Parmi ces technologies, le silicium amorphe représente la technologie la plus mature dans le domaine des couches minces. En 2008, cette technologie représentait plus de 7% du marché mondial. Son principal avantage réside dans l'utilisation de substrats à faible coût, ce qui permet de réduire le coût global de fabrication tout en facilitant l'industrialisation de cette technologie [1].

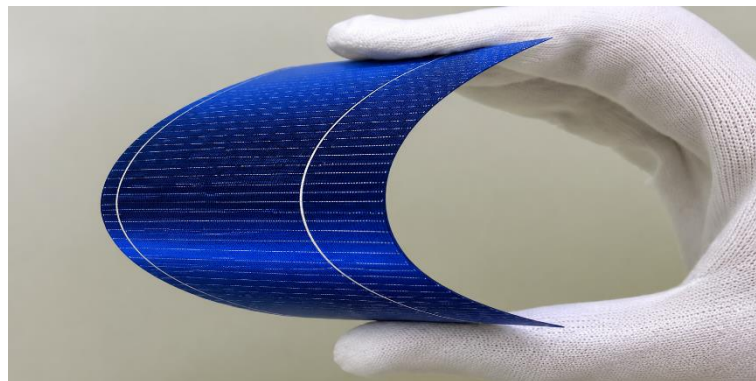


Figure 1.11 Couches minces [1].

### 1.4.2.3. Cellules organiques et plastiques

Les cellules photovoltaïques organiques constituent un axe de recherche particulièrement actif, mais leur développement reste majoritairement limité au cadre des laboratoires. Ces cellules se développent selon deux principales approches : les cellules organiques humides et les cellules polymères organiques, également appelées cellules plastiques. Les progrès réalisés dans ce domaine sont rapides, et les rendements évoluent régulièrement, atteignant actuellement des valeurs proches de 6%. Toutefois, le principal obstacle à leur développement réside dans la faible stabilité des performances ainsi que dans leur durée de vie limitée, estimée à environ 1000 heures [6], [7].

Les avancées dans le domaine des nanosciences ouvrent cependant de nouvelles perspectives d'amélioration pour ces technologies. Bien que leur avenir industriel ne soit pas encore clairement établi, les cellules organiques pourraient permettre la conception de modules photovoltaïques à très faible coût, biodégradables et facilement intégrables sur différentes surfaces [6], [7].

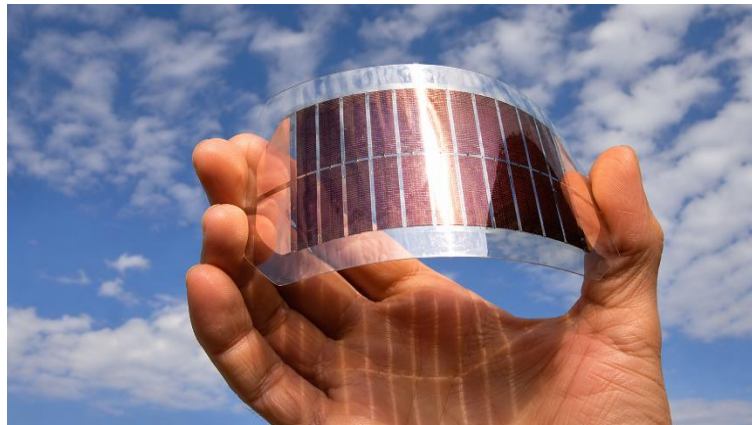


**Figure 1.12** Cellule PV de type organique [7].

Il est possible de connecter les modules photovoltaïques en série ou en parallèle, comme le montrent respectivement les figures 1.13 et 1.14, afin d'augmenter respectivement la tension et l'intensité du courant délivré par le système. Toutefois, certaines précautions doivent être prises lors de cette association, car la présence de cellules moins performantes ou partiellement obstruées, en raison de l'ombrage, de la poussière ou d'autres facteurs environnementaux, peut entraîner une dégradation des performances et provoquer des dommages permanents aux cellules photovoltaïques [1], [4].

### a) Connexion des cellules en série

Comme nous l'avons déjà mentionné à propos de la constitution des modules, la courbe courant-tension du montage en série de plusieurs cellules est obtenue en additionnant les tensions de chacune des cellules pour chacune de même valeur de courant. La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en série de deux cellules est représentée à la figure 1.13. Dans ce cas, la puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale d'une cellule. Pour le montage en série, le courant optimal est le même que pour une seule cellule et la tension optimale est le double de la tension optimale d'une cellule [6].

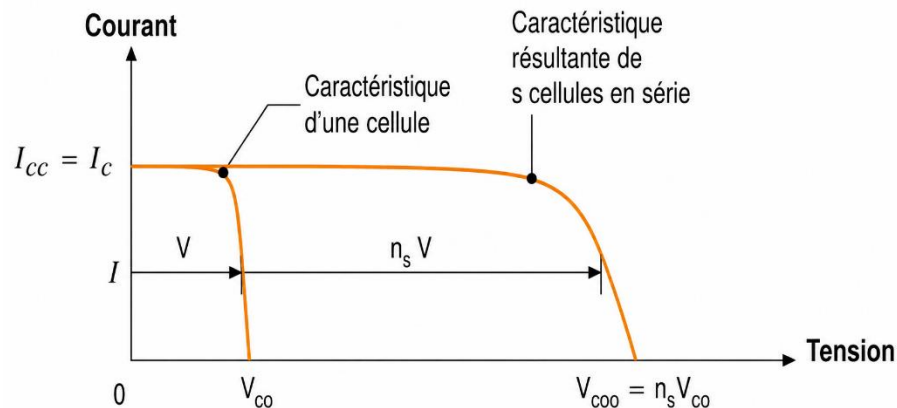


Figure 1.13 Connexion des cellules en série [1].

### b) Connexion des cellules en parallèle

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en parallèle de deux cellules identiques est représentée à la figure 1.14.

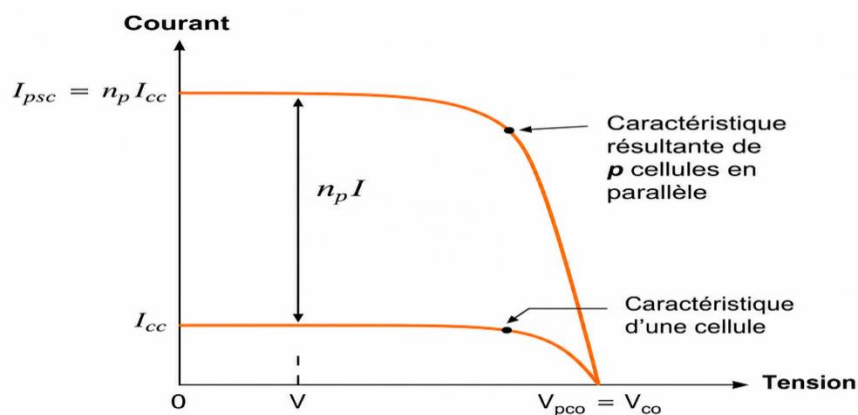


Figure 1.14 Connexion des cellules en parallèle [1].

Comme dans le cas du montage en série, la puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale. Mais cette fois, la tension optimale de l'ensemble est la même que pour

une seule cellule, alors que le courant optimal de l'ensemble est égal au double du courant optimal d'une seule cellule [8].

### 1.5. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque

La photopile présentée à la figure 1.15 comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  [1], [9] :

- La résistance série représente les pertes ohmiques internes (semi-conducteur, contacts, interconnexions), elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

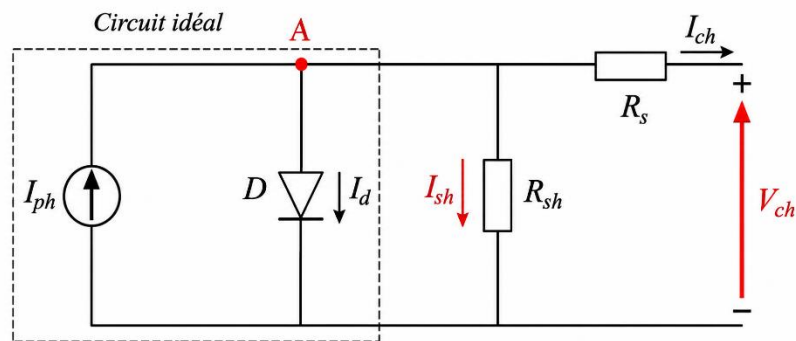


**Figure 1.15** Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque [1].

Le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque fait intervenir plusieurs composants pour représenter les phénomènes physiques réels. Il comprend [1], [4] :

- Un générateur de courant simulant le flux lumineux incident ;
- Une diode représentant les effets de polarisation de la jonction de la cellule ;
- Deux résistances (série  $R_s$  et shunt  $R_{sh}$ ) pour tenir compte des pertes électriques.

Ce modèle est généralement désigné comme le modèle à cinq paramètres, dont les éléments sont : le photo-courant ( $I_{ph}$ ), le courant de saturation de la diode ( $I_0$ ), le facteur d'idéalité de la jonction ( $A$ ), la résistance série ( $R_s$ ) et la résistance shunt ( $R_{sh}$ ).

Dans certains cas, pour simplifier l'analyse, il est possible de négliger l'effet de la résistance shunt en la considérant comme infinie, ce qui conduit au modèle à quatre paramètres. Si l'on néglige également la résistance série, on obtient le modèle à trois paramètres. Le choix du modèle dépend

des objectifs de l'étude : le modèle à cinq paramètres constitue un bon compromis entre simplicité et précision, et permet de décrire de manière satisfaisante la caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule ou du module, en fournissant les expressions des différents courants [1].

L'étude physique d'une photopile conduit à l'équation du courant de charge [10], [11] :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.1)$$

Où :

- $I_{cell}$  : Courant de la cellule photovoltaïque ;
- $I_{ph}$  : Photo-courant de l'incident lumineux ;
- $I_d$  : Courant de la diode ;
- $I_p$  : Courant de fuite à travers la résistance shunt.

Dans le cas où la résistance shunt est suffisamment élevée, le courant ( $I_p$ ) peut être négligé, et l'équation se simplifie ainsi :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \quad (1.2)$$

#### a) Photo-courant ( $I_{ph}$ )

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante [10], [11] :

Avec :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (1.3)$$

- $I_{sc}$  [A] : Courant de court-circuit du panneau, donné par le constructeur ;
- $K_i$  [A/K] : Coefficient de température du courant de court-circuit ;
- $T$  [K] : Température ambiante ;
- $G$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation sur la surface de la cellule ;
- $T_{ref}$  [K] : Température de référence (298 K).

#### b) Courant de saturation ( $I_0$ )

Ce courant varie avec la température sous la relation suivante [10], [11] :

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot E_{go} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right] \quad (1.4)$$

Avec :

- $E_{go}$  [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium multi-cristallin à 25°C).

### c) Le courant de saturation inverse de la diode

L'expression de ce courant est donnée par l'équation suivante [10], [11] :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left(\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right) - 1\right)} \quad (1.5)$$

Où :

- $V_{oc}$  [V] : Tension de circuit ouvert du module, donnée par le constructeur ;
- $q$  [C] : Charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$ ) ;
- $N_s$  : Nombre de cellules connectées en série ;
- $n$  : Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 2$ ) ;
- $K$  : Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K).

### d) Courant de la résistance shunt ( $I_p$ )

Le courant ( $I_p$ ) est donné par l'équation suivante [10], [11] :

$$I_p = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

### e) Courant du panneau ( $I_{PV}$ )

Les équations présentées précédemment ne permettent pas de décrire la caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque, car elles s'appliquent uniquement à une cellule PV, qui constitue l'élément de base du panneau. Il convient donc d'introduire l'équation spécifique au module [10], [11] :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + I R_s)}{n K N_s T}\right) - 1 \right] - I_p \quad (1.7)$$

## 1.6. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque (GPV) produit de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Son fonctionnement repose sur un principe simple : un panneau photovoltaïque est constitué de nombreuses cellules photovoltaïques qui génèrent du courant continu lorsqu'elles sont exposées à la lumière du soleil. Ce courant continu est ensuite transformé en courant alternatif grâce à un onduleur, permettant son utilisation dans les réseaux électriques domestiques ou industriels [1], [12]. La combinaison de plusieurs cellules photovoltaïques en série ou en parallèle permet de former le

générateur photovoltaïque. Cette configuration modulable permet d'adapter le générateur photovoltaïque aux besoins spécifiques en tension et en puissance électrique [12].

## 1.7. Types de systèmes photovoltaïques

On distingue trois types de systèmes : système PV autonome ; système PV connecté au réseau et système PV hybride [13]-[15].

### 1.7.1. Système PV autonome

Une installation photovoltaïque autonome, présentée à la figure 1.16, est un système de production d'énergie qui fonctionne indépendamment du réseau électrique et de toute autre source d'énergie conventionnelle. Elle est généralement utilisée pour alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans des zones isolées, telles que les habitations rurales, les chalets ou les camps, ainsi que pour diverses applications comme la surveillance, les télécommunications ou le pompage d'eau [2]. On distingue principalement deux types de systèmes photovoltaïques autonomes : les systèmes avec stockage, qui utilisent des batteries pour assurer l'alimentation en l'absence de rayonnement solaire, et les systèmes sans stockage, où l'énergie produite est directement consommée par les charges [2], [13].

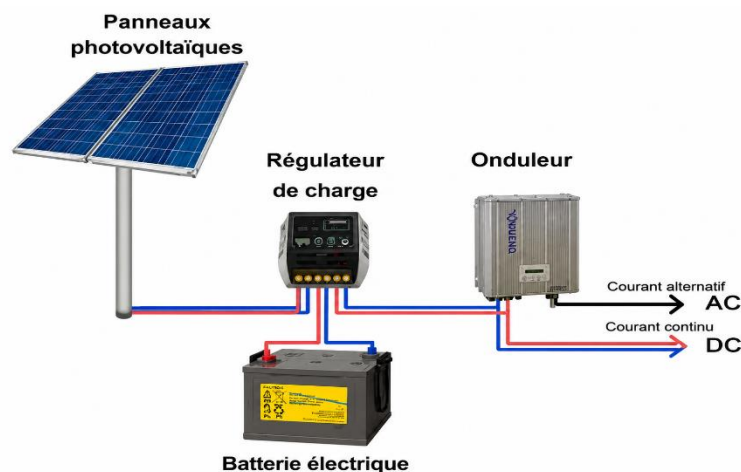


Figure 1.16 Système PV autonome [13].

### 1.7.2. Systèmes PV connectés au réseau

Une installation photovoltaïque peut être connectée en parallèle au réseau électrique afin d'assurer l'alimentation des consommateurs, comme le montre la figure 1.17. Dans ce type de système, les panneaux solaires sont généralement connectés en série pour former des strings, qui sont ensuite reliés à un onduleur. Le rôle principal de l'onduleur est de convertir le courant continu

produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif compatible avec le réseau électrique. Chaque onduleur est dimensionné en fonction de la puissance des panneaux et peut être raccordé à un ou plusieurs strings [1]. D'autre part, si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins [14].

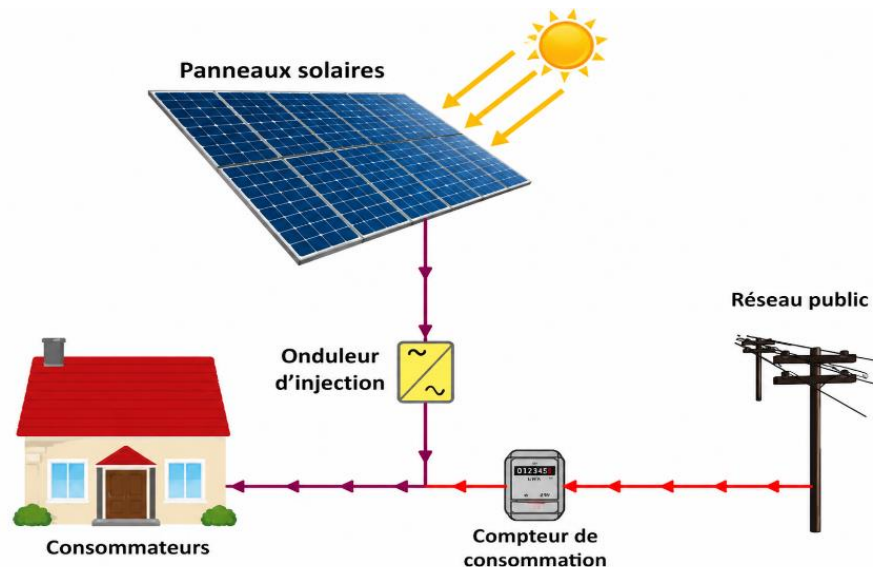


Figure 1.17 Système PV connecté au réseau [1].

### 1.7.3. Systèmes PV hybrides

Les systèmes photovoltaïques hybrides combinent un générateur photovoltaïque avec une autre source d'énergie, tel qu'un système éolien, un groupe électrogène, une installation hydroélectrique ou parfois même le réseau public d'électricité, comme l'illustre la figure 1.18. Cette combinaison permet d'assurer une production énergétique plus stable et continue. Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux sites isolés, où la disponibilité permanente de l'électricité est essentielle, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où l'utilisation d'un système photovoltaïque seul, associé uniquement à des batteries, n'est pas toujours économiquement rentable [2]. Les systèmes photovoltaïques hybrides sont ainsi largement utilisés dans des applications sensibles et stratégiques, telles que les relais de télécommunication, les postes frontaliers, les habitations isolées et d'autres installations situées hors du réseau électrique conventionnel. Grâce à la complémentarité des sources d'énergie, ils garantissent une meilleure fiabilité et une continuité de l'alimentation électrique [2], [15].

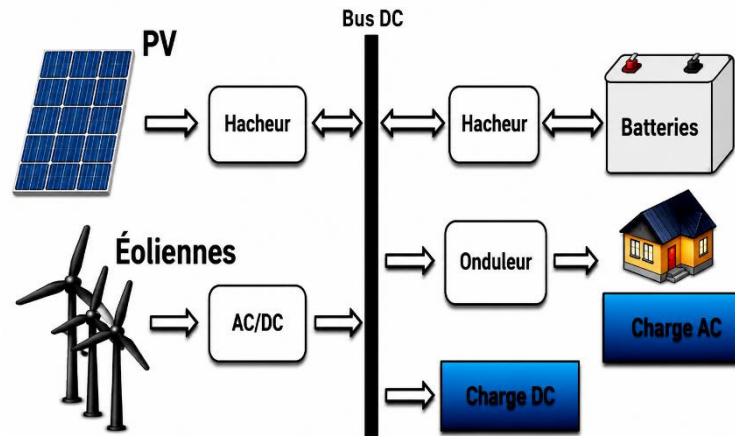


Figure 1.18 Système PV hybride [15].

## 1.8. Avantages et limites des systèmes photovoltaïques

### 1.8.1. Avantages des systèmes photovoltaïques

La technologie photovoltaïque présente de nombreux avantages [1], [4], [9] :

- Une **grande fiabilité**, puisqu'elle ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui réduit considérablement les risques de panne et la rend particulièrement adaptée aux **zones isolées**.
- Le **caractère modulaire** des panneaux photovoltaïques permet une installation simple et flexible, adaptée à différents besoins énergétiques.
- Les **coûts de fonctionnement** des systèmes photovoltaïques sont relativement faibles, en raison de la réduction des opérations de maintenance. De plus, ils ne nécessitent ni combustible, ni transport de ressources énergétiques.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des avantages écologiques importants, car elle produit une énergie propre, silencieuse et non polluante.

### 1.8.2. Limites des systèmes photovoltaïques

Malgré leurs nombreux avantages, les systèmes photovoltaïques présentent également certaines limites [1], [4], [9] :

- Tout d'abord, la fabrication des modules photovoltaïques repose sur des technologies avancées nécessitant des investissements initiaux importants, ce qui augmente le coût global des installations.
- Ensuite, le rendement réel de conversion des modules photovoltaïques reste relativement limité. En effet, la limite théorique de conversion pour une cellule au silicium cristallin est d'environ

28%, tandis que le rendement pratique est généralement inférieur, ce qui réduit la quantité d'énergie produite par unité de surface.

- Par ailleurs, les générateurs photovoltaïques ne sont véritablement compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles besoins énergétiques en zones isolées, où l'accès au réseau électrique et l'approvisionnement en carburant sont difficiles ou coûteux.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batteries) est nécessaire, le coût global du système photovoltaïque augmente considérablement.

## 1.9. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général des différentes sources d'énergies renouvelables, en accordant une attention particulière à l'énergie solaire et à son développement à l'échelle mondiale. Nous avons ensuite étudié le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, en détaillant son principe de conversion de l'énergie ainsi que les différentes configurations de connexion et les technologies associées. Par ailleurs, la modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque a été abordée afin de mieux comprendre son comportement électrique, suivie d'une présentation des principaux types de systèmes photovoltaïques. Enfin, une analyse des avantages et des inconvénients de ces systèmes a également été réalisée, permettant d'évaluer leur efficacité et leurs contraintes dans les applications énergétiques modernes.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la description et à la modélisation d'un système photovoltaïque autonome, en mettant en œuvre des techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), Notamment les méthodes classiques (telles que les techniques Perturber & Observer (P&O) et Incremental Conductance (IncCond)) ainsi que les méthodes intelligentes, comme la logique floue.

***Chapitre 02:***  
***Système photovoltaïque***  
***autonome basé sur des***  
***techniques MPPT<sub>s</sub> classique et***  
***intelligente***

## 2.1. Introduction

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, l'énergie photovoltaïque (PV) joue un rôle important dans la diversification des sources énergétiques renouvelables [16]. Face à l'augmentation continue de la demande énergétique et à l'impératif de réduire l'empreinte carbone, les systèmes PV<sub>s</sub> autonomes apparaissent comme une solution à la fois durable et performante pour la production d'électricité. Ils se révèlent particulièrement adaptés aux zones isolées ou aux applications mobiles, où l'accès au réseau électrique est limité, voire inexistant [1]. Les générateurs photovoltaïques (GPV<sub>s</sub>) ont des caractéristiques non linéaires (P-V) et peuvent atteindre un point de fonctionnement optimal unique lors des conditions d'éclairage uniformes. Le point de fonctionnement d'un GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté [9]. Pour maximiser l'efficacité énergétique, l'intégration d'un convertisseur de puissance (DC/DC) associé à un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) s'avère essentielle. Ce dispositif assure une adaptation continue de la charge, garantissant que le générateur photovoltaïque fonctionne en permanence à son point de puissance optimale, et permettant ainsi d'exploiter au mieux l'énergie disponible. Parmi les méthodes les plus couramment employées figurent l'algorithme Perturber et Observer (P&O), la conductance incrémentale (Incremental Conductance – IncCond) ainsi que l'approche basée sur la logique floue. Ce deuxième chapitre présente, dans un premier temps, l'architecture générale du système PV autonome. Il introduit ensuite les principes de fonctionnement ainsi que la modélisation des techniques MPPTs, notamment les méthodes P&O, IncCond et floue. Ces approches sont mises en œuvre afin d'optimiser l'extraction de la puissance du générateur photovoltaïque, via un convertisseur DC/DC de type élévateur, assurant ainsi un rendement énergétique optimal [1].

## 2.2. Description générale du système photovoltaïque autonome

Comme le montre la figure 2.1, le système PV autonome est généralement composé de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour produire, stocker et utiliser l'énergie solaire de manière efficace. Dans le tableau 2.1, nous explorerons les éléments essentiels d'un système photovoltaïque autonome, tels que : les panneaux solaires, le régulateur de charge, les batteries de stockage, le convertisseur de courant continu en courant alternatif (DC/AC), ... etc. La compréhension de ces composants essentiels permet de mieux saisir le fonctionnement ainsi que les avantages des systèmes photovoltaïques autonomes [17].

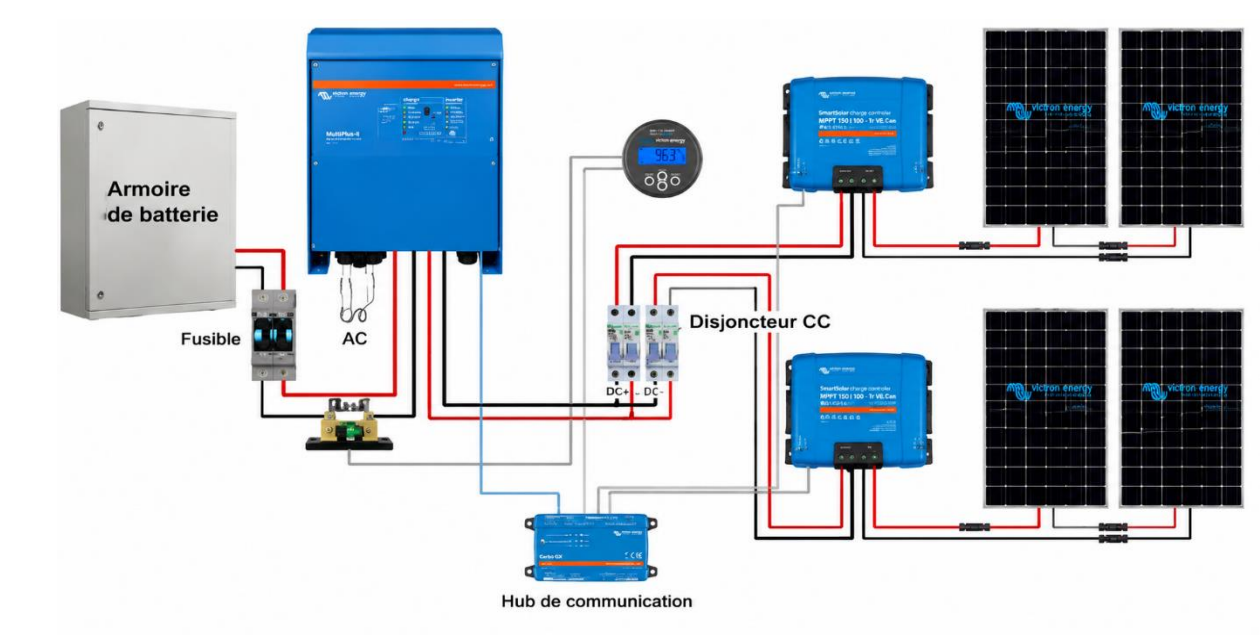


Figure 2.1 Schéma simplifié d’un système PV autonome [18].

Tableau 2.1: Composants et caractéristiques d’un système photovoltaïque autonome [18].

| Composants                   | Caractéristiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Panneaux solaires            | Il s’agit de la pièce maîtresse d’une installation photovoltaïque ; ils permettent de convertir l’énergie solaire incidente sur leur surface sous forme de particules énergétiques (photons) en une énergie électrique. Sur le marché national et international, plusieurs marques et technologies sont disponibles. |
| Contrôleur de charge solaire | Compatible avec le type de batterie aussi bien qu’avec la tension et la puissance de sortie du GPV.                                                                                                                                                                                                                  |
| Onduleur Solaire             | Est un équipement indispensable pour une utilisation domestique ou une alimentation d’équipements fonctionnant avec un courant alternatif. Son choix devrait obéir aux critères et exigences puissance-courant de l’installation.                                                                                    |
| Batteries solaires           | Assurent la fonction de stockage d’énergie électrique produite par le système PV qui pourra être restitué pour être utilisé durant la nuit ou durant les périodes creuses ou en cas d’absence de l’énergie solaire.                                                                                                  |
| Structures et supports       | Constitués de matériaux métalliques résistants aux actions des différents agents météorologiques (vent, humidité, ... etc).                                                                                                                                                                                          |
| Câblage                      | Choisi selon les spécifications techniques (tension max, courant admissible, ... etc).                                                                                                                                                                                                                               |

### 2.3. Analyse des architectures de conversion DC/DC

Dans les systèmes photovoltaïques, l’intégration de convertisseurs DC/DC est indispensable pour assurer une adaptation optimale de la tension entre la source d’énergie (telle que le panneau solaire ou la batterie) et la charge [1]. En raison des variations des conditions de fonctionnement, notamment l’ensoleillement et la température, la tension fournie n’est pas constante, ce qui rend

nécessaire l'utilisation de ces dispositifs de conversion. Selon le rapport de transformation de tension recherché, on distingue principalement trois topologies de base : le convertisseur abaisseur (Buck), qui réduit la tension, le convertisseur élévateur (Boost), qui l'augmente, et le convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost), capable à la fois de diminuer et d'augmenter la tension [1].

### 2.3.1. Convertisseur DC/DC abaisseur (Buck)

Le hacheur abaisseur est un convertisseur statique de type DC/DC qui permet de transformer une tension continue d'entrée en une tension continue de sortie de valeur moyenne inférieure [1]. Comme le montre la figure 2.2, ce convertisseur est constitué principalement d'un interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture, d'une diode, d'une inductance et d'un condensateur de filtrage [19].

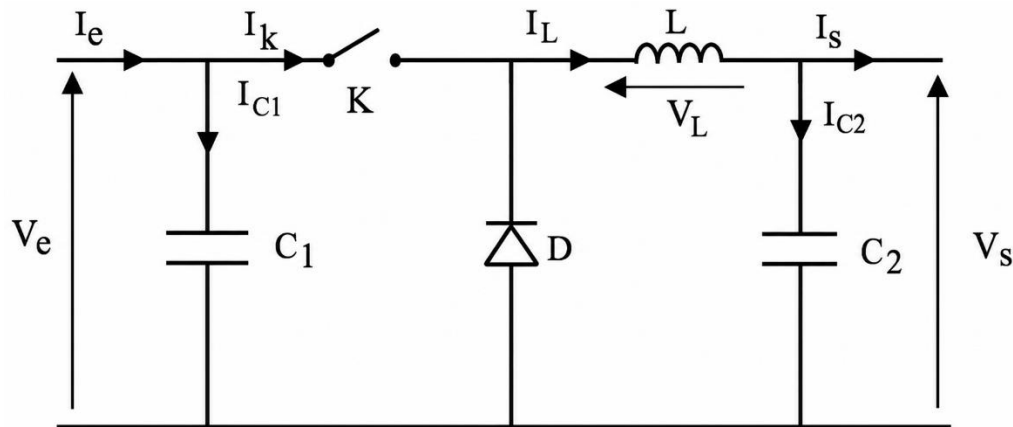


Figure 2.2 Schéma électrique d'un hacheur abaisseur [19].

### 2.3.2. Convertisseur DC/DC élévateur (Boost)

Le hacheur élévateur est un convertisseur statique de type DC/DC qui permet d'augmenter une tension continue d'entrée afin d'obtenir une tension continue de sortie de valeur moyenne supérieure [3]. Il se caractérise par un nombre réduit de composants électroniques ainsi que par une grande simplicité de commande. Selon la figure 2.3, ce convertisseur est composé d'une inductance  $L$  pour le stockage d'énergie, un interrupteur  $K$  pour le contrôle de la sortie, une diode  $D$  pour isoler la sortie lorsque l'interrupteur est fermé et deux condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  pour réduire les ondulations [20]. Son fonctionnement repose sur deux phases principales liées à la commutation de l'interrupteur [1], [3] :

- Lorsque l'interrupteur K est fermé, l'inductance est directement connectée à la source d'entrée et emmagasine de l'énergie sous forme de champ magnétique, tandis que la diode est bloquée et empêche le transfert d'énergie vers la charge.
- Lorsque l'interrupteur K est ouvert, l'inductance restitue l'énergie accumulée en s'ajoutant à la source d'entrée, ce qui permet d'obtenir une tension de sortie plus élevée. La diode devient alors passante et le condensateur se charge, assurant une tension continue aux bornes de la charge.

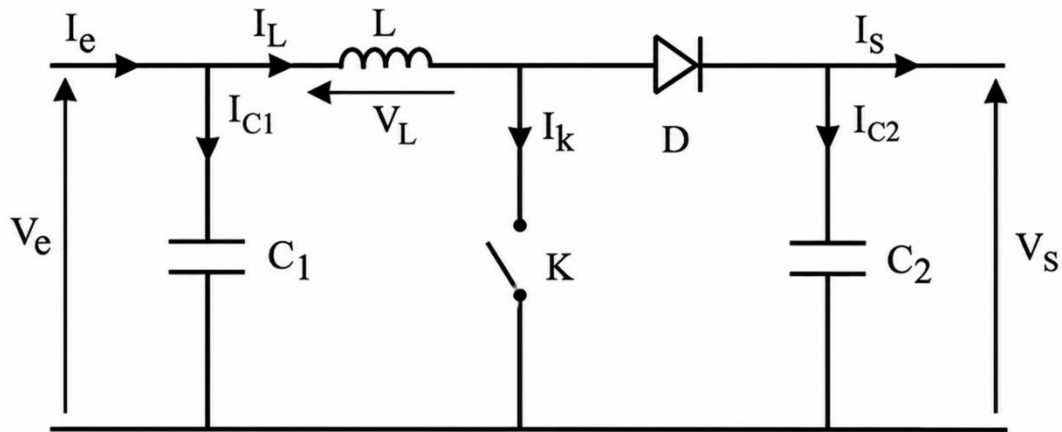


Figure 2.3 Schéma électrique d'un hacheur élévateur [19].

### 2.3.3. Convertisseur DC/DC abaisseur-élévateur (Buck-Boost)

Le hacheur Buck-Boost est un type de convertisseur DC/DC capable de réduire (abaisser) ou augmenter (élever) la tension d'entrée, tout en fournissant une tension de sortie régulée [1], [19]. Le circuit électrique de ce type de convertisseur DC/DC est illustré à la figure 2.4.

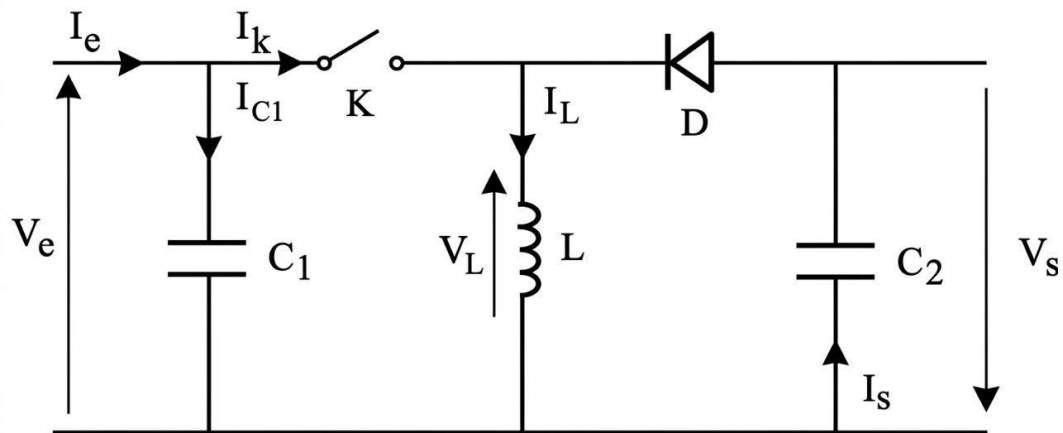


Figure 2.4 Schéma électrique d'un hacheur abaisseur-élévateur [19].

## 2.4. Modélisation mathématique du convertisseur DC/DC élévateur

Le montage représenté à la figure 2.3 présente deux régimes de fonctionnement, selon que le courant dans la bobine  $L$  s'interrompt ou se maintient. Par conséquent, la période se décompose en deux phases successives [20].

- Phase d'accumulation ( $0 < t < dT$ ) : l'interrupteur  $K$  est fermé ( $V_K = 0$  ;  $I_K = I_L$ ) et la diode  $D$  est bloquée ( $V_D = -V_s$  ;  $I_D = 0$ ), la bobine est soumise à  $V_L = V_e$ . Le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, la bobine emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle [20].

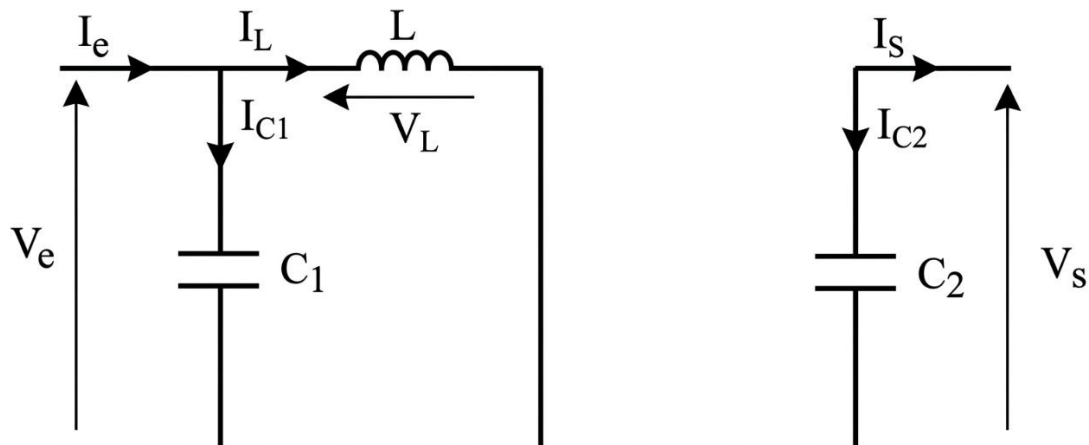


Figure 2.5 Schéma électrique du hacheur élévateur durant la phase d'accumulation [19].

- Phase active ( $dT < t < T$ ) : l'interrupteur  $K$  est ouvert ( $V_K = V_s$  ;  $I_K = 0$ ) et la diode  $D$  est passante ( $V_D = 0$  ;  $I_D = I_L$ ), le courant dans la bobine n'est pas nul ( $V_L = V_e - V_s$ ). L'inductance  $L$  s'opposant à la diminution de courant  $I_L$ , génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source, qui s'applique sur la charge à travers la diode  $D$  [20].

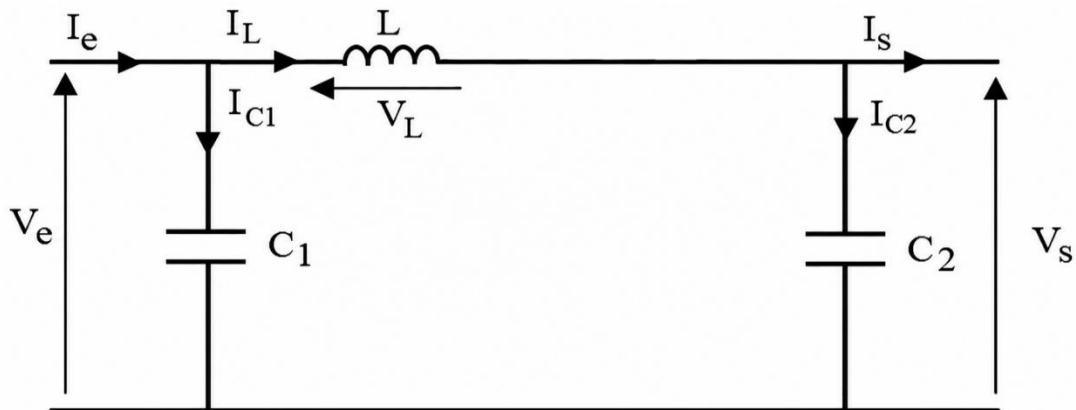


Figure 2.6 Schéma électrique du hacheur élévateur durant la phase active [19].

L'application de la loi de Kirchhoff aux circuits équivalents associés aux deux phases de fonctionnement conduit aux relations suivantes [19], [20] :

- Pour la première phase ( $0 < t < dT$ ) :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I_e(t) - I_L(t) \quad (2.1)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -I_s(t) \quad (2.2)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_e(t) \quad (2.3)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{I_s}{C_2} \quad (2.4)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad (2.5)$$

Pour la deuxième phase ( $dT < t < T$ ) :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I_e(t) - I_L(t) \quad (2.6)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \quad (2.7)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) \quad (2.8)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{I_L - I_s}{C_2} \quad (2.9)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (2.10)$$

En combinant les équations (2.4), (2.5), (2.9) et (2.10), on obtient les équations dynamiques régissant le fonctionnement de ce convertisseur, qui s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dV_s}{dt} = -\frac{I_s}{C_2} + \frac{I_L}{C_2} - \left(\frac{I_L}{C_2}\right) * u \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} + \left(\frac{V_s}{L}\right) * u \end{cases} \quad (2.11)$$

Où :  $u$  représente le paramètre de la position du commutateur.

## 2.5. Principe et importance de la commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques

Un MPPT (Maximum Power Point Tracker) est un système de commande associé à un étage d'adaptation, généralement un convertisseur continu-continu, dont l'objectif est d'exploiter au mieux un GPV en garantissant une production continue à sa puissance maximale. Il repose sur une stratégie de contrôle qui consiste à piloter finement le convertisseur reliant la source à la charge, en ajustant automatiquement le rapport cyclique [21]. Cette action permet de maintenir en permanence le point de fonctionnement optimal du GPV, indépendamment des fluctuations des conditions climatiques (irradiation et température) ou des variations rapides de la charge [21].

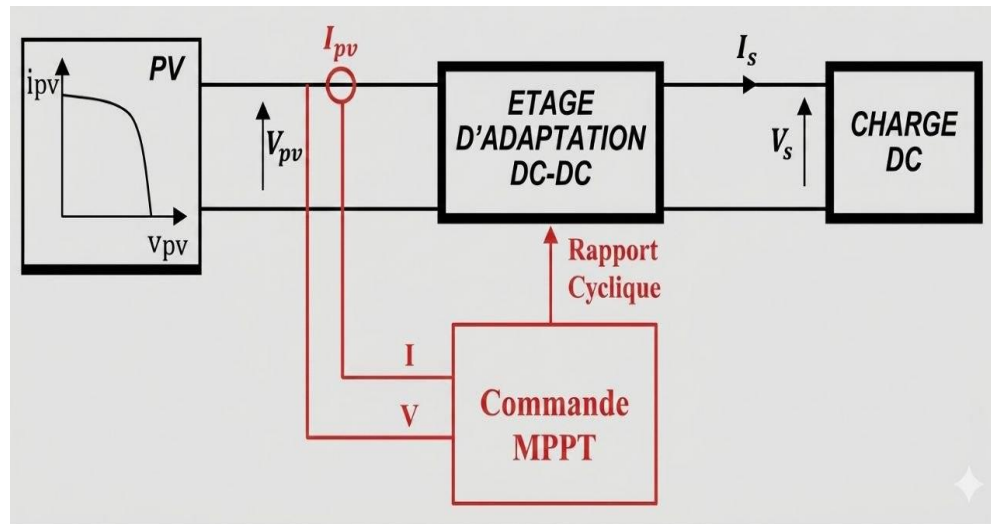


**Figure 2.7** Chaîne de conversion de l'énergie solaire comprenant une commande MPPT [20].

La stratégie MPPT assure le suivi du point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques en ajustant la tension et le courant afin d'optimiser la puissance produite. Généralement intégrée aux onduleurs, elle garantit une gestion efficace entre les panneaux, les batteries et les charges. Grâce à cet ajustement dynamique, elle maximise l'énergie extraite et stockée, tout en améliorant le rendement global du système photovoltaïque [16].

## 2.6. Méthodes MPPT<sub>s</sub> classique et intelligente

### 2.6.1. MPPT de type Perturber et Observer (P&O)

La méthode P&O est une technique de suivi du point de puissance maximale (PPM) largement connue et utilisée dans les systèmes photovoltaïques afin d'optimiser l'extraction de la

puissance [22]. Cette technique MPPT consiste à appliquer de petites variations à la tension  $V_{PV}$  autour de sa valeur initiale et à observer l'effet de ces perturbations sur la puissance  $P_{PV}$ .

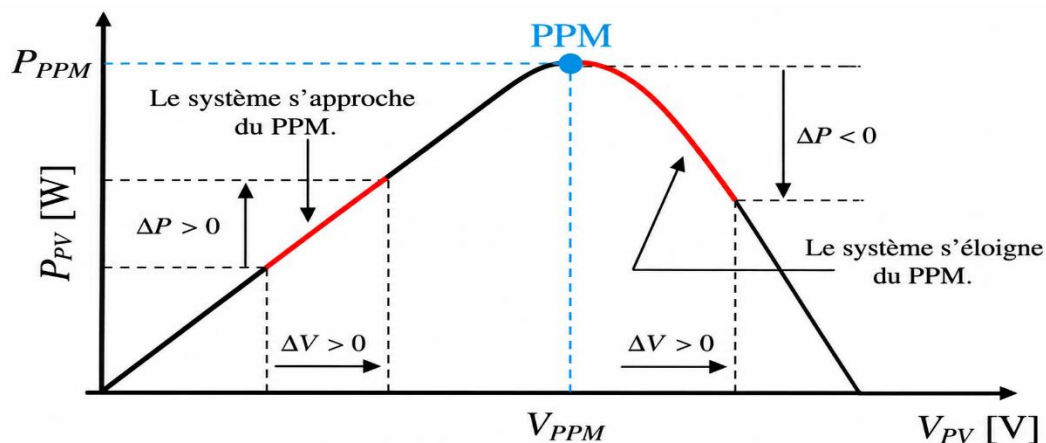


Figure 2.8 Schéma illustratif du principe de la méthode MPPT de type P&O [1].

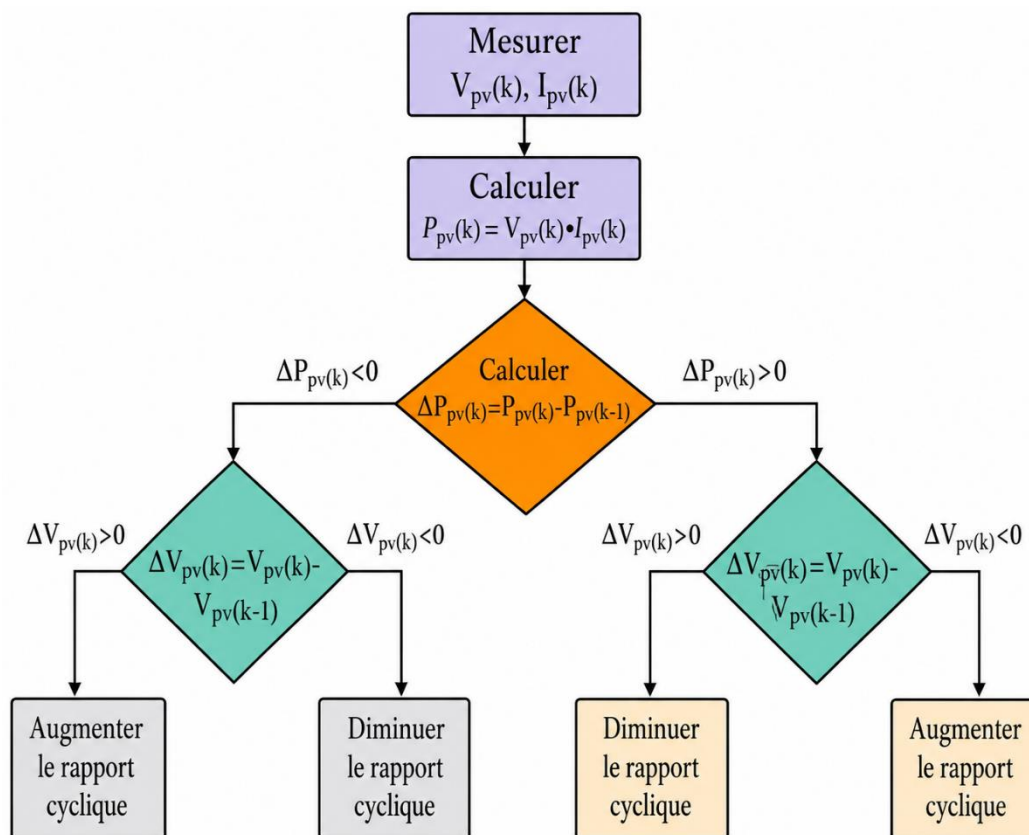


Figure 2.9 Organigramme illustratif du fonctionnement de l'algorithme MPPT de type P&O [22].

Comme montré sur la figure 2.8, une augmentation de la tension  $V_{PV}$  permet de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM : si la puissance  $P_{PV}$  augmente, le système se trouve à gauche du

PPM ; si elle diminue, il se situe à droite. Un raisonnement similaire s'applique également lorsque la tension diminue. À partir de ces analyses des effets de la variation de la tension sur la caractéristique  $P_{PV} = f(V_{PV})$ , il devient possible de déterminer la position du point de fonctionnement par rapport au PPM et d'assurer sa convergence vers le maximum de puissance grâce à une commande adaptée [20].

En résumé, si la puissance  $P_{PV}$  augmente après une perturbation de la tension, celle-ci est maintenue dans le même sens. En revanche, si la puissance  $P_{PV}$  diminue, le sens de la perturbation est inversé afin de ramener le système vers le nouveau PPM. Enfin, la figure 2.9 représente l'organigramme de fonctionnement de l'algorithme P&O [1], [9].

### 2.6.2. MPPT de type Incremental Conductance (IncCond)

La méthode MPPT fondée sur la conductance incrémentale (IncCond) figure parmi les stratégies les plus répandues, grâce à sa capacité à assurer un suivi rapide et précis du PPM. Contrairement à la technique P&O, l'approche IncCond s'appuie simultanément sur les caractéristiques distinctives des courbes courant-tension ( $I_{PV}$ - $V_{PV}$ ) et puissance-tension ( $P_{PV}$ - $V_{PV}$ ) du générateur photovoltaïque. Cette exploitation conjointe permet d'améliorer significativement la rapidité de convergence ainsi que la précision du suivi du PPM. Le principe de cette méthode repose sur l'analyse de la pente de la courbe ( $P_{PV}$ - $V_{PV}$ ), le PPM étant atteint lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule ( $dP/dV = 0$ ), comme exprimé ci-après [9], [23] :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV} \cdot I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} \frac{dV_{PV}}{dV_{PV}} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (2.12)$$

Au PPM,  $dP/dV = 0$  :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \rightarrow I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (2.13)$$

Donc :

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (2.14)$$

En se basant sur l'équation (2.14), le fonctionnement de la méthode MPPT IncCond est articulé sur les conditions suivantes :

- ✓ Si :  $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  donc : le point de fonctionnement est situé sur la gauche du PPM de la courbe ( $P_{PV} - V_{PV}$ ) ;
- ✓ Si :  $\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$  donc : le point de fonctionnement est situé sur la droite du PPM de la courbe ( $P_{PV} - V_{PV}$ ).

Le suivi du PPM s'effectue ainsi par la comparaison entre la conductance instantanée ( $I_{PV}/V_{PV}$ ) et la conductance incrémentielle ( $dI_{PV}/dV_{PV}$ ), conformément à l'organigramme de la figure 2.10 [9]. La taille de l'incrément influe directement sur la vitesse de suivi du PPM. Des incréments plus importants permettent d'accélérer la convergence vers le PPM ; toutefois, ils peuvent engendrer des oscillations autour de ce point et empêcher le système de fonctionner avec précision [9].

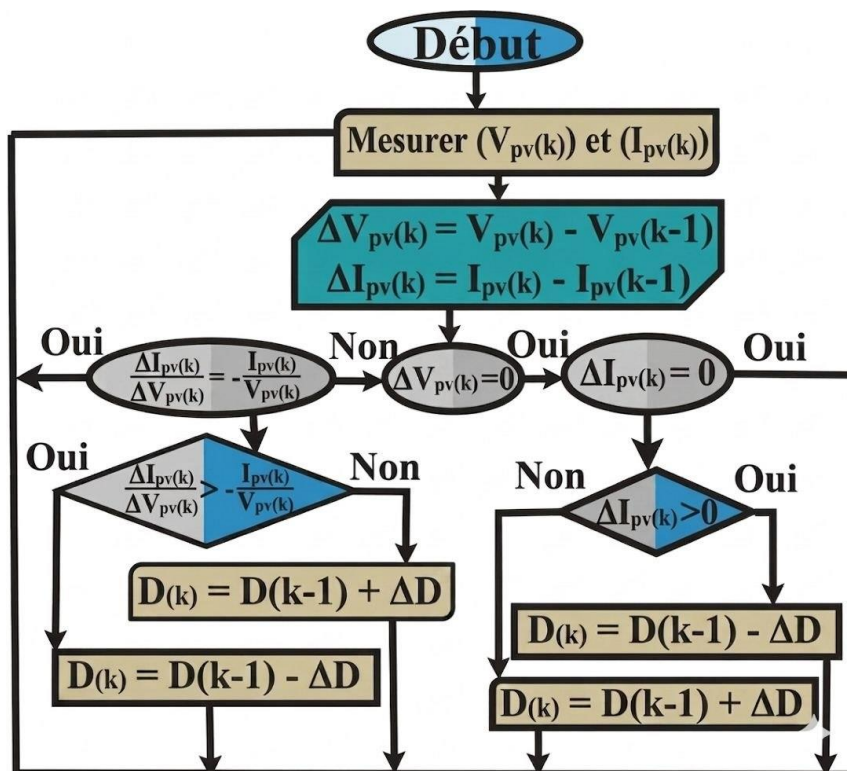


Figure 2.10 Organigramme illustratif du fonctionnement de l'algorithme MPPT de type IncCond [23].

### 2.6.3. MPPT de type logique floue

Le contrôleur MPPT basé sur la logique floue (Fuzzy Logic) constitue une approche intelligente largement adoptée pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques. Il se distingue par sa robustesse face aux incertitudes et aux imprécisions des données d'entrée, tout en ne

nécessitant pas l'élaboration d'un modèle mathématique de haute précision. En outre, cette méthode est particulièrement adaptée au traitement des non-linéarités inhérentes aux systèmes photovoltaïques [25].

La technique MPPT floue étudiée dans ce mémoire de fin d'études repose sur deux variables d'entrée, à savoir l'erreur (E) et sa variation ( $\Delta E$ ), ainsi que sur une variable de sortie correspondant au rapport cyclique ( $\Delta D$ ). Ce dernier est destiné à piloter l'interrupteur de puissance du convertisseur DC/DC, afin d'assurer un transfert maximal de la puissance photovoltaïque vers la charge [20], [25]. L'architecture générale du contrôleur flou, utilisé dans la commande des systèmes, est illustrée à la figure 2.11. La conception de ce genre de contrôleur intelligent repose essentiellement sur trois étapes à savoir : la fuzzification, le mécanisme d'inférence et la défuzzification [9].

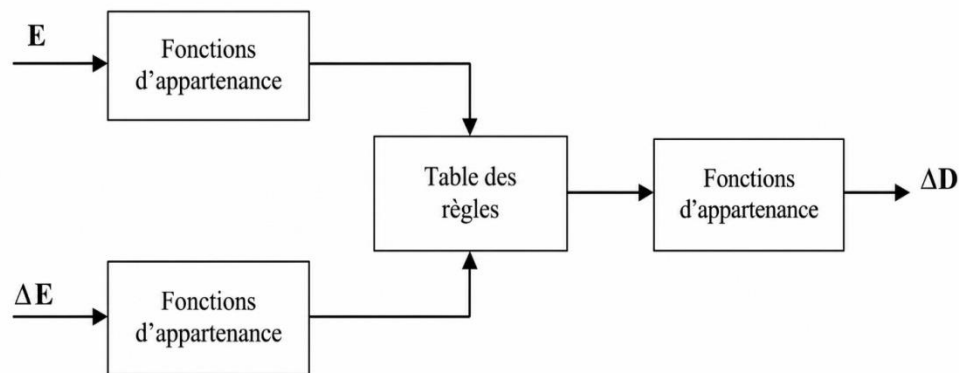


**Figure 2.11** Architecture de base du contrôleur MPPT flou [24].

La fuzzification consiste à transformer les variables d'entrée numériques (E et  $\Delta E$ ) en variables linguistiques à l'aide de fonctions d'appartenance. Les équations des deux entrées (E et  $\Delta E$ ) sont décrites de la manière suivante [9], [26], [27] :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (2.15)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (2.16)$$

Selon la figure 2.12, les deux variables d'entrée (E et  $\Delta E$ ) ainsi que la variable de sortie du MPPT flou sont représentées par cinq fonctions d'appartenance triangulaires chacune, définies comme suit : NG (Négatif Grand), NP (Négatif Petit), Z (Zéro), PP (Positif Petit) et PG (Positif Grand) [20], [28].

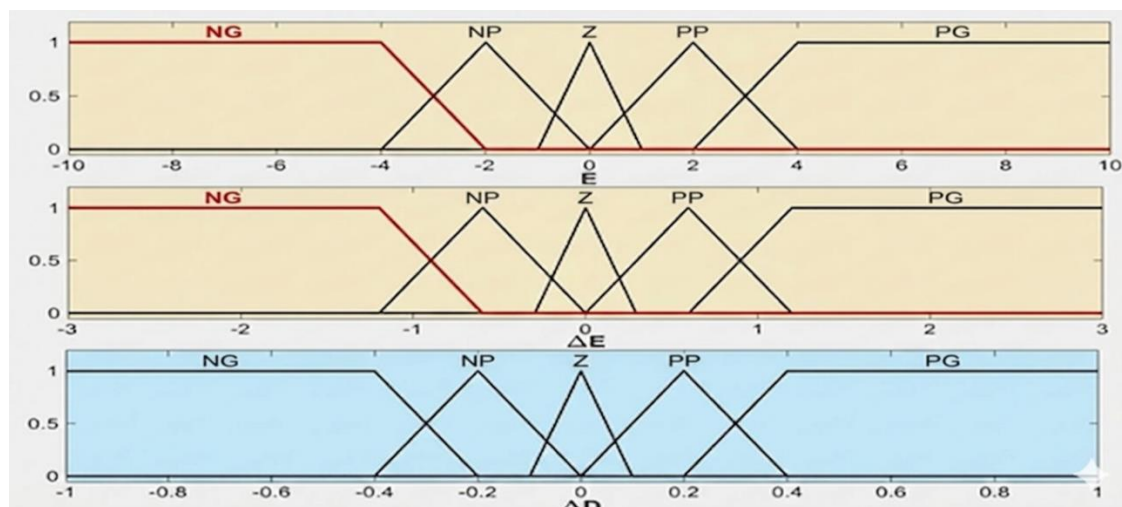


**Figure 2.12** Fonctions d'appartenance des entrées (E et  $\Delta E$ ) et de la sortie  $\Delta D$  [20].

Le mécanisme d'inférence flou est le cœur de la commande floue simulant la pensée floue humaine [9]. En appliquant ce mécanisme aux variables d'entrée, les sorties correspondantes sont déterminées. La valeur de sortie dépend également de la base de règles, représentée sous forme d'un tableau de vérité [9]. Pour notre cas, 25 règles floues sont utilisées pour le développement du MPPT flou [9].

**Tableau 2.2 :** Tableau des règles floue [9].

| $\Delta E$<br>E | NG | NP | Z  | PP | PG |
|-----------------|----|----|----|----|----|
| NG              | Z  | Z  | NG | NG | NG |
| NP              | Z  | Z  | NP | NP | NP |
| Z               | NP | Z  | Z  | Z  | PP |
| PP              | PP | PP | PP | Z  | Z  |
| PG              | PG | PG | PG | Z  | Z  |

Enfin, concernant l'étape de défuzzification, ce processus consiste à transformer l'ensemble flou de sortie en une valeur numérique [9]. Dans notre étude, la méthode du centre de gravité, la plus couramment utilisée, est appliquée à cet effet. L'équation mathématique définissant le rapport cyclique, utilisé pour la commande du hacheur élévateur DC/DC constituant notre dispositif MPPT flou, est donnée par la relation suivante [9], [20] :

$$D(k) = D(k-1) + C \cdot \Delta D \quad (2.17)$$

Où : C représente le gain de correction du rapport cyclique.

## 2.7. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté une étude approfondie de trois méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) utilisées dans les systèmes photovoltaïques, en mettant l'accent sur les stratégies classiques P&O et IncCond, ainsi que sur une approche intelligente basée sur la logique floue. Ces trois méthodes MPPTs ont été appliquées à un système solaire autonome intégrant un hacheur élévateur, dont la modélisation a également été présentée dans ce chapitre. Les trois techniques MPPTs étudiées ont été décrites et discutées en détail. Enfin, le chapitre suivant sera consacré à l'évaluation comparative de ces trois stratégies MPPTs sous MATLAB/Simulink.

***Chapitre 03:***  
***Présentations et discussions des***  
***résultats provenant des***  
***algorithmes MPPTs étudiés***

### 3.1 Introduction

La modélisation et la simulation des systèmes électriques avec MATLAB/Simulink permettent d'étudier, concevoir et d'optimiser le comportement dynamique et permanent des systèmes électriques grâce à des simulations proches des conditions réelles tout en réduisant les coûts et les risques expérimentaux [6],[20]. L'objectif de ce troisième chapitre est d'évaluer, d'analyser et de discuter les performances de trois algorithmes MPPTs fonctionnant sous différentes conditions climatiques et de charges, liées aux variations de la température, de l'irradiation (l'éclairement) et de la charge du système solaire autonome étudié. Les méthodes considérées sont : la méthode perturber & observer (P&O), la méthode de la conductance incrémentale (IncCond) et la méthode de la logique floue. Le logiciel MATLAB/Simulink est utilisé pour réaliser les simulations et analyser les résultats obtenus. Enfin, une étude comparative est présentée afin de mettre en évidence et d'examiner l'efficacité ainsi que la robustesse des différentes méthodes MPPTs traitées dans ce mémoire de fin d'études.

### 3.2 Résultats du panneau solaire

L'évaluation des performances est réalisée à l'aide du panneau photovoltaïque Kyocera Solar KC200GT, soumis à différents scénarios caractérisés par des variations brusques de l'éclairement et de la température. Ces conditions permettent d'analyser la réponse électrique du module photovoltaïque, illustrée par les figures 3.1 et 3.2 présentant l'évolution des caractéristiques I-V et P-V. L'ensemble des paramètres caractérisant le panneau photovoltaïque utilisé dans cette simulation est présenté en Annexe. Cette étape de simulation est essentielle pour mettre en évidence le comportement non linéaire du GPV face aux variations des conditions climatiques.

Sous un éclairement constant de  $1000\text{W/m}^2$  et pour des températures variantes entre de  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $60^\circ\text{C}$ , l'analyse des courbes de la figure 3.1 montre que l'intensité du courant demeure pratiquement stable, avec seulement une légère augmentation. En revanche, la tension ainsi que la puissance maximale diminuent considérablement avec l'élévation de la température, ce qui confirme que ces paramètres sont les plus sensibles aux variations thermiques.

Pour une température constante de  $25^\circ\text{C}$ , l'analyse des simulations réalisées sous différentes valeurs d'irradiation ( $400$ ,  $600$ ,  $700$  et  $1000\text{W/m}^2$ ) montre, à travers les courbes de la figure 3.2, que la tension aux bornes du module photovoltaïque reste pratiquement constante ou ne subit que de faibles

variations. En revanche, le courant généré est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement solaire, ce qui entraîne une variation significative de la puissance maximale extractible.

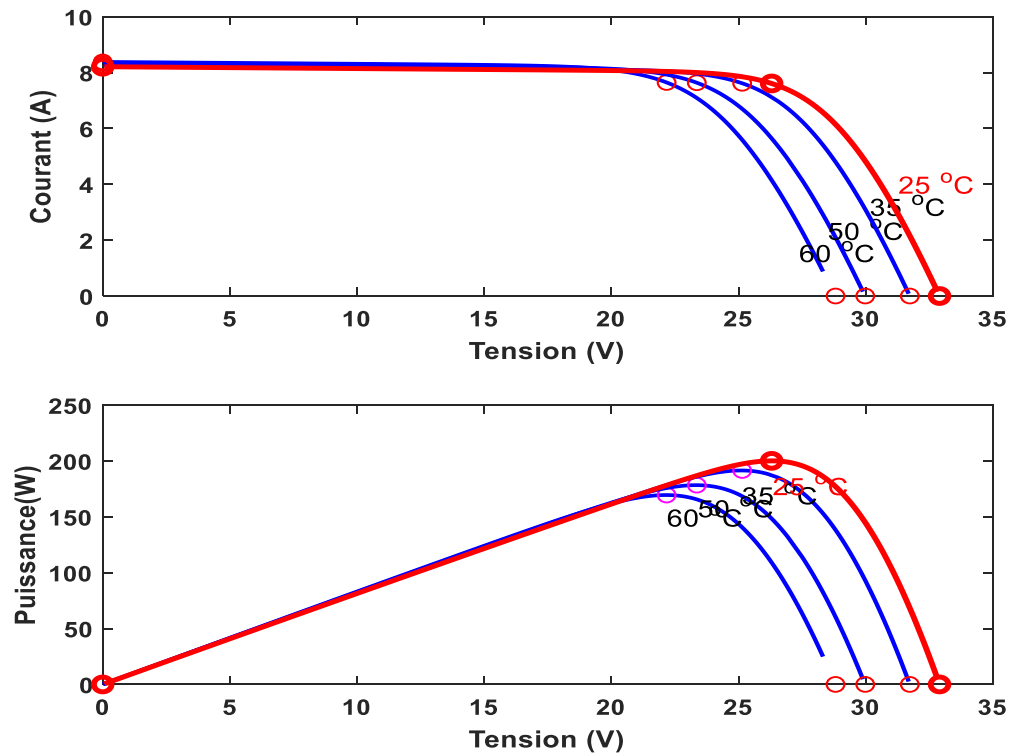


Figure 3.1 Effet de la variation de la température sur les caractéristiques I-V et P-V du GPV.

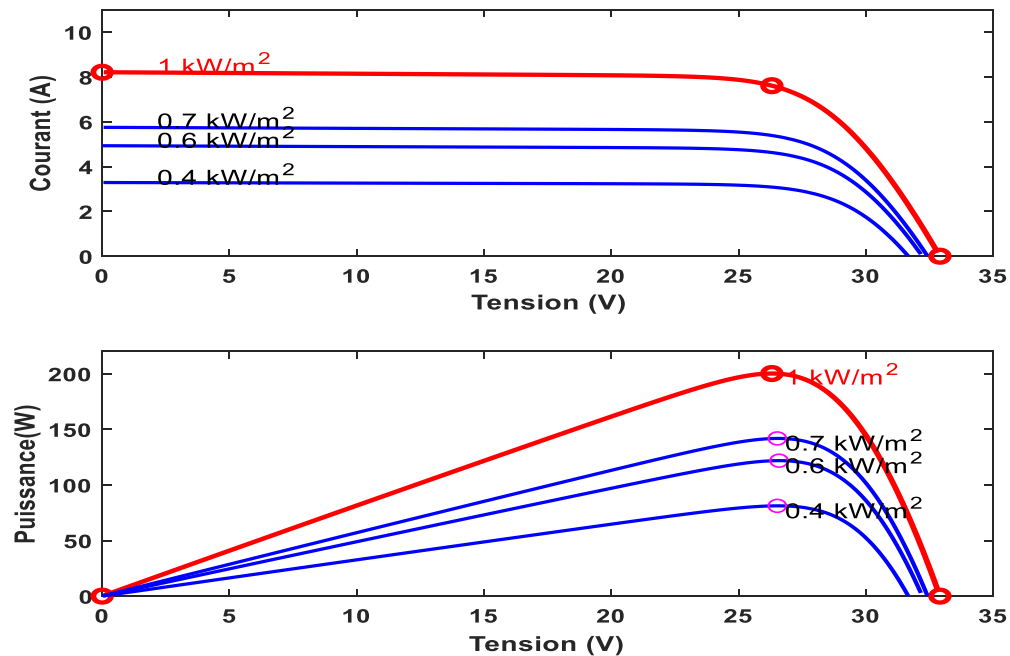


Figure 3.2 Effet de la variation de l'irradiation sur la caractéristique I-V et P-V du GPV.

### 3.3 Résultats de simulations des stratégies MPPTs classiques appliquées (P&O et IncCond)

Dans une première phase, et conformément à la méthodologie adoptée, cette étude évalue les performances de deux algorithmes MPPT sélectionnés : P&O et IncCond, au moyen d'une simulation approfondie sous MATLAB/Simulink, comme le montre les figures 3.3 et 3.4. L'objectif est de comparer leur capacité à maintenir le point de puissance maximale face aux variations des conditions environnementales et de la charge. Les deux algorithmes classiques utilisés permettent d'assurer l'adaptation du rapport cyclique du convertisseur Boost afin de maximiser le transfert de puissance vers la charge. Les résultats obtenus pour ces deux méthodes sont ensuite présentés et analysés.

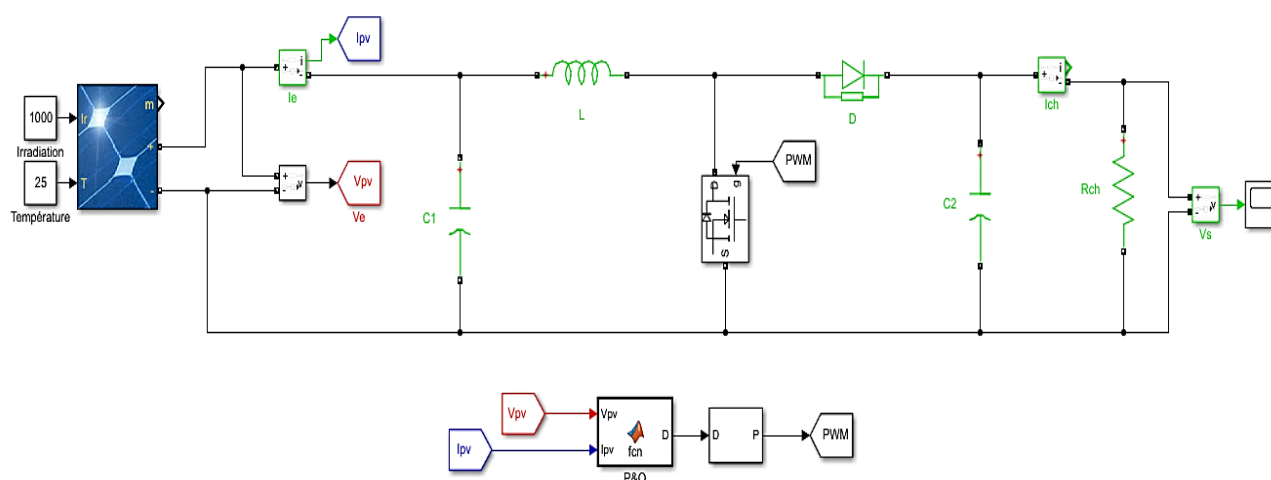


**Figure 3.3** Schéma de simulation du système PV autonome intégrant une commande MPPT basée sur la méthode P&O.

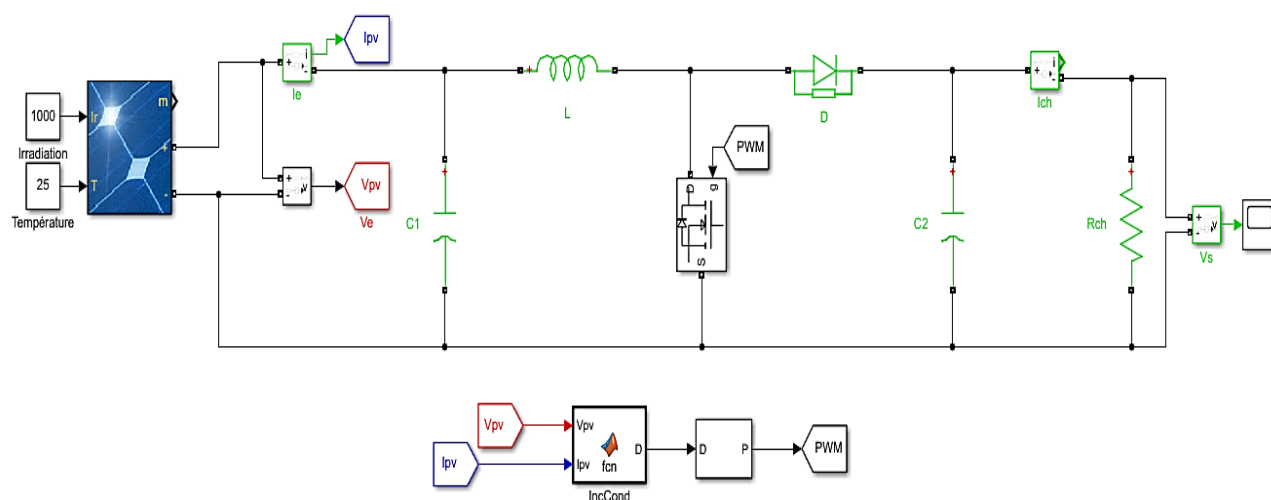


**Figure 3.4** Schéma de simulation du système PV autonome intégrant une commande MPPT basée sur la méthode IncCond.

Dans le premier scénario, l'éclairement est maintenu constant à  $1000 \text{ W/m}^2$  tandis que la température varie par paliers ( $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  et  $60^\circ\text{C}$ ). Le second scénario, basé sur un éclairement variable, évalue le système à température constante de  $25^\circ\text{C}$ , avec des niveaux d'irradiation de 400, 600, 700 et  $1000 \text{ W/m}^2$ . Enfin, une troisième simulation est réalisée afin d'étudier l'impact d'une variation de la résistance de charge, passant de  $40\Omega$  à  $20\Omega$ .

### 3.3.1 Résultats de la stratégie MPPT-P&O

- **Analyse de l'influence de la variation de la température**

Les courbes de simulation présentées aux figures 3.5 et 3.6 mettent en évidence l'influence de la température sur les paramètres du système solaire. En effet, le courant ( $I_{pv}$ ) reste stable malgré les variations thermiques, tandis que la tension ( $V_{pv}$ ) ainsi que la puissance ( $P_{pv}$ ) diminuent progressivement avec l'augmentation de la température, exprimée en degrés Celsius. Cette tendance confirme la sensibilité principalement négative de la tension aux élévations thermiques, entraînant une réduction de la puissance délivrée par le système solaire. D'autre part, la technique MPPT-P&O présente de fortes oscillations au niveau du courant ( $I_{pv}$ ), de la tension ( $V_{pv}$ ) et de la puissance ( $P_{pv}$ ).

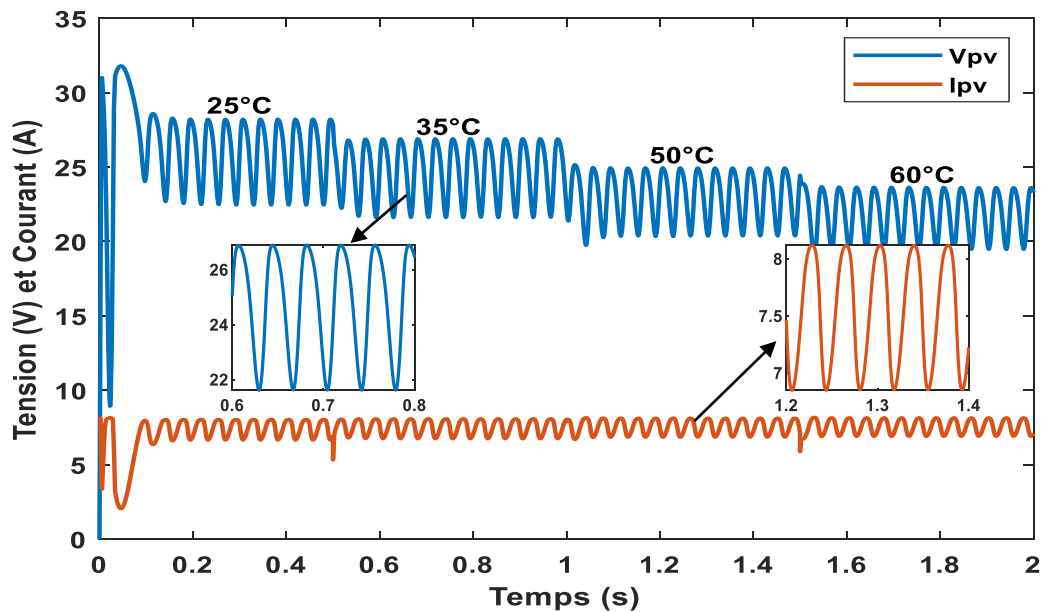


**Figure 3.5** Résultats de la technique MPPT-P&O pour un profil de températures variables : tension et courant photovoltaïques.

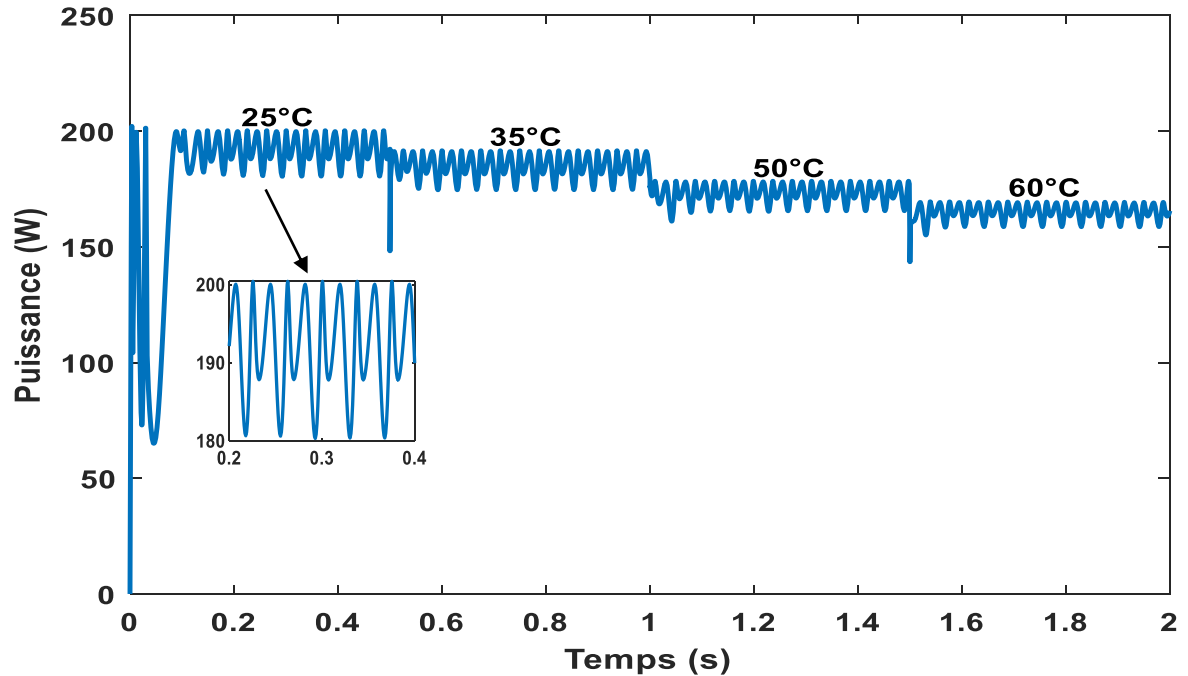


Figure 3.6 Résultat de la technique MPPT-P&O pour un profil de températures variables : puissance photovoltaïque.

- **Analyse de l'influence de la variation d'irradiations**

Sous un rayonnement variable et une température maintenue constante à 25°C, les résultats de simulation mettent en évidence la stabilité de la tension ( $V_{pv}$ ) face aux fluctuations d'irradiations. En revanche, le courant ( $I_{pv}$ ) et la puissance ( $P_{pv}$ ) sont fortement influencés par ces variations : une hausse du rayonnement solaire provoque une augmentation de ces deux grandeurs. En outre, le courant ( $I_{pv}$ ), la tension ( $V_{pv}$ ) et la puissance ( $P_{pv}$ ) sont caractérisés par la présence des oscillations importantes. Ces observations sont illustrées clairement sur les courbes 3.7 et 3.8.

- **Analyse de l'influence de la variation de la charge**

Dans ce scénario, les conditions environnementales sont maintenues constantes (25°C et 1000W/m<sup>2</sup>) afin de tester l'effet d'une variation brusque de la charge, qui passe de 40Ω à 20Ω. Selon la figure 3.9, à l'instant  $t = 1s$ , la courbe de la puissance ( $P_{pv}$ ) présente une perturbation transitoire marquée par un saut brusque, traduisant la rupture de l'équilibre initial du système solaire. Par la suite, le système évolue vers un nouveau régime permanent, caractérisé par une stabilité remarquable.

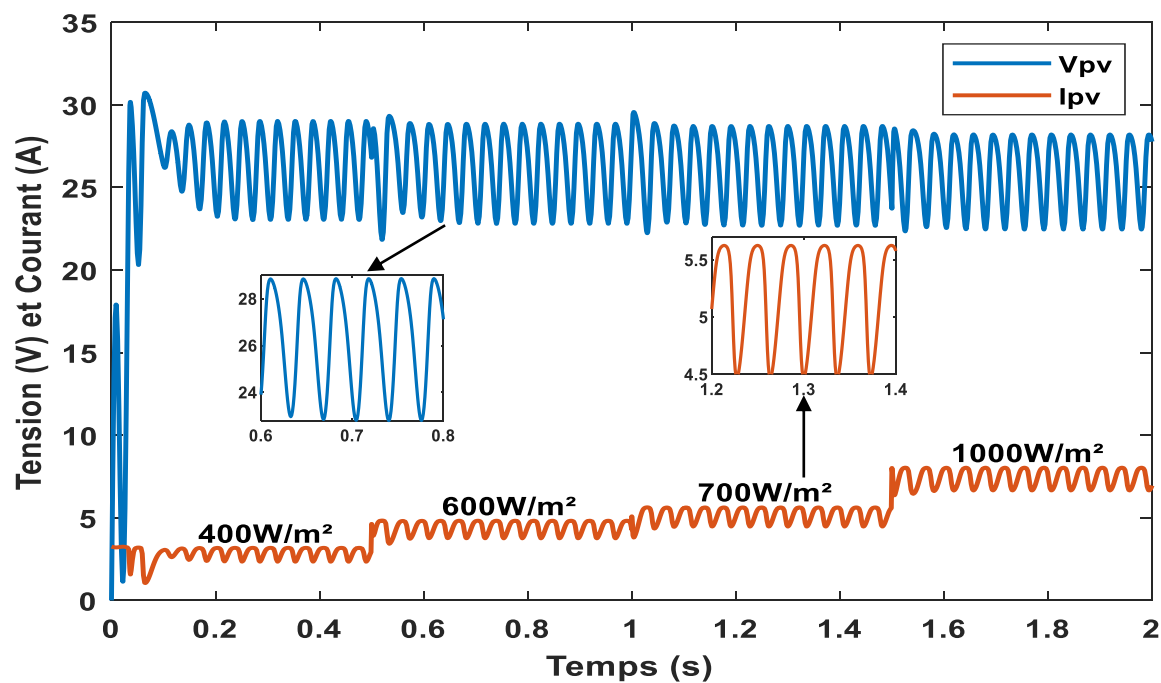


Figure 3.7 Résultats de la technique MPPT-P&O pour un profil d'irradiations variables: tension et courant photovoltaïques.

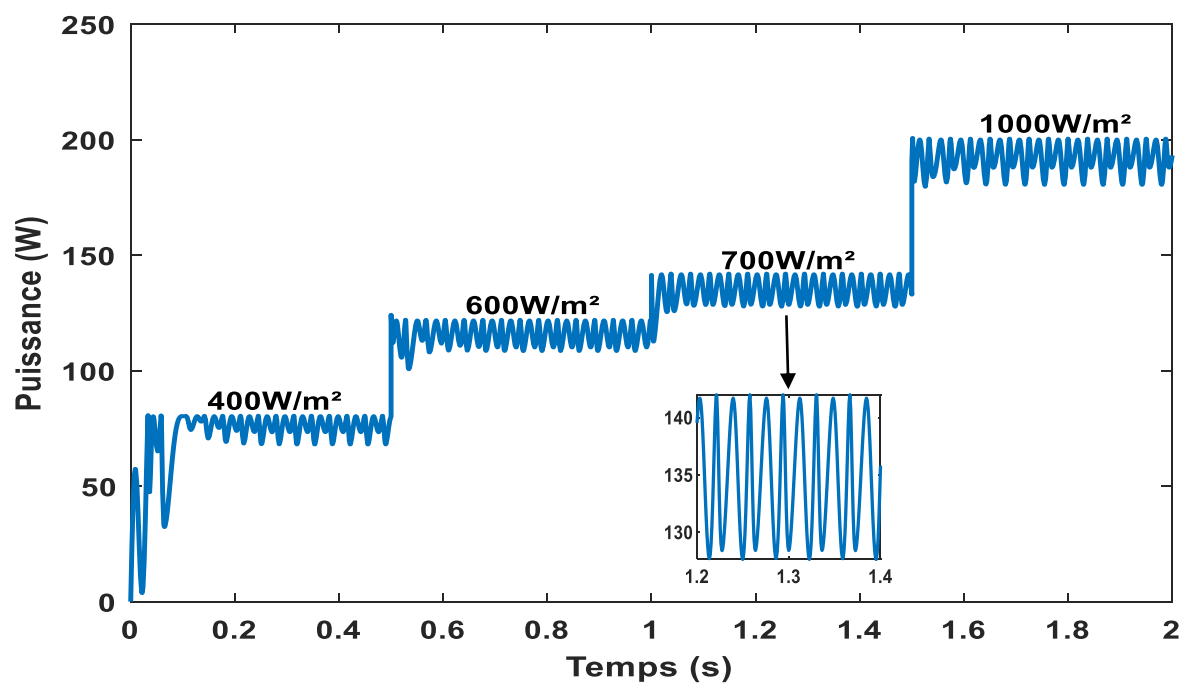


Figure 3.8 Résultat de la technique MPPT-P&O pour un profil d'irradiations variables: puissance photovoltaïque.

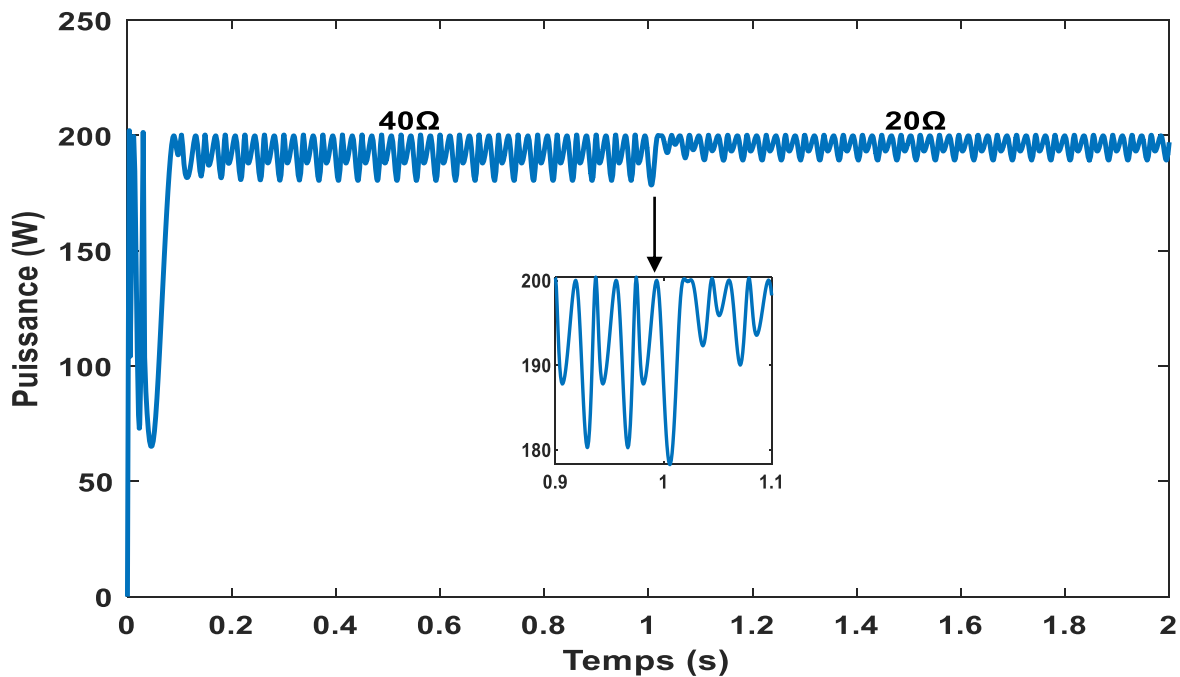


Figure 3.9 Résultat de simulation de la technique MPPT-P&O lors de la variation de la charge.

### 3.3.2 Résultats de la stratégie MPPT-IncCond

- **Analyse de l'influence de la variation de la température**

En appliquant l'algorithme de Conductance Incrémentale dans un scénario de variation de température, les figures 3.10 et 3.11 révèlent un comportement électrique distinct. Le courant ( $I_{pv}$ ) reste invariant, tandis que la tension ( $V_{pv}$ ) et la puissance ( $P_{pv}$ ) diminuent lors de l'augmentation de la température. Cette analyse révèle ainsi une relation inverse entre la tension et la puissance photovoltaïque lors des fluctuations thermiques. Par ailleurs, l'algorithme IncCond montre une meilleure précision de suivi, caractérisée par une réduction significative de l'amplitude des oscillations.

- **Analyse de l'influence de la variation d'irradiations**

L'application de la méthode de la Conductance Incrémentale sous des irradiations variables met en évidence la réactivité du système face aux changements d'ensoleillement. L'analyse des courbes des figures 3.12 et 3.13 montre que le courant ( $I_{pv}$ ) et la puissance ( $P_{pv}$ ) varient en fonction des changements du rayonnement solaire, tandis que la tension ( $V_{pv}$ ) reste pratiquement constante.

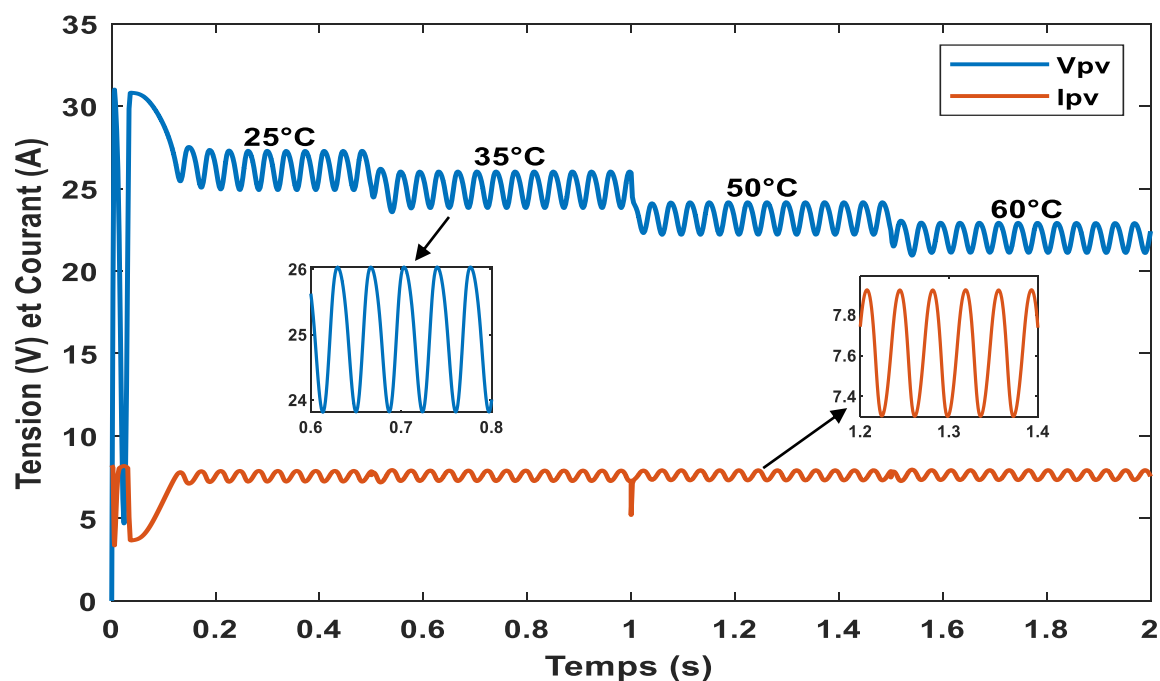


Figure 3.10 Résultats de la technique MPPT-IncCond pour un profil de températures variables: tension et courant photovoltaïques.

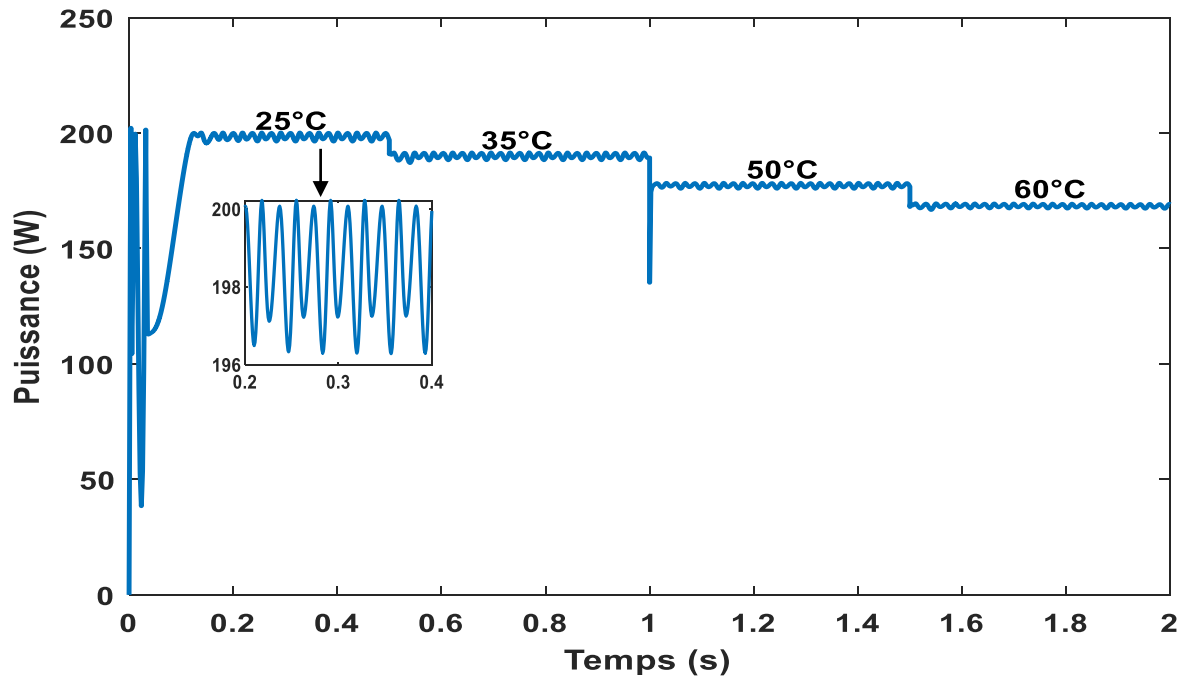


Figure 3.11 Résultat de la technique MPPT-IncCond pour un profil de températures variables: puissance photovoltaïque.

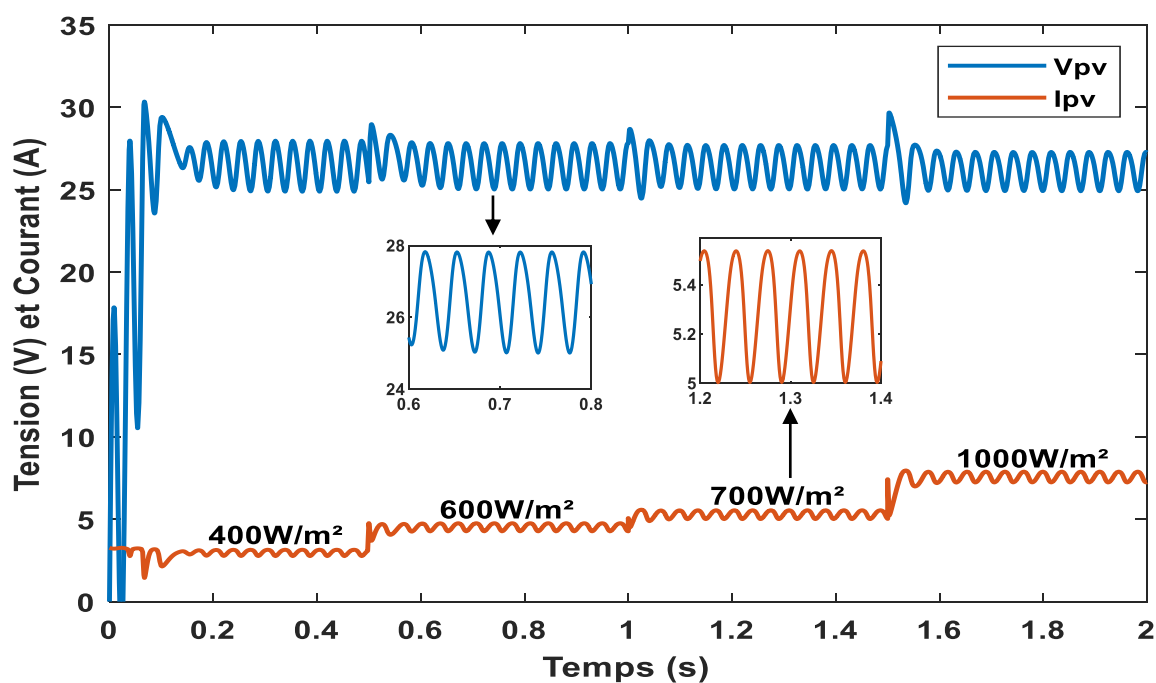


Figure 3.12 Résultats de la technique MPPT-IncCond pour un profil d'irradiations variables: tension et courant photovoltaïques.

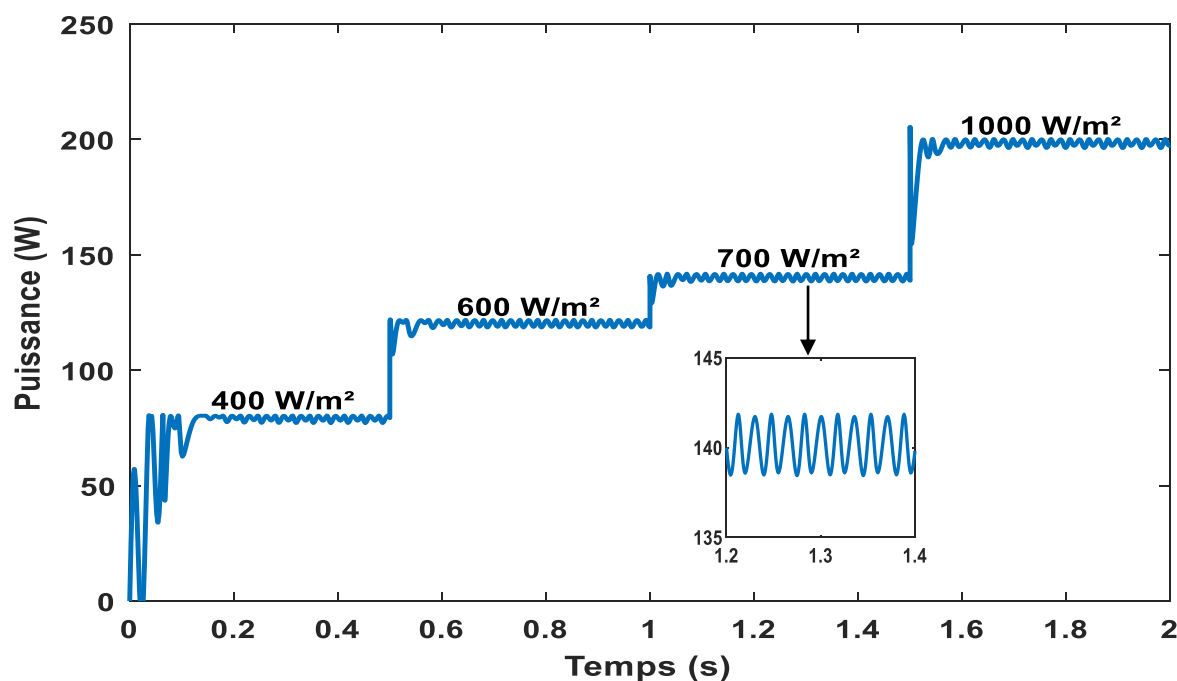


Figure 3.13 Résultat de la technique MPPT-IncCond pour un profil d'irradiations variables: puissance photovoltaïque.

- **Analyse de l'influence de la variation de la charge**

Comme l'illustre la figure 3.14, une variation brusque de la charge, passant de  $40\Omega$  à  $20\Omega$ , est appliquée à l'instant  $t = 1$  s sous des conditions environnementales de  $25^\circ\text{C}$  et d'un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ . Il est remarquable de constater que cette perturbation a été efficacement rejetée dont la puissance photovoltaïque présente une réponse positive et stable face à ce changement de charge.

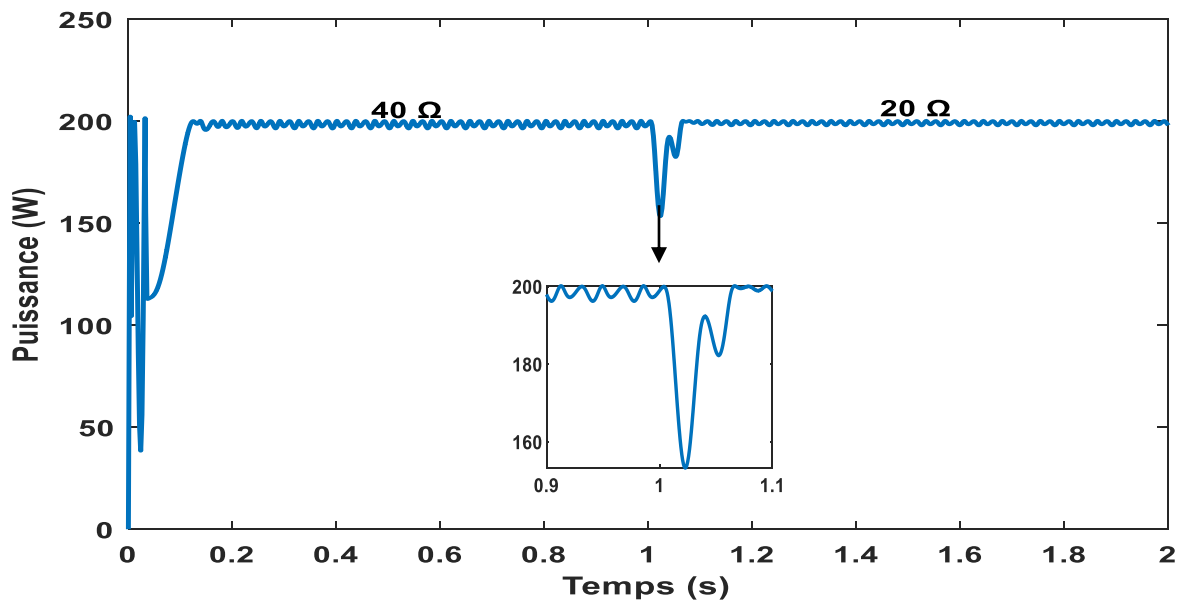


**Figure 3.14** Résultat de simulation de la technique MPPT-IncCond lors de la variation de la charge.

### 3.4 Résultats de la simulation de la stratégie MPPT intelligente (Logique Floue)

Le schéma de simulation sous MATLAB/Simulink du système PV autonome intégrant une commande MPPT basée sur la logique floue est présenté par la figure 3.15. Cette approche intelligente s'est imposée comme une solution performante pour l'optimisation de l'efficacité énergétique, grâce à sa capacité à gérer efficacement les comportements non linéaires des systèmes photovoltaïques [20], [21]. L'intérêt majeur du contrôleur flou réside dans sa robustesse face aux incertitudes de mesure et aux variations des mesures. En effet, il permet une poursuite précise du PPM sans nécessité de la modélisation mathématique du panneau photovoltaïque [9], [16].

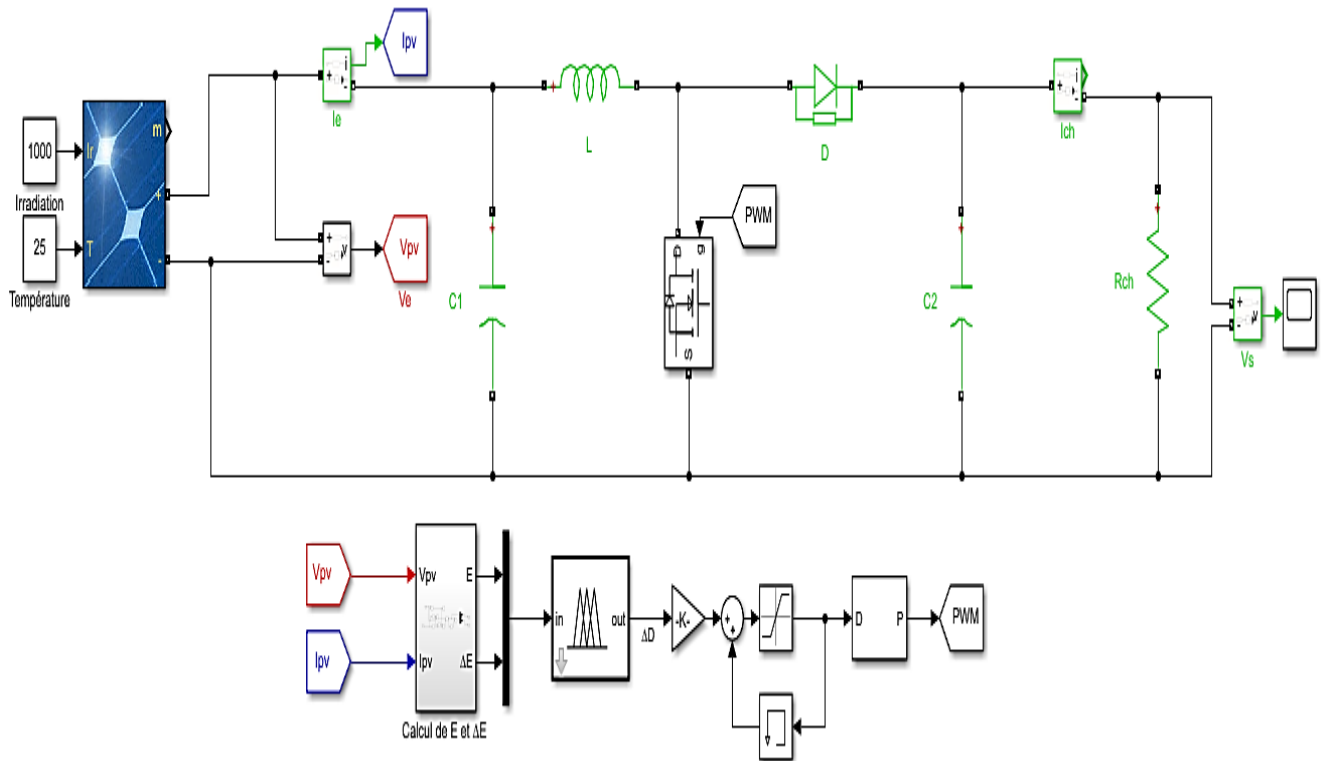


**Figure 3.15** Schéma de simulation du système PV autonome intégrant une commande MPPT basée sur la logique floue.

- **Analyse de l'influence de la variation de la température**

L'application de la commande MPPT par logique floue au scénario de variation thermique, sous un rayonnement stabilisé, met en évidence la supériorité de cette approche en termes de stabilité du signal. Contrairement aux méthodes précédemment étudiées (P&O et IncCond), les résultats illustrés dans les figures 3.16 et 3.17 montrent que les fluctuations et les oscillations autour du PPM ont disparu. Cette amélioration se traduit par un régime permanent plus stable, régulier et performant. L'analyse des courbes confirme que le courant du panneau photovoltaïque ( $I_{pv}$ ) demeure quasiment constant, validant sa faible dépendance aux changements de températures. À l'inverse, on observe une relation inverse entre la température, la tension ( $V_{pv}$ ) et la puissance ( $P_{pv}$ ) : l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension solaire, entraînant ainsi une réduction de la puissance maximale extraite.

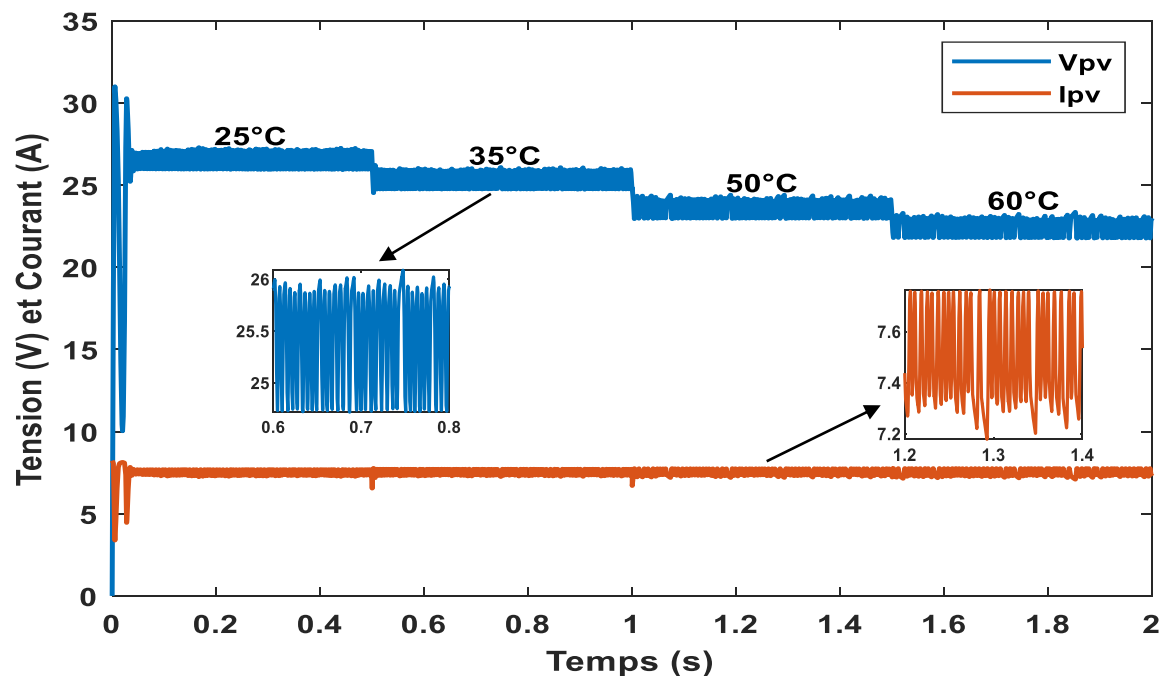


Figure 3.16 Résultats de la technique MPPT-Floue pour un profil de températures variables: tension et courant photovoltaïques.

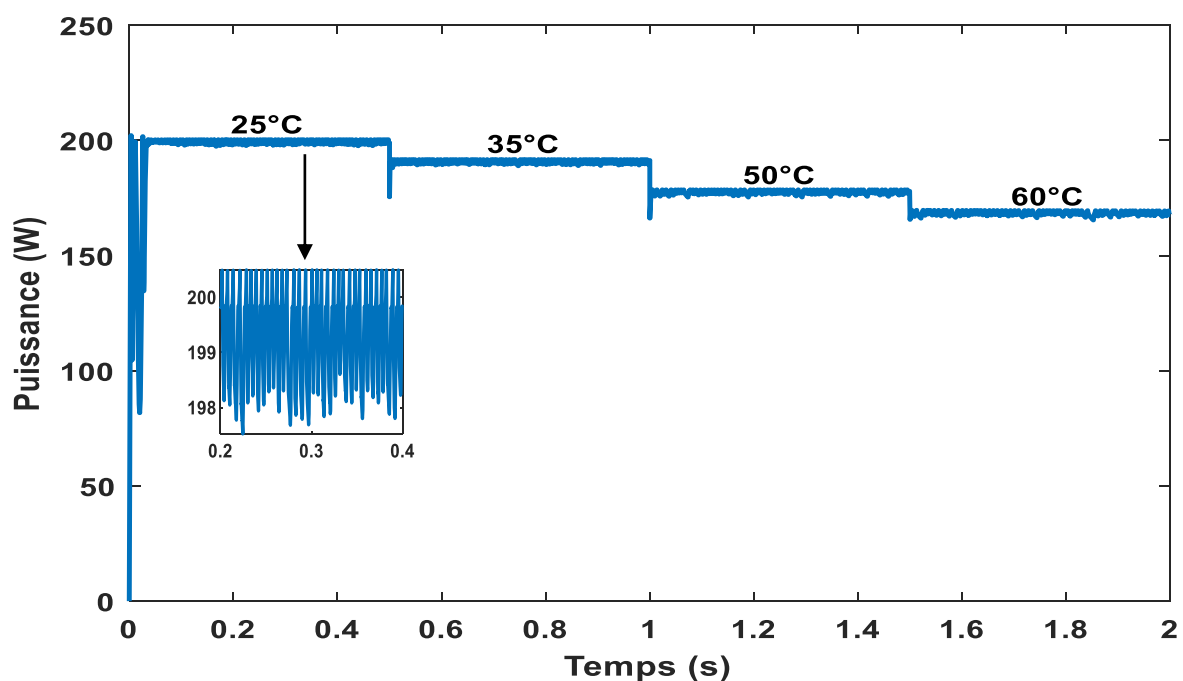


Figure 3.17 Résultat de la technique MPPT-Floue pour un profil de températures variables: puissance photovoltaïque.

- **Analyse de l'influence de la variation d'irradiations**

Sous conditions de température stabilisée à 25°C, les simulations effectuées avec la logique floue révèlent une réponse dynamique très performante face aux variations de l'irradiation. Les figures 3.18 et 3.19 montrent que la tension ( $V_{pv}$ ) demeure stable, alors que le courant ( $I_{pv}$ ) et la puissance ( $P_{pv}$ ) augmentent lors de l'augmentation d'irradiations. L'observation la plus notable réside dans la forte réduction, voire la disparition, des oscillations en régime permanent, ce qui garantit un transfert d'énergie maximal, stable et continu vers la charge.

- **Analyse de l'influence de la variation de la charge**

Dans ce scénario, les conditions environnementales ont été maintenues constantes (25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>), tandis qu'une variation de la résistance de charge a été appliquée, passant de 40Ω à 20Ω. Selon la figure 3.20, la perturbation de charge appliquée à l'instant  $t = 1s$  est rejetée de manière très efficace, comparativement aux autres commandes MPPTs, notamment P&O et IncCond. Les résultats mettent ainsi en évidence la rapidité de réponse et la robustesse de la commande par logique floue face aux variations de charge.

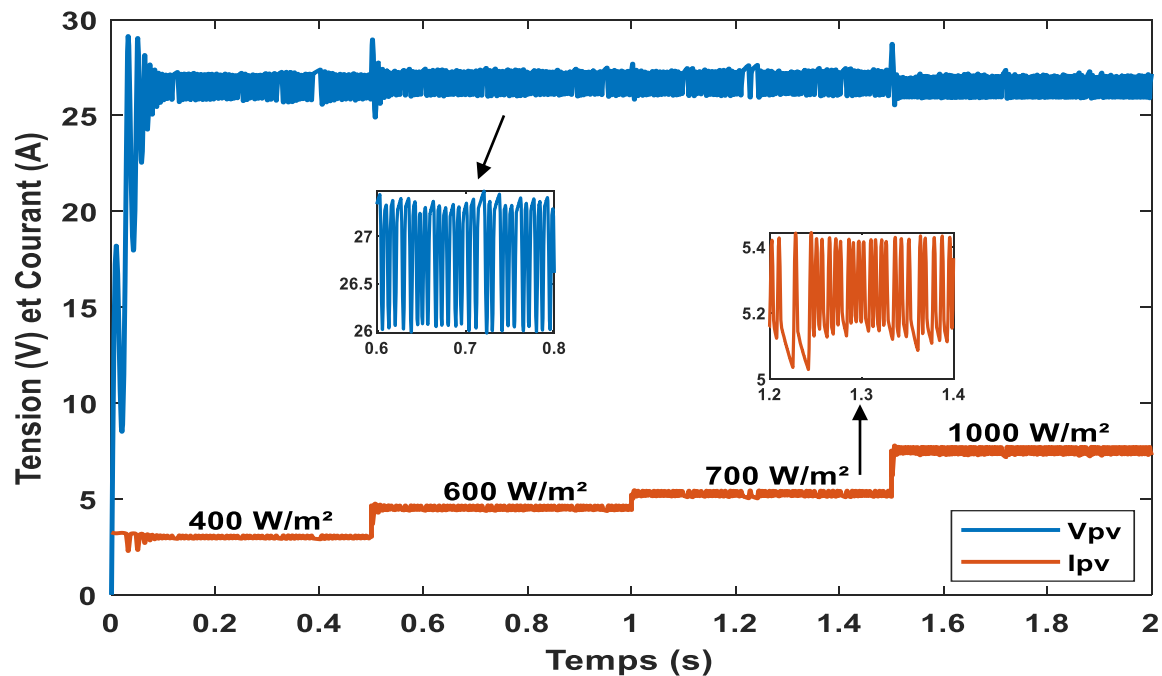


**Figure 3.18** Résultats de la technique MPPT-Floue pour un profil d'irradiations variables: tension et courant photovoltaïques.

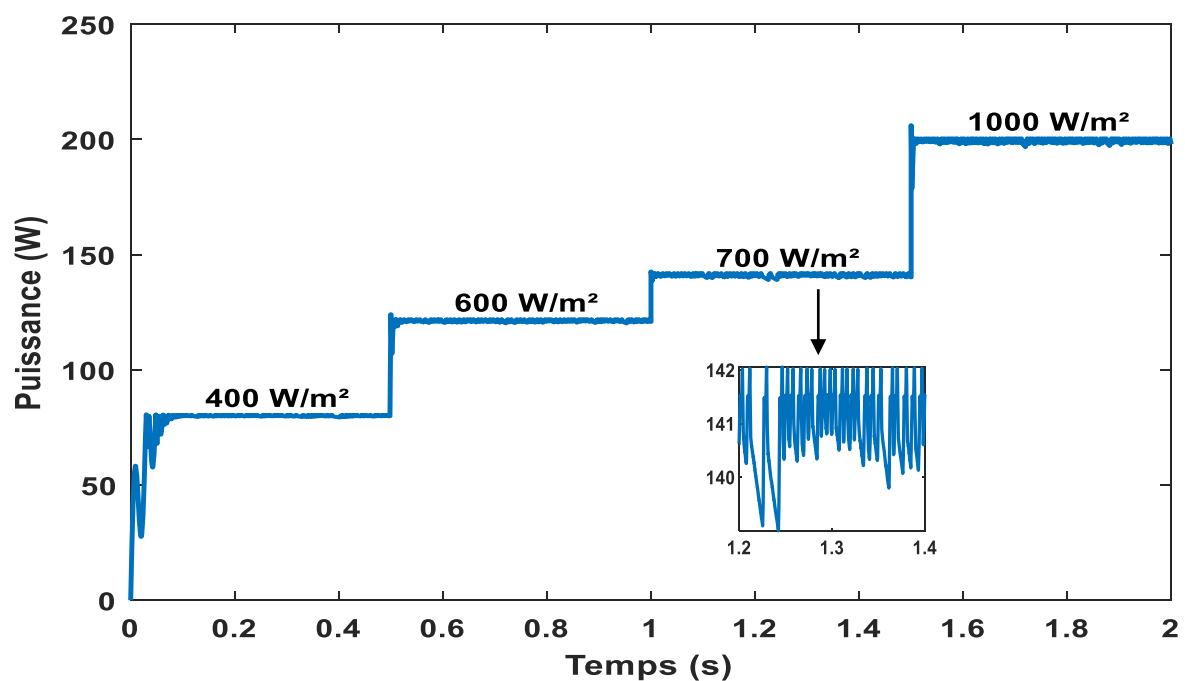


Figure 3.19 Résultat de la technique MPPT-Floue pour un profil d'irradiations variables : puissance photovoltaïque.

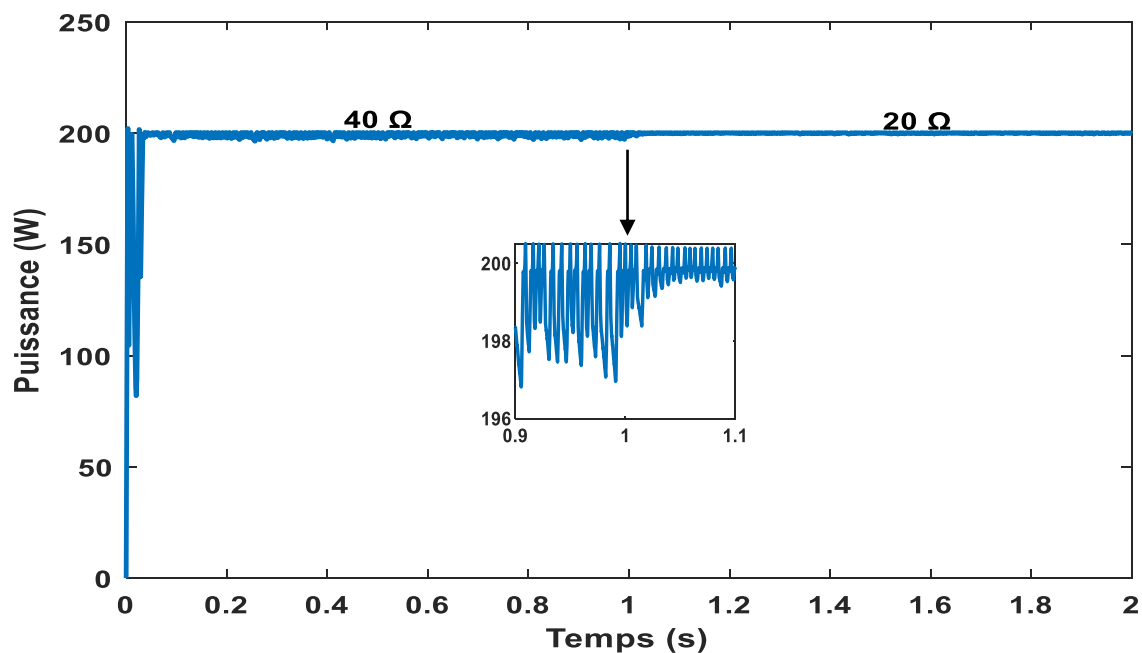


Figure 3.20 Résultat de simulation de la technique MPPT-Floue lors de la variation de la charge.

### 3.5 Etude comparative (résultats et discussions)

Cette section présente une analyse comparative détaillée des performances des trois algorithmes étudiés (P&O, IncCond et logique floue) afin d'identifier la stratégie d'extraction de puissance la plus efficace et la mieux adaptée aux différentes conditions de fonctionnement du système photovoltaïque. Un graphique à barres 3.23, basé sur les résultats de simulations présentés dans les figures 3.21, 3.22 et 3.24, ainsi que des données récapitulées dans le tableau 3.1, sont également utilisés afin de faciliter la comparaison des performances des différentes méthodes. Pour évaluer la supériorité des algorithmes étudiés, deux critères principaux de performance sont retenus : le temps de stabilisation (ou temps de réponse) et l'efficacité ( $\eta$ ) du suivi du PPM, calculée par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{PV}}{P_{Out}} \times 100 \quad (\%) \quad (3.1)$$

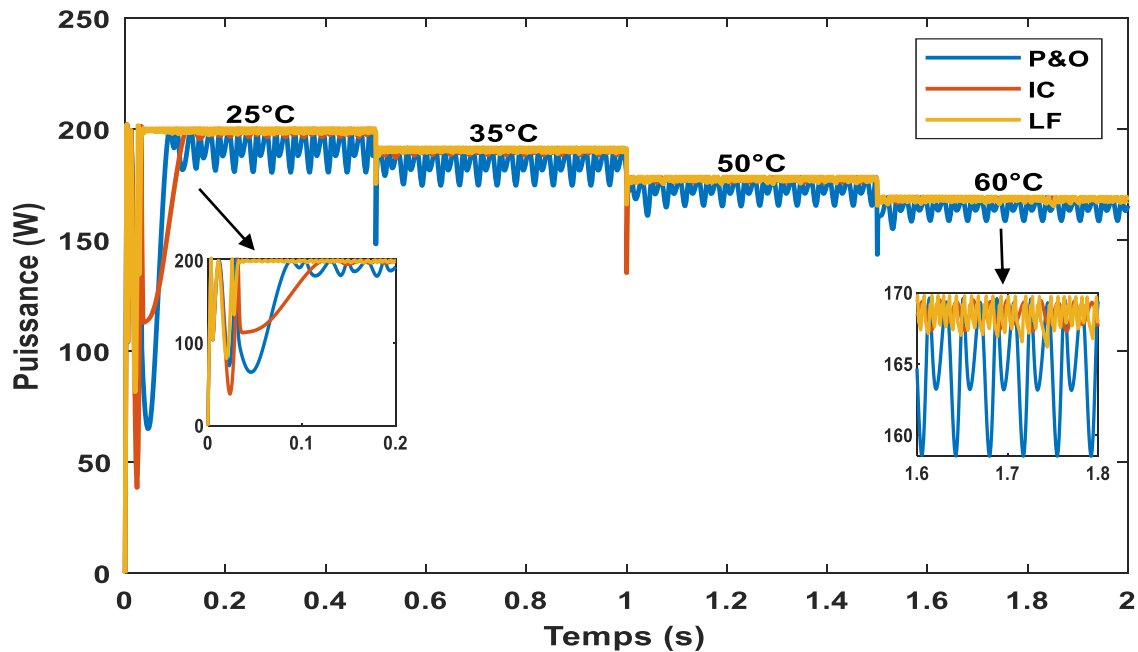


Figure 3.21 Comparaison des techniques MPPTs P&O, IncCond et Floue sous un profil de températures variables.

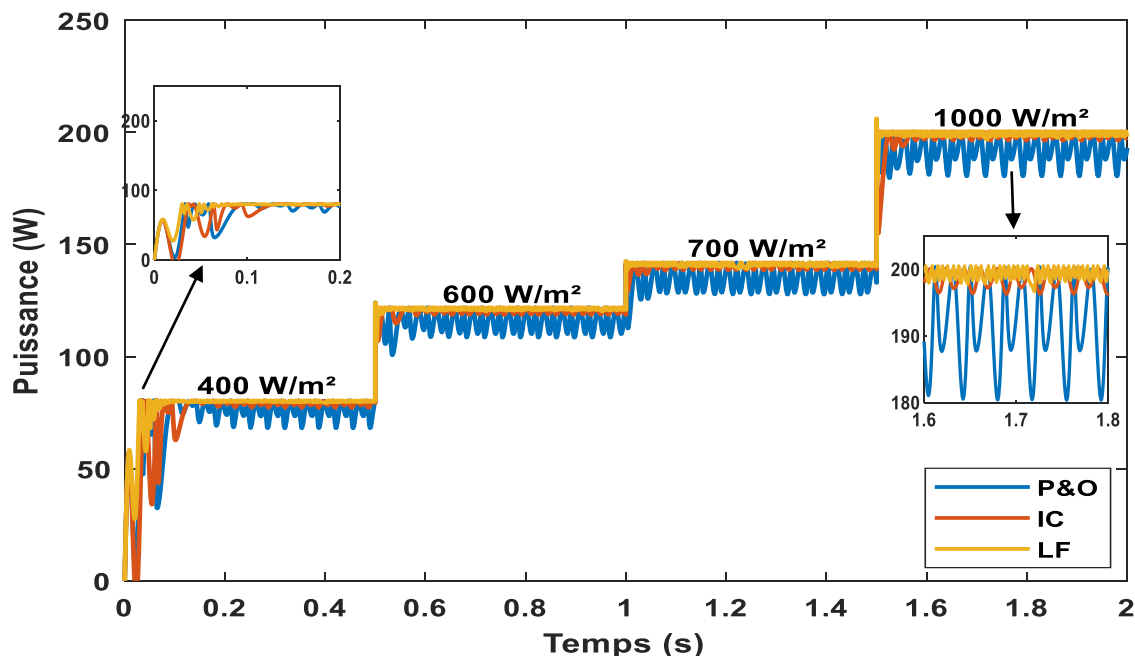


Figure 3.22 Comparaison des techniques MPPTs P&amp;O, IncCond et Floue sous un profil d'irradiations variables.

Tableau 3.1: Etude comparative.

| MPPT appliquée     | 1000 W/m <sup>2</sup> |       |       |       | 25°C                |                     |                     |                      |
|--------------------|-----------------------|-------|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|                    | 25°C                  | 35°C  | 50°C  | 60°C  | 400W/m <sup>2</sup> | 600W/m <sup>2</sup> | 700W/m <sup>2</sup> | 1000W/m <sup>2</sup> |
| P&O (PO)           | 97.3%                 | 96.1% | 94.2% | 98.7% | 92.9%               | 98%                 | 95%                 | 97.3%                |
| IncCond (IC)       | 98.1%                 | 98.8% | 98.6% | 99%   | 97.9%               | 99%                 | 98.8%               | 98.1%                |
| Logique Floue (LF) | 98.5%                 | 99.0% | 99.1% | 99.7% | 98.5%               | 99.2%               | 99.5%               | 98.5%                |

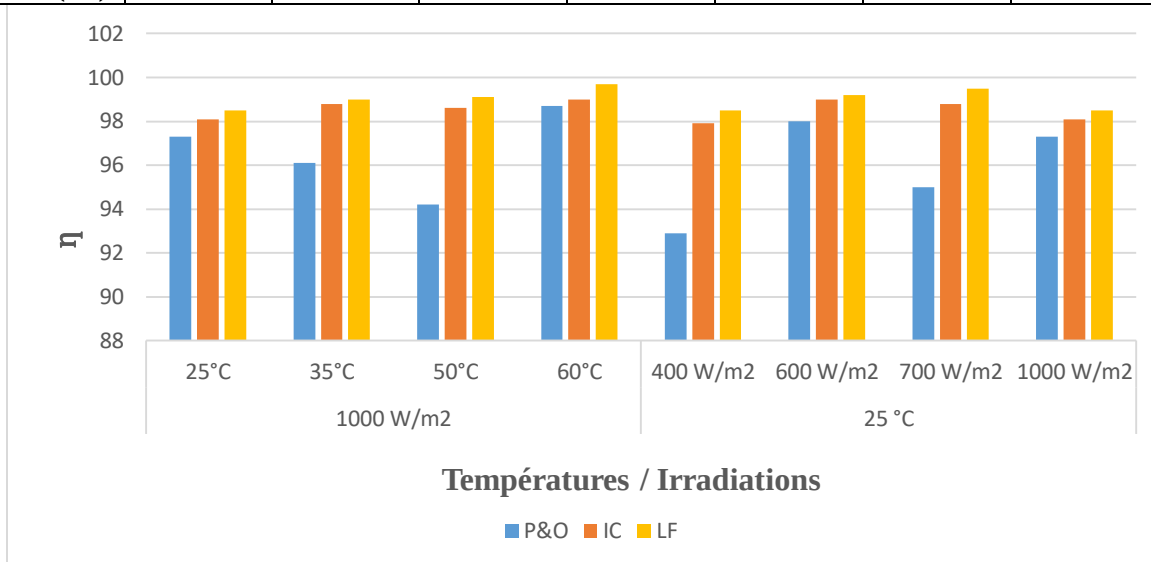


Figure 3.23 Etude comparative des MPPTs P&amp;O, IncCond et Logique Floue.

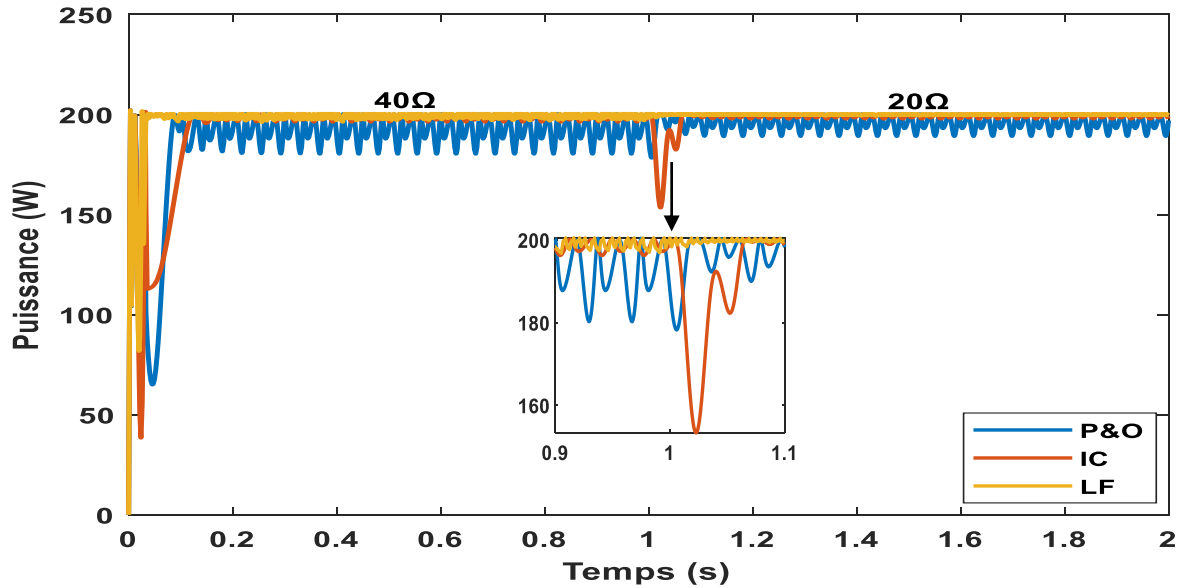


**Figure 3.24** Comparaison des techniques MPPTs P&O, IncCond et Floue lors de la variation de la charge.

L'analyse comparative des résultats de simulation présentés dans les figures 3.21, 3.22 et 3.24 ainsi que le graphique en barres de la figure 3.23, montre clairement la supériorité de la commande MPPT floue par rapport aux approches conventionnelles P&O et IncCond. Les différents tests d'évaluation réalisés montrent que la technique floue atteint rapidement le régime permanent très rapidement, avec un temps de réponse d'environ 0,033 s dans l'ensemble des scénarios étudiés, tout en assurant une stabilité remarquable caractérisée par une quasi-disparition des oscillations autour de la puissance photovoltaïque. En outre, lors de la variation de la charge, la technique MPPT floue confirme également sa grande robustesse grâce à un rejet très rapide et très efficace de la perturbation affectant le système solaire. D'autre part, l'algorithme P&O se distingue par une rapidité de réponse supérieure à celle de la conductance incrémentale, avec un temps de stabilisation de l'ordre de 0,09s contre 0,13s pour la méthode IncCond. Toutefois, cette rapidité s'accompagne d'oscillations permanentes autour du PPM, ce qui réduit la précision du suivi et l'efficacité énergétique globale. À l'inverse, bien que plus lente, la méthode IncCond offre une meilleure précision de suivi grâce à des oscillations plus atténuées, ce qui lui confère une efficacité supérieure à celle du P&O. Néanmoins, ses performances demeurent inférieures à celles de la logique floue, qui combine à la fois une rapidité de convergence élevée, une excellente stabilité et une efficacité optimale du suivi du PPM.

### 3.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de valider et de comparer l'efficacité de trois stratégies de commande MPPTs (P&O, IncCond et logique floue) à travers divers scénarios de simulation sous MATLAB/Simulink, portant sur les variations de températures, d'irradiations et de charges. Les résultats obtenus démontrent clairement que l'approche MPPT basée sur la logique floue surpasse les méthodes conventionnelles P&O et IncCond, en offrant une convergence plus rapide vers le point de puissance maximale (PPM) ; une meilleure stabilité en régime permanent caractérisée par une quasi-absence d'oscillations, ainsi qu'un rejet particulièrement très efficace des perturbations affectant la charge du système solaire. Ces résultats montrent que la commande MPPT par logique floue est la plus performante parmi les méthodes étudiées, confirmant ainsi son efficacité remarquable pour améliorer significativement le rendement global du système photovoltaïque autonome.

# ***Conclusion générale***

## Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'études a permis de mener une étude approfondie du système photovoltaïque autonome, en mettant l'accent sur l'optimisation de son rendement énergétique par le biais de diverses stratégies de poursuite du point de puissance maximale, notamment les approches classiques : P&O et IncCond, ainsi qu'une approche intelligente basée sur la logique floue. La démarche méthodologique adoptée est structurée en trois principaux chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons présenté un aperçu des principales sources d'énergies renouvelables, avec un focus sur l'énergie solaire et son développement mondial. On a ensuite expliqué le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, son processus de conversion ainsi que ses différentes configurations et technologies. La modélisation mathématique de la cellule a également été abordée pour mieux comprendre son comportement électrique, suivie d'une présentation des principaux systèmes photovoltaïques, incluant les systèmes autonomes, raccordés au réseau et hybrides. Enfin, une analyse de leurs avantages et inconvénients a permis d'évaluer leurs performances et leurs limites dans les applications énergétiques actuelles.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié trois méthodes MPPTs, à savoir : P&O, IncCond et la logique floue. Ces approches ont été présentées, modélisées et appliquées au système solaire autonome associé à un hacheur élévateur.

Le troisième chapitre a permis de comparer et de valider les performances de trois stratégies MPPTs (P&O, IncCond et logique floue) à travers plusieurs scénarios de simulation sous MATLAB/Simulink, en tenant compte des variations de températures, d'irradiations et de charges. Les résultats de comparaisons obtenus montrent clairement la supériorité de la méthode MPPT basée sur la logique floue, qui se distingue par une convergence plus rapide vers le point de puissance maximale (PPM), une stabilité accrue en régime permanent avec très peu d'oscillations voire même invisibles, ainsi qu'une meilleure robustesse face aux perturbations. Ces performances confirment l'efficacité de l'approche floue pour améliorer le rendement et assurer une exploitation optimale de l'énergie du système photovoltaïque autonome étudié.

Enfin, afin d'améliorer ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées, notamment :

- ✚ L'implémentation pratique des trois techniques MPPTs étudiées (P&O, IncCond et floue) ;
- ✚ L'application d'autres stratégies MPPTs comme : la logique floue type 2, PSO, ANN, ... etc.

## Références bibliographiques

- [1] A. Mechakou et I. Maaza, “Conception et simulation via le logiciel MATLAB/Simulink d’une technique MPPT avancée destinée à la gestion d’un système solaire,” Mémoire de Master, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, 2025.
- [2] M. Guemmouli, A. Debili et M. Gohmes, “Dimensionnement d’une installation PV pour alimenter une unité industrielle,” Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2022.
- [3] A. Bounour et Y. Bouti, “Etude par simulation d’un système photovoltaïque avec stockage,” Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2021.
- [4] M. C. Achori, “Modélisation d’un panneau solaire photovoltaïque,” Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2021.
- [5] Daniel Suchet et Erik Johnson, “L’énergie solaire photovoltaïque,” Livre, EDP science, 2022.
- [6] M. Bencherif, “Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension,” Thèse de Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [7] “Organic solar cells–The fabulous future of solar!,” <https://ecofriendlylink.com/organic-solar-cells/>, Lien sur internet, visité le: 04/04/2026.
- [8] A. Jelali, “Interconnexion d’un système photovoltaïque sur le réseau électrique,” Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2012.
- [9] M. Ouari et Y. Yakoub, “Étude des commandes MPPT d’un système photovoltaïque,” Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique, Alger, 2020.
- [10] Kadeval, N. Patel, “Mathematical modelling for solar cell, panel and array for photovoltaic system,” Journal of Applied and Natural Science, vol. 13, n°. 3, pp. 937-943, 2021.
- [11] A. Al-Abri, “Mathematical modeling of solar PV panels,” International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 6, n°. 9, pp. 1-6, 2018.
- [12] S. Hammadou, S. Rezzak, et A. E. Boubakir, “Commande linéarisante appliquée aux systèmes PV connecté au réseau,” Mémoire de Master, Université de Jijel, 2020.
- [13] “Photovoltaic,” <https://en.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Photovoltaic>, Lien sur internet, visité le : 28/03/2026.

- [14] A. Belkaid, “Conception et implémentation d’une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome,” Thèse de Doctorat, Université de Sétif 1, 2015.
- [15] A. Bouharchouche, E.m Berkouk, S. Diaf et H. Belmili, “Conception et réalisation d’un logiciel de dimensionnement d’un système d’énergie hybride éolien-photovoltaïque,” *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 17, n°. 3, pp. 359-376, 2014.
- [16] A. Benmeddah et K. Laidi, “Optimisation de l’algorithme MPPT pour un système photovoltaïque en intégrant de nouvelles techniques d’intelligence artificielle ,” *Mémoire de Master*, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2025.
- [17] A. Bouchareb, “Etude et dimensionnement optimale d’un système photovoltaïque autonome,” *Mémoire de Master*, Université de Ghardaïa, 2023.
- [18] F. Hadjrioua, “Systèmes photovoltaïques autonomes, applications et recommandations de conception, *Bulletin des Energies Renouvelables*,” vol. 54, Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), 2024.
- [19] M. N. Mechalikh, et C. E. Hamada, “Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau,” *Mémoire de Master*, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.
- [20] Y. Benotmane, “Commande MPPT à base de la logique floue appliquée à un Système Photovoltaïque”, *Mémoire de Master*, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2020.
- [21] N. Oudjer et B. Djouabi, “Etude et simulation de la commande MPPT basée sur l’approche P&O flou,” *Mémoire de Master*, Université Saad Dahlab, Blida, 2016.
- [22] A. Abbas et al., “Power tracking and performance analysis of hybrid perturb–observe, particle swarm optimization, and fuzzy logic-based improved MPPT control for standalone PV system,” *Technologies*, vol. 13, n°. 3, p. 112, 2025.
- [23] M. Boutaybi, Y. Khlifi and M. L. Elhafyani, “Performance comparison of classical and fuzzy logic MPPT techniques under sudden irradiation variations and their hardware implementation,” *Diagnostyka*, vol. 26, n°. 3, p. 2025312, 2025.
- [24] F. Çakmak, Z. Aydoğmuş and M. R. Tür, “Analyses of PO-based fuzzy logic-controlled MPPT and incremental conductance MPPT algorithms in PV systems,” *Energies*, vol. 18, n°. 2, p. 233, 2025.
- [25] K. Ullah et al., “Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for

- photovoltaic power generation system,” *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101466, 2023.
- [26] H. Karimi, A. Siadatan and A. Rezaei-Zare, “A hybrid P&O-fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) algorithm for photovoltaic systems under partial shading conditions,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 86046-86056, 2025.
- [27] R. K Rai and O. P. Rahi, “Fuzzy logic based control technique using MPPT for solar PV system,” *First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, Trichy, India, pp. 1-5, 2022.
- [28] A. M. O. Anwer, F. A. Omar and A. A. Kulaksiz, “Design of a fuzzy logic-based MPPT controller for a PV system employing sensorless control of MRAS-based PMSM,” *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 18, pp. 2788-2797, 2020.

## Annexe A

Tableau A.1 : Paramètres caractérisant le système solaire étudié.

| Paramètres et indices                  | Valeurs et unités            |
|----------------------------------------|------------------------------|
| Puissance maximale ( $P_m$ )           | 200.143 W                    |
| Tension au PPM ( $V_{mp}$ )            | 26.3 V                       |
| Courant au PPM ( $I_{mp}$ )            | 7.61 A                       |
| Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) | 32.9 V                       |
| Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )  | 8.21 A                       |
| Résistance série ( $R_s$ )             | 0.34483 $\Omega$             |
| Résistance shunt ( $R_{sh}$ )          | 150.6921 $\Omega$            |
| Nombre de cellules en série ( $n_s$ )  | 54                           |
| Température nominale ( $T_{ref}$ )     | 298 (K)                      |
| Constante de Boltzmann (K)             | $1.38 \times 10^{-23}$ (J/K) |
| Charge de l'électron (q)               | $1.6 \times 10^{-19}$ (C)    |
| Inductance (L)                         | 30 mH                        |
| Condensateur de l'entrée (C1)          | $1000 \times 10^{-6}$ F      |
| Condensateur de la sortie (C2)         | $1500 \times 10^{-6}$ F      |
| Résistance de charges ( $R_{ch}$ )     | 40 $\Omega$ et 20 $\Omega$   |