

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة أكلي محمد أولحاج

- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

---

## Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

Harmoune Souhila

et

Arab Kahina

## Thème

---

# Contrôle MPPT intelligent d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Soutenu le : 06/07/2022

Devant la commission composée de :

|       |           |       |              |              |
|-------|-----------|-------|--------------|--------------|
| Mr :  | K.Saoudi  | M.C.A | Univ. Bouira | Président    |
| Mr :  | Y.Touafek | M.A.A | Univ. Bouira | Rapporteur   |
| Mme : | H.Smail   | M.C.B | Univ. Bouira | Examinatrice |

---

Année Universitaire : 2021-2022

## **Remerciements**

Nous remercions avant tout, ALLAH de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier tous les membres de nos familles pour leur soutien moral et leur encouragement durant toutes ces années.

Nous tenons à remercier notre encadreur, Dr : TOUAFEK YAAKOUB, pour son soutien et collaboration à travers ses précieux conseils.

Nous tenons à remercier, les membres du jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous tenons à remercier enfin nos collègues pour leur aide et leur solidarité.

## **Dédicace**

*Je dédie ce travail :*

*A mon cher père que Dieu ait leur âme,*

*A ma mère,*

*A Mes sœurs et frère,*

*A mes amis et collègue,*

*A tous ceux qui me sont chers.*

***Kahina***

**Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*La mémoire de mes très chers parents*

*Mes frères et mes sœurs qui m'ont toujours soutenue*

*Mes beaux frères et belles sœurs*

*Mes neveux et mes nièces*

*Mes ami(e)s et tous ceux que j'aime*

*Mes collègues*

*Souhila*

### Résumé

La puissance produite par un module photovoltaïque est influencée par plusieurs facteurs entre autres l'intensité de l'irradiation solaire, la température des cellules mais aussi et surtout par la charge. Aussi afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie renouvelable il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale de la source d'entrée et ce à l'aide des commandes MPPT.

Et c'est précisément l'objectif de notre travail, qui consiste à faire une étude et une analyse de comparaison entre deux commandes MPPT ; la commande classique P&O et la commande par logique floue.

Les résultats de notre simulation ont montré que les performances de la commande floue ont été meilleures que celles de la commande P&O.

**Mots clés :** Convertisseur DC-DC, MPPT, Photovoltaïque, Poursuite, commande floue, systèmes.

### Abstract

The power produced by a photovoltaic module is influenced by several factors, including the intensity of solar irradiation, the temperature of cells, and especially the load. Also in order to maximize the performance of renewable energy systems it is necessary to track the maximum power point of the input source using the MPPT commands.

And this is precisely the aim of our work, which is to make a study and a comparison analysis between two MPPT methods; the classical P&O method and the fuzzy logic one.

Our simulation results showed that the performance of the fuzzy logic based command was better than the classical P&O one.

**Keywords:** DC-DC converter, MPPT, Photovoltaic, Tracking, fuzzy controller, systems.

### ملخص

تتأثر الطاقة التي تنتجها الوحدة الكهروضوئية بعدة عوامل من بينها شدة الإشعاع الشمسي، درجة حرارة الخلايا، وخاصة الحمولة. من أجل تعظيم أداء أنظمة الطاقة المتجددة، من الضروري تتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة لمصدر الإدخال باستخدام عناصر التحكم MPPT.

وهذا هو بالضبط هدف عملنا وهو إجراء دراسة وتحليل مقارنة بين ضابطي MPPT؛ التحكم الكلاسيكي P&O والتحكم المنطقي الضبابي.

أظهرت نتائج محاكتنا أن أداء التحكم الضبابي كانت أفضل من عنصر التحكم P&O.

## **Résumé**

---

**الكلمات الرئيسية:** محول DC-DC ، MPPT ، الخلايا الكهروضوئية ، التتبع ، وحدة التحكم الغامضة ، الأنظمة

## Sommaire

|  |    |
|--|----|
| Introduction générale .....  | 1  |
| I. Chapitre I .....  | 2  |
| I.1 Introduction .....   | 2  |
| I.2 L'énergie solaire .....  | 2  |
| I.3 La conversion photovoltaïque .....   | 7  |
| I.3.1 La cellule photovoltaïque .....  | 7  |
| I.3.1.1 Différents types de filières technologiques des cellules photovoltaïques.... | 7  |
| I.3.1.1.1 La filière silicium.....   | 7  |
| I.3.1.1.2 La filière couches minces .....  | 8  |
| I.3.1.1.3 La filière des cellules organiques .....                                   | 10 |
| I.3.1.1.4 La filière des pérovskites.....  | 11 |
| I.3.1.2 Structure de la cellule photovoltaïque.....                                  | 11 |
| I.3.1.3 Dopage des semi-conducteurs.....   | 12 |
| I.3.1.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....                | 13 |
| I.3.1.5 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque .....                          | 13 |
| I.3.1.5.1 Caractéristique $I = f(V)$ .....   | 13 |
| I.3.1.5.2 Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque .....                      | 15 |
| I.3.1.5.3 Puissance optimale et rendement.....                                       | 16 |
| I.3.1.5.4 Influence de l'éclairement sur la cellule photovoltaïque.....              | 17 |
| I.3.1.5.5 Influence de la température sur la cellule photovoltaïque.....             | 18 |
| I.3.1.5.6 Influence de la résistance série sur la cellule photovoltaïque.....        | 19 |
| I.3.1.5.7 Influence de la résistance shunt sur la cellule photovoltaïque.....        | 19 |
| I.3.1.6 Le groupement de cellules .....  | 20 |
| I.3.1.6.1 Le groupement de cellules en série.....                                    | 20 |
| I.3.1.6.2 Le groupement de cellules en parallèle .....                               | 21 |
| I.3.1.6.3 Le groupement hybride de cellules photovoltaïques : .....                  | 22 |
| I.3.2 Le module photovoltaïque .....   | 23 |
| I.3.3 Le panneau photovoltaïque.....   | 23 |
| I.3.4 Le champ photovoltaïque .....  | 23 |
| I.3.5 Les systèmes photovoltaïques .....   | 23 |
| I.3.5.1 Systèmes autonomes « au fil du soleil ».....                                 | 24 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| I.3.5.1.2   | Systèmes autonomes avec stockage .....  | 25 |
| I.3.5.1.3   | Systèmes autonomes hybrides .....   | 26 |
| I.3.5.1.4   | Systèmes raccordés au réseau .....  | 26 |
| I.4         | Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque.....                 | 27 |
| I.5         | Conclusion : .....  | 29 |
| II.         | Chapitre II .....   | 32 |
| II.1        | Introduction .....  | 32 |
| II.2        | Les hacheurs .....  | 32 |
| II.2.1      | Convertisseur Cuk .....   | 33 |
| II.2.2      | Convertisseur abaisseur (Buck) : .....  | 34 |
| II.2.3      | Convertisseur élévateur (Boost) .....   | 36 |
| II.2.4      | Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost) .....                                  | 37 |
| II.3        | La commande MPPT .....  | 39 |
| II.3.1      | Les Algorithmes MPPT .....  | 39 |
| II.3.1.1    | Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) .....                            | 39 |
| II.3.1.2    | Conductance Incrémentale (Inc Cond, Incremental Conductance).....                       | 41 |
| II.3.1.3    | Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension <b>V<sub>oc</sub></b> ..... | 43 |
| II.3.1.4    | Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant <b>I<sub>cc</sub></b> .....    | 43 |
| II.3.1.5    | Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels .....                            | 44 |
| II.3.1.6    | La Commande MPPT Floue.....   | 45 |
| II.3.1.6.1  | Structure d'une commande floue .....  | 46 |
| II.3.1.6.2  | Avantages et désavantages du réglage par logique floue .....                            | 51 |
| II.4        | Conclusion .....  | 52 |
| III.        | Chapitre III.....   | 56 |
| III.1       | Introduction .....  | 56 |
| III.2       | Modélisation des composants du système photovoltaïque .....                             | 56 |
| III.2.1     | Modélisation du générateur photovoltaïque .....   | 56 |
| III.2.1.1   | Cas idéal : .....   | 56 |
| III.2.1.2   | Cas réel : .....  | 57 |
| III.2.1.2.1 | Le modèle à une seule diode : .....   | 57 |
| III.2.1.2.2 | Le modèle à deux diodes.....  | 59 |
| III.2.2     | Modélisation du convertisseur Boost .....   | 61 |
| III.2.3     | Modélisation de la commande MPPT basée sur l'algorithme P&O.....                        | 62 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| III.2.4   | Modélisation de la commande MPPT basée sur la logique floue.....                            | 63 |
| III.2.4.1 | Les fonctions d'appartenance.....   | 63 |
| III.2.4.2 | Les règles d'inférence : .....  | 64 |
| III.3     | Simulation et discussion des résultats .....  | 57 |
| III.3.1   | Changement d'éclairement .....  | 57 |
| III.3.1.1 | Pour une irradiation de $800 \text{ W/m}^2$ et une température de $25^\circ\text{C}$ .....  | 57 |
| III.3.1.2 | Pour une irradiation de $900 \text{ W/m}^2$ et une température de $25^\circ\text{C}$ .....  | 60 |
| III.3.1.3 | Pour une irradiation de $1000 \text{ W/m}^2$ et une température de $25^\circ\text{C}$ ..... | 62 |
| III.3.2   | Changement de température .....   | 66 |
| III.3.2.1 | Pour une température de $0^\circ\text{C}$ et une irradiation de $1000 \text{ W/m}^2$ .....  | 66 |
| III.3.2.2 | Pour une température de $10^\circ\text{C}$ et une irradiation de $1000 \text{ W/m}^2$ ..... | 69 |
| III.3.2.3 | Pour une température de $55^\circ\text{C}$ et une irradiation de $1000 \text{ W/m}^2$ ..... | 71 |
| III.4     | Conclusion.....   | 74 |
|           | Conclusion générale.....  | 77 |

## Liste des figures

- Figure I.1.** Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord
- Figure I.2.** Définition de l'Air Mass
- Figure I.3.** Composantes du rayonnement solaire au sol
- Figure I.4.** Répartition spectrale du rayonnement solaire : Hors atmosphère (AM0)  
À l'incidence  $41.8^\circ$  (AM1.5).
- Figure I.5.** Cellules du silicium monocristallin et multicristallin
- Figure I.6.** Cellule du silicium amorphe en couche mince
- Figures I.7.** Cellule au tellure de Cadmium en couche mince
- Figure I.8.** Cellule CIS en couche mince
- Figure I.9.** Cellule CIGS en couche mince
- Figure I.10.** Exemple d'application des cellules photovoltaïques organiques (Konarka Technologies)
- Figure I.11.** Structure d'un cristal de pérovskite générique  $ABX_3$
- Figure I.12.** Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.
- Figure I.13.** a) Silicium pur (intrinsèque), b) Silicium de type n, c) Silicium de type p
- Figure I.14.** Courbe caractéristique  $I = f(v)$
- Figure I.15.** Schéma équivalent d'une photodiode . Générateur à tension constante (courbe a); Générateur à courant constant (courbe b)
- Figure I.16.** Schéma équivalent d'une photopile en fonctionnement.
- Figure I.17.** Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.
- Figure I.18.** Influence de l'éclairement sur la cellule photovoltaïque
- Figure I.19.** Influence de la température sur la cellule photovoltaïque
- Figure I.20.** Influence de la résistance série sur la cellule photovoltaïque
- Figure I.21.** Influence de la résistance shunt sur la cellule photovoltaïque
- Figure I.22.** Groupement de cellules en série
- Figure I.23.** Groupement de cellules en parallèle
- Figure I.24.** Groupement hybride de cellules
- Figure I.25.** De la cellule au champ photovoltaïque
- Figure I.26.** Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque
- Figure I.27.** Système de pompage « au fil du soleil »
- Figure I.28.** Système photovoltaïque avec stockage (Avec ou sans conversion d'énergie)

- Figure I.29.** Système d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque / groupe électrogène
- Figure I.30.** Système photovoltaïque raccordé au réseau
- Figure II.1.** Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P<sub>MAX</sub> du GPV
- Figure II.2.** Symbole d'un convertisseur DC-DC
- Figure II.3.** Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Cuk
- Figure II.4.** Signaux de tensions et de courants du convertisseur Cuk
- Figure II.5.** Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (Buck).
- Figure II.6.** Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck
- Figure II.7.** Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost)
- Figure II.8.** Signaux de tensions et de courants du convertisseur Boost
- Figure II.9.** Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)
- Figure II.10.** Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck-Boost
- Figure II.11.** Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque.
- Figure II.12.** Algorithme MPPT basé sur la commande P&O.
- Figure II.13.** Organigramme de l'algorithme MPPT de la conductance incrémentale
- Figure II.14.** Organigramme de l'algorithme FCO
- Figure II.15.** Organigramme de l'algorithme FCC
- Figure II.16.** Structure d'une commande floue
- Figure II.17.** Univers de discours de la variable température
- Figure II.18.** Fonctions d'appartenance
- Figure II.19.** Fuzzification avec : (a) trois ; (b) cinq ; (c) sept fonctions d'appartenance
- Figure III.1.** Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale
- Figure III.2.** Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une seule diode
- Figure III.3.** Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes
- Figure III.4.** Schéma block du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink
- Figure III.5.** Circuit électrique équivalent du convertisseur boost
- Figure III.6.** Organigramme de la commande P&O utilisée
- Figure III.7.** Schéma block de la commande P&O sous Matlab/Simulink
- Figure III.8.** Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée  $dP \cdot dV$
- Figure III.9.** Fonctions d'appartenance de la variable de sortie  $dD$
- Figure III.10.** Schéma block de la commande MPPT basée sur la logique floue sous Matlab/Simulink

- Figure III.11.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.12.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.13.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.14.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.15.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.16.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.17.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.18.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.19.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.20.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.21.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

- Figure III.22.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$
- Figure III.23.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $0^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.24.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $0^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.25.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $0^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.26.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $0^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.27.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $10^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.28.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $10^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.29.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $10^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.30.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $10^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.31.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $55^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$
- Figure III.32.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $55^\circ\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$

**Figure III.33.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de 55°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

**Figure III.34.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de 55°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

## Liste des tableaux

**Tableau I.1** Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque.

**Tableau II.1** Désignation standard des ensembles flous

**Tableau III.1.** Les règles d'inférence utilisées dans la commande floue

## **Abréviations:**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>AM :</b>                   | Air Mass (Masse d'air)   |
| <b>STC :</b>                  | Standard Test Conditions   |
| <b>ZCE :</b>                  | Zone de Champs Electrique  |
| <b>FF :</b>                   | Fill Factor (Facteur de forme)   |
| <b>PV:</b>                    | Photovoltaïque   |
| <b>GPV:</b>                   | Générateur Photovoltaïque.   |
| <b>PPM:</b>                   | Point de Puissance Maximale.   |
| <b><math>P_{max}</math> :</b> | Puissance maximale   |
| <b>MPPT:</b>                  | Poursuite du point de puissance maximale (maximum Power Point Tracking). |
| <b>DC:</b>                    | Courant Continu (Direct Current).  |
| <b>I.C (Inc Cond) :</b>       | (Incremental Conductance), Conductance Incrémentale                      |
| <b>P&amp;O:</b>               | Perturbation et Observation.   |
| <b>FCO :</b>                  | Fraction de la tension de Circuit Ouvert                                 |
| <b>FCC :</b>                  | Fraction du courant de Court-Circuit                                     |
| <b>dP :</b>                   | Variation de la puissance  |
| <b>dV :</b>                   | Variation de la tension  |
| <b>dD :</b>                   | Variation du rapport cyclique.   |
| <b>NG :</b>                   | Négatif Grand  |
| <b>NM :</b>                   | Négatif Moyen  |
| <b>NP :</b>                   | Négatif Petit  |
| <b>EZ :</b>                   | Environ Zéro   |
| <b>PP :</b>                   | Positif Petit  |
| <b>PM :</b>                   | Positif Moyen  |
| <b>PG :</b>                   | Positif Grand  |
| <b>Dec_G :</b>                | Décrémenter Grand  |
| <b>Dec_M :</b>                | Décrémenter Moyen  |
| <b>Inc_M :</b>                | Incrémenter Moyen  |
| <b>Inc_G :</b>                | Incrémenter Grand  |

## Nomenclature

|   |  |
|---|--|
| <b>G :</b>  | Rayonnement solaire ( $\text{W/m}^2$ )   |
| <b>E :</b>  | Energie d'un photon (J)  |
| <b>h :</b>  | Constante de Planck ( $6.63 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$ )                               |
| <b><math>\nu</math> :</b>                         | Fréquence d'un photon ( $\text{s}^{-1}$ )  |
| <b>C :</b>  | Célérité de la lumière dans le vide ( $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )                     |
| <b><math>\lambda</math> :</b>                     | Longueur d'onde (m)  |
| <b><math>I_{cc}</math>(<math>I_{sc}</math>) :</b> | Courant de court-circuit (A)   |
| <b><math>V_{oc}</math>(<math>U_{oc}</math>) :</b> | Tension de circuit-ouvert (V)  |
| <b>I et V</b>                                     | Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque, respectivement :(A),<br>(V) |
| <b><math>I_{ph}</math> :</b>                      | Photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) (A)           |
| <b><math>I_0</math> :</b>                         | Courant de saturation de la cellule (A)  |
| <b><math>V_T</math> :</b>                         | Tension thermique de la cellule (V)  |
| <b>n :</b>  | Facteur d'idéalité   |
| <b>K :</b>  | Constante de Boltzmann ( $1.3854 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ )                         |
| <b>T :</b>  | Température de la cellule (K)  |
| <b>q :</b>  | Charge élémentaire d'électron ( $1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )                    |
| <b><math>R_{sh}</math>(<math>R_p</math>) :</b>    | Résistance shunt ou parallèle ( $\Omega$ )   |
| <b><math>R_s</math> :</b>                         | Résistance série ( $\Omega$ )  |
| <b><math>I_{Rp}</math> :</b>                      | Courant traversant la résistance parallèle (A)   |
| <b><math>T_{ref}</math> :</b>                     | Température de référence (298 K).  |
| <b><math>G_{ref}</math> :</b>                     | Eclairement de référence ( $1000 \text{ W/m}^2$ )                                      |
| <b><math>K_i</math> :</b>                         | Courant de court-circuit de la cellule à $T=25^\circ\text{C}$                          |
| <b><math>I_{d1}</math> :</b>                      | Courant de la première diode (A)   |
| <b><math>I_{d2}</math> :</b>                      | Courant de la deuxième diode (A)   |
| <b><math>I_{01}</math> :</b>                      | Courant de saturation de la première diode (A);  |
| <b><math>I_{02}</math> :</b>                      | Courant de saturation de la seconde diode 2 (A);                                       |
| <b><math>n_1</math> :</b>                         | Facteur d'idéalité de la première diode  |
| <b><math>n_1</math> :</b>                         | Facteur d'idéalité de la première diode  |

## ***Nomenclature***

---

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b><math>P_m(P_{max})</math></b> | Puissance maximale (W)                             |
| <b><math>I_m(I_{mp})</math></b>  | Courant maximal (A)                                |
| <b><math>V_m(V_{mp})</math></b>  | Tension maximale (V)                               |
| <b><math>S</math></b>            | Surface du module photovoltaïque (m <sup>2</sup> ) |
| <b><math>\eta</math></b>         | Rendement énergétique                              |
| <b><math>P_c</math></b>          | Puissance crête (W)                                |
| <b><math>N_s</math></b>          | Nombre de cellules en série.                       |
| <b><math>N_p</math></b>          | Nombre de cellules en parallèle.                   |
| <b><math>I_{cc}^t</math></b>     | Courant de court circuit total (A)                 |
| <b><math>V_{oc}^t</math></b>     | Tension de circuit ouvert totale (V)               |
| <b><math>R</math></b>            | Résistance ( $\Omega$ )                            |
| <b><math>C</math></b>            | Capacité (F)                                       |
| <b><math>L</math></b>            | Inductance (H)                                     |
| <b><math>S</math></b>            | Interrupteur                                       |
| <b><math>V_i</math></b>          | Tension d'entrée du convertisseur (V)              |
| <b><math>V_o</math></b>          | Tension de sortie du convertisseur (V)             |
| <b><math>V_L</math></b>          | Tension sur l'inductance (V)                       |
| <b><math>V_c</math></b>          | Tension sur la capacité (V)                        |
| <b><math>V_D</math></b>          | Tension de diode (V)                               |
| <b><math>V_s</math></b>          | Tension de l'interrupteur (V)                      |
| <b><math>i_o</math></b>          | Courant de sortie du convertisseur (A)             |
| <b><math>i_i</math></b>          | Courant d'entrée du convertisseur (A)              |
| <b><math>i_L</math></b>          | Courant traversant l'inductance (A)                |
| <b><math>i_c</math></b>          | Courant traversant la capacité (A)                 |
| <b><math>i_D</math></b>          | Courant traversant la diode (A)                    |
| <b><math>i_s</math></b>          | Courant traversant l'interrupteur (A)              |
| <b><math>dP</math></b>           | Variation de la puissance (W)                      |
| <b><math>dV</math></b>           | Variation de la tension (V)                        |
| <b><math>D</math></b>            | Rapport cyclique                                   |
| <b><math>dD</math></b>           | Variation du rapport cyclique                      |
| <b><math>M</math></b>            | Rapport de conversion ( $M = \frac{V_o}{V_i}$ )    |

## *Nomenclature*

---

|              |   |
|--------------|---|
| $\mu_E(x)$ : | Fonction d'appartenance   |
| $E$ :        | Ensemble concerné par la fonction d'appartenance  |
| $x_0$ :      | Variable d'entrée à la commande floue (avant fuzzification)                             |
| $x$ :        | Variable linguistique (après fuzzification)   |
| $x_R$ :      | Variable de sortie après le mécanisme d'inférence                                       |
| $x_R^*$ :    | Abscisse du centre de gravité (variable de sortie de la commande après défuzzification) |

### **Introduction générale**

Vu le souci d'épuisement des réserves mondiales connues (pétrole, charbon, gaz, etc.), les crises économiques (flambée des prix du pétrole), les accidents des centrales nucléaires tels que ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986), le souci de pollution, le besoin sans cesse croissant en énergie, toutes ces perspectives renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables [1]. Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des plus importantes sources d'énergie renouvelables, qui présente un dénouement à nos problèmes de production d'énergie. De plus, cette énergie semble la plus prometteuse, non polluante et inépuisable. Néanmoins, la production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température [2], la surface des cellules photovoltaïques et la charge [3]. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque, PV ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale. On utilise alors un étage d'adaptation [4] entre le GPV et la charge [5] commandé par un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, appelé 'maximal power point tracking', (MPPT afin que la puissance maximale soit générée en permanence. [2]

Plusieurs méthodes MPPT, démontrées par plusieurs travaux ont été utilisées pour déterminer le point de puissance maximale.

D'un autre côté la logique floue ou bien la théorie des ensembles flous a attiré l'attention d'un grand nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Le contrôle par la logique floue est préférable à d'autres méthodes car il ne nécessite pas des modèles mathématiques de système.

Dans ce contexte, deux techniques de recherche du point PPM ; La technique P&O et celle Floue, seront étudiées et simulées sous Matlab/Simulink dans plusieurs conditions rigoureuses pour tester et comparer le suivi du point PPM et la robustesse des deux commandes adoptées

Ce travail comprend trois chapitres

Le premier chapitre introduit des généralités concernant l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque, en allant de la cellule aux systèmes photovoltaïques.

## *Introduction générale*

---

Le deuxième chapitre rappelle quelques types de convertisseurs DC-DC et les principales techniques de poursuite MPPT et des concepts généraux sur la logique floue.

Le chapitre trois est consacré à la modélisation des différents composants de notre système et à la simulation et la comparaison des deux techniques MPPT, la P&O et celle basée sur la logique floue.

## *Chapitre I*

---

# *Energie solaire et conversion photovoltaïque*

## I. Chapitre I

### I.1 Introduction

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et, sous forme stockée durant des millions d'années, de nos réserves de gaz, de pétrole et de charbon. [6] [7]

Cette énergie peut être convertie en énergie thermique ou en électricité selon la nature des capteurs. Convertir l'énergie lumineuse en électricité, telle est la fonction d'une photopile ou d'une cellule solaire. Tous les photogénérateurs sont donc des transformateurs d'énergie qui, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, produisent de l'énergie électrique. [8]

### I.2 L'énergie solaire

L'énergie lumineuse dite « extraterrestre » c'est-à-dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut  $1367 \text{ W/m}^2$ . Il s'agit de l'irradiance reçue, ou rayonnement solaire instantané, à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil). On appelle cette valeur « constante » solaire, mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil. [6] [7]

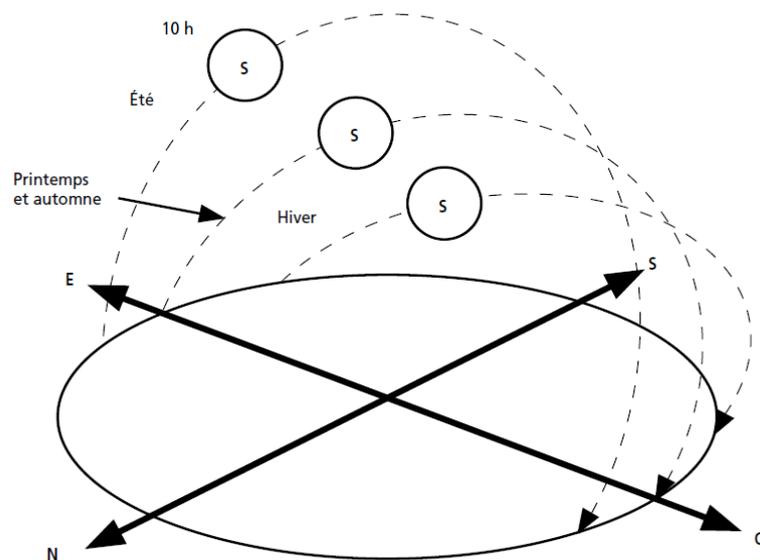
Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur la Terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère. La modification par l'atmosphère du rayonnement solaire obéit à des phénomènes assez complexes et surtout en grande partie aléatoires. L'état de notre ciel et donc le flux lumineux reçu au niveau du sol à un instant donné dépendent d'un grand nombre de paramètres :

Gaz présents dans l'atmosphère, Nuages, Albédo (réflectivité du sol), Température ambiante, Vent et Humidité relative....

Or ces paramètres dépendent :

- \_ Du lieu géographique ;
- \_ De la saison ;
- \_ De l'heure de la journée ;
- \_ Des conditions météo du moment... [6] [7]

L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le Soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel, c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus courte lorsque le Soleil est directement au-dessus de l'endroit visé. C'est le « midi solaire », moment où le rayonnement solaire direct est le plus intense. Comme le Soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est plus grande qu'en hiver. La Figure I.1 illustre ce phénomène, en reproduisant la trajectoire du Soleil dans le ciel au cours des quatre saisons de l'année.



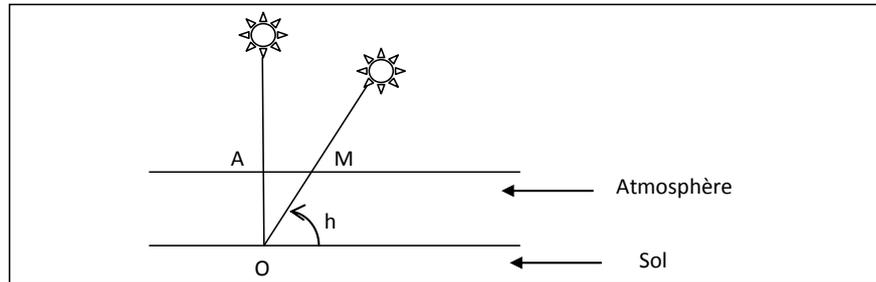
**Figure I.1.** Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord [9]

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales s'allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le Soleil est plus bas au midi solaire.

Les journées d'hiver sont également plus courtes, et le Soleil encore plus bas qu'à l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire ( $G$ ) sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude. Inversement, le rayonnement atteint son intensité maximale lorsque le plan est perpendiculaire aux rayons du Soleil, donc l'intensité du rayonnement solaire sur un plan quelconque augmente quand on l'incline vers le Soleil [9]

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformations. [6] [7]

On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (Figure I.2)



**Figure I.2.** Définition de l'Air Mass [6] [7]

Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil (angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et par la direction du Soleil).

A l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la figure I.2, on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{I.1})$$

Donc l'Air Mass  $\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.2})$

Dans l'expression AM<sub>x</sub>, x désigne ce rapport OM/OA.

**Exemples :**

Soleil au zénith (au niveau de la mer) : AM1 ;

Soleil à 30° : AM2 ;

Soleil à 41.8° : AM1.5.

Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère [6] [7].

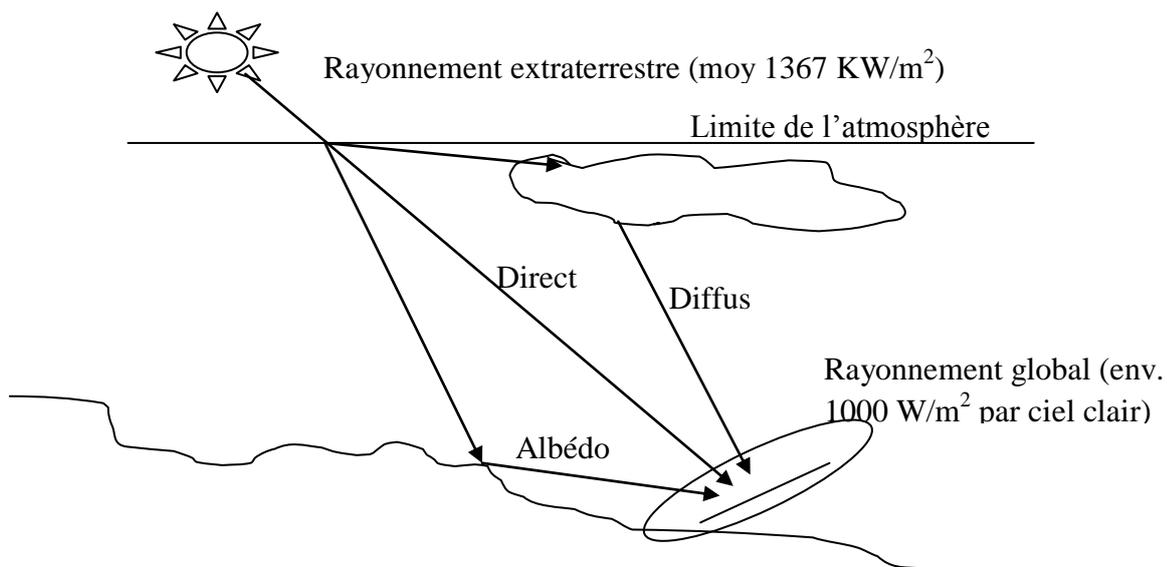
En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes [6] [7]:

**Le rayonnement direct** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux.

Le **rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions.

L'**albédo** est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

Le **rayonnement global** est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure I.3



**Figure I.3.** Composantes du rayonnement solaire au sol [6] [7]

La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleur différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

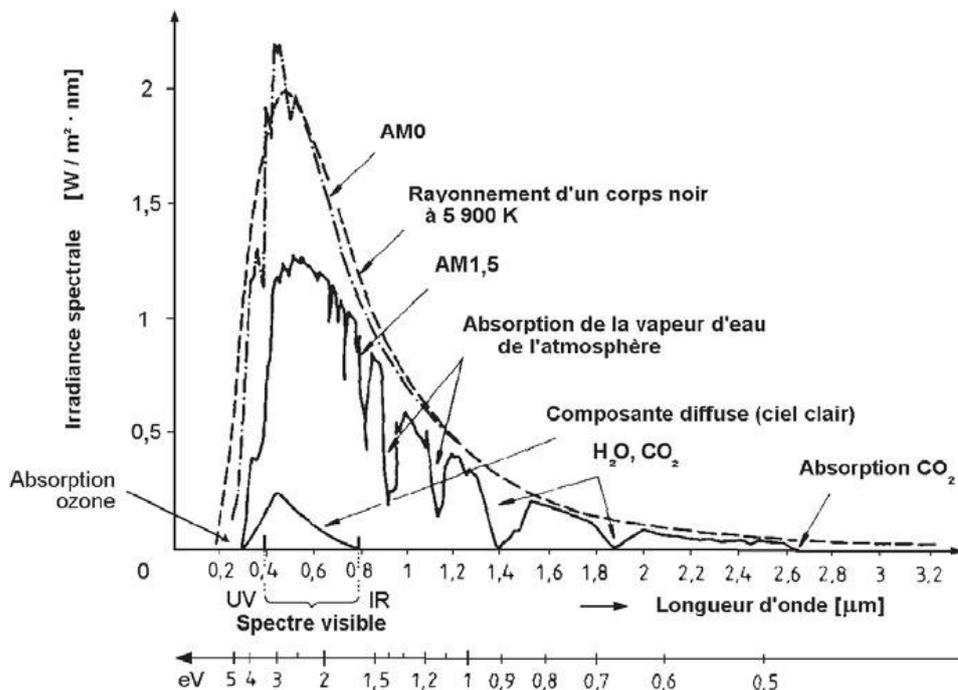
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.3})$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde.

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de **AM0**. Sa distribution en énergie est répartie comme suit :

|                |                                     |       |
|----------------|-------------------------------------|-------|
| Ultraviolet UV | $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ | 6.4%  |
| Visible        | $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ | 48.0% |
| Infrarouges    | $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$   | 45.6% |

La *figure I.4* montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1.5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de  $41.8^\circ$  au niveau de la mer. L'irradiance spectrale est le flux solaire pour une longueur d'onde donnée (et donc une couleur donnée, en ce qui concerne la lumière visible). [6] [7]



**Figure I.4.** Répartition spectrale du rayonnement solaire : Hors atmosphère (AM0).  
À l'incidence  $41.8^\circ$  (AM1.5) [6]

Ce spectre de ciel clair, noté AM1.5, sert de référence pour la mesure des cellules photovoltaïques [6] [7].

Ainsi, les conditions standards de qualification des cellules [5] («*STC*»), pour *Standard Test Conditions* [6] [7]) sont un spectre **AM1.5**, une puissance incidente de

1000W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C et c'est dans de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné. [10]

### I.3 La conversion photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « Photos » qui signifie *lumière* et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique.

Mais c'est le savant français Antoine Becquerel qui le premier, en 1839, mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie : la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière. [6] [7]

#### I.3.1 La cellule photovoltaïque

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière. [9]

##### I.3.1.1 Différents types de filières technologiques des cellules photovoltaïques

Il existe différentes filières technologiques. On distingue la filière à base de silicium cristallin, elle couvre de l'ordre de 88% de la production mondiale. La filière des couches minces. Il y a aussi la filière des cellules organiques. Et, en ces dernières années, à partir de 2009, il y a eu naissance d'une nouvelle filière appelé filière pérovskite qui reste encore dans les laboratoires de recherche. [11]

###### I.3.1.1.1 La filière silicium

C'est la filière dominante. L'élément du silicium est le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, il a l'avantage de pouvoir être produit à partir d'une ressource naturelle quasi inépuisable, la silice, un composant de granit, des sables et des grès.

Cette filière à base de silicium cristallin comprend le monocristallin et le multicristallin (figure I.5). [11]

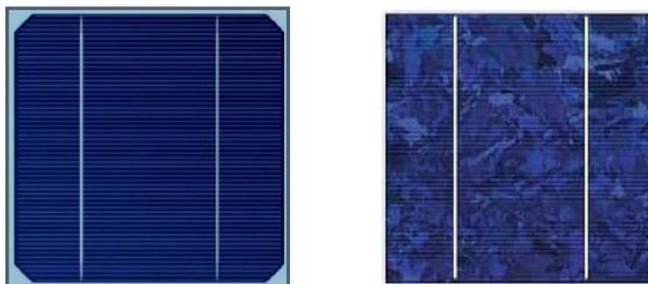


Figure I.5. Cellules du silicium monocristallin et multicristallin [11]

#### **I.3.1.1.1 Le silicium monocristallin**

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairément [8], mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse [11]. Il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium. [8]

#### **I.3.1.1.2 Le silicium multicristallin**

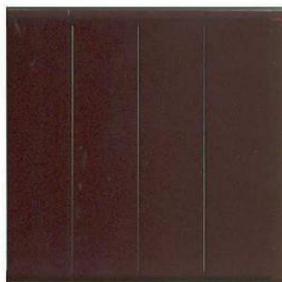
Cousin germain du précédent (composé de multicristaux, il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairéments modérés, et également moins onéreux. [8]

#### **I.3.1.1.2 La filière couches minces**

Les principales filières couches minces sont le Silicium amorphe utilisé depuis de longues années, dans les montres et calculatrices, le CdTe (hétérojonction Cadmium Telluride, Sulfure de Cadmium), le CIS (hétérojonction de diselenure cuivre indium/ sulfure de cadmium) [11] et le GaAs (arséniure de gallium). [8]

##### **I.3.1.1.2.1 Le silicium amorphe**

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents (Rendement faible en plein soleil [11]), ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairéments, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse. [8] Mais ses performances diminuent sensiblement avec le temps [11]



**Figure I.6.** Cellule du silicium amorphe en couche mince [11]

##### **I.3.1.1.2.2 Le tellure de cadmium (CdTe)**

Les cellules au tellure de cadmium (CdTe) sont aussi appelées hétérojonction à base de tellure de cadmium et sulfure de cadmium.

Cette technologie semblait être la plus adaptée pour les couches minces. Mais le problème de toxicité posé par le cadmium a pesé lourdement sur son développement, l'autre problème est que le tellure est un élément rare.

Ces cellules sont légères et robustes. Elles ont pris un véritable essor ces dernières années.



**Figures I.7.** Cellule au tellure de Cadmium en couche mince [11]

Ces cellules absorbent une grande quantité de lumière, y compris lorsqu'elle vient à manquer et se comportent également mieux que les autres lorsque leur température monte. Le coût de fabrication d'une cellule au tellure de cadmium serait deux à trois fois moins important que celui d'une structure cristalline. [11]

#### **I.3.1.1.2.3 Le diséléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS)**

Les cellules CIGS sont elles aussi des hétérojonctions. De plus, leur rendement est le plus élevé à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couches minces.



**Figures I.8.** Cellule CIS en couche mince [11]

Les cellules en CIGS résistent mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe. En plus, elles captent un peu mieux la lumière en début et en fin de journée, comme toutes les couches minces. [11]



**Figures I.9.** Cellule CIGS en couche mince [11]

#### I.3.1.1.2.4 Arséniure de gallium (GaAs)

Ce matériau à très haut rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes à concentration.

Dans ces applications, le rendement et le poids sont les critères de sélection et non le prix.  
[8]

#### I.3.1.1.3 La filière des cellules organiques

L'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 40 ans.

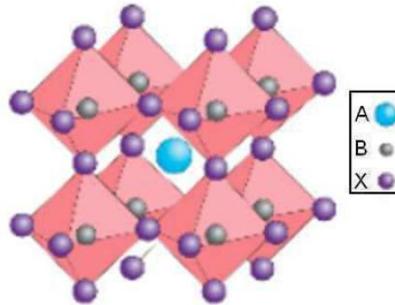


**Figure I.10** Exemple d'application des cellules photovoltaïques organiques (Konarka Technologies) [11]

Les cellules photovoltaïques organiques ont connu le meilleur taux de croissance parmi les différentes filières photovoltaïques durant les 12 dernières années. Leur développement à grande échelle est aujourd'hui freiné par la faible mobilité des porteurs de charges dans le matériau, limitant le rendement, et la faible durée de vie des cellules.  
[11]

#### I.3.1.1.4 La filière des pérovskites

C'est un nouveau type des cellules photovoltaïques. Elle n'est pas encore sortie des laboratoires.



**Figure I.11** Structure d'un cristal de pérovskite générique  
ABX<sub>3</sub> [11]

Ses qualités photovoltaïques, la capacité d'absorption des photons 10 fois supérieure au silicium, la bonne séparation des charges électriques et leur mobilité. Mais le grand défi pour les cellules solaires pérovskite est la stabilité à long terme.

Les cellules solaires en pérovskite sont une alternative diablement séduisante aux cellules en silicium qui dominent aujourd'hui le marché. Mais elles ne peuvent pas le concurrencer car elles se dégradent à partir de 40°C, et aussi elles sont instables lorsque l'humidité dépasse 35 %. [11]

#### I.3.1.2 Structure de la cellule photovoltaïque

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction p-n) ou entre deux matériaux différents (hétérostructures), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance. [12]

La figure I.12 présente un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire

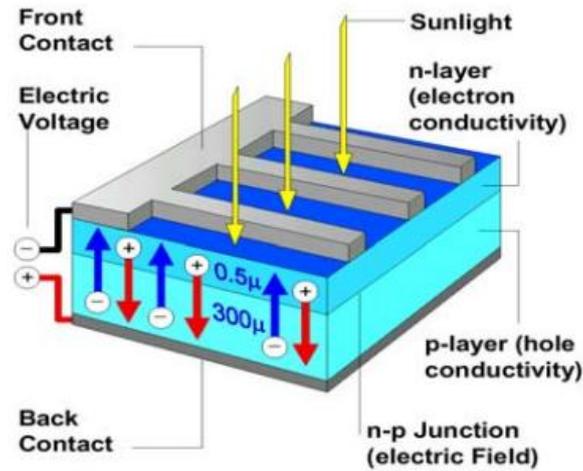


Figure I.12. Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [13]

I.3.1.3 Dopage des semi-conducteurs

À l'état pur, le silicium dit « intrinsèque » n'est pas très photoconducteur. En le dopant avec des atomes étrangers de phosphore qui ont 5 électrons dans leur couche externe, il y aura alors un excédent de charges négatives dans le cristal (figure 3.10b). Le matériau sera donc potentiellement « donneur » d'électrons, disponibles pour la conduction électrique, et le silicium ainsi dopé est appelé silicium de type n. [6] [7]

Par symétrie, on peut également doper le silicium avec du bore qui a seulement trois électrons dans la bande de valence. Le résultat est l'apparition d'un excédent de trous, donc de charges positives (figure I.10.c). Le matériau est à l'inverse du précédent « accepteur » d'électrons. Ce matériau ainsi dopé est appelé silicium de type p. [6] [7]

À la figure I.13, on représente une vue schématisée, à plat, des atomes de silicium intrinsèque, de type n et de type p.

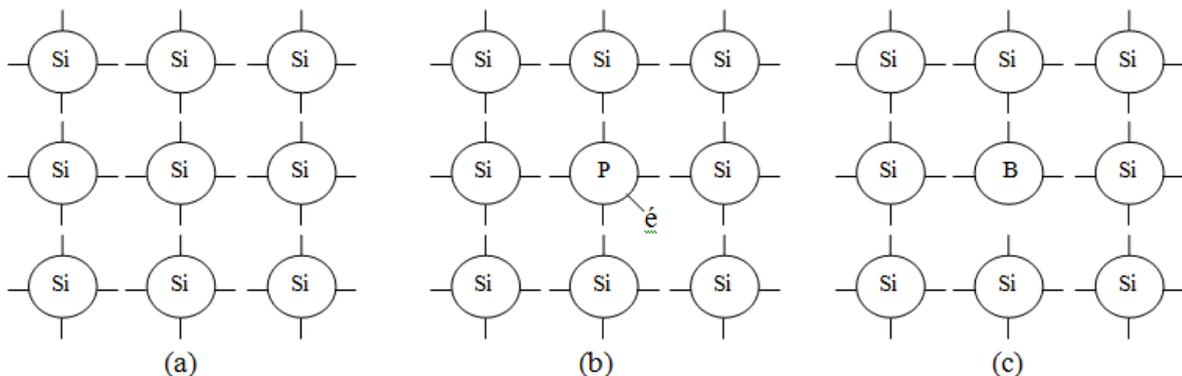


Figure I.13. a) Silicium pur (intrinsèque). b) Silicium de type n. c) Silicium de type p. [6] [7]

### I.3.1.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à la matrice et crée ainsi un « trou ». En l'absence de dispositif supplémentaire, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombiner et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein [14]. La mise en contact de deux zones à dopages opposés dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu : la diode. À l'interface où les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium du type p au type n apparaît une région appelée zone de charge d'espace [6] [7]. Une telle jonction crée entre les deux zones un champ électrique élevé et permanent. [15] Tout porteur de charge mobile ayant pu diffuser jusqu'à cette zone de champ, sera vigoureusement drainé vers le côté n pour les électrons et le côté p pour les trous. Dès que les porteurs de charge se trouvent dans une zone de leur type, ils ne risquent plus de se recombiner autrement que par les défauts du réseau ou de la surface [15] Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE ou à sa proximité immédiate où les porteurs de charges sont séparés immédiatement par le champ électrique et ont peu de chance de rencontrer leur opposé, alors que plus loin de la jonction, ces derniers conservent une grande chance de se recombiner avant d'atteindre la zone de leur type. [14]

### I.3.1.5 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque reste l'élément de base de tout générateur photovoltaïque. Pour prévoir ses performances, il est très important de connaître son modèle mathématique.

#### I.3.1.5.1 Caractéristique $I = f(V)$

- Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par le champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit  $I_{cc}$  qui correspond au photocourant  $I_{ph}$  généré par le rayonnement. Ce photocourant est proportionnel à l'irradiance du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il dépend très légèrement de la température. [15]
- Si la cellule est laissée en circuit *ouvert*, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, introduisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au

photocourant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . [15]

En somme, aussi bien en état de court-circuit où la tension est nulle, qu'en état de circuit ouvert où le courant est nul, aucune puissance ne peut être extraite de la photopile.

- Si l'on place maintenant une charge non nulle et non infinie aux bornes de la photodiode, on se trouve dans un cas intermédiaire entre la situation de court-circuit et celle de circuit ouvert. Le courant va se répartir entre la charge extérieure et la diode. Il en résultera une tension de travail inférieure à la tension de circuit ouvert. [15]

La caractéristique courant-tension d'une photopile se met sous la forme mathématique :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_{sh}} \quad (I.3)$$

Avec :

$I$  et  $V$  sont le courant et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque (A), (V)

$I_{ph}$  : Photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) (A)

$I_0$  : Courant de saturation de la cellule (A)

$V_T$  : Tension thermique de la cellule (V)

$n$  : Facteur d'idéalité de la diode

$q$  : Charge de l'électron ( $1.6 \cdot 10^{-19} C$ )

$K$  : Constante de Boltzman ( $1.380 \cdot 10^{-23} J/K$ )

$T$  : Température de la cellule (°K)

$R_{sh}$  : Résistance shunt ou parallèle ( $\Omega$ )

$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ )

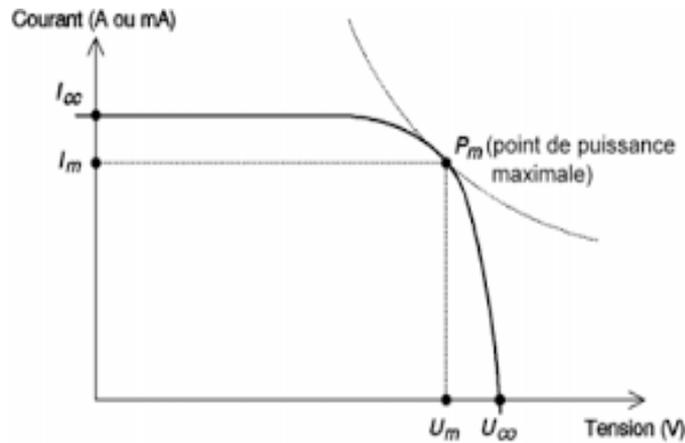


Figure I.14. Courbe caractéristique  $I = f(V)$  [15]

I.3.1.5.2 Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque

Une cellule solaire ne peut être assimilée à aucun générateur classique. On peut, en effet, la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale de sa caractéristique et comme une source de courant constant dans la partie horizontale de sa caractéristique (figure I.15). [15]

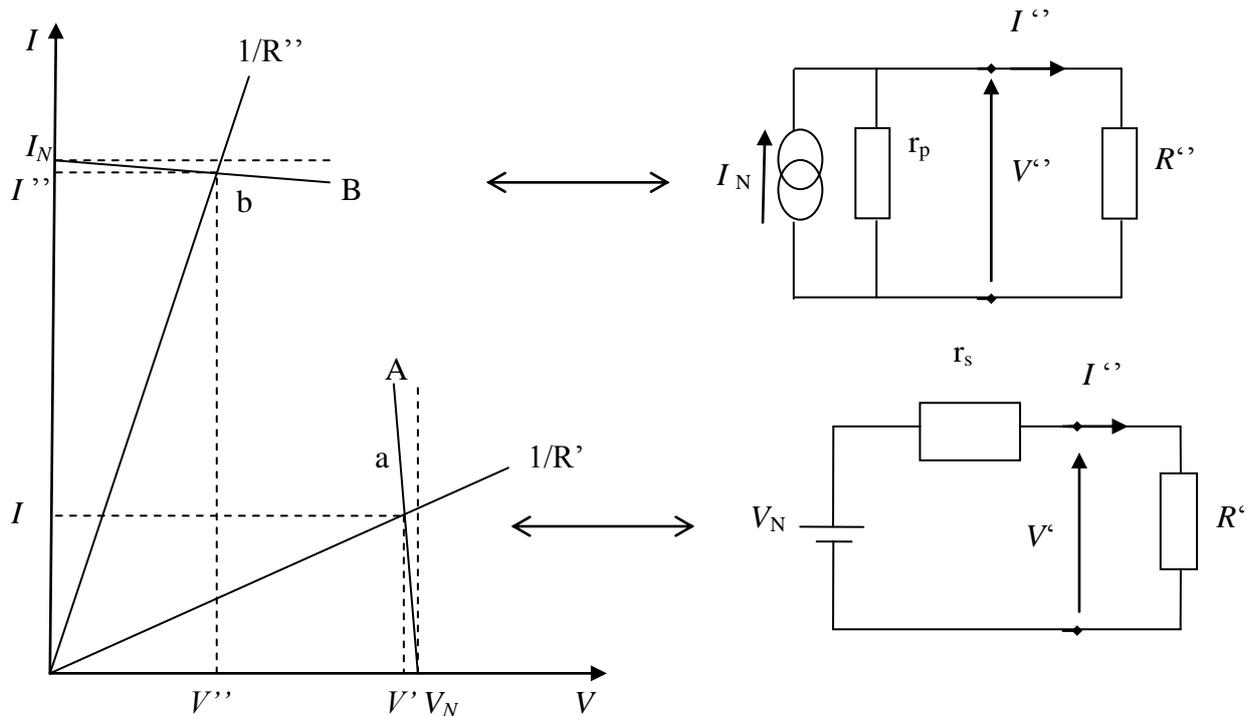


Figure I.15. Schéma équivalent d'une photodiode. Générateur à tension constante (courbe a) ; Générateur à courant constant (courbe b)

La figure I.16 représente le schéma électrique équivalent d'une photopile sous éclairage. Il correspond en fait à un générateur de courant imparfait (qui présente une conductance shunt et une résistance série parasite) monté en parallèle sur une diode imparfaite. [15]

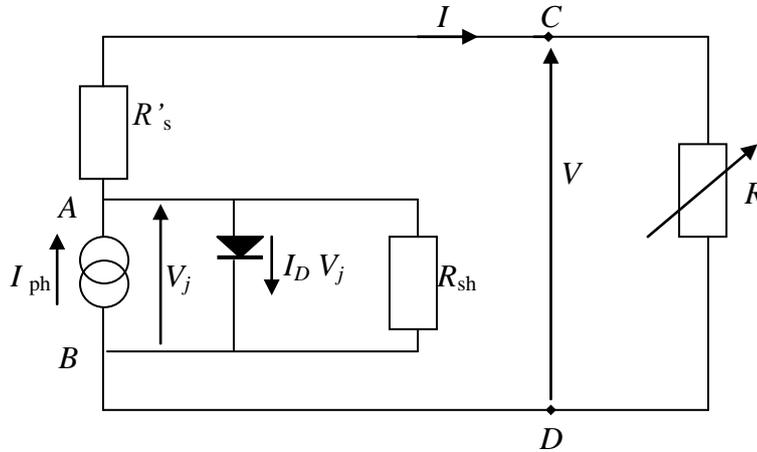


Figure I.16. Schéma équivalent d'une photopile en fonctionnement.

### I.3.1.5.3 Puissance optimale et rendement

Une caractéristique fondamentale des photodiodes est que pour une irradiance et une température données, elles n'imposent ni le courant ni la tension de fonctionnement. Seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge R aux bornes de la photodiode qui va déterminer le point de fonctionnement. [15]

L'extraction de puissance sera maximale lorsque l'impédance sera telle que le produit  $(I \times V)$  sera maximum [16], soit au point  $P_m$ , situé au « coude » de la caractéristique. Ce point dit de *puissance maximale* est associé à une tension dite *tension maximale*  $V_m$  et de *courant maximal*  $I_m$ .

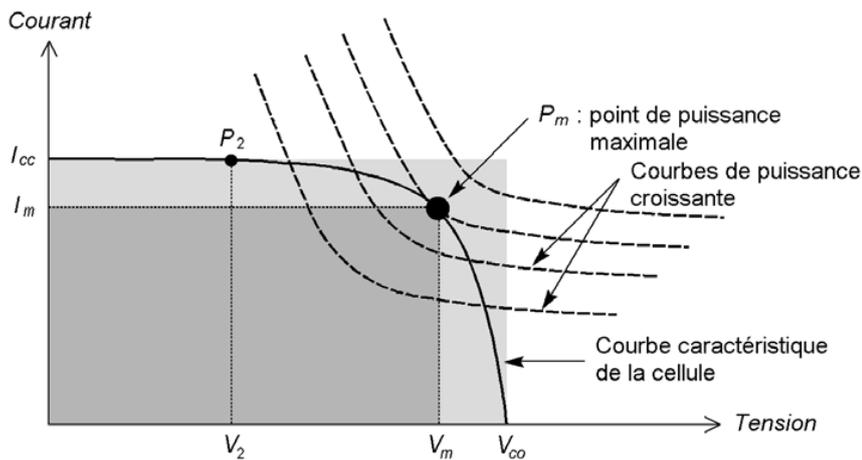


Figure I.17. Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.

Remarquons cependant que la photopile peut être sollicitée également à plus faible puissance, par exemple à une tension inférieure à  $V_m$  (point  $P_2$  sur la figure I.17).

Il est clair que plus la courbe est « carrée », plus la puissance maximale est élevée.

On mesure cette propriété par le *facteur de forme* (ou *fill factor*) défini comme suit :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc}I_{cc}} \quad (I.4)$$

Il rend compte de la qualité de la cellule, intégrant les résistances internes série et parallèle. Le *rendement énergétique* est défini quant à lui comme le rapport entre cette puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur le module photovoltaïque.

Si  $S$  est la surface de ce module, et  $E$  l'éclairement en  $W/m^2$ , le rendement énergétique il s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{E S} \quad (I.5)$$

Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions de référence STC. Le rendement énergétique varie selon le type de matériau employé pour la cellule photovoltaïque. [17]

La puissance maximale ( $P_m$ ) d'un panneau dans ces conditions est appelée la *puissance crête* ( $P_c$ ) exprimée en *watts-crête*. [6] [7]

#### I.3.1.5.4 Influence de l'éclairement sur la cellule photovoltaïque

Nous avons vu plus haut que le courant de court-circuit est pratiquement égal au photocourant, lui-même directement proportionnel à la surface éclairée et à l'irradiance pour un spectre donné. Mais qu'en est-il de la tension de circuit ouvert ? [15]

L'équation caractéristique s'écrit pour un courant d'utilisation nul : [15]

$$I_{ph} = I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

Si l'on a  $R_{sh}$  infinie et  $R_s$  nulle, l'équation donnant la tension de circuit ouvert devient :

$$V_{oc} = n \left( \frac{KT}{q} \right) \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (I.7)$$

On voit donc que la tension de circuit ouvert est proportionnelle au  $\ln$  de l'irradiance. Il s'ensuit qu'elle varie peu et d'autant moins que le facteur d'idéalité  $n$  de la diode est voisin de 1.

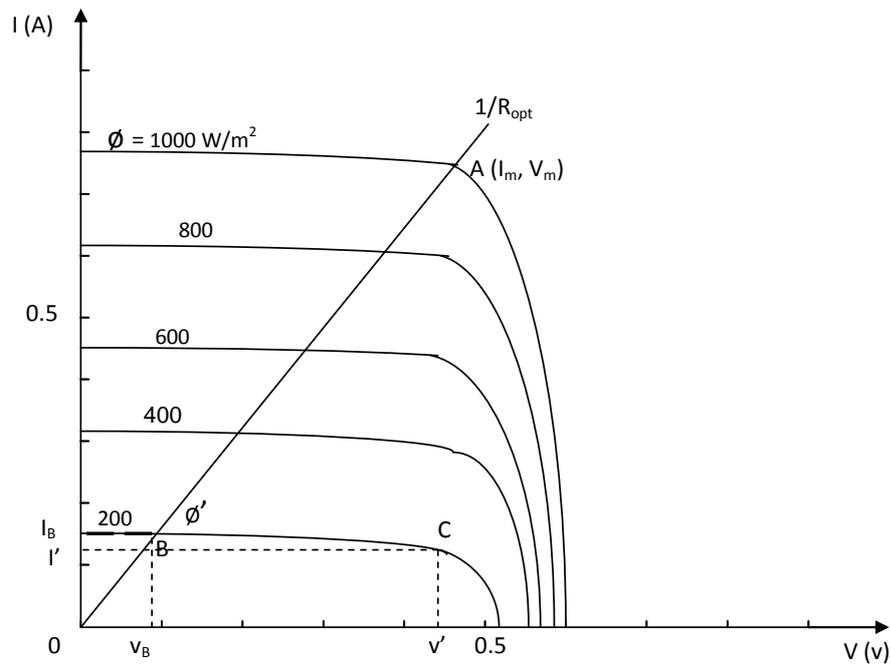


Figure I.18. Influence de l'éclairement sur la cellule photovoltaïque [15]

**I.3.1.5.5 Influence de la température sur la cellule photovoltaïque**

La température est un paramètre important dans le comportement des photopiles, ne serait-ce que parcequ'une cellule exposée à une irradiance de  $1 \text{ kW/m}^2$  n'en transforme en électricité que 12% au plus. Ainsi, si la photopile n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et ses performances électriques peuvent se dégrader. La figure I.19 montre l'influence de la température sur la courbe de puissance d'une photopile. [15]

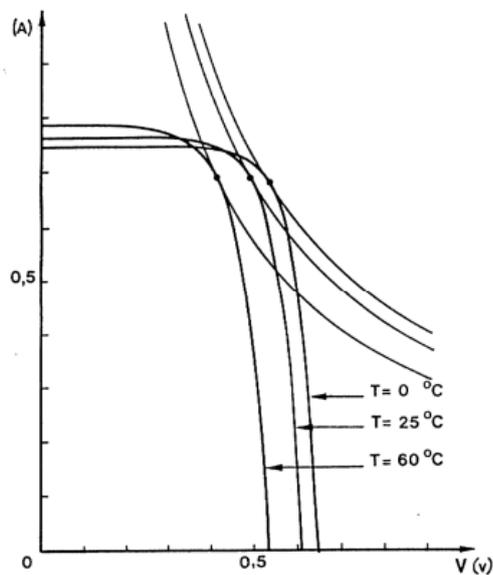


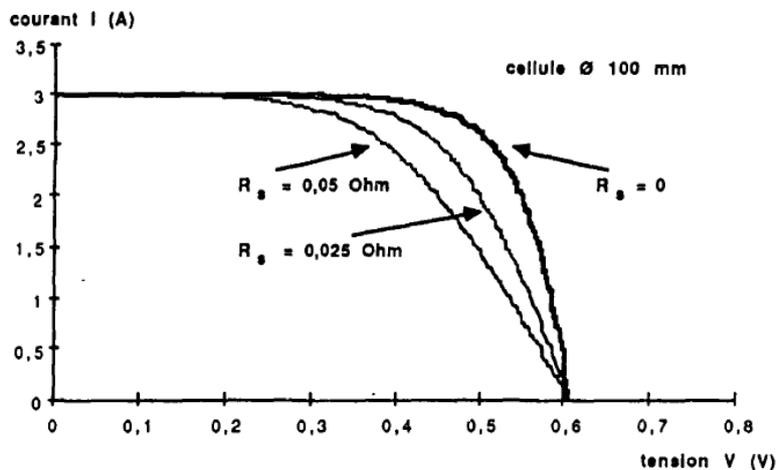
Figure I.19. Influence de la température sur la cellule photovoltaïque [15]

On observe une augmentation du photocourant, notamment à cause de la diminution de la largeur de bande interdite. En même temps, on assiste à une augmentation notable du courant direct de diode, entraînant une diminution nette de la tension de circuit ouvert. [15]

L'augmentation de température se traduit donc au total par une baisse relative de la puissance disponible de  $-0.35\%/K$  et par une légère modification de la valeur de la charge permettant d'extraire cette puissance maximale. [15]

### I.3.1.5.6 Influence de la résistance série sur la cellule photovoltaïque

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension (figure .I.20).



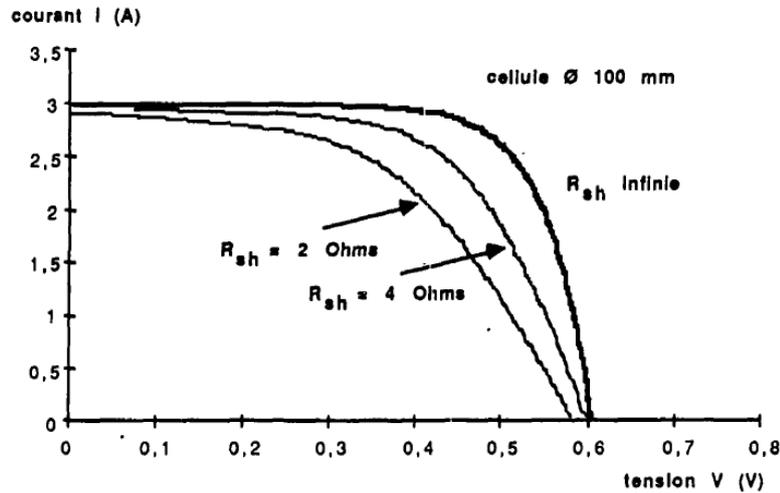
**Figure I.20.** Influence de la résistance série sur la cellule photovoltaïque [16]

Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit. [15]

### I.3.1.5.7 Influence de la résistance shunt sur la cellule photovoltaïque

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photocourant, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée. La résistance shunt est en général très élevée.

On peut facilement percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit. Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile ; en outre, une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement [15] (figure. I.21)



**Figure I.21.** Influence de la résistance shunt sur la cellule photovoltaïque [16]

### I.3.1.6 Le groupement de cellules

La tension générée par une cellule photovoltaïque au silicium mono ou multicristalin fonctionnant au point de puissance maximale sous l'éclairement de référence de  $1 \text{ kWm}^{-2}$ , est de l'ordre de 0,55 V et le courant est fonction de la surface de la cellule. Il convient donc de grouper en série et parallèle des cellules élémentaires pour adapter tension et courant en fonction des contraintes de la charge à alimenter. [16]

La caractéristique courant-tension d'un groupement quelconque de photopiles sera homothétique de la courbe  $I(V)$  d'une cellule de base. Il sera de même pour tout le réseau de caractéristiques. En conséquence, tout ce qui a été dit pour une cellule reste valable pour un groupement de cellules. [15]

#### I.3.1.6.1 Le groupement de cellules en série

La tension générée par une cellule étant très faible, il faudra dans la majorité des cas associer en série un certain nombre de cellules pour obtenir des tensions compatibles avec les charges à alimenter.

On constate immédiatement sur cette figure, correspondant à la mise en série de  $N_s$  générateurs de courant, que le courant généré par les cellules est le même dans toute la branche ainsi que dans la charge. [16] on prendra, ainsi, soin de ne connecter en série que des cellules identiques.

La nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle par  $N_s$ . en particulier, l'impédance optimale du groupement sera  $N_s$  fois plus grande que celle de la cellule de base. Les résistances série s'ajoutent et les résistances parallèles s'ajoutent également. [15]

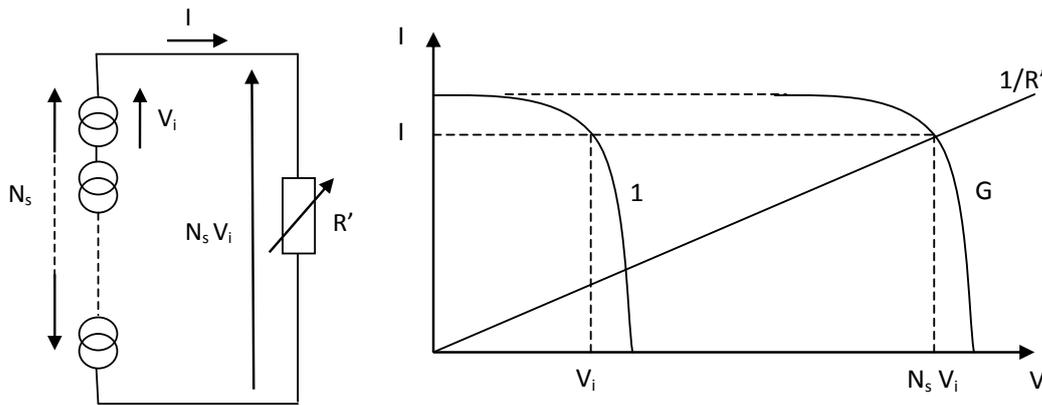


Figure I.22. Groupement de cellules en série

### I.3.1.6.2 Le groupement de cellules en parallèle

Il est possible d'augmenter le courant fourni à une charge en plaçant en parallèle plusieurs cellules ou modules photovoltaïques (figure I .23) [16].

Cette fois-ci, c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutent, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par  $N_p$ . l'impédance optimale du groupement sera  $N_p$  fois plus faible que l'élément de base. Ce sont les inverses des résistances série qui s'ajoutent, ainsi que les conductances shunts. [15]

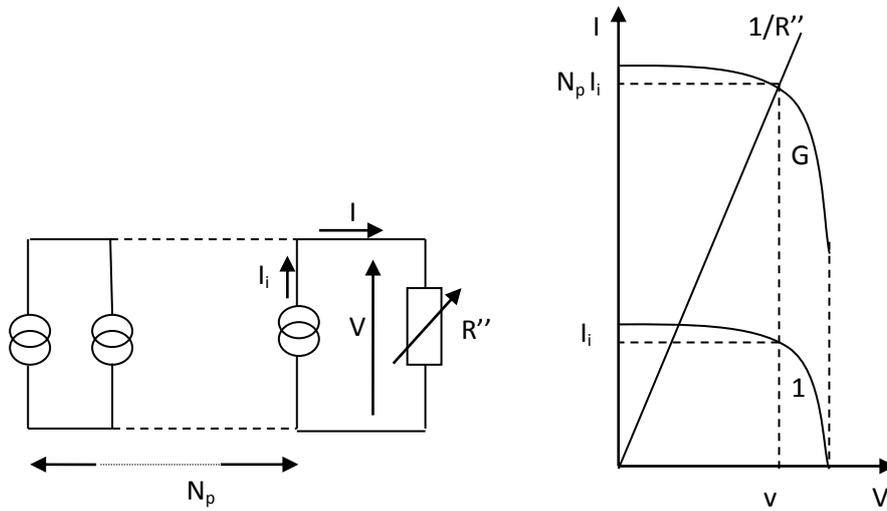


Figure I.23. Groupement de cellules en parallèle

**I.3.1.6.3 Le groupement hybride de cellules photovoltaïques :**

La combinaison des montages série et parallèle est également possible, ce qui permet d'augmenter tension et puissance au même temps [18]

$$I_{cc}^t = N_p \times I_{cc} \tag{I.7}$$

$$V_{oc}^t = N_s \times V_{oc} \tag{I.8}$$

Avec :

$N_p$  : Nombre des cellules en parallèle.

$N_s$  : Nombre des cellules en série.

$I_{cc}^t$  : Le courant de court circuit total.

$V_{oc}^t$  : La tension de circuit ouvert totale.

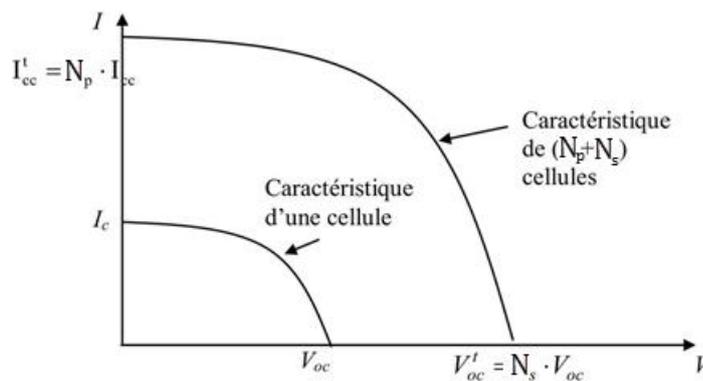


Figure I.24. Groupement hybride de cellules [18]

### I.3.2 Le module photovoltaïque

Plusieurs cellules photovoltaïques reliées en série, enrobées dans une résine transparente ou enfermées hermétiquement dans du verre ou du plastique, et intégrées à un cadre métallique, forment un module photovoltaïque (Figure I.25). [19]

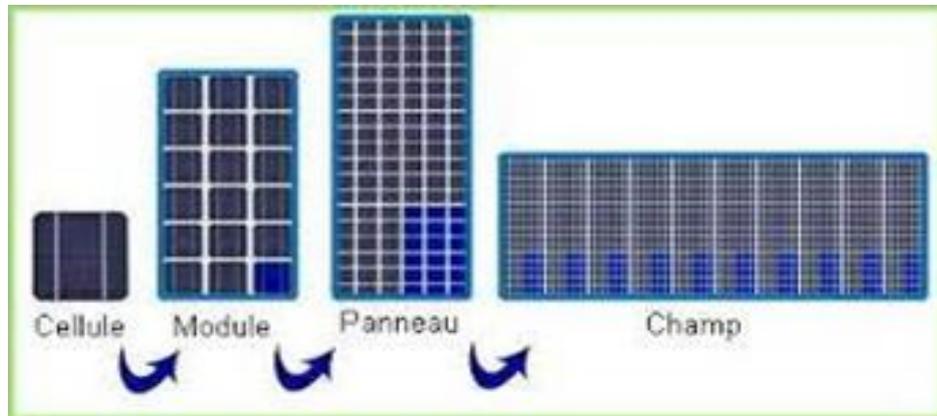


Figure I.25. De la cellule au champ photovoltaïque

### I.3.3 Le panneau photovoltaïque

La plupart du temps, un seul module ne suffit pas pour fournir la puissance voulue. Il faut donc prévoir plusieurs qui seront groupés en panneaux (Figure I.25). [19]

### I.3.4 Le champ photovoltaïque

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle parfois une sous-station. Une association série-parallèle de panneaux aura une caractéristique I(V) théorique en tous points homothétique à celle des modules de base pourvu qu'ils soient identiques. [15]

### I.3.5 Les systèmes photovoltaïques

On appelle système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaires à l'alimentation d'une application en toute fiabilité [6]

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur la figure I.26, et cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas de figure, mais il est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments représentés ici [20]

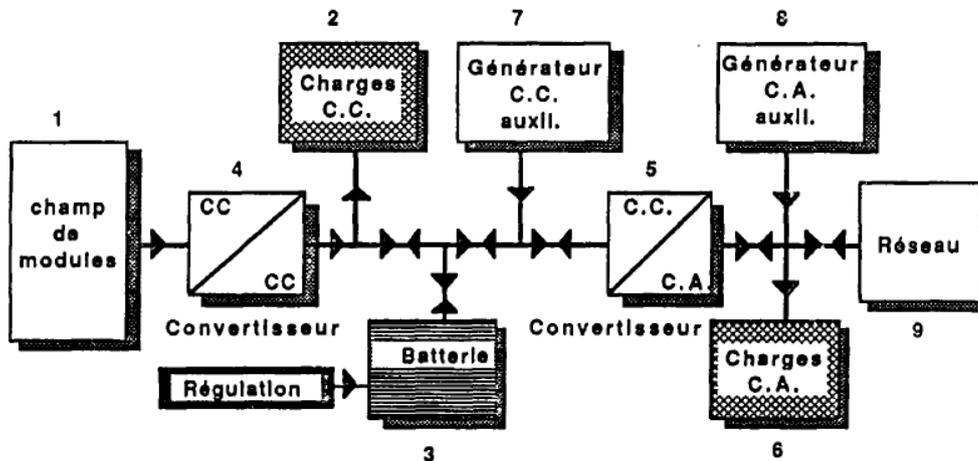


Figure I.26. Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque [20]

## Types de systèmes photovoltaïques

Les différents types des systèmes photovoltaïques sont :

### I.3.5.1 Systèmes autonomes « au fil du soleil »

C'est très certainement la chaîne la plus simple et la plus fiable des systèmes photovoltaïques. La charge continue est alimentée directement du champ de modules « au fil du soleil ». Aucune batterie ne fixant la tension de travail, c'est l'impédance de la charge qui va fixer le point de travail. Il faut alors effectuer l'adaptation de la charge au groupement de modules considéré. [20].

On peut les trouver dans les deux cas suivants :

#### I.3.5.1.1 Alimentation directe

Dans ce cas, les fonctions se réduisent à PRODUIRE et UTILISER. L'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de lumière et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée et c'est souvent contraignant puisque par le fait, on ne profite pas toujours des éclaircissements plus élevés : pas de stockage, donc pas de récupération du surplus d'énergie solaire. [6]

### I.3.5.1.1.2 Le pompage au fil du soleil

Il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir. La pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un convertisseur. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable, directement fonction du rayonnement solaire, d'où l'expression « au fil du soleil ».

Quant à l'utilisation, elle pourra se faire à n'importe quel moment, en tirant sur le réservoir (Figure I.27). [6]

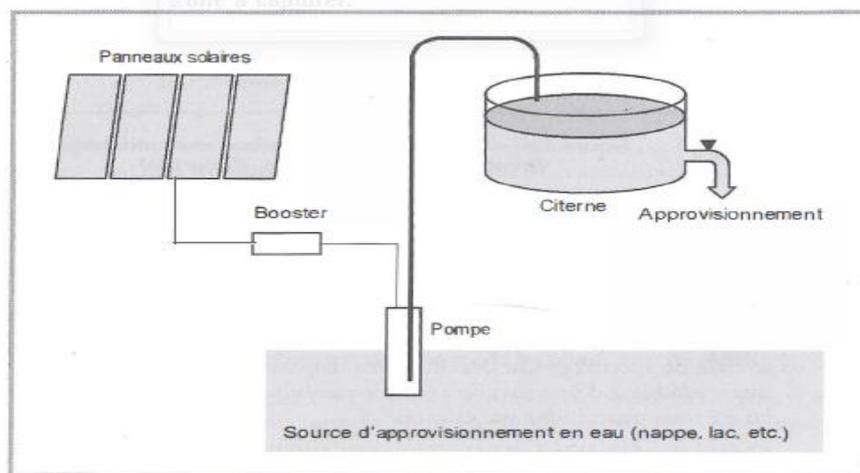


Figure I.27. Système de pompage « au fil du soleil » [6]

### I.3.5.1.2 Systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent Stand-Alone Systems. (Figure I.28).

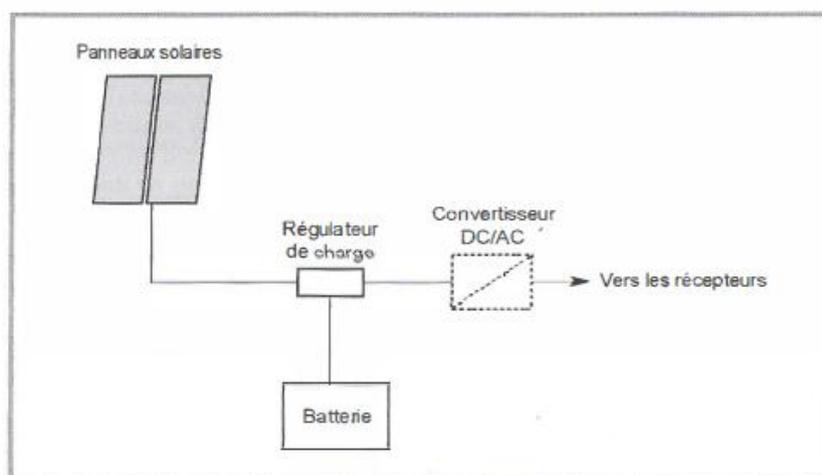
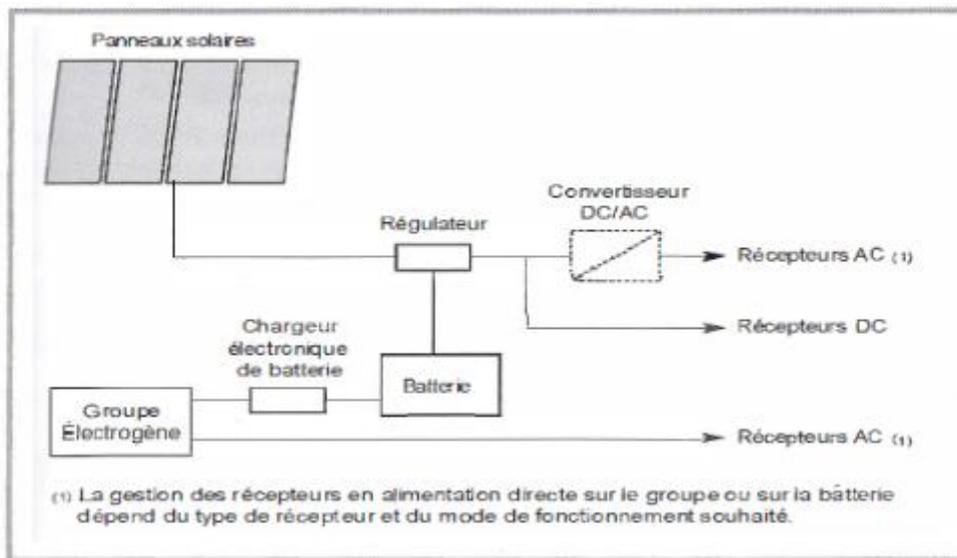


Figure I.28. Système photovoltaïque avec stockage (Avec ou sans conversion d'énergie) [6]

La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de « réservoir » d'énergie en permanence.

Lorsque la batterie est pleine, un régulateur coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge. Ceci a pour conséquence la perte d'une part de l'énergie produite (excédentaire pour l'application) en été notamment sous nos climats. [6]

### I.3.5.1.3 Systèmes autonomes hybrides



**Figure I.29.** Système d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque / groupe électrogène [6]

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité autonome qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi « génératrice ») ou une éolienne,

On retiendra l'éolienne si le site est bien venté, de préférence au cours des saisons où l'ensoleillement est plus bas. Mais quand l'approvisionnement en diesel est possible, le groupe électrogène est plus confortable, car on y a recours à volonté, et il permet en outre de recharger la batterie lorsqu'elle est faible. [6]

### I.3.5.1.4 Systèmes raccordés au réseau

Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin [21]. Un système de compteur double direction comptabilise les kWh extraits et fournis [20].

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur, et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale ». [6]

Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie. Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée. [6]

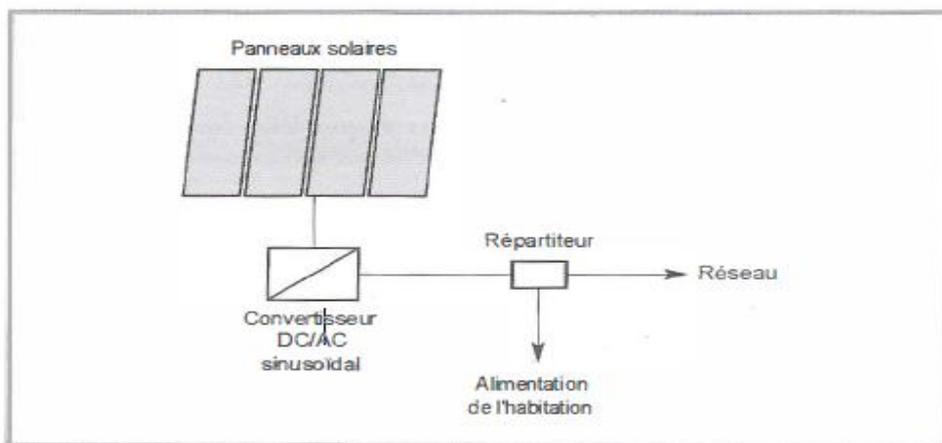


Figure I.30. Système photovoltaïque raccordé au réseau [6]

Cette solution est plus rentable que l'alimentation photovoltaïque purement indépendante, mais malheureusement encore très onéreuse en comparaison d'une alimentation électrique à 100 % sur réseau (Figure I.30). [6]

#### I.4 Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque

Tableau I.1 Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque. [19]

| Avantages   | Inconvénients   |
|---|---|
| Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité. | Le coût initial des systèmes PV est élevé, même si la rentabilité à long terme est assurée. Ils sont donc parfois hors de portée des personnes à faibles revenus. |
| Absence de bruit, de pollution et d'émissions.                                  |   |
| Maintenance réduite (pas de pièces en   | Dans la plupart des installations, l'électricité doit   |

|   |   |
|---|---|
| <p>mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).</p> <p>Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).</p> <p>Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.</p> <p>Sécurité absolue si l'installation est conforme. Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 <math>V_{cc}</math> et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.</p> | <p>être stockée dans des batteries. Or, les batteries :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(i) requièrent une maintenance régulière,</li> <li>(ii) doivent être remplacées périodiquement</li> <li>(iii) peuvent avoir un impact sur la performance du système (lorsque les produits locaux sont de mauvaise qualité ou ne peuvent pas être remplacés)</li> </ul> <p>Les systèmes photovoltaïques de faible puissance requièrent souvent des équipements à courant continu dont l'efficacité énergétique est supérieure à celle des équipements à courant alternatif, mais dont le coût est souvent plus élevé.</p> <p>Les systèmes PV doivent être conçus et installés par des techniciens car toute erreur de conception ou de réalisation conduirait à créer une installation d'un rendement inférieur à celui des solutions alternatives.</p> <p>Les systèmes PV de forte puissance nécessitent souvent un système de secours (éolien ou au fuel) pour les périodes de forte demande ou de fort ennuagement</p> <p>L'électricité solaire photovoltaïque n'est pas économiquement viable pour les charges thermiques de type cuisson, chauffage, ou repassage</p> <p>Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées [22].</p> |
|---|---|

**I.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons tenté de cerner l'énergie photovoltaïque, en abordant son principe de conversion et en présentant l'organe qui l'assure, à savoir la cellule photovoltaïque avec ses principales caractéristiques et ses différentes technologies. Nous avons, également, survolé les types des systèmes photovoltaïques et leurs différentes composantes et nous avons clôturé cette partie avec les avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque.

## *Chapitre II*

---

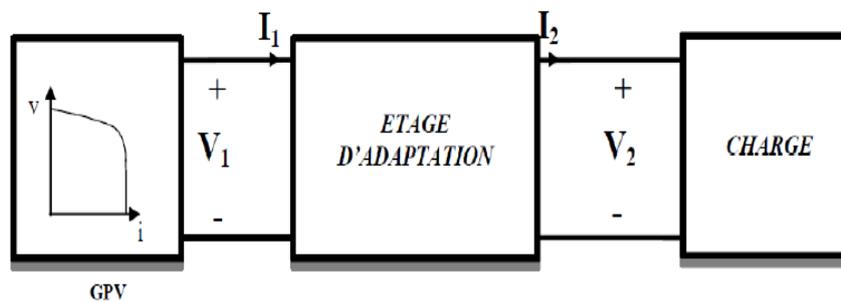
# ***Convertisseurs DC-DC et commandes MPPT***

## II. Chapitre II

### II.1 Introduction

Comme nous l'avons vu, un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation (convertisseur DC-DC) entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (II.1).



**Figure II.1.** Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de  $P_{max}$  du GPV. [5]

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments, en assurant à travers une action de contrôle par une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qu'on détaillera plus loin dans ce chapitre, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{max}$  disponible [5].

### II.2 Les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [23]. Ils sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. [24]

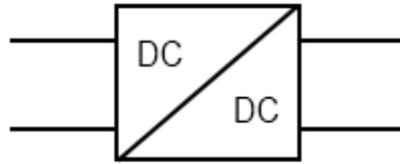


Figure II.2: Symbole d'un convertisseur DC-DC

On présente ici les principaux types de convertisseurs :

- **Convertisseur Cuk**
- **Convertisseur abaisseur (ou Buck)**
- **Convertisseur élévateur (ou boost)**
- **Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-boost) [25]**

### II.2.1 Convertisseur Cuk

Le Cuk ou le hacheur à stockage capacitif, d'après son inventeur l'américain d'origine serbe **Slobodan Ćuk**, est l'un des types les plus populaires des convertisseurs Continu/Continu. La tension de sortie peut être soit inférieure ou supérieure à la tension d'entrée ; Il est capable d'inverser le signal de sortie du positif au négatif.

Le Cuk a une faible perte de commutation et une plus grande efficacité par comparaison avec d'autres convertisseurs DC-DC [26].

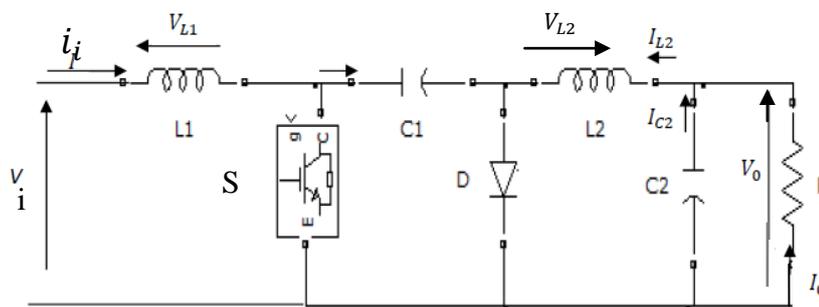


Figure II. 3. Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Cuk

Pour  $t \in [0, DT_s]$ . S est fermé, l'inductance L1 se charge de la source de tension d'entrée et l'inductance L2 est connectée en série avec les condensateurs C1 et C2 [27].

Donc on a :

$$V_{L1}(t) = V_i(t) \quad (\text{II.1})$$

$$V_{L2}(t) = V_o - V_{C1}(t) \quad (\text{II.2})$$

Pour  $t \in [DT, T]$  . S est bloqué et la diode est passante, on a :

$$V_{L1}(t) = V_i(t) - V_{C1}(t) \quad (\text{II.3})$$

$$V_{L2}(t) = V_o \quad (\text{II.4})$$

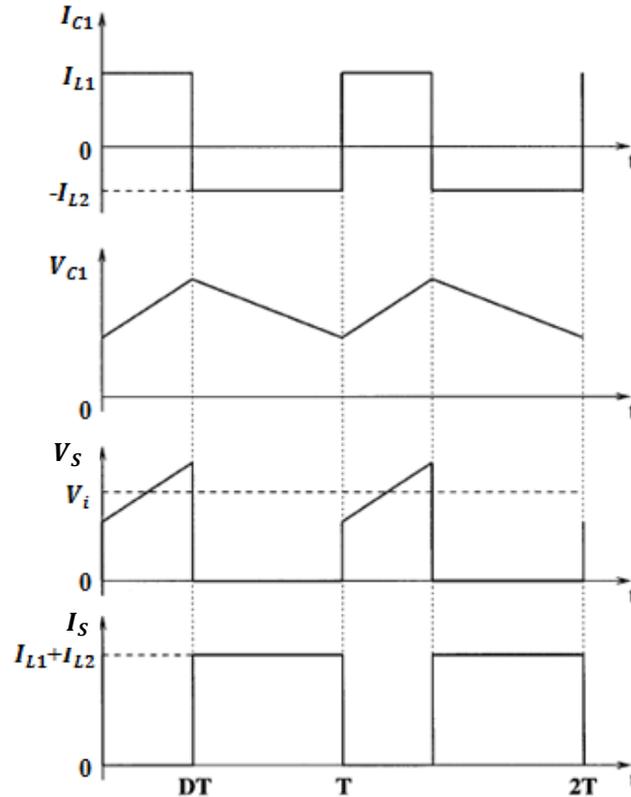
Les valeurs moyennes de  $V_{L1}$  et  $V_{L2}$  sont obtenues par :

$$V_{L1} = V_i \cdot D + (V_i - V_{C1}) \cdot (1 - D) = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$V_{L2} = (V_o - V_{C1}) \cdot D + (1 - D) \cdot V_o = 0 \quad (\text{II.6})$$

Le rapport de conversion  $M(D)$  est calculé comme suit :

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{(1-D)} \quad (\text{II.7})$$



**Figure II.4.** Signaux de tensions et de courants du convertisseur Cuk [28]

### II.2.2 Convertisseur abaisseur (Buck) :

Le convertisseur dévolteur ou abaisseur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série [23]. Son application typique est de convertir sa

tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = \frac{V_o}{V_i}$  change avec le rapport cyclique du commutateur.

Ce hacheur série commande le débit :

- d'un générateur de tension dont la tension est toujours positive,
- dans un récepteur de courant dont le courant ne peut devenir négatif.[29]

La (figure II.5) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [23].

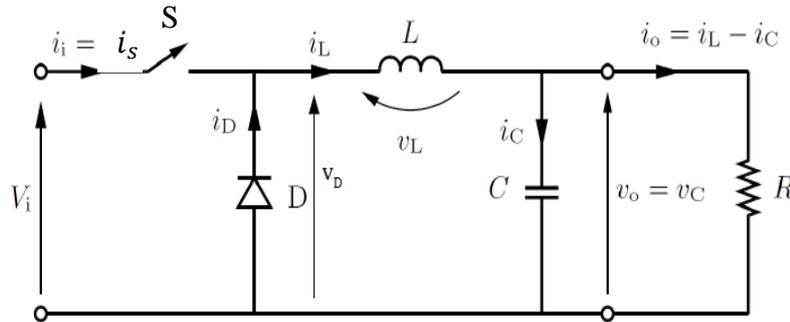


Figure II.5. Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (Buck).[30]

Pendant que l'interrupteur est fermé, la tension sur l'inductance  $V_L = V_i - V_o$ . (II.8)

Pendant que l'interrupteur est ouvert, la tension  $V_L = -V_o$  (II.9)

La variation du courant dans l'inductance dépend de la tension sur celle-ci :

$$V_L = \frac{L di_L}{dt} \quad \text{(II.10). Donc}$$

Le courant alterne entre une évolution avec une pente positive constante  $\frac{(V_i - V_o)}{L}$  (II.11)

et une pente négative constante  $-\frac{V_o}{L}$  (II.12) [41] (Figure II.6).

La tension moyenne sur l'inductance  $V_L$  étant nulle en régime permanent :

$$D(V_i - V_o) - (1 - D)V_o = 0 \quad \text{(II.12)}$$

Soit

$$V_o = DV_i \quad \text{(II.13)}$$

La tension de sortie  $V_o$  a donc une valeur inférieure ou égale à  $V_i$  puisque  $D$  est compris entre 0 et 1.[41]

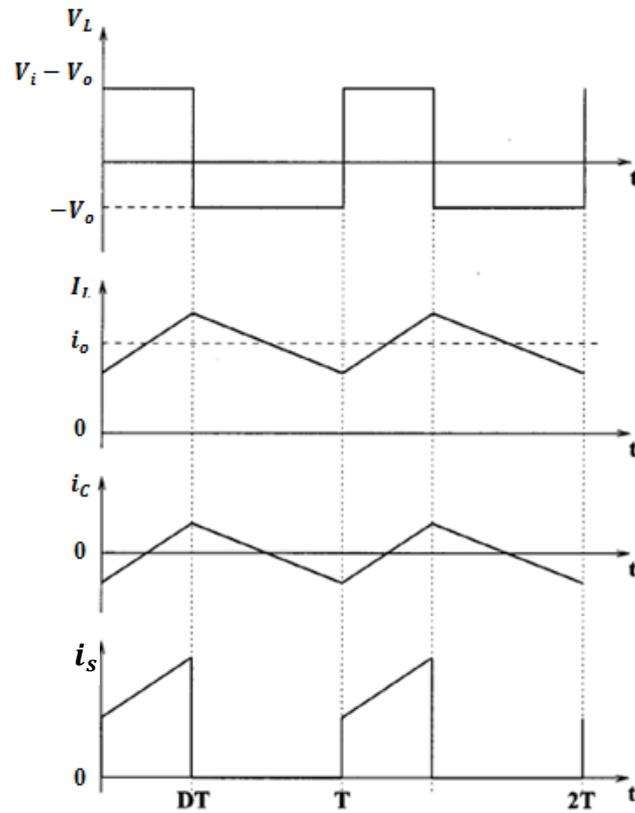


Figure II.6. Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck [28]

### II.2.3 Convertisseur élévateur (Boost)

Celui-ci est un convertisseur élévateur ou survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [23].

Ce hacheur commande le débit

- d'un générateur de courant dont le courant  $i$  est toujours positif,
- dans un récepteur de tension dont la tension  $u_$  ne peut devenir négative.[29]

Son schéma de principe de base est celui de la (figure II.7) [23].

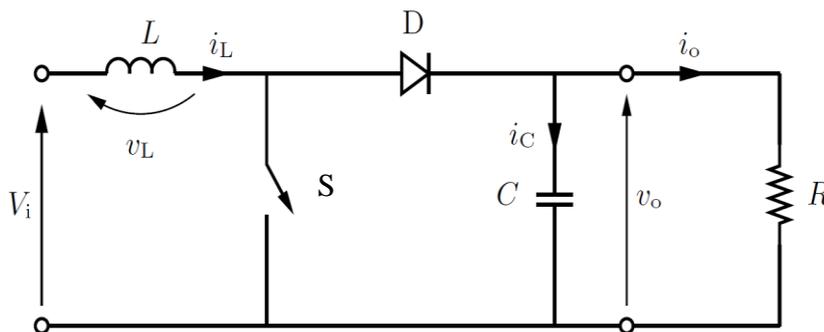


Figure II.7. : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur (Boost) [30]

Pendant que l'interrupteur est fermé, la tension sur l'inductance  $V_L = V_i$ . (II.14)

et le courant  $i_L$  augmente avec une pente égale à  $\frac{V_i}{L}$ . (II.15)

Pendant que l'interrupteur est ouvert, la tension sur l'inductance  $V_L = V_i - V_o$  (II.16)

et le courant diminue avec une pente  $\frac{(V_i - V_o)}{L} < 0$  (II.17) (Figure II.8).

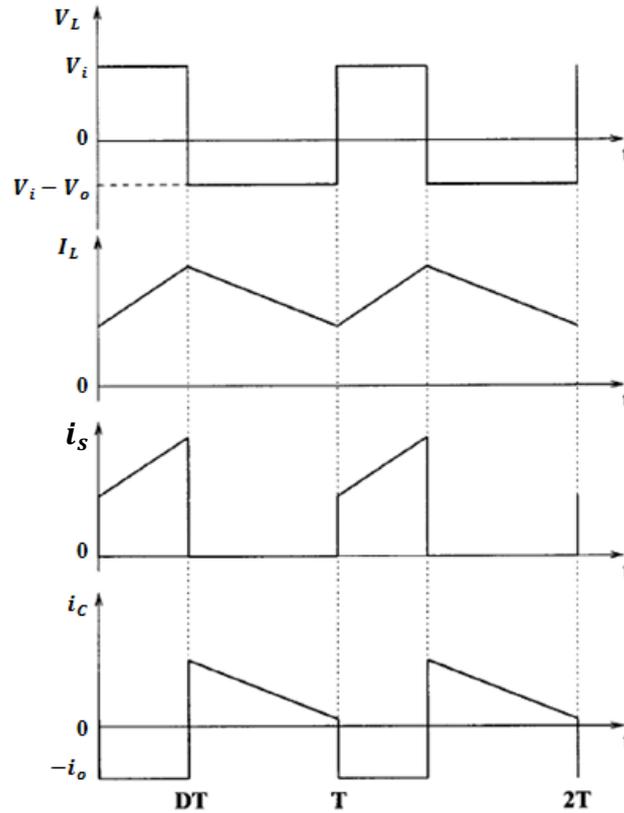


Figure II.8. Signaux de tensions et de courants du convertisseur Boost [28]

La tension moyenne sur l'inductance  $V_L$  étant nulle en régime permanent :

$$DV_i + (1 - D)(V_i - V_o) = 0 \quad (II.18)$$

Soit

$$V_o = \frac{1}{(1-D)} V_i \quad (II.19)$$

La tension de sortie  $V_o$  a donc une valeur supérieure ou égale à  $V_i$  puisque  $D$  est compris entre 0 et 1.[30]

#### II.2.4 Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost)

Le convertisseur élévateur-abaisseur ou dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe

quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, son schéma de base est illustré par la (figure II.9) [23] :

Il est important de remarquer que la tension de sortie  $V_o$  est désormais orientée dans l'autre sens [30]

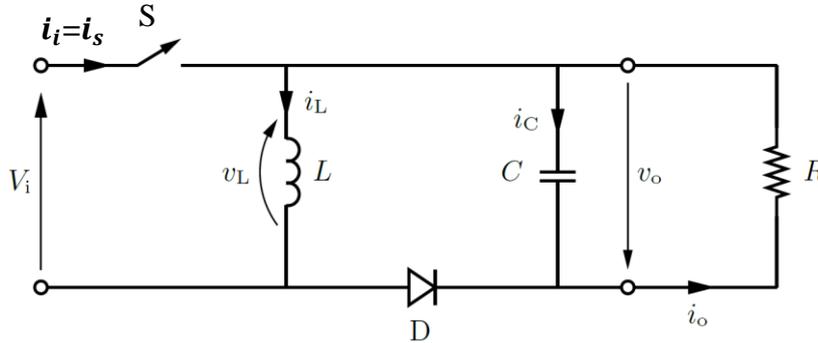


Figure II.9. : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur [30]

Pendant que l'interrupteur est fermé, la tension aux bornes de l'inductance  $V_L = V_i$  (II.20)

et le courant augmente avec une pente  $\frac{V_i}{L}$ . (II.21)

Pendant que l'interrupteur est ouvert, la tension aux bornes de l'inductance

$$V_L = -V_o \quad (II.22)$$

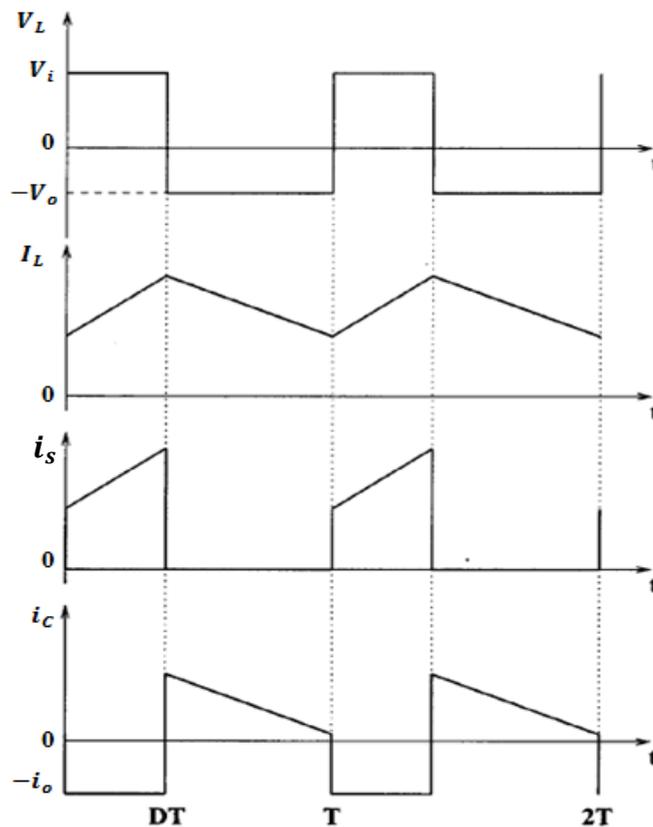


Figure II.10. Signaux de tensions et de courants du convertisseur Buck-Boost [28]

et le courant diminue avec une pente constante  $-\frac{V_o}{L}$  (II.23) (Figure II.10).

La tension moyenne sur l'inductance  $V_L$  étant nulle en régime permanent :

$$DV_i - (1 - D)V_o = 0 \quad (\text{II.24})$$

Soit

$$V_o = \frac{D}{(1-D)} V_i \quad (\text{II.25})$$

La tension de sortie  $V_o$  a donc une valeur supérieure, égale ou inférieure à  $V_i$  en fonction du rapport cyclique  $D$  [30]

### II.3 La commande MPPT

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $D$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. [2]

Plusieurs algorithmes ont été utilisés dans la littérature à savoir : la méthode de la conductance incrémentale, 'I.C.', la méthode de la logique floue (Fuzzy Logic Control), celle à base des réseaux de neurones (Neural Network) et la méthode perturbation et observation (P&O) traditionnelle qui présente des problèmes de précision sur la régulation autour du PPM [31].

#### II.3.1 Les Algorithmes MPPT

##### II.3.1.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension  $V_{PV}$ , ce qui engendre une variation de la puissance. La figure II.11 montre que si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite. [32]

De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM. [32]

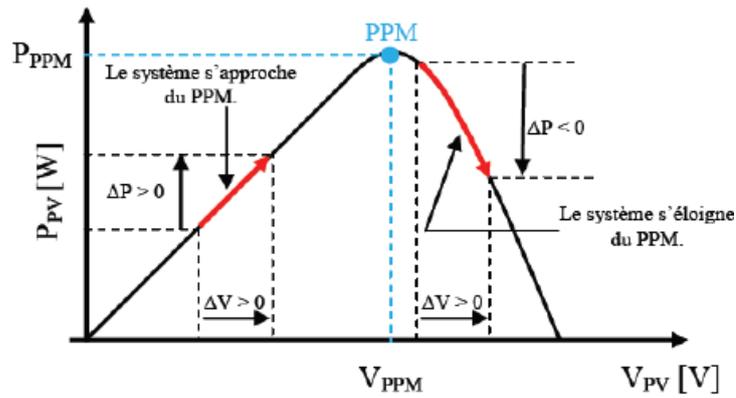


Figure II.11. Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque [32]

La figure II.12 illustre l'organigramme de la commande MPPT de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant. [32]

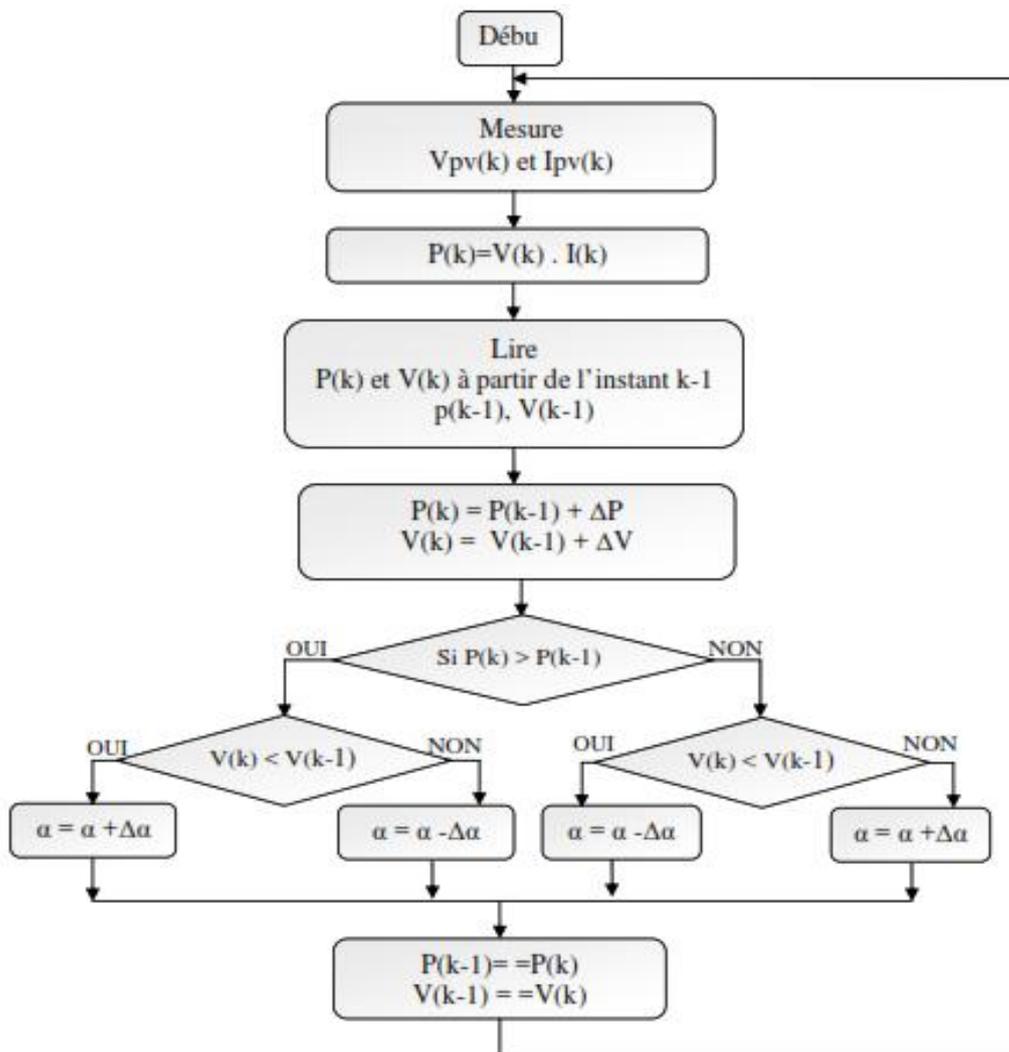


Figure II.12. Algorithme MPPT basé sur la commande P&O. [33]

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. [32]

En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM. [32]

### II.3.1.2 Conductance Incrémentale (Inc Cond, Incremental Conductance)

L'algorithme d'incrémental de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si  $\frac{dp}{dV}$  est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure 6 prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant:

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{pour} \quad V = V_{mp} \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{dp}{dt} > 0 \quad \text{pour} \quad V < V_{mp} \quad (\text{II.27})$$

$$\frac{dp}{dt} < 0 \quad \text{pour} \quad V > V_{mp} \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Sachant que } P = I \times V \quad (\text{II.29})$$

La dérivée du produit par rapport à la tension  $V$  donne la relation suivante:

$$\frac{dp}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I \times \frac{dV}{dI} + V \times \frac{dI}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.30})$$

Ce qui revient à écrire:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (\text{II.31})$$

Les changements par accroissement nécessaires  $dV$  et  $dI$  sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour  $V$  et  $I$  à celles mesurées durant le cycle précédent:

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \quad (\text{II.32})$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \quad (\text{II.33})$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions suivantes:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \tag{II.34}$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \tag{II.35}$$

Si la relation (II.34) est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension  $V(k)$  n'est nécessaire. Si la relation (II.34) est fautive, selon que  $V(k)$  est supérieure ou inférieure à  $V_{mp}$ , la tension  $V(k)$  est ajustée en conséquence.

Si le système fonctionnait au MPP pendant le cycle précédent, le changement par accroissement de la tension de fonctionnement sera zéro ( $dV(k) = 0$ ). (II.36)

Ceci mènerait à une division par l'erreur zéro. Si  $dI = 0$  (II.37)

L'ajustement de la tension du système est évité.

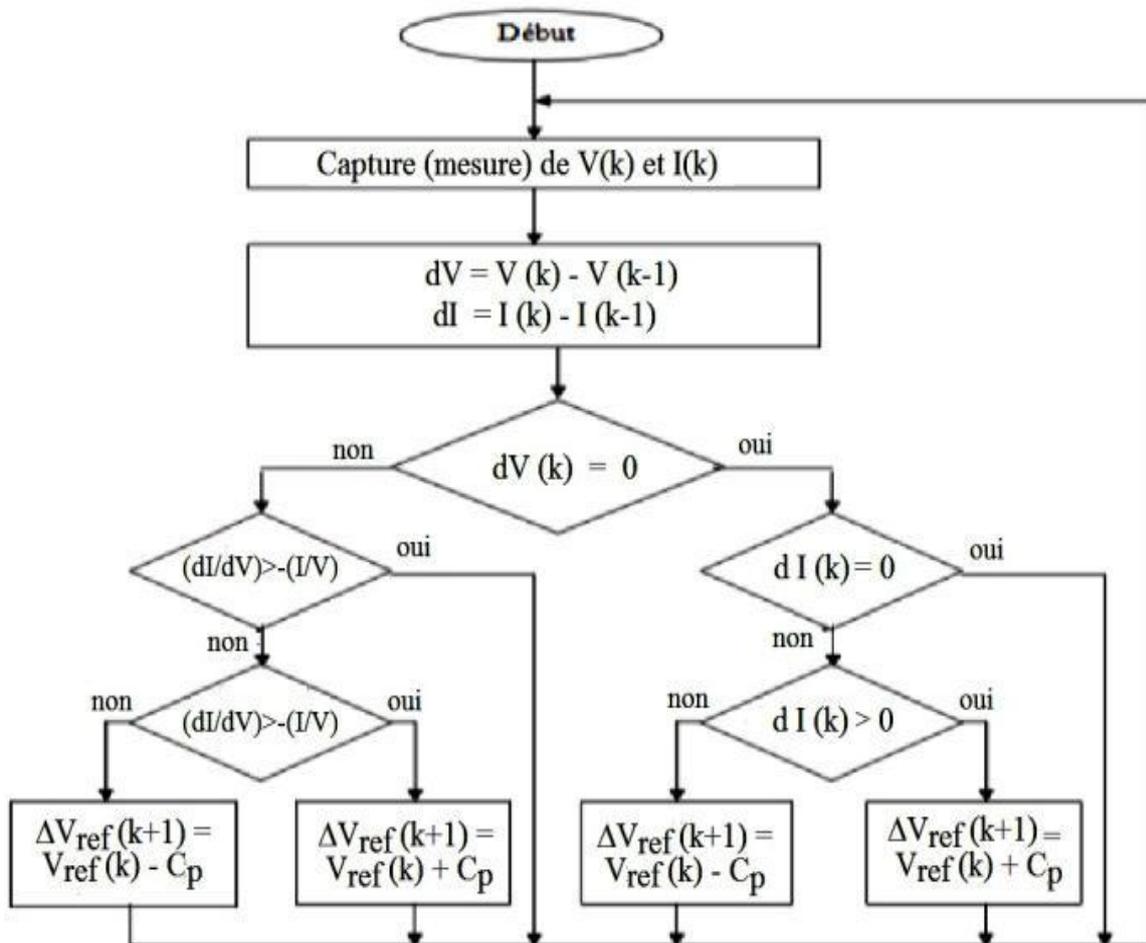


Figure II.13 Organigramme de l'algorithme MPPT de la conductance incrémentale [25]

Si  $dI \neq 0$ , les équations (II.27) et (II.28) sont employées pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de  $V_{mp}$  et un ajustement correspondant à la tension de fonctionnement sera réalisé en conséquence. [25]

### II.3.1.3 Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension $V_{oc}$

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{mp} = K \times V_{oc} \quad (\text{II.38})$$

Où  $k$  est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

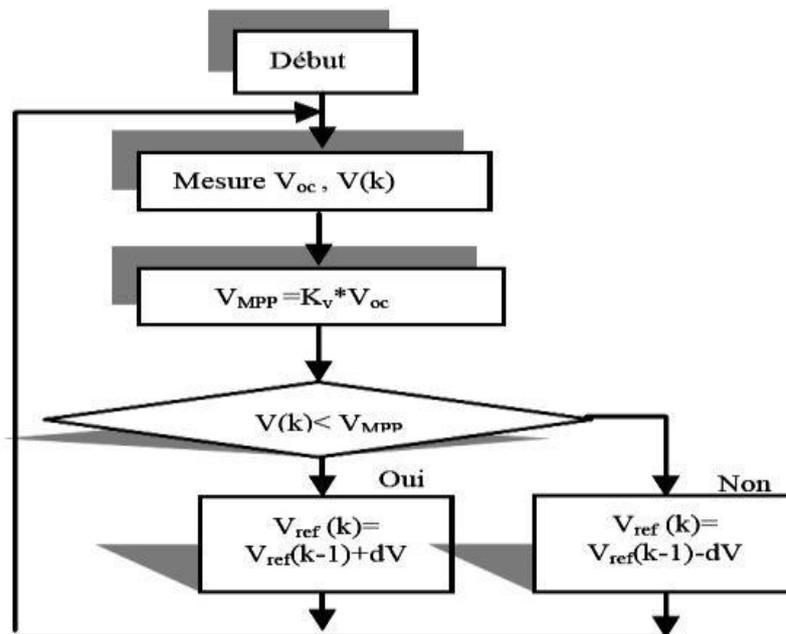


Figure II.14. Organigramme de l'algorithme FCO

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée.

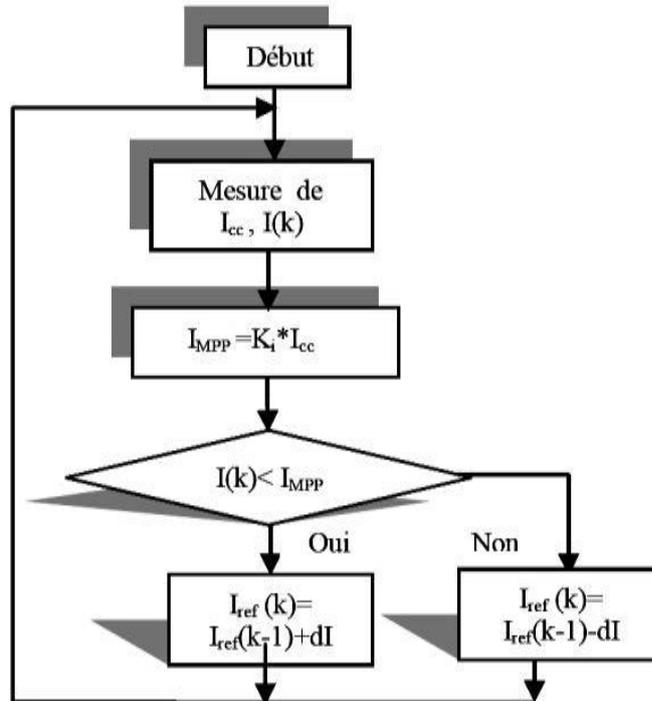
Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale. [2]

### II.3.1.4 Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant $I_{cc}$

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante:

$$I_{mp} = k \times I_{cc} \quad (\text{II.39})$$

Où  $k$  est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.



**Figure. II.15.** Organigramme de l'algorithme FCC

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale. [2]

### II.3.1.5 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels

Ces dernières années, la technique de réseaux de neurones est de plus en plus utilisée dans divers domaines d'application, permettant de résoudre des problèmes complexes. Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches peut varier selon le degré de précision souhaitée de la commande.

Pour une commande MPPT, les variables d'entrées sont les paramètres caractéristiques d'un GPV associées à des données atmosphériques, la sortie est un signal représentant la valeur du rapport cyclique permettant de commander le convertisseur statique pour fonctionner au PPM.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un entretien et une maintenance régulière. En effet, pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau, l'apprentissage doit être révisé régulièrement. [32]

### II.3.1.6 La Commande MPPT Floue

Aujourd'hui, la logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité. L'opinion courante est qu'il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage et de prise de décision provenant du Japon. Cependant, cette argumentation n'est pas du tout correct. [34]

En effet, les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude.

Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous-ensemble flou (fuzzy en anglais) soit proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équations différentielles.

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Grâce au chercheur japonais M. Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. [35]

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lot\_ Zadeh en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques.

En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. [36]

La commande floue, quant à elle, est un outil bien adapté à la modélisation des phénomènes décrits par des prédicats vagues ou par des connaissances imprécises. [35]

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale.

Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système [2]. Par contre elle a besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur la connaissance d'un opérateur qualifié

manipulant le système [37]. En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. [2]

### II.3.1.6.1 Structure d'une commande floue

La structure conventionnelle d'une commande floue est présentée figure II.16. Elle est composée de quatre blocs distincts : [35]

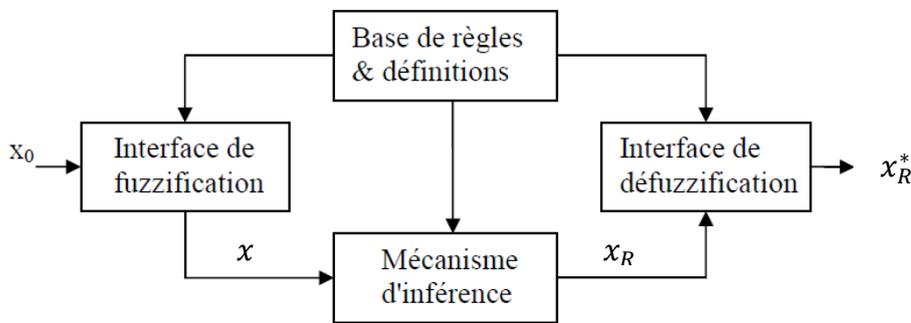


Figure II.16. Structure d'une commande floue [35]

#### II.3.1.6.1.1 Base de règles et définitions

On regroupe dans ce bloc l'ensemble des définitions utilisées dans la commande floue ainsi que la base de règles, transcription sous forme de règles « SI...ALORS » de la stratégie de commande de l'expert. [35]

#### II.3.1.6.1.2 Interface de fuzzification

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme : Quelque, beaucoup, souvent, Chaud, froid, rapide, lent.....etc

Les expressions de ce genre forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue. Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance. [34]

La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables. Dans ce contexte, on attribue à chaque valeur de la variable linguistique des fonctions d'appartenance  $\mu$ , dont la valeur varie entre 0 et 1.

On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent alors être traitées par les inférences.

[34]

En toute généralité, la fonction d'appartenance est désignée par  $\mu_E(x)$ . L'argument  $x$  se rapporte à la variable linguistique, tandis que l'indice  $E$  indique l'ensemble concerné [34]. Elles admettent comme argument la position de  $x$  dans l'univers de discours, et comme sortie le degré d'appartenance de  $x$  à la situation décrite par la fonction.

L'univers de discours d'une variable couvrira l'ensemble des valeurs prises par cette variable (fig.II.17, par exemple). [35]

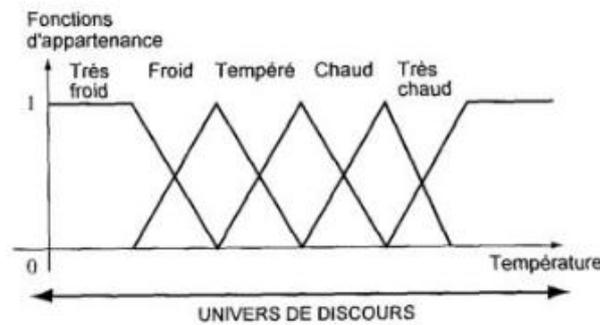


Figure II.17. Univers de discours de la variable température.

La figure II.18 donne quelques exemples de fonctions d'appartenance. [38]

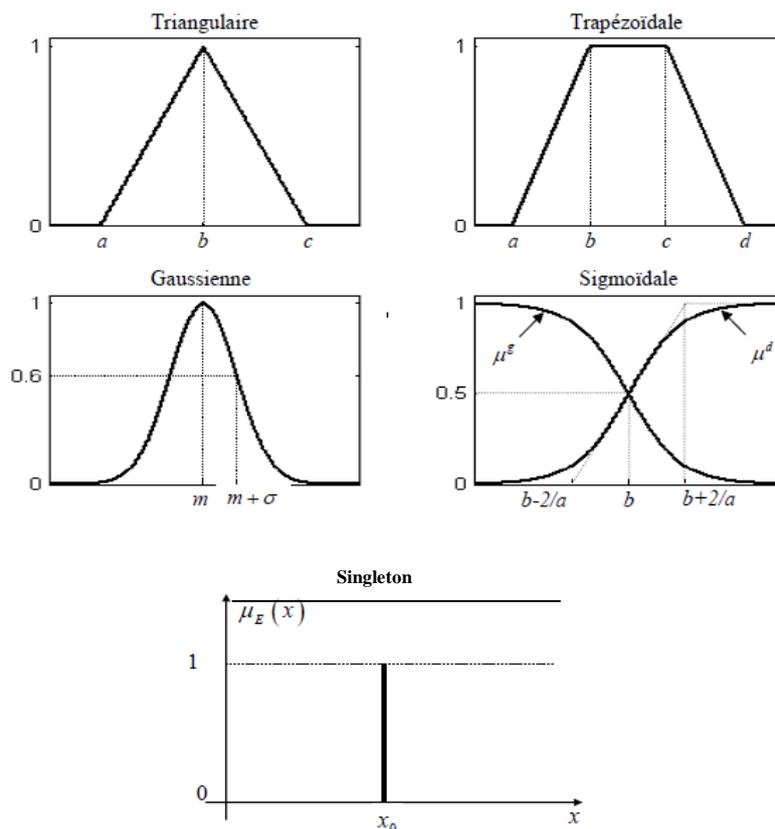
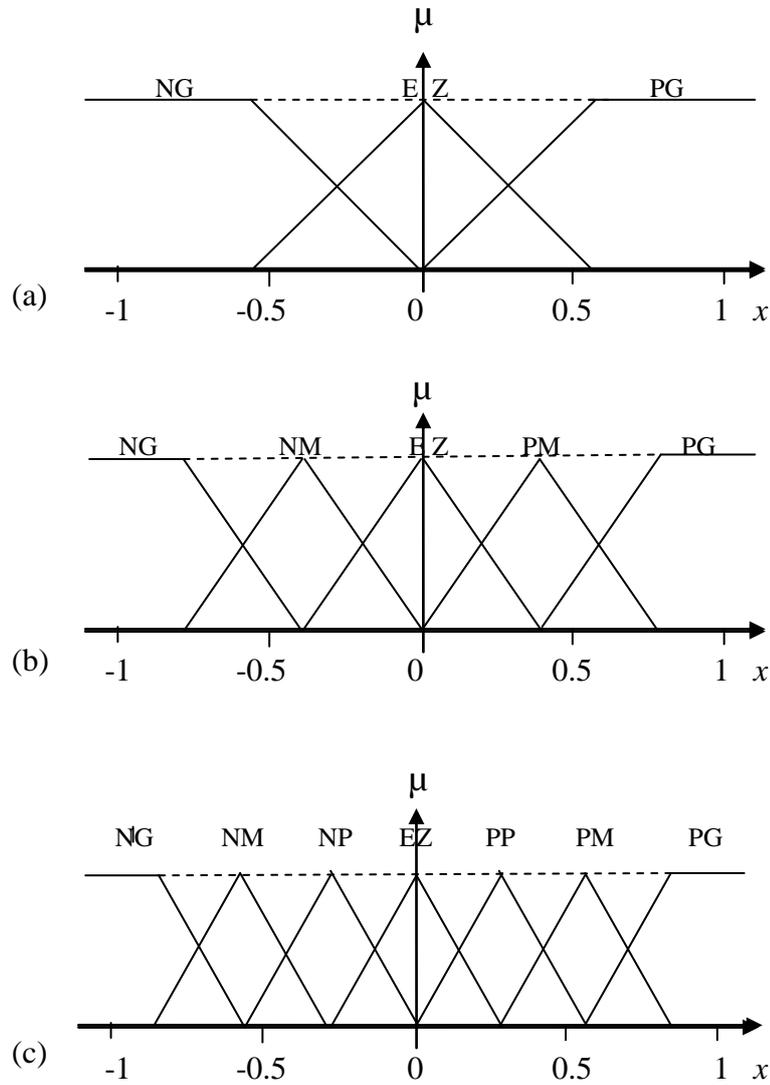


Figure II.18. Fonctions d'appartenance [38]

En général on introduit pour une variable  $x$  trois, cinq ou sept ensembles représentés par des fonctions d'appartenance, comme le montre la figure II.19



**Figure II.19.** Fuzzification avec : (a) trois ; (b) cinq ; (c) sept fonctions d'appartenance.

Les différents ensembles sont caractérisés par des désignations standard ; la signification des symboles est indiquée au tableau II.1 [34]

| Symbole | Signification |
|---------|---------------|
| NG      | négatif grand |
| NM      | négatif moyen |
| NP      | négatif petit |
| EZ      | environ zéro  |
| PP      | positif petit |
| PM      | positif moyen |
| PG      | positif grand |

**Tableau II.1** Désignation standard des ensembles flous

Pour chacun de ces prédicats, on pourra donner une fonction d'appartenance. Le nombre de prédicats dépend essentiellement de la manière dont l'expert peut décrire le process et de la précision souhaitée même

Par exemple, en commande floue classique, 5 prédicats est un bon compromis ; parfois 3 peuvent suffire (dans les cas extrêmes, on peut aller jusqu'à 7).

Les trois prédicats « positif », « négatif » et « proche de zéro » servent à la régulation (quand l'erreur consigne-mesure est faible) ; les autres prédicats servent à la poursuite (ralliement de la trajectoire). [35]

#### II.3.1.6.1.3 Mécanisme d'inférence

Le mécanisme d'inférence utilise la base de règles ainsi que les sous ensembles flous d'entrée pour définir les sous-ensembles flous correspondant à la commande du système.

#### Les méthodes d'inférence

Pour le réglage par logique floue, on utilise en général une des méthodes suivantes :

- **Méthode d'inférence max-min**
- **Méthode d'inférence max-prod**
- **Méthode d'inférence somme-prod**

Elles permettent un traitement numérique des inférences. [34]

- **Méthode d'inférence max-min**

La méthode d'inférence max-min réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum.

La conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie  $x_R$  par l'opérateur ET réalisée dans le cas présent par la formation du minimum.

Enfin, l'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum. [34]

- **Méthode d'inférence max-prod**

La méthode d'inférence max-prod réalise, en général, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation du maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum.

Par contre la conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, qui lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie  $x_R$  par l'opérateur ET, est réalisée cette fois-ci par la formation du produit. L'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé, de nouveau, par la formation du maximum. [34]

- **Méthode d'inférence somme-prod**

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la méthode d'inférence somme-prod réalise au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit.

La conclusion de chaque règle, précédée par ALORS, liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie  $x_R$  par l'opérateur ET, est réalisée par la formation du produit. L'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé par la formation de la somme, donc de la valeur moyenne. [34]

#### II.3.1.6.1.4 Interface de défuzzification

La commande nécessitant un signal précis, il faudrait donc transformer la fonction d'appartenance résultante obtenue à la sortie du moteur d'inférence en une valeur précise. Cette opération est appelée défuzzification. [38]

#### Les méthodes de défuzzification

Parmi les méthodes publiées dans la littérature, on peut citer [38] :

- **Le centre de gravité**

- La méthode de la hauteur
- La méthode de la hauteur modifiée
- La méthode de la valeur maximum
- La méthode de la moyenne des centres

Notre travail traitera de la méthode de défuzzification la plus utilisée, qui est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}(x_R)$ . Dans ce contexte, il suffit de calculer l'abscisse  $x_R^*$  à l'aide de la relation générale

$$x_R^* = \frac{\int_{-1}^1 x_R \mu_{RES}(x_R) dx_R}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(x_R) dx_R} \quad (\text{II.40})$$

L'abscisse  $x_R^*$  du centre de gravité forme ainsi le signal de sortie qui, en général, doit être soumis à un traitement [34].

La détermination de  $x_R^*$  nécessite une envergure de calcul assez importante, surtout pour l'exécution en temps réel [34].

#### II.3.1.6.2 Avantages et désavantages du réglage par logique floue

Evidemment, le réglage par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont [34]:

- La non-nécessité d'une modélisation ;
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- La maîtrise de systèmes à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser) ;
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire) ;
- L'emploi possible aussi pour des processus rapides (grâce à des processeurs dédiés) ;
- La disponibilité de systèmes de développement efficaces, soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle), soit pour circuits intégrés (processeurs dédiés, fuzzy processors, solution matérielle).

Par contre, les désavantages sont [34]:

- Le manque de directives précises d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification et de la défuzzification) ;

- L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur souvent difficile) ;
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable) ;
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire ;
- La précision de réglage souvent peu élevée
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possibles).

En tout cas, on peut affirmer que le réglage par logique floue présente une alternative valable aux réglages conventionnels. Cela est confirmé non seulement par un fort développement dans beaucoup de domaines d'application, mais aussi par des travaux de recherche sur le plan théorique [34].

#### **II.4 Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les types de base des hacheurs pouvant être utilisés dans l'étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge et dans la deuxième partie, nous avons, d'abord, étalé les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale MPPT qui régissent le fonctionnement de ces hacheurs et par la suite, nous avons parlé des concepts de base de la logique floue et de la commande floue.

## *Chapitre III*

---

### ***Modélisation, simulation et résultats***

### III. Chapitre III

#### III.1 Introduction

Pour extraire toute la puissance disponible sur le panneau photovoltaïque, il faut, comme mentionné préalablement, utiliser un étage d'adaptation commandé par une commande de maximisation de la puissance photovoltaïque générée. Et c'est dans cette optique que va l'intérêt de ce travail qui porte sur une étude comparative de deux méthodes très utilisées à savoir, la méthode P&O et celle basée sur la logique floue, et ce afin d'en tirer la plus fiable et la plus robuste.

Ce chapitre débute par une partie modélisant tous les composants du système photovoltaïque et se termine par la partie simulation et discussion des résultats.

#### III.2 Modélisation des composants du système photovoltaïque

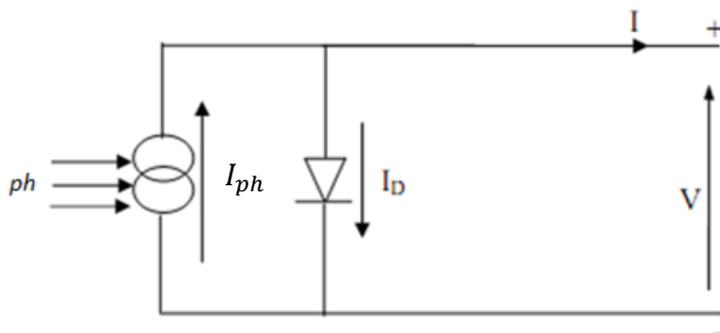
##### III.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

De nombreux travaux ont développé plusieurs modèles pouvant être utilisés pour décrire le comportement du générateur photovoltaïque. L'utilisation de ces modèles permet d'obtenir la caractéristique courant-tension ( $I, V$ ) du module photovoltaïque pour l'analyse et l'évaluation des performances du système photovoltaïque.

Les principaux modèles explicités dans ce travail sont basés sur ces modèles de cellules : le modèle idéal, le modèle réel à une seule diode et le modèle réel à deux diodes.

##### III.2.1.1 Cas idéal :

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire idéale est donné par la figure III.1 :



**Figure III.1.** Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{III.1})$$

Tels que :

$I$  : Courant fourni par la cellule (A).

$I_{ph}$  : Photocourant créé par la cellule (A)

$I_D$  : Courant de diode (A)

Avec :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{III.2})$$

$$V_T = \frac{nKT}{q} \quad (\text{III.3})$$

Tels que :

$V$  : Tension fournie par la cellule (V).

$I_0$  : Courant de saturation de la cellule (A)

$V_T$  : Tension thermique de la cellule (V)

$n$  : Facteur d'idéalité

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.3854 \cdot 10^{-23}$  J/K)

$T$  : Température de la jonction p-n de la cellule (K)

$q$  : Charge élémentaire d'électron ( $1.6021 \cdot 10^{-19}$  C)

L'équation du courant devient :

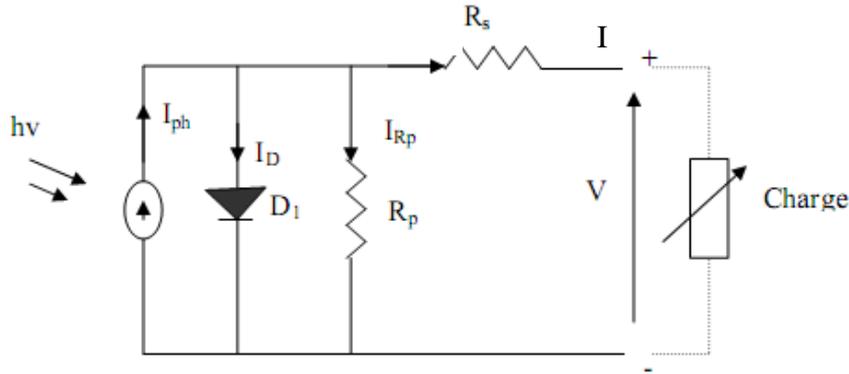
$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{III.4})$$

### III.2.1.2 Cas réel :

Le modèle électrique d'une cellule solaire, dans ce cas, consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle, une résistance série  $R_S$  et une résistance parallèle  $R_P$ .

#### III.2.1.2.1 Le modèle à une seule diode :

Ce modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Son circuit électrique équivalent est donné par la figure III.2.



**Figure III.2.** Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une seule diode

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (III.5) :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (III.5)$$

Tels que :

$I_{Rp}$  : Courant passant dans la résistance parallèle

Le photocourant dépend fortement de l'insolation et de la température d'où :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (III.6)$$

Avec :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V+R_S I}{V_T}} - 1 \right) \quad (III.7)$$

$$I_0 = (I_{cc} - I_m) \left( e^{\frac{-(V_m+R_S I_m)}{V_T}} \right) \quad (III.8)$$

$$I_{Rp} = \frac{V+R_S I}{R_p} \quad (III.9)$$

$V_T$  : est donné par la relation précédente (III.3)

Tels que :

$I_{cc}$  : Le courant de court circuit

$K_i$  : Le courant de court-circuit de la cellule à  $T=25^\circ\text{C}$

$T$  : Température de la cellule (K)

$T_{ref}$  : Température de référence (298 K).

$G$  : Eclairement absorbé par la cellule ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$G_{ref}$  : Eclairage de référence (1000 W/m<sup>2</sup>)

$I_m$  : Courant nominal (A)

$V_m$  : Tension nominale (V)

$V_{oc}$  : Tension de circuit ouvert (V)

$R_p$  : Résistance shunt, représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule ( $\Omega$ ).

$R_s$  : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi que les résistances ohmique et de contact au niveau des connexions des cellules ( $\Omega$ ).

L'équation du courant devient :

$$I = \left[ I_{cc} + K_i(T - T_{ref}) \right] \frac{G}{G_{ref}} - (I_{cc} - I_m) \left( e^{\frac{-q(V_m + R_s I)}{nKT}} \right) \left( e^{\frac{q(V + R_s I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (\text{III.10})$$

Et c'est ce modèle qu'on a utilisé dans la simulation du générateur photovoltaïque de notre travail avec les paramètres suivants :

$$I_m = 23.25 \text{ A}$$

$$V_m = 54.2 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 25.44 \text{ A}$$

$$V_{oc} = 66 \text{ V}$$

$$R_s = 2.2 \Omega$$

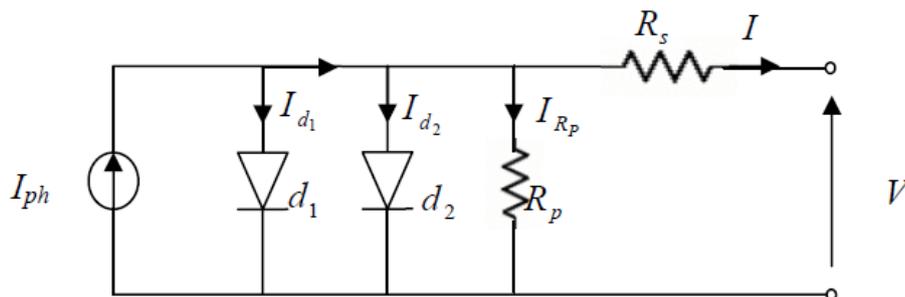
$$K_i = 0.015 \text{ A}$$

Avec  $R_p$  considérée comme étant infinie

### III.2.1.2.2 Le modèle à deux diodes

Ce modèle se distingue du précédent par le fait qu'il comporte deux diodes. L'une modélise les pertes par diffusion dans la jonction, tandis que l'autre modélise les pertes par recombinaison.

Le circuit électrique équivalent est donné par la figure ci-dessous :



**Figure III.3.** Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.

L'équation caractéristique de ce modèle est la suivante :

$$I = I_{Ph} - I_{d_1} - I_{d_2} - I_{Rp} \quad (\text{III.11})$$

Tels que :

$I_{d_1}$  : Courant de la première diode (A)

$I_{d_2}$  : Courant de la deuxième diode (A)

Avec :

$$I_{d_1} = I_{01} \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{n_1 K T}} - 1 \right) \quad (\text{III.12})$$

$$I_{d_2} = I_{02} \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{n_2 K T}} - 1 \right) \quad (\text{III.13})$$

$V_T$ ,  $I_{Ph}$  et  $I_{Rp}$  sont donnés précédemment respectivement par les relations (III.3), (III.6) et (III.9)

Tels que :

$I_{01}$  : Courant de saturation de la première diode 1 (A);

$I_{02}$  : Courant de saturation de la seconde diode 2 (A);

$n_1$  : Facteur d'idéalité de la première diode

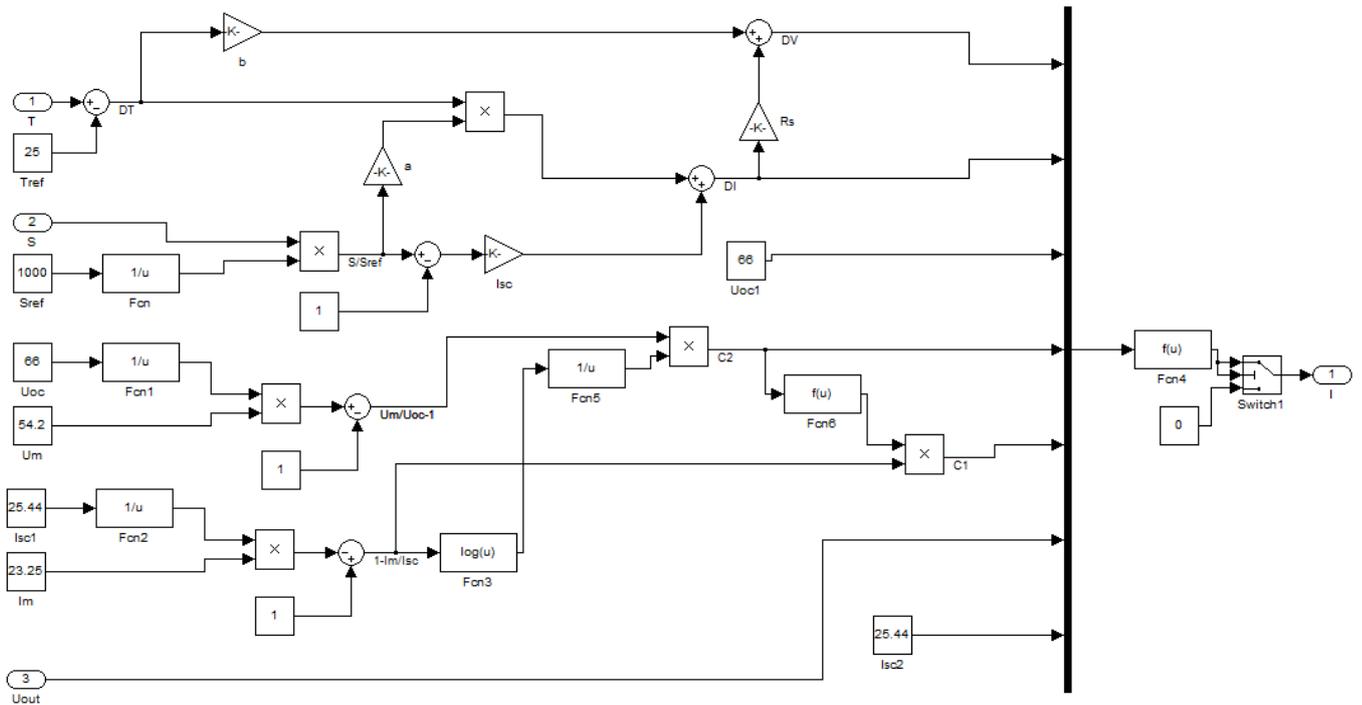
$n_1$  : Facteur d'idéalité de la première diode

L'équation du courant devient :

$$I = \left[ I_{cc} + K_i (T - T_{ref}) \right] \frac{G}{G_{ref}} - I_{01} \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{n_1 K T}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{n_2 K T}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_p} \quad (\text{III.14})$$

**Le modèle du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink :**

Son modèle sous Matlab/Simulink est représenté par la figure III .4.

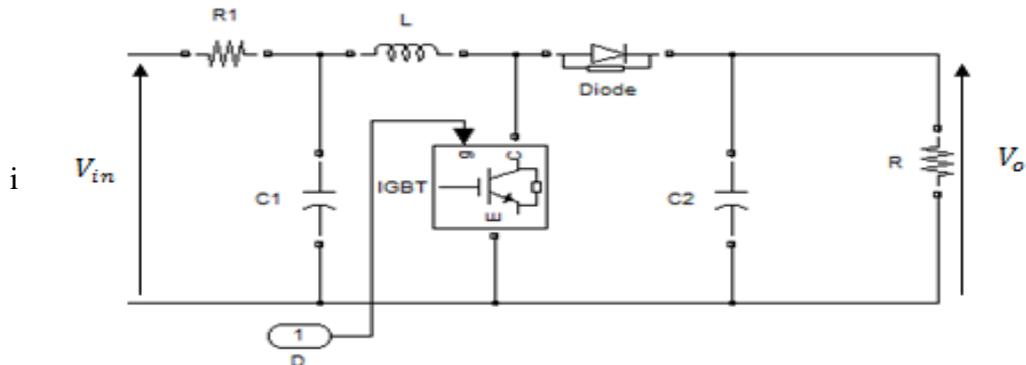


**Figure III .4.**Schéma block du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink

**III.2.2 Modélisation du convertisseur Boost**

Le circuit électrique équivalent du convertisseur élévateur (boost), mentionné précédemment au chapitre II, dont la fonction est de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure avec un rapport de conversion  $V_o = \frac{V_i}{(1-D)}$  (II. 19), est représenté par la figure III.5.

L'utilisation de la résistance et de la capacitance



**Figure III.5.** Circuit électrique équivalent du convertisseur boost

Les paramètres de ce convertisseur sont :

$$R_1 = 0.1 \Omega$$

$$R_2 = 40 \Omega$$

$$C_1 = 2 * 10^{-3} F$$

$$C_2 = 2 * 10^{-3} F$$

$$L = 0.02 H$$

### III.2.3 Modélisation de la commande MPPT basée sur l’algorithme P&O

Le principe de fonctionnement de la commande P&O est basé sur le calcul du produit  $dP*dV$ . S’il est supérieur ou égal à zéro, le rapport cyclique  $D$  est incrémenté d’une variation constante  $dD = 0.001$  et il est, en revanche, décrémenté de la même variation dans le cas contraire.

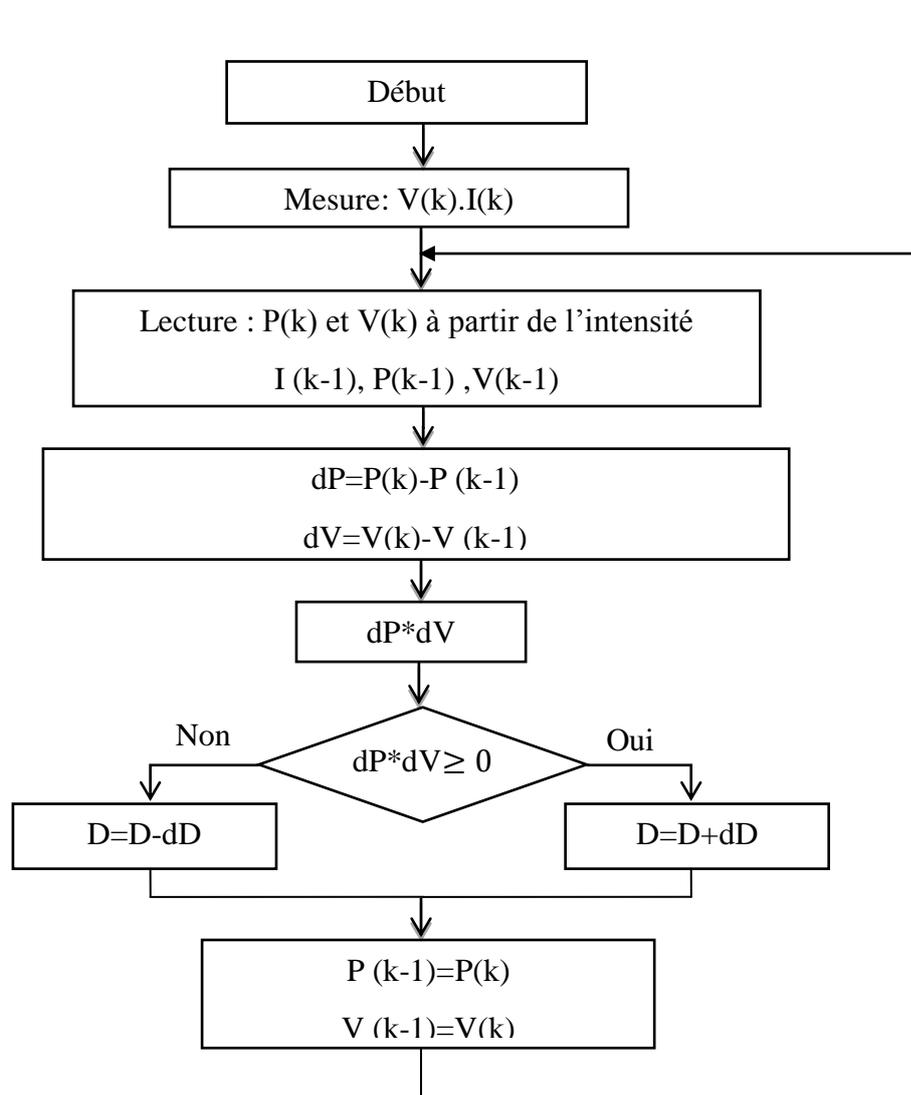
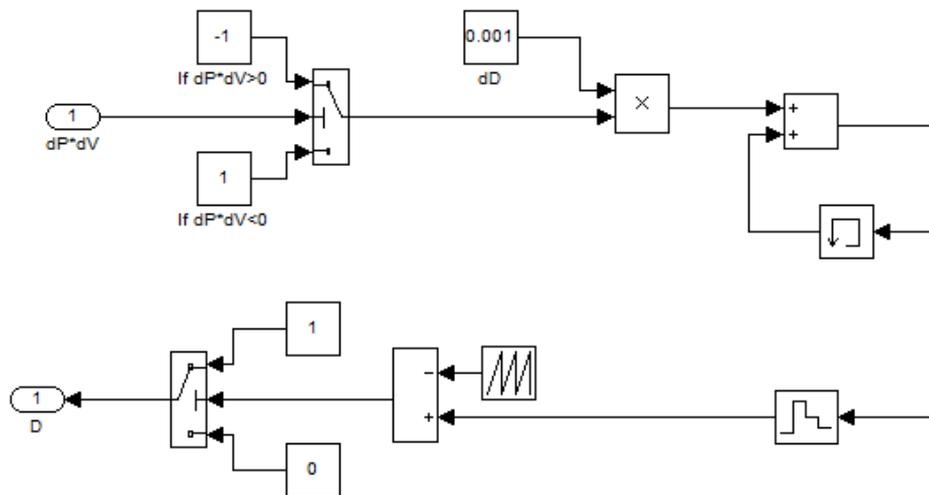


Figure III.6. Organigramme de la commande P&O utilisée

**Le modèle de la commande P&O sous Matlab/Simulink :**

Le modèle de la commande P&O sous Matlab/Simulink est représenté par la figure III.7.



**Figure III.7.** Schéma block de la commande P&O sous Matlab/Simulink

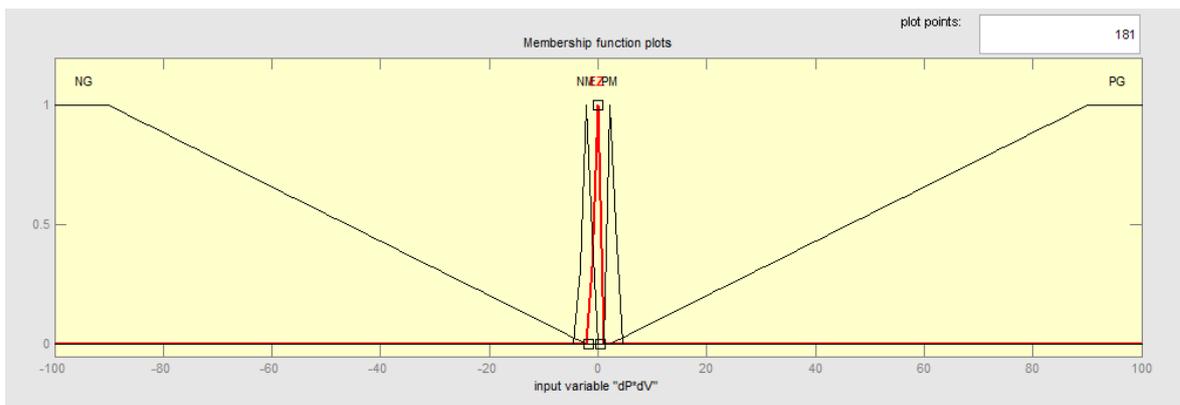
**III.2.4 Modélisation de la commande MPPT basée sur la logique floue**

Une seule entrée  $dP*dV$  et une seule sortie  $dD$  sont utilisées pour cette commande. Et son principe de fonctionnement est identique à celui de la commande P&O à une seule différence : la variation  $dD$ , qui n'est, dans ce cas, pas constante.

Les fonctions d'appartenance et les règles d'inférence utilisées sont présentées ci-dessous :

**III.2.4.1 Les fonctions d'appartenance**

- **Pour la variable d'entrée  $dP*dV$  :** cinq prédicats sont utilisés avec les désignations « NG, NM, EZ, PM, PG » dont la signification est donnée au tableau II.1 du chapitre précédent.



**Figure III.8.** Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée  $dP*dV$



### III.3 Simulation et discussion des résultats

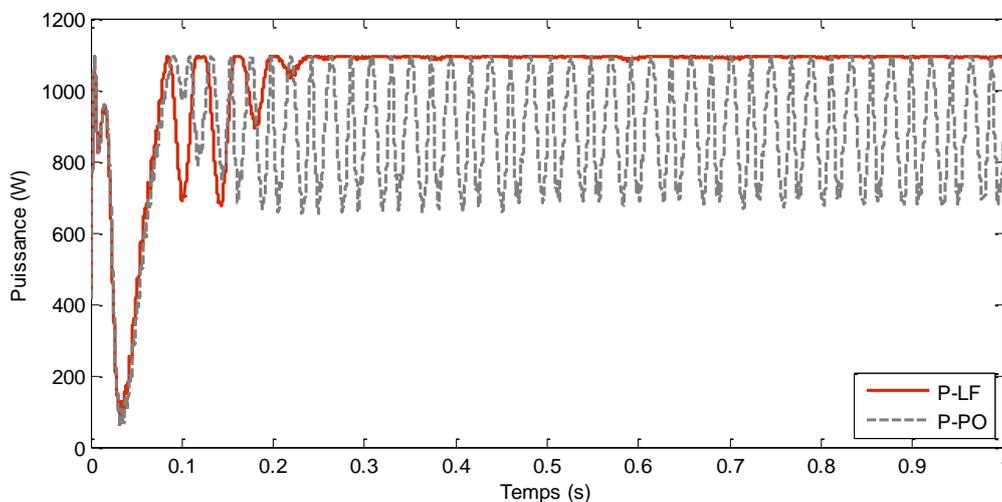
Afin de choisir la meilleure commande qui soit, une simulation comparant l'efficacité et la performance des deux commandes : P&O et celle basée sur la logique floue, est effectuée et ce en faisant varier, dans un premier temps, l'éclairement pour une même température de 25°C puis en faisant varier la température pour un même éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

#### III.3.1 Changement d'éclairement

Les graphes de comparaison des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue, pour la puissance, l'intensité, la tension et le rapport cyclique, obtenus pour les valeurs d'éclairement 800 W/m<sup>2</sup>, 900 W/m<sup>2</sup>, 1000 W/m<sup>2</sup> et la même température de 25°C, sont représentés ci-dessous.

##### III.3.1.1 Pour une irradiation de 800 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C

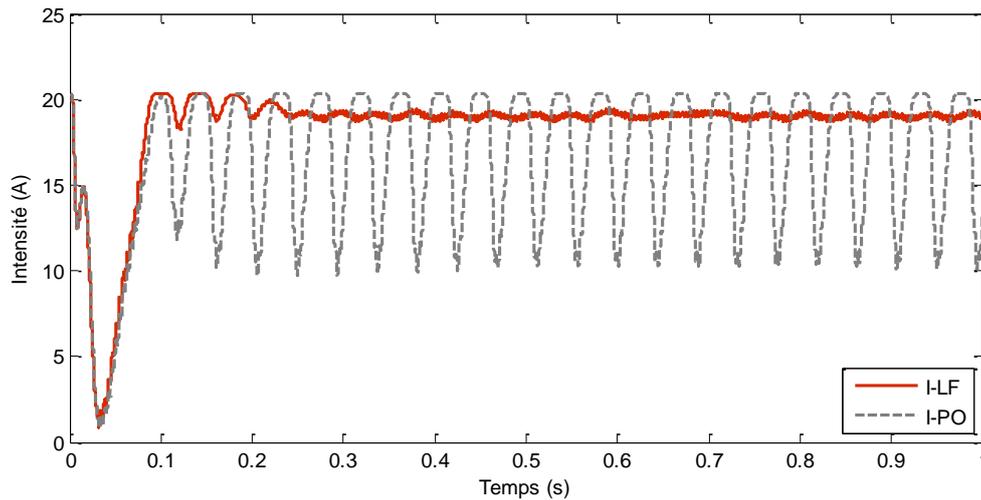
❖ Le graphe de comparaison des puissances est donné par la figure III.11.



**Figure III.11.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de 800 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C

Ce graphe montre que les deux puissances baissent et oscillent entre 825 W et 960 W, puis subissent une chute (60 W) et atteignent ensuite un maximum d'environ 1094 W au bout de 0.09s avec un léger retard de celle générée en utilisant la commande P&O. Et que la puissance générée en utilisant la commande P&O oscille, par la suite, en augmentant d'amplitude et se stabilise, au bout de 0.2 s, autour d'une valeur moyenne de 887 W avec une amplitude de 207 W, alors que celle générée en utilisant la commande floue baisse jusqu'à 690.757 W, puis oscille et se stabilise enfin à son maximum, au bout de 0.24 s, avec de légères fluctuations d'environ 6 W.

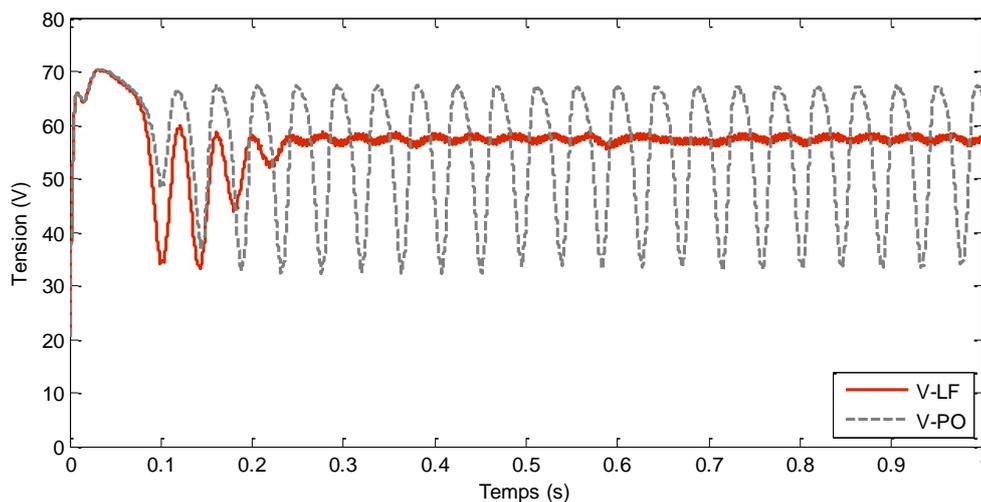
❖ Le graphe de comparaison des intensités est donné par la figure III.12.



**Figure III.12.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que les deux intensités baissent et oscillent entre 12.5 A et 15A, puis subissent, également, une chute (0.85 A), et atteignent, ensuite, un maximum d'environ 20.34 A au bout de 0.09s avec un léger retard, comme pour la puissance, de celle générée en utilisant la commande P&O. Et que l'intensité générée en utilisant la commande P&O oscille, par la suite, en augmentant d'amplitude pour se stabiliser, au bout de 0.2 s, autour d'une valeur moyenne de 15.34 A avec une amplitude de 5 A, alors que celle générée en utilisant la commande floue oscille en régressant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.24 s, autour de 19.05A avec de légères fluctuations d'environ 0.35 A.

❖ Le graphe de comparaison des tensions est donné par la figure III.13.

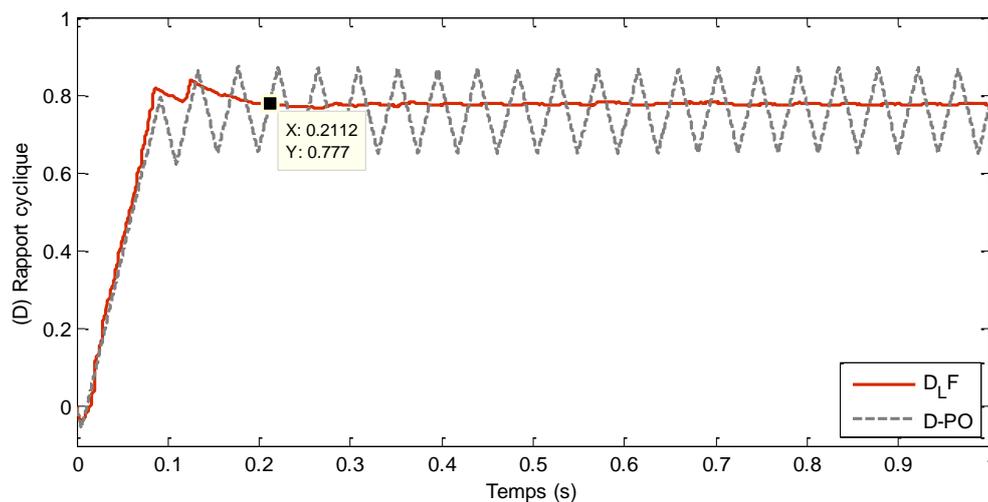


**Figure III.13.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que les deux tensions atteignent un maximum d'environ 70 V au bout de 0.03 s avec un léger retard, cette fois-ci, de celle générée en utilisant la commande floue (0.2 ms).

Après avoir atteint ce maximum, les deux tensions baissent : l'une pour osciller autour d'une valeur moyenne de 50.35 V avec une amplitude de 16.85 V- il s'agit de celle générée en utilisant la commande P&O- tandis que l'autre pour osciller et se stabiliser au bout de 0.24 s, avec de légères fluctuations, autour de 57 V.

❖ Le graphe de comparaison des rapports cycliques est donné par la figure III.14.

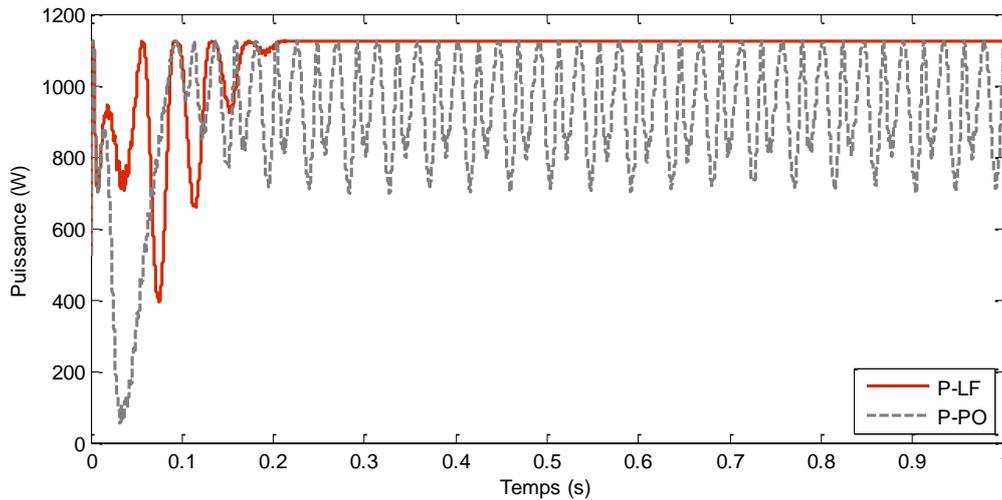


**Figure III.14.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que le rapport cyclique généré en utilisant la commande floue atteint, successivement, deux valeurs maximales d'environ 0.82 et 0.84 au bout de 0.08 s et 0.12 s, puis diminue en fluctuant jusqu'à se stabiliser aux alentours de 0.777. En revanche, le rapport cyclique généré en utilisant l'autre commande atteint son maximum de 0.755 au bout de 0.091 s, puis zigzague autour d'une valeur moyenne de 0.7585 avec une amplitude de 0.1.

### III.3.1.2 Pour une irradiation de $900 \text{ W/m}^2$ et une température de $25^\circ\text{C}$

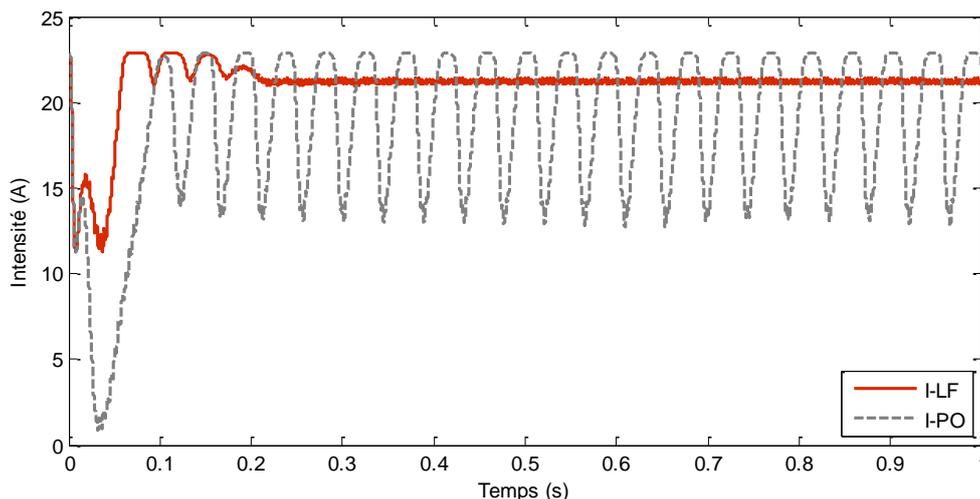
❖ Le graphe de comparaison des puissances est donné par la figure III.15.



**Figure III.15.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que la puissance générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 700 W et 881.155 W, puis subit une chute (54 W) et atteint, ensuite, un maximum de 1125 W au bout de 0.095 s et oscille, ensuite, en augmentant d'amplitude pour se stabiliser autour de 942.5 W avec une amplitude de 182.5 W. Alors que celle générée en utilisant la commande floue baisse et oscille entre 700 W et 950 W, puis atteint le même maximum que la précédente au bout de 0.0575 s, puis baisse à nouveau jusqu'à 400 W et oscille, ensuite, pour se stabiliser à son maximum, au bout de 0.22 s, avec de légères fluctuations d'environ 2.4 W.

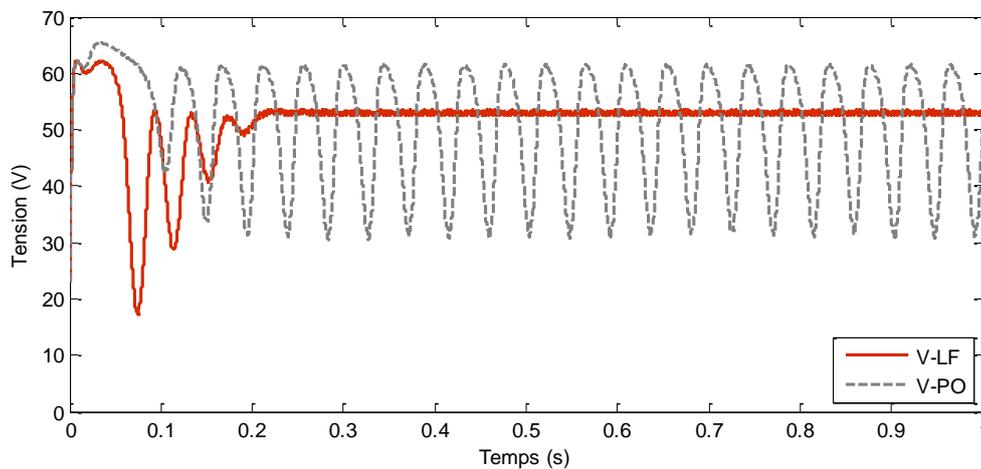
❖ Le graphe de comparaison des intensités est donné par la figure III.16.



**Figure III.16.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que l'intensité générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 11.32 A et 14.512 A, puis subit une chute (0.85 V), puis atteint un maximum de 22.88 A au bout de 0.1 s et oscille, ensuite, en augmentant d'amplitude pour se stabiliser, au bout de 0.17 s, autour d'une valeur moyenne d'environ 18 A avec une amplitude de 4.8 A. Alors que celle générée en utilisant la commande floue baisse et oscille entre 11.32 A et 15.32 A, puis atteint un maximum de 22.895 A au bout de 0.068 s et oscille, ensuite, en régressant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.22 s, aux alentours de 21.2 A avec de légères fluctuations d'environ 0.2 A.

❖ Le graphe de comparaison des tensions est donné par la figure III.17.

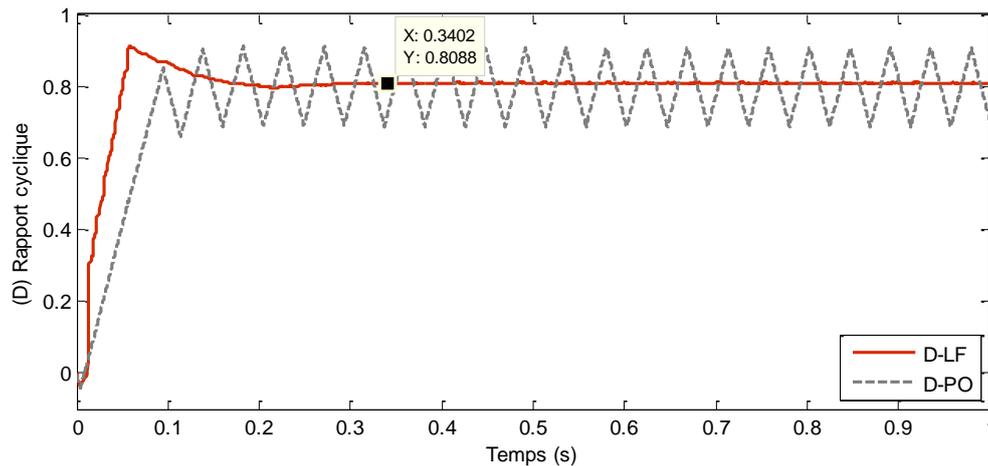


**Figure III.17.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que la tension générée en utilisant la commande floue atteint un maximum de 62.3 V au bout de 0.038 s, puis un minimum de 17.25 V et oscille, ensuite, pour se stabiliser au bout de 0.22 s autour d'une valeur moyenne de 53 V avec de légères fluctuations d'environ 0.5 V.

Quant à celle générée en utilisant la commande P&O, elle atteint un maximum de 65.4 V, au bout de 0.032 s, puis baisse en oscillant et en augmentant d'amplitude et se stabilise, au bout de 0.2 s, autour d'une valeur moyenne de 46.4 V avec une amplitude de 15 V.

❖ Le graphe de comparaison des rapports cycliques est donné par la figure III.18.

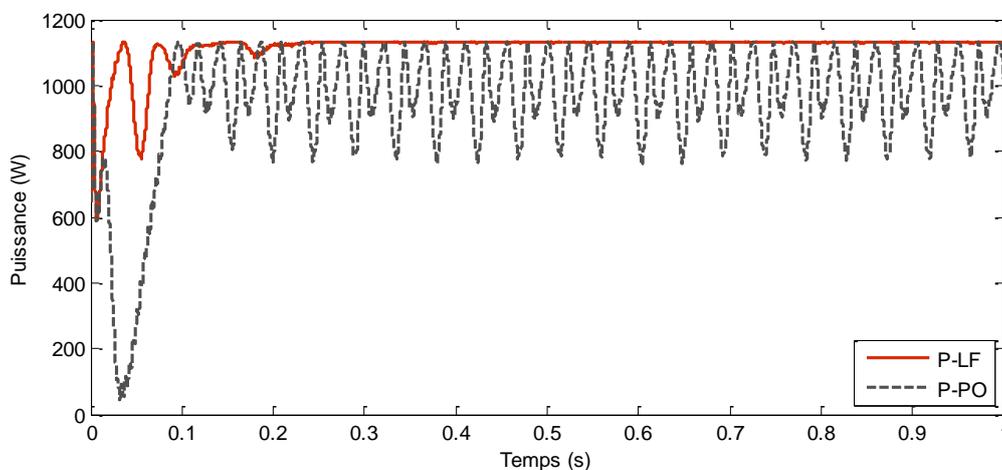


**Figure III.18.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $900 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que le rapport cyclique généré en utilisant la commande P&O atteint son maximum de 0.85 au bout de 0.095 s, puis zigzague continuellement autour de la valeur 0.799 avec une amplitude d'environ 0.109. Alors que celui généré en utilisant la commande floue atteint son maximum d'environ 0.911 au bout de 0.0583 s et diminue en fluctuant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.34 s, aux alentours de 0.8088 avec de négligeables fluctuations de l'ordre du millième.

### III.3.1.3 Pour une irradiation de $1000 \text{ W/m}^2$ et une température de $25^\circ\text{C}$

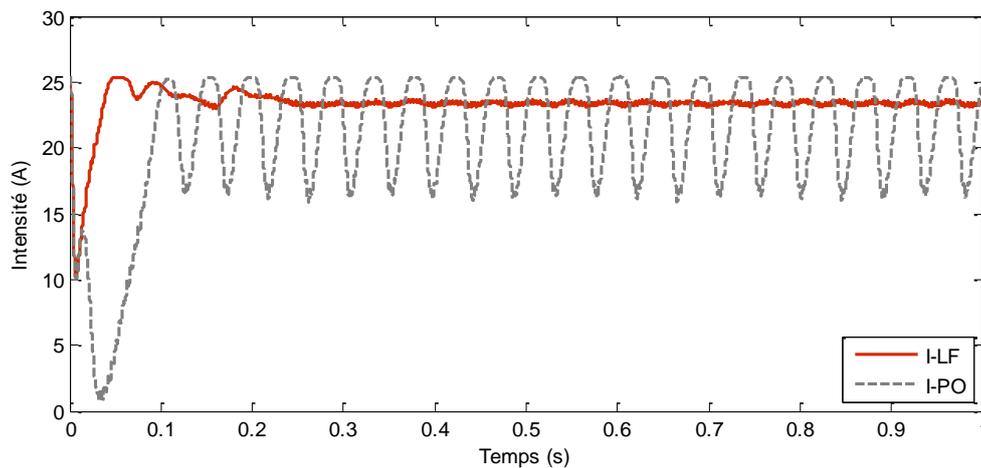
❖ Le graphe de comparaison des puissances est donné par la figure III.19.



**Figure III.19.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que la puissance générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 587.7 W et 782.88 W, puis subit une chute (46.7 W), puis atteint un maximum de 1131.5 W au bout de 0.097 s et oscille, ensuite, en augmentant d'amplitude jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.2 s, autour de 989.5 W avec une amplitude d'environ 142 W. Tandis que celle générée en utilisant la commande floue, elle atteint un minimum de 587.7 W, puis le même maximum que la précédente au bout de 0.037 s et oscille jusqu'à se stabiliser à son maximum au bout de 0.25 s avec de légères fluctuations d'environ 3 W.

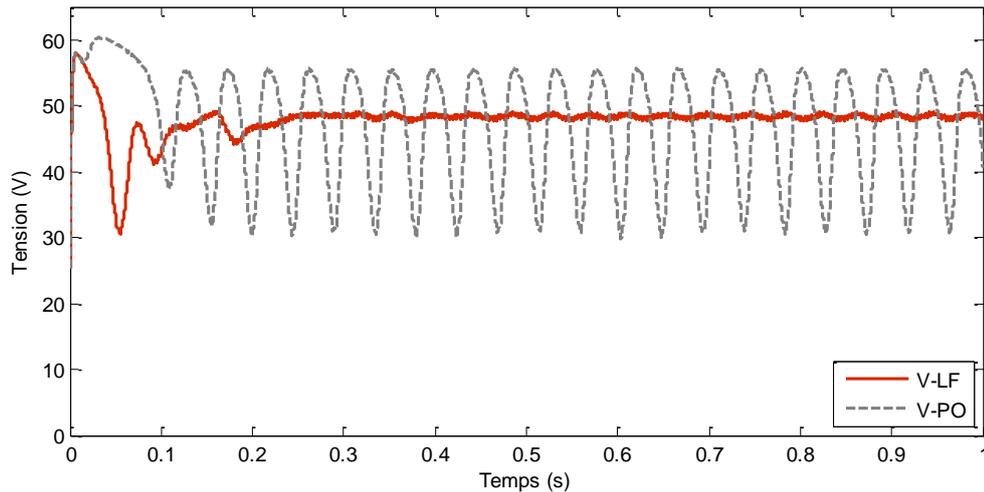
❖ Le graphe de comparaison des intensités est donné par la figure III.20.



**Figure III.20.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que l'intensité générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 10 A et 13.81 A, puis subit une chute (0.775 V) et atteint, ensuite, un maximum de 25.25 A au bout de 0.1 s et oscille, en augmentant d'amplitude, pour se stabiliser, au bout de 0.17 s, autour d'une valeur moyenne d'environ 20.94 A avec une amplitude de 4.44 A. Alors que celle générée en utilisant la commande floue atteint un minimum de 10 A, puis un maximum de 25.38 A au bout de 0.056 s et oscille, ensuite, en régressant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.34 s, aux alentours de 23.35 A avec de légères fluctuations d'environ 0.25 A.

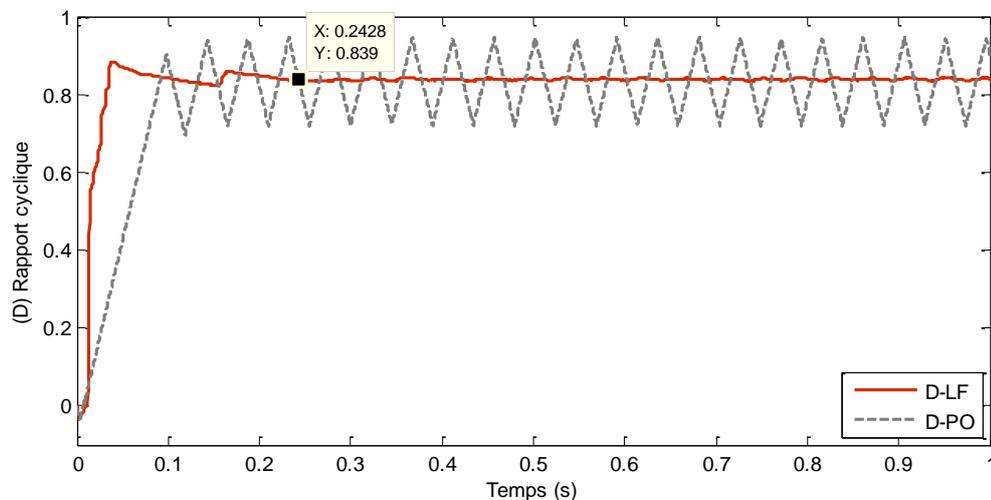
❖ Le graphe de comparaison des tensions est donné par la figure III.21.



**Figure III.21.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que la tension générée en utilisant la commande floue atteint un maximum de 58 V au bout de 7 ms, puis un minimum de 30.5 V et oscille, ensuite, pour se stabiliser, au bout de 0.34 s, autour de 48.4 V avec de légères fluctuations d'environ 0.6 V. Quant à celle générée en utilisant la commande P&O, elle atteint un maximum de 60.32 V, au bout de 0.032 s, puis baisse en oscillant et en augmentant d'amplitude et se stabilise, au bout de 0.2 s, autour d'une valeur moyenne de 43.25 V avec une amplitude de 12.25 V.

❖ Le graphe de comparaison des rapports cycliques est donné par la figure III.22.



**Figure III.22.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$

Ce graphe montre que le rapport cyclique généré en utilisant la commande P&O atteint un maximum de 0.9 au bout de 0.098 s, puis zigzague continuellement autour de la valeur 0.8325 avec une amplitude d'environ 0.1115. Alors que celui généré en utilisant la commande floue atteint un maximum d'environ 0.883 au bout de 0.038 s, puis diminue en fluctuant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.24 s, aux alentours de 0.839 avec de négligeables oscillations de l'ordre du millième.

En augmentant l'éclairement, une augmentation de la puissance, de l'intensité et du rapport cyclique et une baisse de la tension sont observées pour les deux commandes.

Ce qui va dans le sens de la théorie car l'augmentation de l'intensité du courant fourni est due principalement, comme indiqué précédemment (I.3.1.5.4), à l'augmentation du photocourant étant donné qu'il est directement proportionnel à la surface éclairée et à l'irradiance. Ce qui implique, ainsi, la diminution de la tension et l'augmentation de la puissance délivrée observées.

Ceci explique, également, l'augmentation palpée du rapport cyclique qui tente toujours d'extraire le maximum de la puissance disponible sur le photogénérateur.

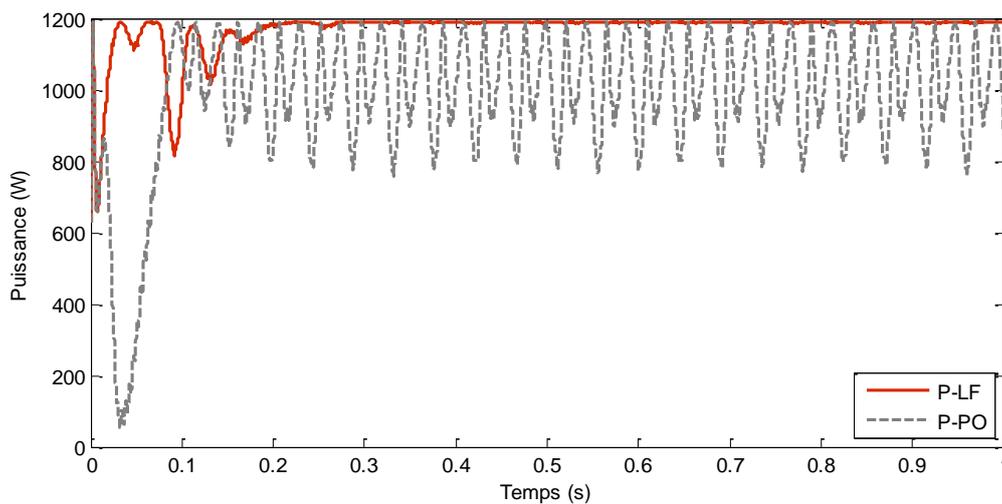
En effet l'efficacité des deux commandes est constatée, cependant la commande floue permet d'atteindre un point maximal plus élevé en un temps plus court avec moins de fluctuations autour de ce point que la commande P&O.

### III.3.2 Changement de température

Les graphes de comparaison des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue, pour la puissance, l'intensité, la tension et le rapport cyclique obtenus pour les valeurs de température 0°C, 10°C, 55°C, et pour le même éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup> sont représentés ci-dessous.

#### III.3.2.1 Pour une température de 0°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

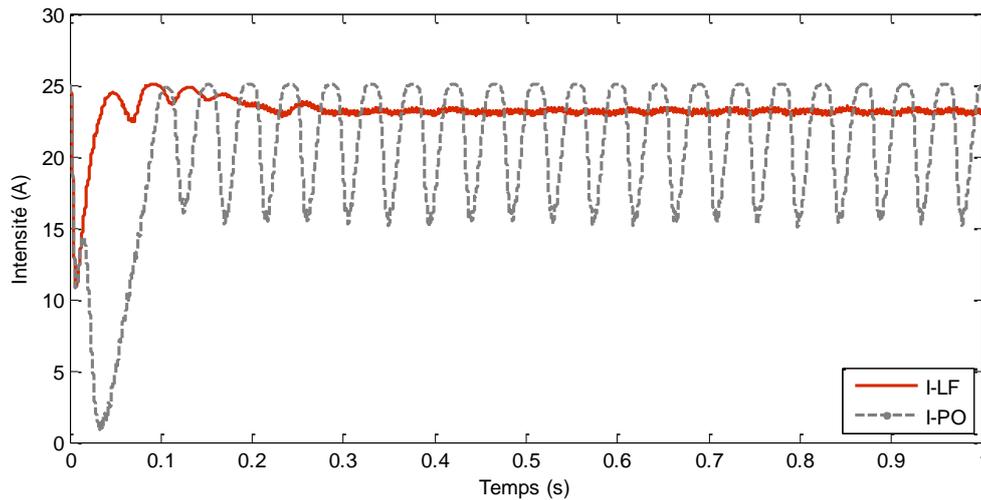
❖ Le graphe de comparaison des puissances est donné par la figure III.23.



**Figure III.23.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de 0°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

Ce graphe montre que la puissance générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 657 W et 860.9 W, puis subit une chute (52.4 W) et atteint, ensuite, un maximum de 1189.3 W au bout de 0.0952 s et oscille, en augmentant d'amplitude jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.2 s, autour de 1017.15 W avec une amplitude d'environ 172.15 W. Alors que celle générée en utilisant la commande floue atteint un minimum de 657 W, puis le même maximum que la précédente au bout de 0.0344 s, puis oscille et atteint un autre minimum de 816 W, puis oscille, à nouveau, jusqu'à se stabiliser à son maximum au bout de 0.29 s avec de légères fluctuations d'environ 5.3 W

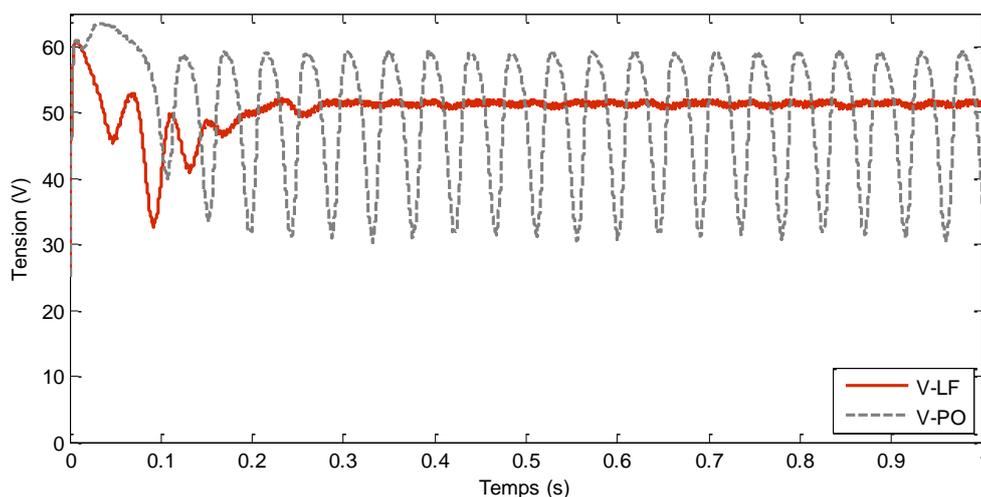
❖ Le graphe de comparaison des intensités est donné par la figure III.24.



**Figure III.24.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $0^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $1000\text{ W/m}^2$

Ce graphe montre que l'intensité générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 10.76 A et 14.45 A, puis subit une chute (0.825 V), puis atteint un maximum de 24.885 A au bout de 0.1 s et oscille, ensuite, en augmentant d'amplitude pour se stabiliser, au bout de 0.17 s, autour d'une valeur moyenne d'environ 20.3 A avec une amplitude de 5 A. Alors que celle générée en utilisant la commande floue atteint un minimum de 10.76 A, puis successivement deux maximums de 24.516 A et 25.026 A au bout de 0.0476 s et 0.0918 s, et oscille, ensuite, en régressant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.34 s, aux alentours de 23.1 A avec de légères fluctuations d'environ 0.3 A

❖ Le graphe de comparaison des tensions est donné par la figure III.25.

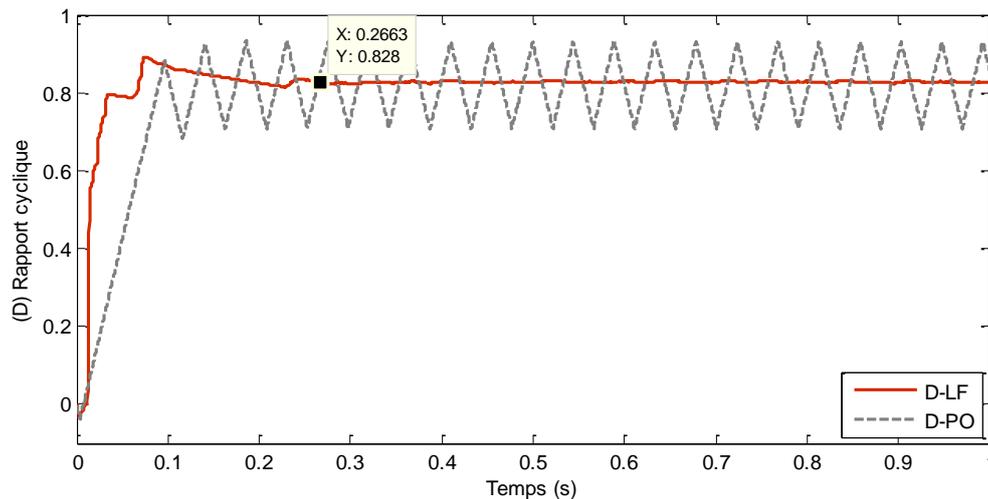


**Figure III.25.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $0^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $1000\text{ W/m}^2$

Ce graphe montre que la tension générée en utilisant la commande floue atteint un maximum de 61 V au bout de  $7.3 \cdot 10^{-3}$  s, puis atteint, en oscillant, un minimum de 32.62 V, puis oscille, à nouveau, pour se stabiliser au bout de 0.3 s autour de 51.35 V avec de légères fluctuations d'environ 0.65 V.

Quant à celle générée en utilisant la commande P&O, elle atteint un maximum de 63.556 V, au bout de 0.032 s, puis baisse en oscillant et en augmentant d'amplitude et se stabilise, au bout de 0.2 s, autour d'une valeur moyenne de 45.3 V avec une amplitude de 13.9 V.

❖ Le graphe de comparaison des rapports cycliques est donné par la figure III.26.

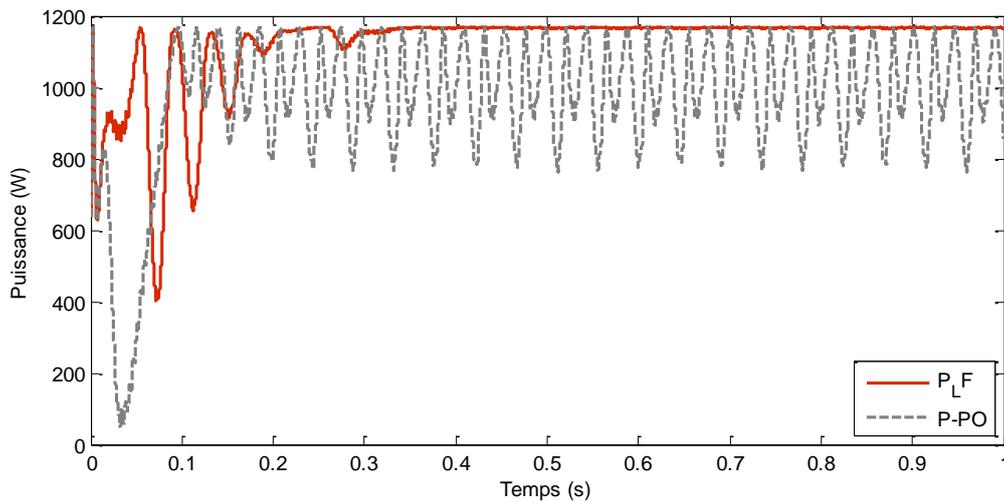


**Figure III.26.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $0^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$

Ce graphe montre que le rapport cyclique généré en utilisant la commande P&O atteint son maximum de 0.882 au bout de 0.0963 s, puis zigzague continuellement autour de la valeur 0.81975 avec une amplitude d'environ 0.1115. Alors que celui généré en utilisant la commande floue atteint son maximum d'environ 0.8914 au bout de 0.0741 s et diminue en oscillant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.266 s, aux alentours de 0.828 avec de négligeables fluctuations de l'ordre du millième.

III.3.2.2 Pour une température de 10°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

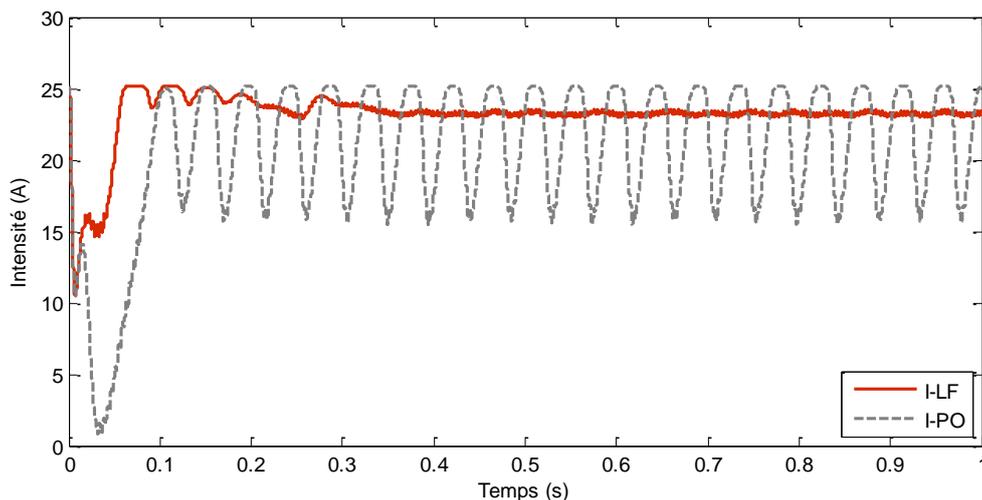
❖ Le graphe de comparaison des puissances est donné par la figure III.27.



**Figure III.27.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de 10°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

Ce graphe montre que la puissance générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 628.59 W et 829.34 W, puis subit une chute (49.7 W) et atteint, ensuite, un maximum de 1166.415 W au bout de 0.0956 s et oscille, en augmentant d’amplitude, jusqu’à se stabiliser, au bout de 0.2435 s, autour de 1004.4575 W avec une amplitude d’environ 161.9575 W. Alors que celle générée en utilisant la commande floue atteint un minimum de 628.597 W, puis atteint, en oscillant, le même maximum que la précédente au bout de 0.055 s, puis baisse à nouveau jusqu’à 402.42 W et oscille pour se stabiliser à son maximum au bout de 0.35 s avec de légères fluctuations d’environ 3.5 W.

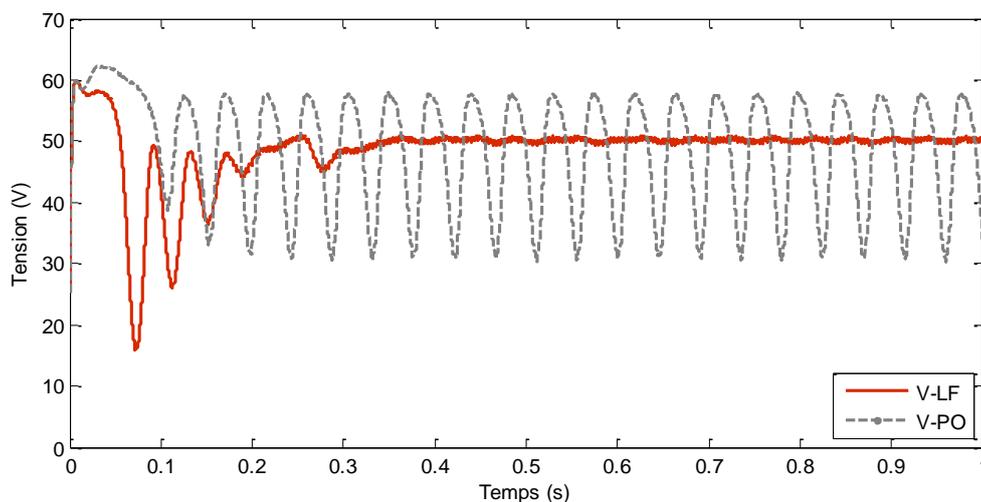
❖ Le graphe de comparaison des intensités est donné par la figure III.28.



**Figure III.28.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de 10°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

Ce graphe montre que l'intensité générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 10.5 A et 14.192 A, puis subit une chute (0.798 V) et atteint, ensuite, un maximum de 25.029 A au bout de 0.1075 s et oscille, en augmentant d'amplitude, pour se stabiliser, au bout de 0.169 s, autour d'une valeur moyenne d'environ 20.39 A avec une amplitude de 4.79 A. Alors que celle générée en utilisant la commande floue atteint un minimum de 10.5 A, puis atteint, en oscillant, un maximum de 25.21 A au bout de 0.072 s et oscille, ensuite, en régressant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.36 s, aux alentours de 23.25 A avec de légères fluctuations d'environ 0.25 A.

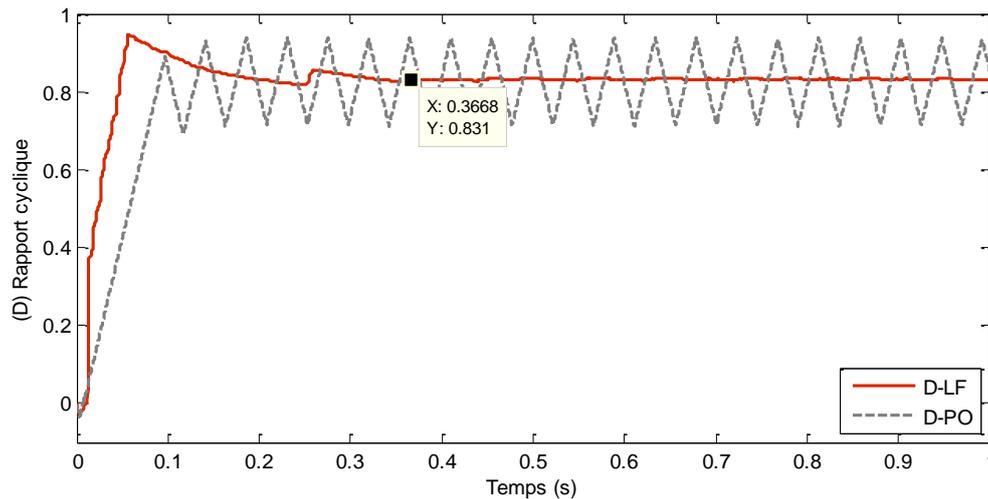
❖ Le graphe de comparaison des tensions est donné par la figure III.29.



**Figure III.29.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de 10°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

Ce graphe montre que la tension générée en utilisant la commande floue atteint un maximum de 59.822 V au bout de 7.2 ms, puis un minimum de 15.96 V et oscille, ensuite, pour se stabiliser au bout de 0.36 s autour de 50.1 V avec de légères fluctuations d'environ 0.7 V. Quant à celle générée en utilisant la commande P&O, elle atteint un maximum de 62.261 V, au bout de 0.0323 s, puis baisse en oscillant et en augmentant d'amplitude et se stabilise, au bout de 0.2 s, autour d'une valeur moyenne de 44.25 V avec une amplitude de 13.5 V.

❖ Le graphe de comparaison des rapports cycliques est donné par la figure III.30.

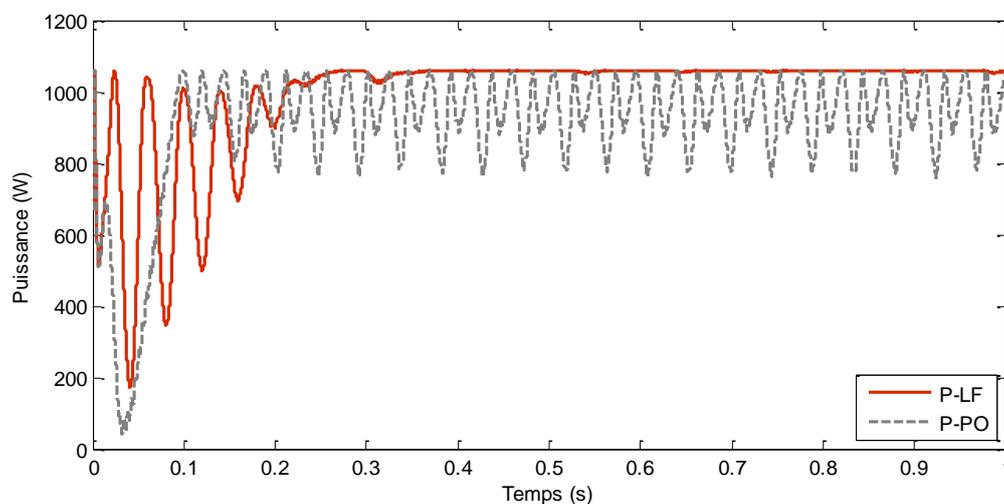


**Figure III.30.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $10^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $1000\text{ W/m}^2$

Ce graphe montre que le rapport cyclique généré en utilisant la commande P&O atteint son maximum de 0.89 au bout de 0.0969 s, puis zigzague continuellement autour de la valeur 0.8255 avec une amplitude d'environ 0.1115. Alors que celui généré en utilisant la commande floue atteint son maximum d'environ 0.9476 au bout de 0.056 s et diminue en fluctuant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.36 s, aux alentours de 0.831 avec de négligeables oscillations de l'ordre du milliè.

### III.3.2.3 Pour une température de $55^{\circ}\text{C}$ et une irradiation de $1000\text{ W/m}^2$

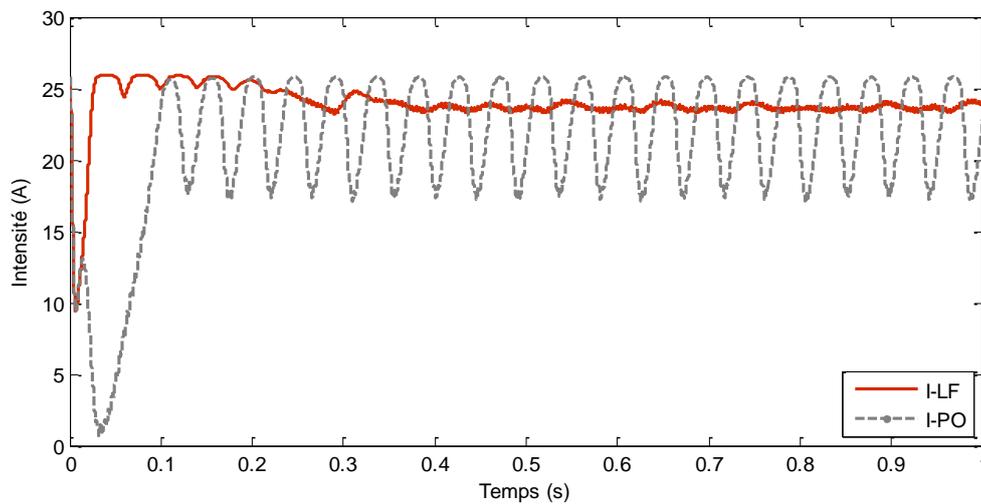
❖ Le graphe de comparaison des puissances est donné par la figure III.31.



**Figure III.31.** Comparaison des puissances générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $55^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $1000\text{ W/m}^2$

Ce graphe montre que la puissance générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 510.718 W et 693.76, puis subit une chute (41.83 W) et atteint, ensuite, un maximum de 1059.82 W, au bout de 0.0991 s, et oscille, en augmentant d'amplitude, jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.2035 s, autour de 944.91 W avec une amplitude d'environ 114.91 W. Alors que celle générée en utilisant la commande floue chute jusqu'à la valeur 510.718 W, puis atteint le même maximum que la précédente, au bout de 0.024 s, puis rechute à nouveau jusqu'à la valeur 173.6383 W et oscille, ensuite, pour se stabiliser, au bout de 0.38 s, autour de 1130 W avec de légères fluctuations d'environ 8 W.

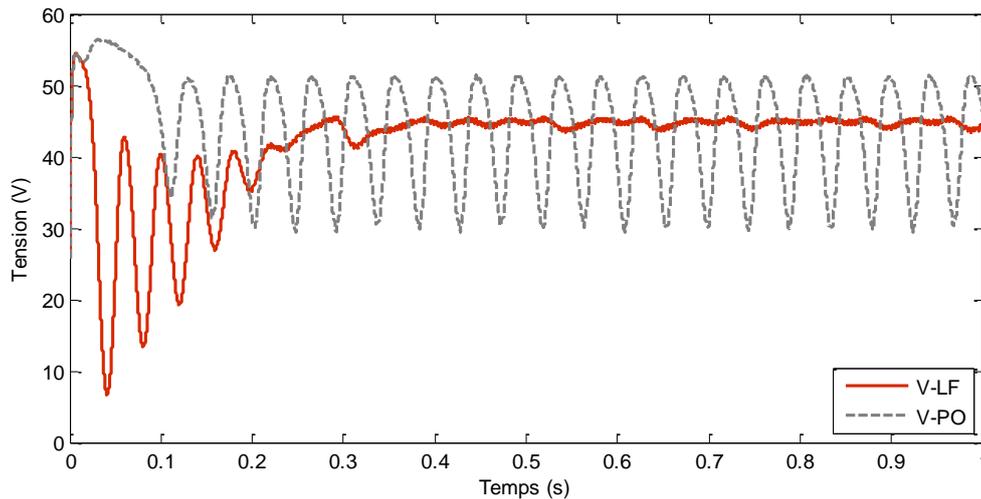
❖ Le graphe de comparaison des intensités est donné par la figure III.32.



**Figure III.32.** Comparaison des intensités générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de 55°C et une irradiation de 1000 W/m<sup>2</sup>

Ce graphe montre que l'intensité générée en utilisant la commande P&O baisse et oscille entre 9.3899 A et 13.044 A, puis subit une chute (0.7415 V) et atteint, ensuite, un maximum de 25.644 A au bout de 0.1115 s et oscille, en augmentant d'amplitude, pour se stabiliser, au bout de 0.17 s, autour d'une valeur moyenne d'environ 21.542 A avec une amplitude de 4.242 A. Alors que celle générée en utilisant la commande floue atteint un minimum de 9.3899 A, puis un maximum de 25.8892 A au bout de 0.041 s et oscille, ensuite, en régressant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.34 s, aux alentours de 23.7 A avec de légères fluctuations d'environ 0.4 A.

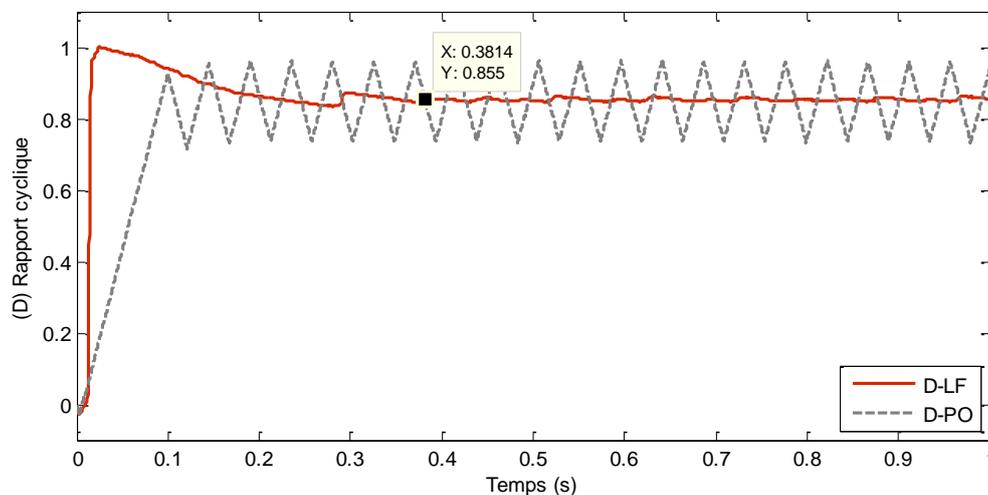
❖ Le graphe de comparaison des tensions est donné par la figure III.33.



**Figure III.33.** Comparaison des tensions générées en utilisant les deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $55^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$

Ce graphe montre que la tension générée en utilisant la commande floue atteint un maximum de  $59.3904 \text{ V}$  au bout de  $6.9 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ , puis un minimum de  $6.707 \text{ V}$  et oscille, ensuite, pour se stabiliser au bout de  $0.4 \text{ s}$  autour de  $44.5 \text{ V}$  avec de légères fluctuations d'environ  $1 \text{ V}$ . Quant à celle générée en utilisant la commande P&O, elle atteint un maximum de  $56.418 \text{ V}$ , au bout de  $0.0323 \text{ s}$ , puis baisse en oscillant et en augmentant d'amplitude et se stabilise, au bout de  $0.2 \text{ s}$ , autour d'une valeur moyenne de  $40.675 \text{ V}$  avec une amplitude de  $10.575 \text{ V}$ .

❖ Le graphe de comparaison des rapports cycliques est donné par la figure III.34.



**Figure III.34.** Comparaison des rapports cycliques des deux commandes P&O et celle basée sur la logique floue pour une température de  $55^{\circ}\text{C}$  et une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$

Ce graphe montre que le rapport cyclique généré en utilisant la commande P&O atteint son maximum de 0.927 au bout de 0.1 s, puis zigzague continuellement autour de la valeur 0.848 avec une amplitude d'environ 0.112. Alors que celui généré en utilisant la commande floue atteint son maximum d'environ 1.001 au bout de 0.025 s et diminue en fluctuant jusqu'à se stabiliser, au bout de 0.3814 s, aux alentours de 0.855 avec de négligeables fluctuations de l'ordre du millième.

En augmentant, cette fois-ci, la température, une augmentation de l'intensité et du rapport cyclique et une baisse de la puissance et de la tension sont constatées pour les deux commandes. Ceci va toujours dans le sens de la théorie puisque, comme mentionné précédemment (I.3.1.5.5), la légère augmentation de l'intensité du courant fourni est due à une augmentation du photocourant due à la diminution de la largeur de la bande interdite et à l'augmentation du courant direct de diode. Ce qui implique ainsi la baisse de la tension et de la puissance délivrée observées.

Ceci justifie également l'augmentation du rapport cyclique qui tente toujours d'extraire le maximum de la puissance disponible sur le photogénérateur.

Là aussi, l'efficacité des deux commandes est prouvée. Néanmoins, la commande floue prend, une fois de plus, les devants étant donné qu'elle permet d'atteindre, comme pour le changement d'éclairément, un point maximal plus élevé en un temps plus court avec moins de fluctuations autour de ce point que la commande P&O.

### **III.4 Conclusion**

Ce chapitre recouvre la partie décisive et concluante de ce travail, à savoir la partie simulation.

Après avoir modélisé les composants du système photovoltaïque et expliqué le principe de la recherche du point de puissance maximal (PPM), vient alors cette partie démontrer l'efficacité des deux algorithmes ; MPPT perturber et observer P&O et celui basé sur la logique floue et montrer également les vertus de la commande floue par rapport à sa rivale qui se manifestent par : un point de puissance maximal plus élevé et son temps d'atteinte qui est plus court avec de moindres oscillations à ses alentours.

Ceci permet, ainsi, de conclure que la commande floue est la commande la plus fiable et la plus robuste qui permet d'extraire le maximum de puissance disponible sur le photogénérateur avec moins de pertes et par conséquent un meilleur rendement.

### **Conclusion générale**

Dans le cadre de ce travail, une étude de plusieurs méthodes valides dans la recherche du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque est faite, plusieurs points ont été abordés sur l'optimisation de la conversion d'énergie et plusieurs solutions, qui permettent d'augmenter le rendement global électrique d'un système photovoltaïque, ont été proposées.

Ainsi, le premier chapitre a été dédié à la présentation du principe de la conversion photovoltaïque ainsi qu'aux différents éléments du processus de cette conversion. Différents types et configurations des systèmes photovoltaïques y ont été également décrits et enfin une liste des avantages et inconvénients de l'électricité photovoltaïque a été étalée en clôturant ce chapitre.

Afin d'extraire le maximum de puissance de cette électricité photovoltaïque, le deuxième chapitre a été consacré à l'étude de l'étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge et les différents types de hacheurs le constituant, ainsi qu'à l'étude des commandes MPPT qui régissent son fonctionnement.

L'application de la logique floue dans les commandes MPPT a permis d'améliorer le rendement des générateurs photovoltaïques et a offert des performances robustes. Et c'est ce qui a été prouvé au dernier chapitre, après avoir fait une étude comparative entre la commande MPPT basée sur la logique floue et la commande MPPT conventionnelle P&O. On a montré, par les simulations faites, que la commande basée sur la logique floue a accru le point de puissance maximale fournie et a résolu les problèmes liés au temps de réponse et aux fluctuations autour de ce point de puissance maximale.

Nous suggérons comme perspective d'améliorer nos résultats en choisissant des commandes plus efficaces tels que les régulateurs neuroflous.

## Références

- [1] S.ZAAMTA, A.DIB, « Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs », Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, N°1, pp : 137-147, 2009.
- [2] H. ABBES, H.ABID, K.LOUKIL, A.TOUMI, M.ABID, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables, Vol 17, N°3, pp : 435 – 445, 2014.
- [3] N.GHEDHAB, « Optimisation des systèmes de Conversion Photovoltaïques de Moyenne Puissance et Application au Radar », mémoire de magister, Houari Boumediene, Alger, 2012.
- [4] S.M.AIT CHEIKH, « Etude, investigation et conception d'algorithme de commande appliqués aux systèmes photovoltaïque », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [5] S.BENSMAIL, « Contribution à la modélisation et à l'optimalisation des systèmes photovoltaïques », mémoire de magister, Université A.Mira, Béjaia, 2012
- [6] A.LABOURET, M.VILLOZ, « Energie solaire photovoltaïque », Dunod, 3<sup>ième</sup> édition.
- [7] A.LABOURET, M.VILLOZ, « Installations photovoltaïques ; Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau », Dunod, 5<sup>ième</sup> édition.
- [8] A.LABOURET, M.VILLOZ « Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque », 10 Eph, 5<sup>ième</sup> édition.
- [9] J.ROYER, T.DJIAKO, E.SCHILLER, B.SADA SY. « Le pompage photovoltaïque». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa.
- [10] Y.RAIS, « Modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2012.
- [11] Z.EL JOUAD, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », thèse de doctorat, Angers, France, 2016.

## Références

---

- [12] D.BONNEAUX, L.DAVID, A.DUMAS, S.GERMAIN, « Etude des cellules photovoltaïques », olympiades de la physique, 2004.
- [13] Le photovoltaïque-Module 3, Fonctionnement et Technologies, Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2010.
- [14] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovoltaïque](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovoltaïque), consulté le : 15/05/2022.
- [15] A.RICAUD, « Photopiles solaires, De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés », Collection : Cahiers de chimie, 1<sup>ère</sup> édition, 1997.
- [16] Sous la direction de B.EQUER, « énergie solaire photovoltaïque », Editions Ellipses, volume 1, 1993.
- [17] S.AMROUCHE, « Contribution à l'Etude du Conditionnement de Puissance dans les Systèmes Photovoltaïques », thèse de doctorat, Université de Béjaïa, 2012.
- [18] L.CHANCELIER, E.LAURANT, « L'électricité photovoltaïque », Collection : le point sur, Lavoisier Editions.
- [19] M.HANKINS, « Installations solaires photovoltaïques autonomes. Conception et installation d'unités non raccordées au réseau », Dunod, 2010.
- [20] B EQUER, « Energie solaire photovoltaïque », volume 1, 1991.
- [21] Guide de l'acheteur, « les systèmes photovoltaïques », Canada, 2002.
- [22] S.BELAKEHAL, « Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [23] N. ABOUCHABANA, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [24] G.SEGUIER, R.BAUSIERE, F.LABRIQUE, « Electronique de puissance », Dunod, 8<sup>ième</sup> édition, 2004.
- [25] N.AOUCHICHE, M.S.AÏT CHEIKH, A.MALEK, « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°3, pp : 485 – 498, 2013.

## *Références*

---

- [26] M. SAAD SAOUD, « Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole », thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2017.
- [27] N.AOUCHICHE, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », thèse de Doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [28] M.H.RASHID, "Power electronics handbook", Academic Press Series in Engineering, 2001.
- [29] G.SEGUIER, P.DELARUE, F.LABRIQUE, « Electronique de puissance », Dunod, 10<sup>ième</sup> édition, 2004, 2011, 2015.
- [30] E.OMORUYI, « Modélisation du comportement transitoire des génératrices distribuées raccordées au réseau électrique de distribution à l'aide de convertisseurs », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Ecole polytechnique de Montréal, 2017.
- [31] M.F.YADN, M.EIOUARIACHI, T.MRABTI, Ka.KASSMI, B.TIDHAF, E.CHADLI, K.KASSMI, « Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'une commande MPPT numérique », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, N°1, pp : 171 – 186, 2011.
- [32] S.ABOUDA, « Contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: Application aux systèmes de pompage », thèse de doctorat en cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2015.
- [33] L.BOUCERREDJ, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque par la commande mppt », Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism Vol. 5, Nr. 5, pp : 197-205, 2021.
- [34] H.Bühler, « Réglage par logique floue », collection Electricité, Presses polytechniques et universitaires romandes, première édition, 1994.
- [35] P.BORNE J.ROZINOER J.-Y. DIEULOT L.DUBOIS, "Introduction à la commande floue", Editions TECHNIP, 1998.
- [36] F.DERNONCOURT, « Introduction à la logique floue », Paris, 2011.

## *Références*

---

[37] Y.DJERIRI, Z.BOUDJEMA, « Commande robuste par la logique floue et les réseaux de neurones artificiels de la GADA : étude comparative », Revue des Energies Renouvelables Vol. 20, N°1, pp : 147 – 160, 2017.

[38] K.GUESMI, « Contribution à la commande floue d'un convertisseur statique », thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2006.