

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

Université Abderrahmane MIRA- Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département de génie électrique



جامعة عبد الرحمان ميرة – بجاية  
كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة الكهربائية

# MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

**Présenté par :**

DJAFRI Thiziri

MAZIOUA Amira

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Spécialité : **Electromécanique**

**INTITULE :**

---

**Optimisation et gestion énergétique dans une installation  
photovoltaïque avec stockage**

---

Soutenu le **02/07/2024** devant le jury composé de :

Mme : ABDELLI Radia

Présidente

Mr : DJARMOUNI Kamel

Examineur

Mme : S. BELAID

Promotrice

Année Universitaire : 2023//2024

## *Remerciement*

*Avant tout, nous remercions ALLAH le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et témoigner notre profonde gratitude à notre promotrice Mme. BELAID, pour leur encadrement efficace, leur soutien et leur disponibilité. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous adressons aussi nos remerciements à monsieur BOUDJERDA Tarek, notre Co-promoteur pour ses conseils, pour son suivi ainsi que pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée durant toute notre période de préparation de notre travail.*

*On tient à remercier vivement les membres de nos familles qui Nous ont toujours encouragés et soutenus.*

*On remercie, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à L'élaboration de ce mémoire.*

*Enfin, sans oublier on remercie les jurys Mr. DJERMONI et Mme.ABDELLI, qui nous feront l'honneur De juger ce travail.*

*Djafri & Mazioua*

## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition de l'énergie solaire photovoltaïque .....	3
I.3. Rayonnement solaire .....	4
I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	5
I.4.1. Avantages de l'énergie photovoltaïque .....	5
I.4.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	5
I.5. La cellule photovoltaïque.....	5
I.5.1. Effet photovoltaïque .....	5
I.5.2. Types des cellules photovoltaïques .....	6
I.5.2.1. Les plus utilisés .....	7
I.5.2.2. Les moins utilisés .....	8
I.5.3. Groupements des cellules photovoltaïques .....	9
I.5.3.1. Groupements des cellules en parallèle .....	9
I.5.3.2. Groupements des cellules en série .....	9
I.5.3.3. Groupements des cellules en Série-Parallèle .....	10
I.6. Module photovoltaïque .....	10
I.7. Caractéristiques d'un module photovoltaïque .....	11
I.8. Différents types de systèmes photovoltaïques .....	12
I.8.1. Système photovoltaïque connecté au réseau .....	12
I.8.2. Système photovoltaïque hybride .....	12
I.8.3. Système photovoltaïque autonome .....	13
I.8.3.1. Système autonome sans stockage .....	14
I.8.3.2. Système autonome avec stockage .....	14
I.9. Fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque .....	14
I.10. Le stockage d'énergie électrique .....	15
I.11. Les différents éléments de stockage d'énergie électrique .....	15
I.11.1. Stockage à court terme .....	15
I.11.2. Stockage à long terme .....	16
I.11.2.1. Définition de l'accumulateur électrochimique .....	16
I.11.2.2 Les caractéristiques des accumulateurs électrochimiques .....	16

---

I.11.2.3. Les différents types d'accumulateurs électrochimiques .....	17
I.12. La gestion d'énergie photovoltaïque .....	18
I.13. Conclusion .....	19

**Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système PV**

II.1. Introduction .....	20
II.2. Description du système à étudier .....	20
II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque .....	21
II.3.1. Modèle idéale .....	21
II.3.2. Modèle à une diode .....	22
II.3.3. Modèle à deux diodes .....	23
II.3.4. Modèle explicite du module photovoltaïque .....	24
II.4. Simulation d'un modèle PV .....	25
II.4.1. Caractéristiques du module photovoltaïque .....	26
II.4.1.1. Influence de l'ensoleillement .....	26
II.4.1.2. Influence de la température .....	27
II.5. Modélisation des convertisseurs DC-DC (hacheurs) .....	28
II.5.1. Hacheurs de type élévateur (Boost) .....	29
II.5.2. Convertisseur Buck-Boost .....	30
II.6. Modélisation de la batterie .....	31
II.6.1. Résultats de simulation .....	33
II.7. Techniques de poursuite du point de puissance maximale .....	34
II.7.1. La commande MPPT.....	34
II.7.1.1. Technique de la perturbation et observation (PO) .....	34
II.7.1.2. Technique de l'incrémentation de la conductibilité (CI) .....	38
II.7.1.3. Technique de la logique floue (LF) .....	41
II.7.2. Etude comparative entre les trois algorithmes proposés .....	44
II.8. Conclusion .....	46

**Chapitre III : Dimensionnement et gestion de l'énergie du système PV**

III.1. Introduction .....	47
III.2. Dimensionnement du système photovoltaïque .....	47
III.2.1. Évaluation du besoin en électricité .....	48
III.2.2. Estimation de l'ensoleillement.....	49
III.2.3. Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	51

III.2.3.1. Estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité .....	51
III.2.3.2. Estimation de la puissance crête du champ photovoltaïque .....	52
III.2.3.3. Choix de la tension de fonctionnement .....	52
III.2.3.4. Calcul de nombre de panneaux PV (total, séries et parallèles) .....	53
III.2.4. Dimensionnement de la batterie de stockage .....	53
III.2.5. Dimensionnement de l'onduleur .....	54
III.3. Gestion d'énergie du système photovoltaïque avec batterie .....	56
III.3.1. Algorithme de gestion de l'énergie du système .....	56
III.3.2. Le profil de consommation .....	57
III.3.3. Le profil d'ensoleillement et de température .....	58
III.3.4. Simulation du système photovoltaïque avec gestion et stockage d'énergie .....	59
III.3.4.1. Les résultats de simulation du système global .....	60
III.3.4.2. Interprétation des résultats .....	63
III.4. Conclusion .....	66

#### **Chapitre IV : Système de gestion de puissance basé sur la logique floue**

IV.1. Introduction .....	68
IV.2. Présentation du système de gestion .....	68
IV.3. Mise en œuvre du système flou .....	69
IV.3.1. Établissement des règles de décision .....	70
IV.3.2.1. Résultats de simulation .....	75
IV.3.2.2. Interprétation des résultats .....	81
IV.4. Conclusion .....	83
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>84</b>

#### **Bibliographie**

#### **Résumé**

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure (I.1) : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque .....	3
Figure (I.2): Rayonnement solaire.....	4
Figure (I.3):Structure et principe de fonctionnement d'une cellule PV .....	6
Figure (I.4) : La cellule monocristalline .....	7
Figure (I.5): La cellule en silicium polycristallin .....	7
Figure (I.6) : Les cellules au silicium amorphe .....	8
Figure (I.7) : Schéma de trois cellules PV associées en parallèle .....	9
Figure (I.8) : Schéma de trois cellules PV associées en série .....	9
Figure (I.9) : Cellule, module, panneau et champ PV .....	11
Figure (I.10) : Caractéristiques d'un module photovoltaïque .....	11
Figure (I.11) : Système connecté au réseau .....	12
Figure (I.12) : Système photovoltaïque hybride .....	13
Figure (I.13) : Système photovoltaïque autonomes .....	13

### Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système PV

Figure (II.1) : Schéma bloc du système étudié.....	20
Figure (II.2) : Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque idéal. ....	21
Figure (II.3) : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode .....	22
Figure (II.4) : Schéma électrique équivalent du modèle deux diodes .....	23
Figure (II.5) : Schéma de simulation du panneau photovoltaïque. ....	26
Figure (II.6) : Caractéristiques (P-V) et (I-V) d'un module photovoltaïque avec variation de G .....	27
Figure (II.7) : Caractéristiques (P-V) et (I-V) d'un module photovoltaïque avec variation de $T_c$ .....	28
Figure (II.8) : Allure de la tension de commande de l'interrupteur .....	29
Figure (II.9) : Circuit électrique du hacheur « Boost ». ....	29
Figure (II. 10) : Système PV conçu autour d'un hacheur Buck-Boost. ....	30
Figure (II.11) : Modèle R-C de la batterie .....	32
Figure (II.12) : Réponse en tension et état de charge de la batterie .....	33
Figure (II.13) : Caractéristique $P_{pv}$ ( $V_{pv}$ ) et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation .....	35
Figure (II.14) : Organigramme de la méthode perturbation et observation .....	36
Figure (II.16) : Variation de la tension, le courant et la puissance avec la méthode PO .....	37

---

Figure (II.17) : Positionnement du point de fonctionnement. ....	37
Figure (II.18) : Algorithme basée sur la méthode incrément de conductance .....	39
Figure (II.19) : Variation de la tension, le courant et la puissance en fonction de temps avec la méthode CI sous STC .....	40
Figure (II.20) : Structure générale d'un système basé sur la logique floue .....	41
Figure (II.21) : Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie .....	43
Figure (II.22) : Variation de la tension, le courant et la puissance en fonction de temps avec la méthode CI amélioré. ....	44
Figure (II.23) : Variation de la tension en fonction de temps. ....	45
Figure (II.24) : Variation de courant en fonction de temps.....	45
Figure (II.25) : Variation de la puissance en fonction de temps. ....	45

**Chapitre III : Dimensionnement et gestion de l'énergie du système PV**

Figure (III.1) : Représentation du nombre d'heure équivalente d'une journée de rayonnement Solaire .....	49
Figure (III.2) : L'orientation idéale d'un module photovoltaïque .....	50
Figure (III.3) : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques .....	50
Figure (III.4) : Diagramme de gestion d'un système PV avec batteries. ....	57
Figure (III.5) : Allure de profil de consommation de la maison .....	58
Figure (III.6) : Allures de profil d'ensoleillement (a) et de température (b).....	59
Figure (III.7) : Bloc de simulation de système global.....	60
Figure (III.8) : Allure de la tension du bus continue Vdc.....	60
Figure (III.9) : Allure de puissance de batterie(a), courant de batterie (b) et la tension de batterie (c). .....	61
Figure (III.10) : Allure de la puissance de panneau photovoltaïque. ....	61
Figure (III.11) : Allure de la puissance disponible .....	61
Figure (III.12) : Etat de charge de la batterie. ....	62
Figure (III.13) : Allure de la superposition des différentes puissances (Ppv, Pch, Pdis, Pbat)62	
Figure (III.14) : Zooms des jours (1 et 3).....	63

**Chapitre IV : Système de gestion de puissance basé sur la logique floue**

Figure(IV.1): Fonctions d'appartenances des entrées et de la sortie de la charge P1.....	72
Figure(IV.2): Fonctions d'appartenances des entrées et de la sortie de la charge (P1+P2).....	72
Figure(IV.3): Fonctions d'appartenances des entrées et de la sortie de la charge (P1+P2+P3) .....	73
Figure(IV.4): Profil d'ensoleillement (a) et de température (b) pour une période de 7 jours..	74

Figure(IV.5): Allures des différents profils de charge, la charge ( $P_{ch1}=P1$ ) (a), la charge ( $P_{ch2}=P1+P2$ ) (b) et la charge ( $P_{ch3}=P1+P2+P3$ ) (c).....	75
Figure(IV.6): Le courant (a) et la tension(b) de batterie .....	76
Figure(IV.7): Etat de charge des batteries(SOC) .....	76
Figure(IV.8) : Puissances disponibles .....	77
Figure(IV.9) : Allures des différentes puissances : PV, charge, batterie. ....	77
Figure(IV.10) : Zoom du jour1 .....	78
Figure(IV.11) : Zoom des jours 2 et 3.....	79
Figure(IV.12) : Zooms du jour 5.....	80

## Liste des tableaux

### Chapitre II : Modélisation et optimisation d'un système PV

Tableau (II.1) : Paramètres électriques des panneaux SIEMENS SM 110-24 de 110W .....	26
Tableau (II.2) : Table de vérité résume le principe de fonctionnement de la méthode perturbation et observation.....	35
Tableau (II.3) : Table du contrôle FUZZY pour déterminer la sortie $\Delta C$ .....	43

### Chapitre III : Dimensionnement et gestion de l'énergie du système PV

Tableau (III.1) : Consommation journalière pour une maison .....	48
Tableau (III.2) : Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude .....	51
Tableau (III.3) : Les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance crête. ....	52
Tableau (III.4) : Résultats de calcul du dimensionnement de l'installation photovoltaïque....	55
Tableau (III.5) : Synthèse sur fonctionnement par phase du système PV.....	65

### Chapitre IV: Système de gestion de puissance basé sur la logique floue

Tableau (IV.1) : Modes de fonctionnement du système de gestion .....	70
Tableau (IV.2) : Les règles du contrôleur logique flou (P1).....	72
Tableau (IV.3) : Les règles du contrôleur logique flou (P1+P2) .....	73
Tableau (IV.4) : Les règles du contrôleur logique flou (P1+P2+P3).....	73

## Liste des abréviations, sigles et acronymes

PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
PPM	Point de puissance maximale (Maximum PowerPoint)
MPPT	Maximum Power Point Tracking
DC/AC	Convertisseur continu-alternatif
DC/DC	Convertisseur continu-continu
SMES	Les stockages d'énergie magnétique supraconducteurs
CAES	Les stockages d'énergie à air comprimé
PbO2	Oxyde de plomb
Ni-Cd	Nickel-cadmium
KOH	L'hydroxyde de potassium
Ni-MH	Nickel-hydrure métallique
MLI	Modulation Large Impulsion
EDC	Etat de charge
EDC <sub>min</sub>	Etat de charge maximale
EDC <sub>max</sub>	Etat de charge maximale
FEM	Force électromotrice
P&O	Perturbation et observation
CI	Conductance incrémentielle
FLC	Contrôleur de logique floue (Fuzzy Logic Controller)
STC	Condition de charge normale (standard test conditions)
CdTe	Le tellure de cadmium
GaAs	Gallium et d'arséniure

## Liste des symboles

### Tension

$V_{co}$	Tension en circuit ouvert
$V_{tco}$	Tension totale en circuit ouvert
$V_{dc}$	Tension du bus continu
$U_m$	Tension correspondant à $P_{max}$
$V_{mpp}$	Tension au point de puissance maximale
$V_{opt}$	Tension optimale
$V_t$	Tension thermique
$\Delta V$	La variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température
$V_L$	La tension aux bornes de l'inductance
$V_{ch}$	Tension de la charge
$V_{pv}$	Tension de sortie du panneau photovoltaïque
$V_{batt\_co}$	Tension de la batterie en circuit ouvert
$U_{tension-sys}$	Tension du système choisie en fonction de la puissance à produire.
$\Delta V$	La variation de la tension

### Courant

$I_0$	Courant inverse de saturation
$I_{ph}$	Photo courant
$I_d$	Courant de diode
$I_{pv}$	Le courant délivré par le module
$I_{sh}$	Courant shunt diodes
$I_{mpp}$	Courant au point de puissance
$I_{opt}$	Courant optimum
$I_{pv}$	Courant de sortie du panneau photovoltaïque
$I_{ch}$	Courant dans la charge résistive
$I_{batt}$	Courant de la batterie
$I_{tcc}$	Courant de court-circuit Total
$I_{d1}, I_{d2}$	Les courants qui traversant la première et la deuxième diode
$\Delta I$	La variation du courant

Puissance

$P_c$	Puissance crête de générateur Photovoltaïque
$P_{dis}$	Puissance disponible
$P_{pv}$	Puissance du champ PV
$P_{ch}$	Puissance de la charge
$P_{ch,m}$	Puissance maximale de la charge
$P_{mpp}$	Puissance maximale
$P_{batt}$	Puissance des batteries
$P_{pv,u}$	Puissance unitaire d'un module photovoltaïque
$P_m$	Puissance crête maximum

Résistance

$R$	Résistance interne
$R_{sh}$	Résistance parallèle
$R_s$	Résistance série

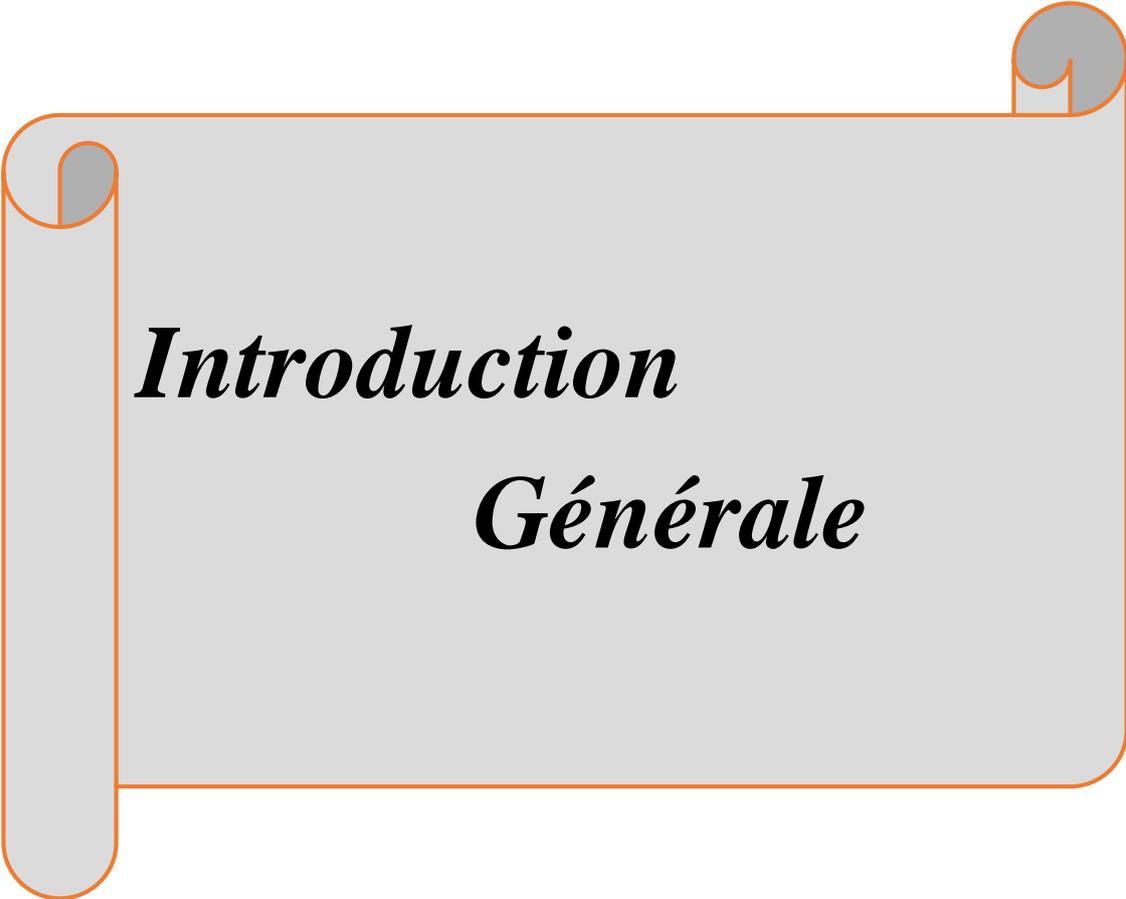
Autres

$\Delta G$	La variation de l'insolation
$G$	L'éclairement absorbé par le panneau
$\Delta T_c$	La variations de la température.
$T$	La période de la commutation
$T_r$	L'interrupteur
$C$	condensateur
$N_{ja}$	Nombre de jour d'autonomie
$\eta_{ond}$	Rendement de l'onduleur
$\Delta\alpha$	une variation de sortie
$E_c$	Besoins énergétiques journaliers
$T_{ch}$	Durée de fonctionnement
$I_r$	Irradiation solaire
$N_{pt}$	Le nombre total des modules
$N_{pv-parallèle}$	Nombre de panneau en parallèle
$N_{pv-série}$	Nombre de panneau en série
$N_s$	Nombre de cellule en série
$N_P$	Nombre de cellule en parallèle

MOS	Transistor Mosfet
FF	Facteur de forme
$\eta$	Le rendement
$G_{STC}$	L'éclairement dans les conditions standard
$T_{STC}$	La température de jonction dans les conditions standard
K	Constant de Boltzmann.
$\eta_B$	Rendement de la batterie
$C_p$	Coefficient correcteur
$T_c$	Température de jonction
$E_g$	Energie de gap
A	Facteur d'idéalité de la Photopile
q	Charge de l'électron
$\alpha_{cc}$	Coefficient d'incrémentatation du courant
$P_D$	Profondeur de décharge des batteries
$\beta_{co}$	Coefficient d'incrémentatation de tension $V_{co}$
$Q_d$	La quantité de charge manquante par rapport à $C_{batt}$
$N_{eq}$	Nombre d'heure équivalente d'ensoleillement dans les conditions STC

Unités de mesure

C	Capacité du condensateur, [F]
E	Énergie, [Wh]
I	Courant, [A]
G	Eclairement, [ $W/m^2$ ]
L	Inductance, [H]
P	Puissance, [W]
R	Résistance, [ $\Omega$ ]
T	Température, [ $^{\circ}C$ ]



***Introduction***

***Générale***

## **Introduction générale**

La majeure partie de l'énergie consommée dans le monde aujourd'hui (plus de 80%) provient encore de sources non renouvelables telles que les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et l'uranium. Bien que ces réserves se soient accumulées sur des millions d'années par des processus géologiques, elles sont par nature limitées et diminueront avec le temps [1]. Face à cette réalité, il devient impératif d'exploiter massivement les énergies alternatives renouvelables et durables comme l'énergie éolienne, solaire, hydraulique et la biomasse.

Parmi les solutions énergétiques prometteuses pour l'avenir, l'énergie solaire photovoltaïque se démarque comme une option particulièrement intéressante. Cette technologie exploite une ressource quasi-inépuisable et omniprésente sur notre planète en transformant directement une partie du rayonnement solaire en électricité. Au-delà de son caractère renouvelable, elle présente de nombreux autres avantages, tels qu'une production propre avec très peu d'émissions polluantes, des coûts d'entretien faibles [2].

Afin d'exploiter au mieux le potentiel des installations photovoltaïques, deux problématiques clés doivent être adressées : la poursuite du point de puissance maximale et la gestion efficace de l'énergie produite. L'objectif est d'extraire le maximum de puissance disponible, quelles que soient les conditions météorologiques. Pour y parvenir, diverses méthodes MPPT ont été développées, allant des algorithmes classiques comme Perturbation et Observation (P&O) et Incrémental conductance (IncCond), aux méthodes intelligentes telles que le contrôle par logique floue [3].

Dans cette optique, notre étude vise à développer un système photovoltaïque autonome performant qui fonctionne à son point de puissance maximale. Ce système est associé à un algorithme de supervision permettant d'assurer une gestion efficace entre la production et la consommation, en répartissant de manière optimale la puissance disponible entre les charges électriques à alimenter et les éléments stockage. Ce mémoire détaille les différents aspects de cette étude dans quatre chapitres :

Le premier chapitre décrira les concepts de base de l'énergie solaire photovoltaïque et les différents systèmes photovoltaïques existants. Une étude détaillée des différents moyens de stockage d'énergie sera également présentée, avec un focus sur les batteries au plomb retenues pour cette étude.

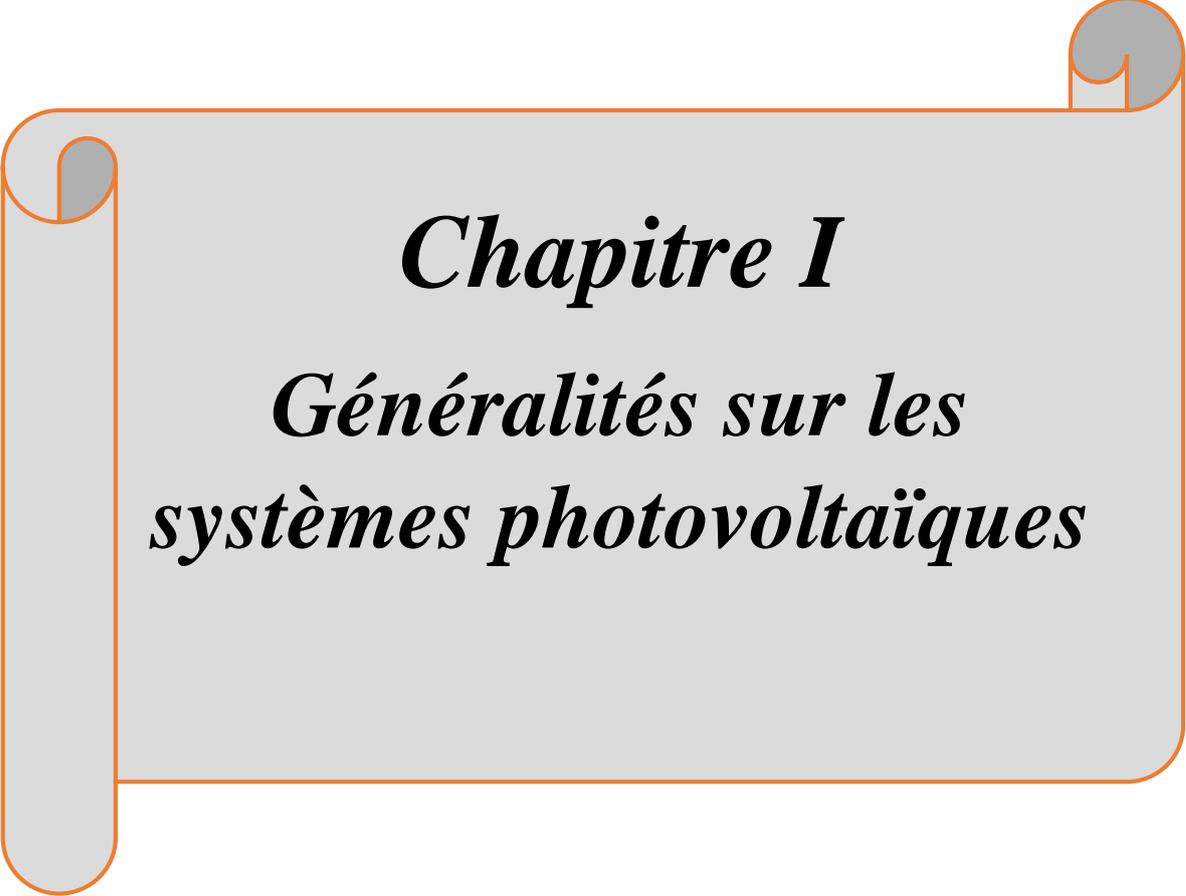
Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des composants principaux du système, en particulier le module photovoltaïque et la batterie de stockage. Il abordera ensuite

les stratégies de maximisation de la puissance extraite des panneaux solaires. Des simulations sur Matlab/Simulink seront présentées pour trois algorithmes : perturbation et observation (P&O), Conductance Incrémentielle (IncCond), ainsi qu'une version avancée de l'IncCond basée sur la logique floue. Une analyse comparative de ces trois méthodes sera menée dans l'optique d'identifier celle offrant les meilleures performances pour l'optimisation du système photovoltaïque.

Le troisième chapitre se concentrera sur le dimensionnement de notre installation photovoltaïque autonome, comprenant des panneaux solaires, des éléments de stockage et une charge représentant les équipements électriques d'une maison à usage d'habitation. Nous développerons par la suite un algorithme de gestion d'énergie dans cette installation. Une simulation sera réalisée, suivie d'une analyse des résultats qui nous permettra d'identifier les limites de cet algorithme. Cette évaluation sera la base pour concevoir une stratégie de gestion intelligente dans le chapitre suivant.

Le dernier chapitre sera consacré à la gestion d'énergie intelligente de notre système photovoltaïque autonome. Nous introduisons la logique floue, une approche intelligente qui permet l'amélioration des performances et la satisfaction des besoins énergétiques. Cette méthode vise à assurer la continuité de l'alimentation énergétique de la maison, tout en évitant de tomber dans la pénurie totale de l'alimentation.

Une conclusion générale clôturera ce mémoire en résumant l'ensemble du travail étudié.



***Chapitre I***  
***Généralités sur les***  
***systèmes photovoltaïques***

## I.1. Introduction

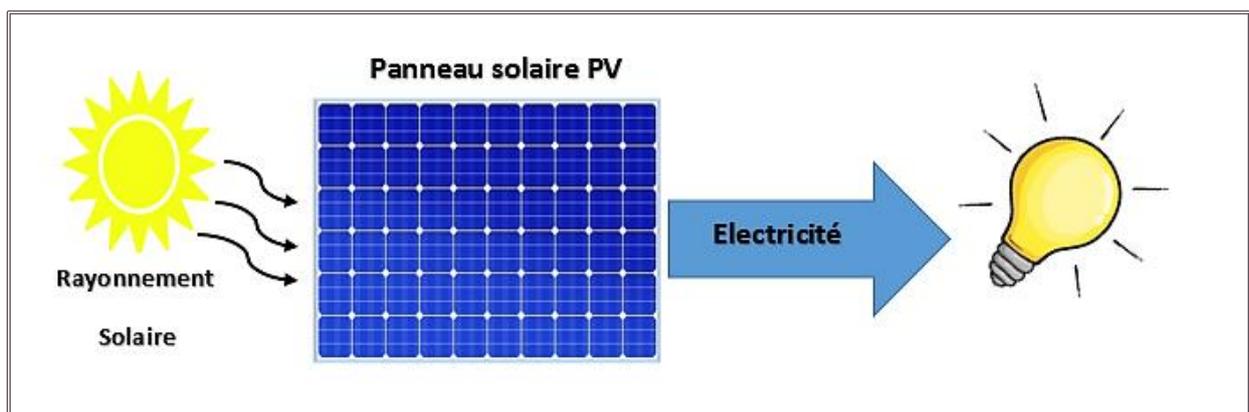
L'énergie solaire représente une source énergétique propre, renouvelable et pratiquement inépuisable. Grâce aux progrès des systèmes photovoltaïques (PV), cette ressource solaire peut désormais être convertie efficacement en électricité. Bien que découvert dès le 19<sup>ème</sup> siècle, le principe de la cellule photovoltaïque a connu un réel essor applicatif à partir des années 1950 pour alimenter les satellites, avant de s'étendre aux installations terrestres isolées dans les années 1970. Aujourd'hui, le photovoltaïque prend une place prépondérante dans le paysage énergétique mondial, de par sa fiabilité et son respect de l'environnement [3].

Dans ce premier chapitre, nous expliquerons le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ainsi que les différentes configurations de systèmes PV existants, à savoir les systèmes autonomes, les systèmes connectés au réseau et les systèmes hybrides. Notre étude se concentrera plus particulièrement sur les systèmes photovoltaïques autonomes, c'est-à-dire non raccordés au réseau électrique. Pour assurer une production d'électricité en continu, ces systèmes requièrent un moyen de stockage de l'énergie solaire par batteries.

Enfin, nous étudierons la gestion énergétique optimale des installations autonomes avec stockage par batteries, qui constitue le cœur de notre travail.

## I.2. Définition de l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque, également connue sous le nom d'énergie photovoltaïque, est une forme d'énergie électrique obtenue directement à partir de la lumière du soleil grâce à des panneaux ou des centrales photovoltaïques. Elle découle de la conversion directe d'un photon en électron dans un semi-conducteur. Cette énergie est qualifiée de renouvelable car sa source, le soleil est perçu comme inépuisable à l'échelle de l'histoire humaine.



**Figure (I.1) :** Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

### I.3. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est la source d'énergie primaire pour de nombreux processus sur terre, notamment pour les systèmes photovoltaïques qui convertissent cette énergie lumineuse en électricité. C'est une ressource inépuisable qui peut être exploitée de manière durable par les systèmes photovoltaïques pour produire de l'électricité propre et renouvelable.

Le rayonnement solaire qui atteint la terre est composé de différentes parties du spectre électromagnétique [4] :

- Le rayonnement visible (lumière) représente environ 43% du rayonnement.
- Le rayonnement infrarouge (chaleur) représente 49%.
- Le rayonnement ultraviolet représente 8%.

L'énergie provenant du rayonnement solaire n'est pas constante et dépend de plusieurs facteurs :

- Le moment de la journée joue un rôle majeur, avec un maximum de rayonnement reçu à midi solaire lorsque le soleil est au plus haut dans le ciel.
- La saison a également une forte influence, avec un rayonnement plus élevé en été qu'en hiver pour les régions de moyennes latitudes.
- La météo locale est déterminante. La présence de nuages réduit fortement le rayonnement transmis, tandis qu'un ciel dégagé permet un rayonnement maximal.

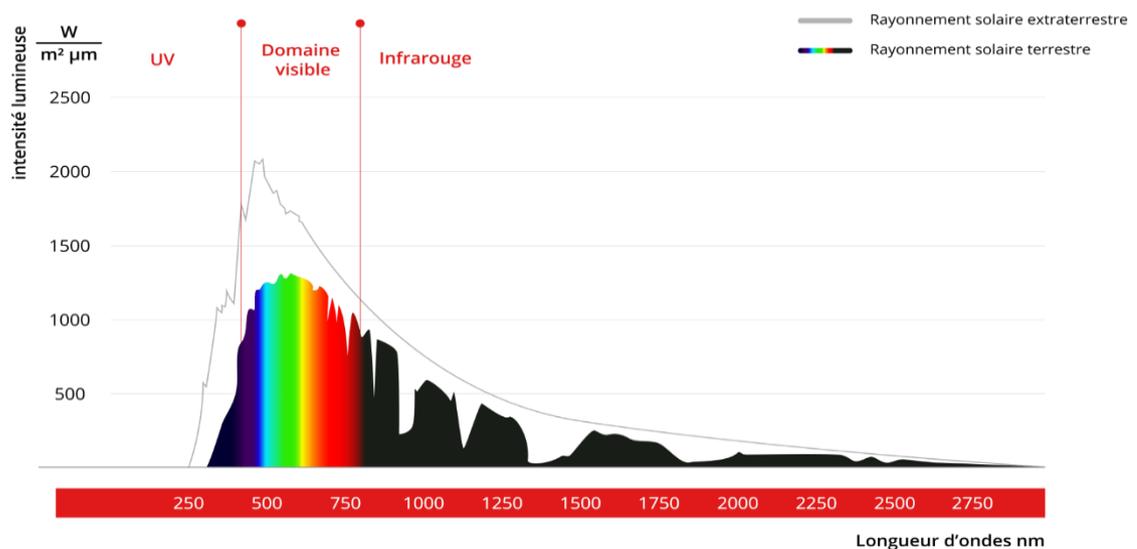


Figure (I.2): Rayonnement solaire [5].

## **I.4. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

Les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont les suivants [6]:

### **I.4.1. Avantages de l'énergie photovoltaïque**

- La lumière solaire représente la ressource renouvelable la plus abondante parmi toutes les autres.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.
- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie propre et écologique qui ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets polluants.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.

### **I.4.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

- Le rendement des cellules photovoltaïques est faible.
- Les modules photovoltaïques ne fonctionnent pas quand l'énergie solaire n'est pas disponible.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

## **I.5. La cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque, également appelée photopile, constitue le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. C'est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en courant électrique grâce à un processus connu sous le nom d'effet photovoltaïque.

Elle fonctionne grâce à son composé principal le silicium, qui est obtenu à partir de la silice, l'un des matériaux les plus répandus sur notre planète [7].

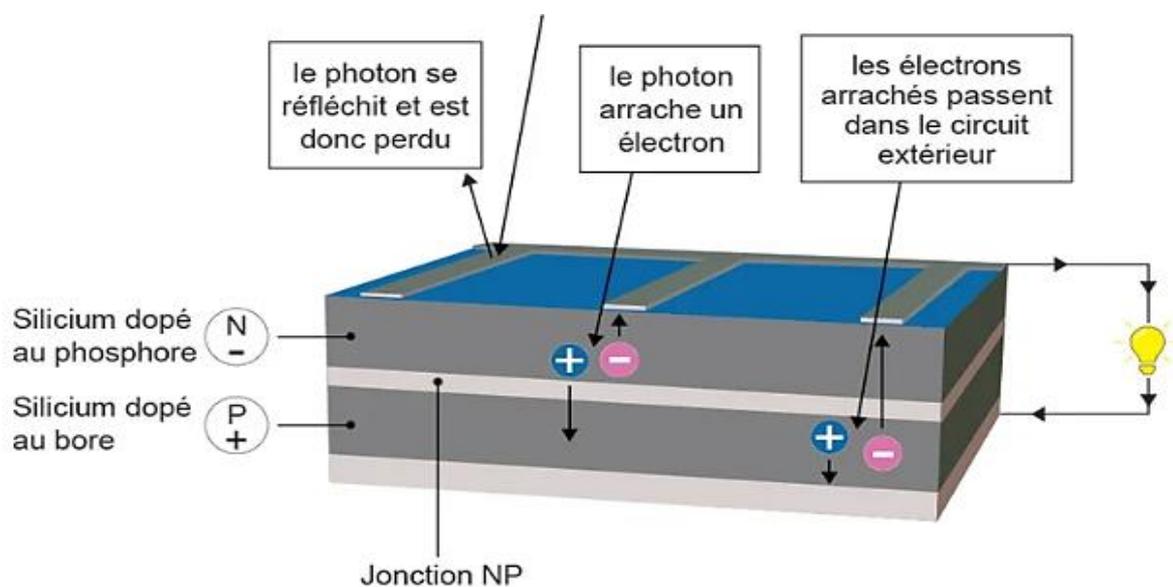
### **I.5.1. Effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par le français Edmond Becquerel, désigne la capacité que possèdent certains matériaux, notamment les semi-conducteurs, à convertir directement les différentes composantes de la lumière du soleil (et non sa chaleur) en électricité [5].

C'est un processus qui génère une tension ou un courant électrique dans une cellule photovoltaïque. Ces cellules solaires sont fabriquées à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) :

- Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (**zone P**).
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (**zone N**).

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la **zone P** et les électrons, chargés négativement, dans la **zone N**. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque [3].



**Figure (I. 3):** Structure et principe de fonctionnement d'une cellule PV [5].

### I.5.2. Types des cellules photovoltaïques

Les technologies photovoltaïques (PV) reposent sur des cellules qui convertissent le rayonnement solaire en courant électrique continu. Ces cellules sont ensuite assemblées en modules, qui sont à leur tour reliés à différents composants électriques tels que l'onduleur et le boîtier de raccordement, formant ainsi un système photovoltaïque complet. La durée de vie moyenne d'un module est d'environ 25 ans [8].

Il existe également divers types de cellules solaires, chacun ayant ses propres caractéristiques en termes de rendement et de coût.

### I.5.2.1. Les plus utilisés

#### ❖ Les cellules en silicium monocristallin :

Les cellules monocristallines se distinguent par leur couleur très foncée, résultant d'un seul cristal de silicium bien que leur rendement soit supérieur à celui des cellules polycristallines, leur fabrication plus délicate les rend plus coûteuses. Les panneaux monocristallins sont les plus performants, avec des cristaux très purs orientés dans une même direction, ce qui leur permet de produire plus d'énergie en cas d'ensoleillement direct. Leur rendement moyen est d'environ 18 % [9].



**Figure (I.4) :** La cellule monocristalline [10].

#### ❖ Les cellules en silicium polycristallin :

On reconnaît ces cellules à leur couleur bleutée. Elles sont composées de cristaux orientés dans différentes directions : c'est la raison pour laquelle leur couleur n'est pas homogène. À l'échelle mondiale, c'est le matériau photovoltaïque le plus utilisé, car il offre à ce jour le meilleur rapport qualité/prix. Les coûts de fabrication sont en effet inférieurs au silicium monocristallin [4].

L'inconvénient majeur des cellules en silicium polycristallin est qu'elles ont un rendement moyen de 12 à 15 % inférieur à celle en silicium monocristallin [9].

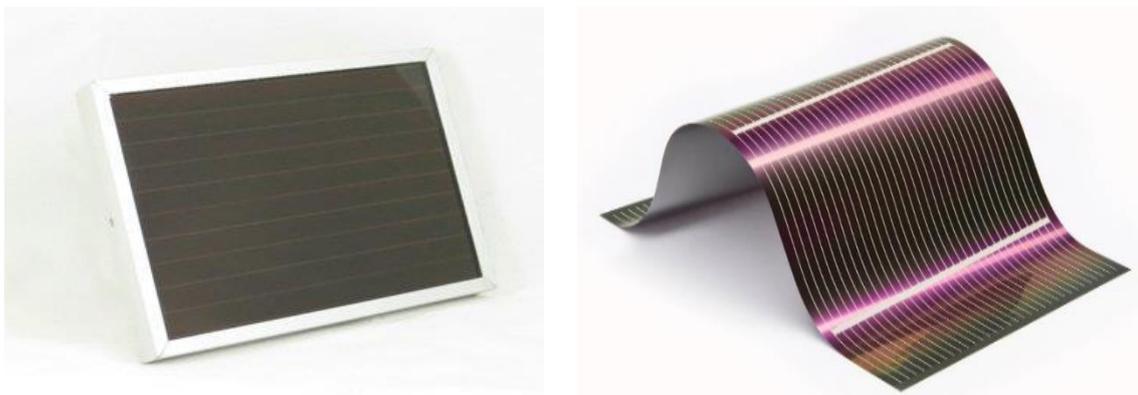


**Figure (I.5):** La cellule en silicium polycristallin [10].

❖ Les cellules au silicium amorphe en couche mince :

Il existe également des cellules au silicium amorphe, généralement de couleur marron ou gris foncé. Elles sont bien plus fines que les cellules en silicium cristallin avec un rendement compris entre 6 et 9 % [9]. Leur durée de vie est limitée à environ une dizaine d'années.

Ces cellules sont utilisées dans des applications nécessitant des formes adaptées, ainsi que dans des versions encore plus minces, souvent intégrées dans des appareils comme les petites calculatrices. De plus, elles sont employées dans des contextes tels que les tentes de camping pour alimenter des équipements électroniques lors d'expéditions en plein air [8].



**Figure (I.6) :** Les cellules au silicium amorphe [10].

### I.5.2.2. Les moins utilisés

❖ Les cellules organiques et les pérovskites :

Les cellules organiques et à pérovskite présentent un grand potentiel en termes de coût, de flexibilité et d'efficacité, elles rencontrent encore plusieurs défis qui doivent être surmontés avant de devenir largement utilisables à grande échelle. Elles se dégradent encore trop rapidement sous l'effet de l'environnement, ce qui limite leur durée de vie.

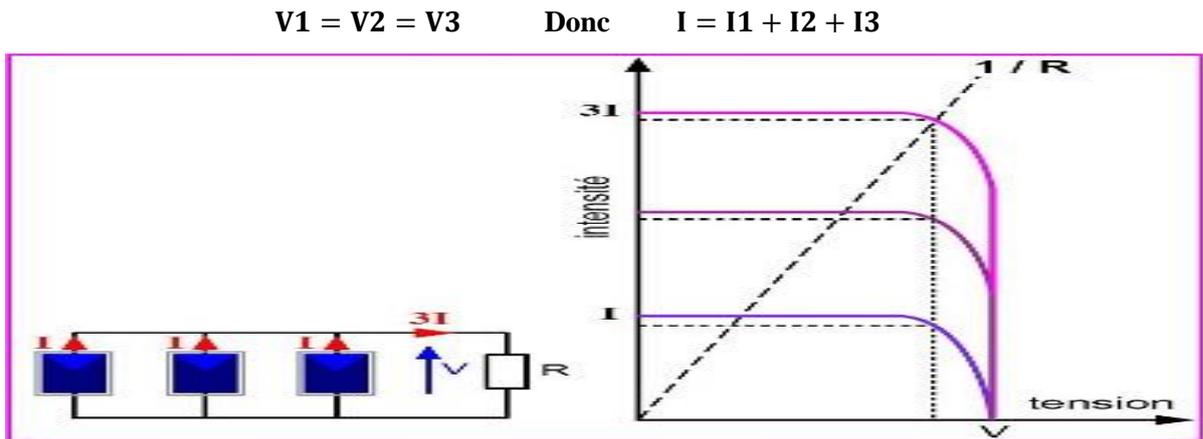
❖ Les cellules solaires (CdTe) et (GaAs) :

Les cellules solaires à base de sélénium et de tellure de cadmium (CdTe) présentent des risques liés à la toxicité du cadmium, tandis que les cellules solaires à base de gallium arsenide (GaAs) sont très coûteuses à fabriquer, limitant ainsi leur utilisation à des applications spécialisées, principalement dans l'industrie spatiale.

**I.5.3. Groupements des cellules photovoltaïques**

**I.5.3.1. Groupements des cellules en parallèle**

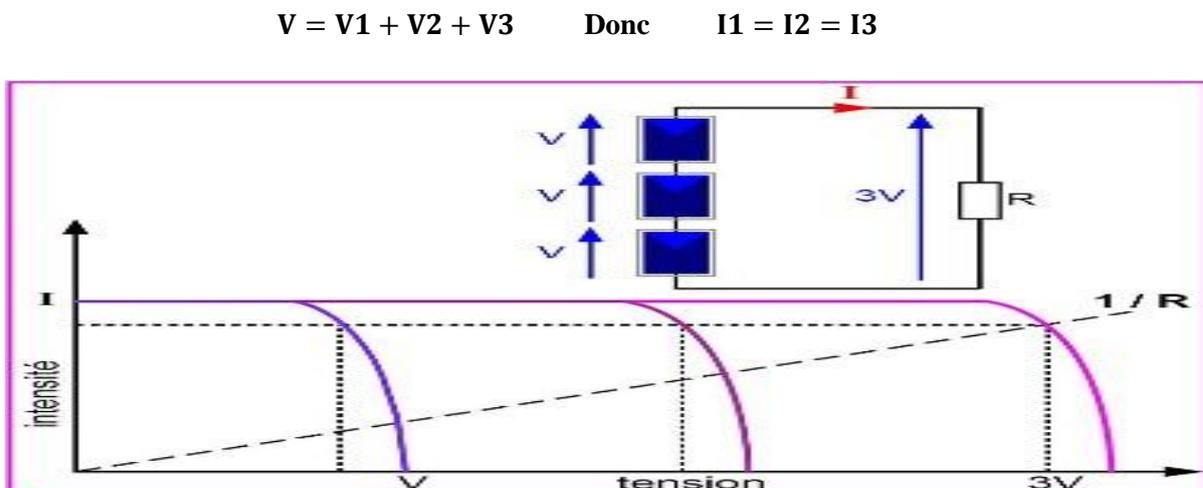
Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [11], figure(I.7).



**Figure (I.7) :** Schéma de 3 cellules PV associées en parallèle [12].

**I.5.3.2. Groupements des cellules en série**

Une association de (Ns) cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque, les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [11], figure (I.8).



**Figure (I.8) :** Schéma de 3 cellules PV associées en série [12].

### I.5.3.3. Groupements des cellules en Série-Parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle des cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension totale en circuit ouvert sont données par les relations :

$$I_{tcc} = N_P \times I_{cc}$$

$$V_{tco} = N_S \times V_{co}$$

$N_P$  : Nombre de cellule en parallèle.

$N_S$  : Nombre de cellule en série.

➤ Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau des cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante [13].

## I.6. Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque ou un générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules PV élémentaires montées en série ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) [14].

Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire, elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit [15].

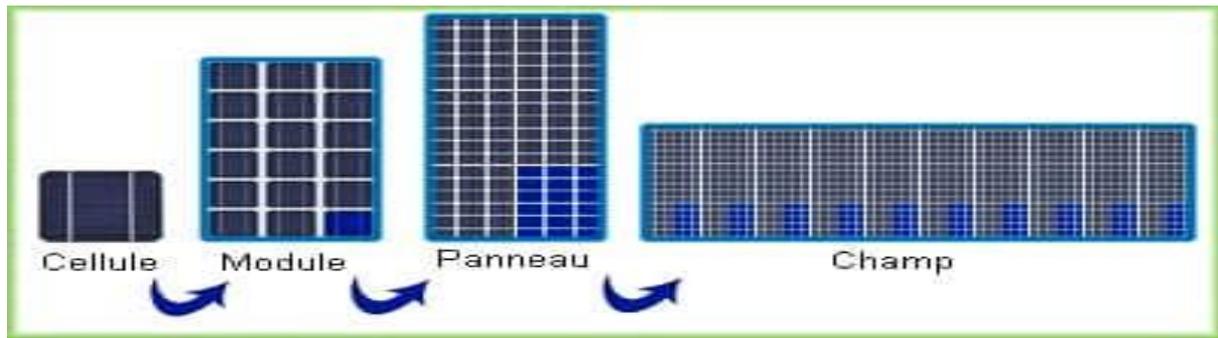


Figure (I.9) : Cellule, module, panneau et champ PV [16].

## I.7. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est caractérisé par des courbes (I-V) et (P-V) dans des conditions constantes d'irradiation et de température ( $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25^\circ\text{C}$ ).

Les grandeurs physiques suivantes définissent ces courbes [13]:

- Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) : Courant débité par un module en court-circuit c'est la plus grande valeur de courant généré par un module pour une tension nulle  $V_{PV} = 0$ .
- Tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) : C'est la tension maximale qui peut délivrer un module photovoltaïque, il s'agit de la tension aux bornes d'un module PV à vide, pour un éclaircissement "plein soleil".
- La puissance de crête  $P_c$  : La puissance-crête ( $W_c$ ) d'un module photovoltaïque est la puissance électrique maximale qu'il peut fournir, dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclaircissement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- Point de fonctionnement optimum ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $PPM = V_{mp} * I_{mp}$ .
- Facteur de forme : Il est défini par la relation suivante :  $FF = \frac{PPM}{V_{CO} * I_{CC}}$
- Le rendement :  $\eta = \frac{PPM}{P_{in}} = \frac{FF * V_{CO} * I_{CC}}{P_{in}}$

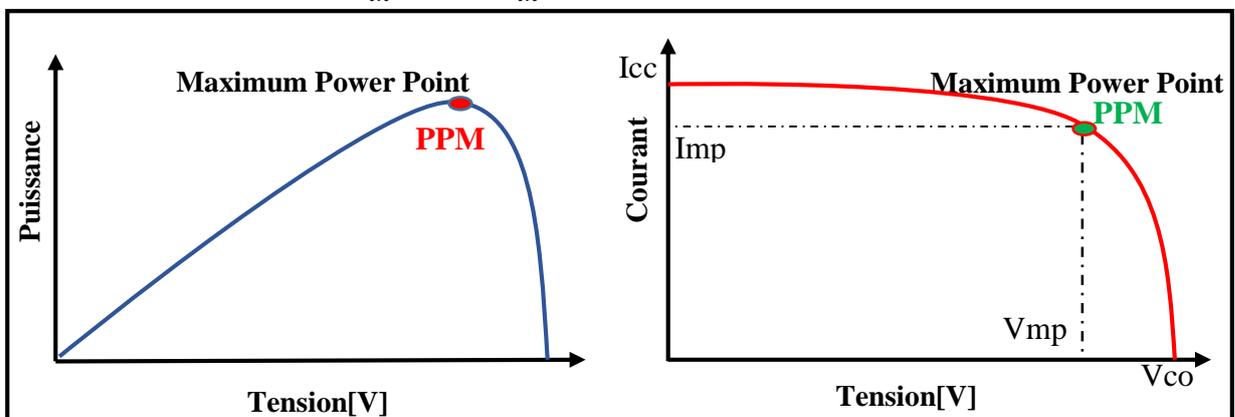


Figure (I.10) : Caractéristiques d'un module photovoltaïque.

## 1.8. Différents types de système photovoltaïques

Un système photovoltaïque convertit la lumière du soleil en électricité utilisable grâce à plusieurs éléments chacun ayant une fonction précise. Cette électricité peut être utilisée pour répondre à divers besoins, que ce soit pour alimenter une maison, recharger des appareils électroniques comme les téléphones portables, ou même pour des tâches plus spécifiques comme le pompage d'eau.

Les systèmes de conversion photovoltaïque sont généralement classés en trois catégories en fonction des besoins et des contraintes spécifiques de chaque situation.

### I.8.1. Système photovoltaïque connecté au réseau

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est l'application la plus envisagée en zone urbaine avec l'installation des modules photovoltaïques (PV) au sol ou sur un bâtiment, l'énergie électrique produite par ces modules est directement injectée dans le réseau électrique collectif via un convertisseur de puissance qui adapte l'énergie produite, comme le montre la figure (I.11) ci-dessous. Contrairement aux systèmes autonomes, cette électricité n'est pas stockée dans des batteries, mais est plutôt acheminée vers le réseau local de distribution (même le surplus de production) [11].

Ces systèmes ne servent pas d'alimentation de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne disposent pas de réserve d'énergie.

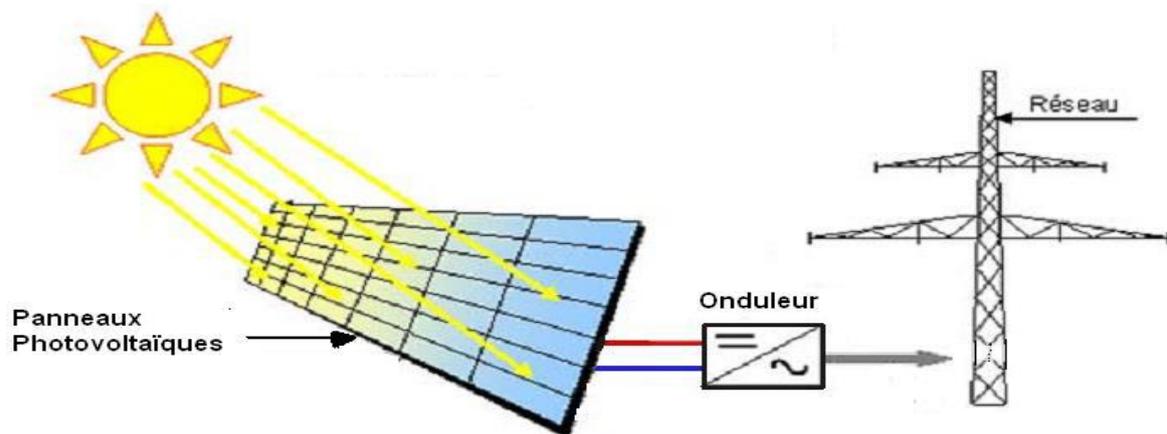


Figure (I.11) : Système connecté au réseau [6].

### I.8.2. Système photovoltaïque hybride

Le système hybride est la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables, comme illustré dans la figure (I.12). Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau.

Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène dans le but d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation.

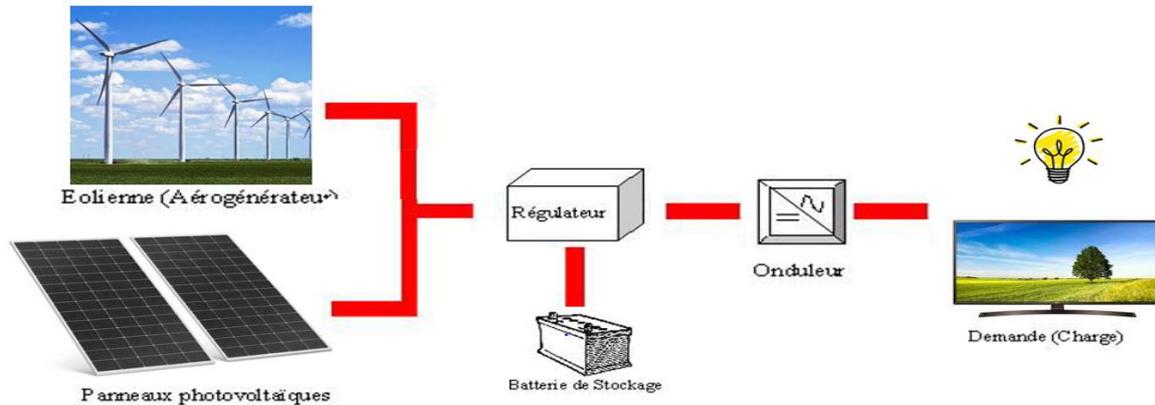


Figure (I.12) : Système photovoltaïque hybride [17].

### I.8.3. Système photovoltaïque autonome

C'est une topologie utilisée pour les installations isolées du réseau électrique. Dans ce système, illustré dans la figure (I.13), les panneaux solaires sont connectés à un régulateur de charge qui contrôle la charge des batteries. Les batteries stockent l'énergie produite par les panneaux solaires, et un onduleur convertit ensuite l'énergie stockée en courant alternatif pour alimenter les charges électriques. Un système photovoltaïque autonome peut être dimensionné en fonction des besoins énergétiques spécifiques de l'utilisateur [18]. Il peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques tels que des lampes, des réfrigérateurs, des pompes à eau, des systèmes de communication, etc.

L'autonomie du système dépend de la capacité des batteries à stocker l'énergie et de l'efficacité des panneaux solaires à la convertir.

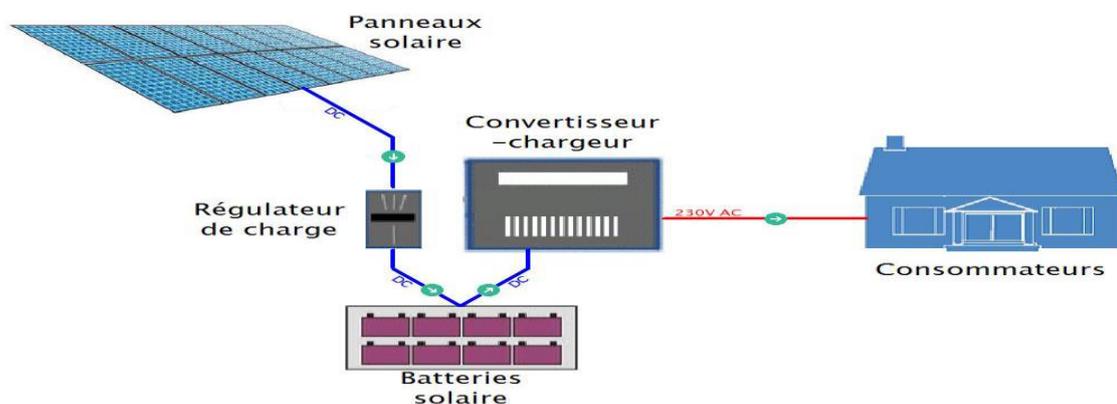


Figure (I.13) : Système photovoltaïque autonome [17].

Il existe deux types de systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage et sans stockage.

### **I.8.3.1. Système autonome sans stockage**

Dans ce cas, le système est connecté directement sur l'installation électrique intérieure du site. Il ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour le démarrage. C'est intéressant pour toutes les utilisations qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Le pompage photovoltaïque pour l'approvisionnement en eau dans des zones reculées est un exemple représentatif de cette catégorie de système autonome. Cela convient également à des usages simples comme la recharge de téléphones portables avec des chargeurs solaires en extérieur, ou l'utilisation de lampes solaires pour le camping.

### **I.8.3.2. Système autonome avec stockage**

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes. Elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée [13]. Donc, le stockage est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

Notre étude porte sur un système photovoltaïque autonome avec stockage, visant à alimenter en électricité une maison estivale. Ce type de système, populaire et polyvalent, a été choisi pour sa capacité à répondre aux divers besoins énergétiques d'une habitation. Le stockage d'énergie joue un rôle essentiel, permettant d'emmagasiner l'électricité produite par les panneaux solaires pour la restituer à la charge lorsque l'ensoleillement est insuffisant, assurant ainsi une alimentation continue, y compris pendant la nuit.

L'objectif est d'évaluer l'efficacité, la fiabilité et la rentabilité économique d'une telle solution photovoltaïque autonome, tout en analysant son adaptation aux différents profils de consommation d'une maison. Cette étude apportera un éclairage sur les performances et l'adéquation de ce système pour une utilisation résidentielle saisonnière.

## **I.9. Fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque**

Pour optimiser l'exploitation de l'énergie solaire dans un système photovoltaïque, il est essentiel de concevoir un dispositif d'adaptation afin de réguler et maximiser la puissance transmise à la charge. Cette fonction est généralement assurée par un convertisseur statique

agissant comme un traqueur du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking).

Ce convertisseur MPPT comprend un circuit de puissance adapté au type de charge (hacheur DC/DC pour le courant continu ou onduleur DC/AC pour l'alternatif), ainsi qu'un circuit de commande doté d'un algorithme dédié. Ce dernier ajuste l'impédance du convertisseur de manière à extraire le maximum de puissance disponible du générateur photovoltaïque et la transférer de façon optimale vers la charge. L'utilisation d'un tel dispositif d'interfaçage s'avère donc cruciale pour exploiter pleinement le potentiel énergétique du système.

## **I.10. Le stockage d'énergie électrique**

Le stockage d'énergie est la capacité à conserver une quantité d'énergie pour une utilisation future. Ce besoin de stockage se présente la demande en énergie est plus élevée que la production instantanée, ou lorsque la production d'énergie solaire est faible, comme la nuit ou par temps nuageux.

La quantité d'énergie requise dépend des appareils en service, qui peuvent fonctionner de manière continue ou être activés en fonction des besoins spécifiques.

L'apport d'énergie solaire se produit de manière périodique en fonction des cycles de jour et de nuit, aléatoire (conditions météorologiques) [6].

Diverses technologies sont utilisées pour stocker l'énergie électrique, telles que les batteries, les stockages d'énergie magnétique supraconducteurs (SMES), les super condensateurs, les stockages d'énergie à air comprimé (CAES) et les stockages hydrauliques pompés. Parmi celles-ci, la batterie d'accumulateurs électrochimiques est la plus répandue dans les systèmes photovoltaïques.

## **I.11. Les différents éléments de stockage d'énergie électrique**

Le stockage d'énergie peut être divisé en deux catégories principales en fonction de sa capacité à retenir l'énergie et de la façon dont cette énergie est stockée et récupérée : le stockage à court terme et le stockage à long terme [15].

### **I.11.1. Stockage à court terme**

Permet de stocker l'énergie dans un système pour une utilisation immédiate, sans besoin de transformation supplémentaire. Les super-condensateurs dans les dispositifs électroniques portables est un exemple de cette méthode fournissant rapidement de l'électricité en quelques

secondes à quelques minutes. Cela répond aux besoins urgents en électricité et offre une solution immédiate pour diverses applications.

### **I.11.2. Stockage à long terme**

Ce type de stockage implique la conversion de l'électricité en une forme intermédiaire, telle que la chaleur ou l'air comprimé, pour une utilisation future. Il offre la possibilité de stocker d'importantes quantités d'énergie sur des périodes prolongées, allant de plusieurs heures à plusieurs jours, voire semaines dans le contexte des systèmes photovoltaïques. Parmi les méthodes de stockage les plus couramment utilisées, on retrouve le stockage électrochimique. Pour illustrer, le stockage thermique utilise l'électricité pour chauffer un matériau comme de l'eau, tandis que le stockage par air comprimé nécessite de comprimer de l'air qui est ensuite stocké pour alimenter une turbine lors de son utilisation.

Le stockage électrochimique peut être employé tant pour le stockage à court terme que pour le stockage à long terme, selon l'application et les besoins. Par exemple, les batteries rechargeables (pour téléphones, ordinateurs portables et autres appareils électroniques) utilisent un stockage électrochimique à court terme, tandis que les systèmes de stockage d'énergie à grande échelle, comme les batteries stationnaires pour l'alimentation des maisons, des bâtiments ou des réseaux électriques, sont destinés à un stockage à long terme.

#### **I.11.2.1. Définition de l'accumulateur électrochimique**

Les accumulateurs électrochimiques (batterie) sont des générateurs "réversibles" c'est-à-dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Ils sont constitués de deux électrodes, plaques positif (anodes) et plaques négatif (cathode) immergées dans un électrolyte [13].

#### **I.11.2.2 Les caractéristiques des accumulateurs électrochimiques**

Les caractéristiques des accumulateurs électrochimiques ou les batteries, comprennent plusieurs aspects importants qui déterminent leur performance et leur utilisation efficace dans les systèmes photovoltaïques. Voici quelques-unes de ces caractéristiques :

- **Capacité de batterie :** La capacité d'une batterie représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via l'électrolyte et matériaux actifs des électrodes sur une charge. Elle est exprimée en Ampère heure (1Ah=3600 Coulomb) ou en Wattheure Wh (1Wh = 3600 J).

Elle est déterminée sous des conditions de décharge fixée, habituellement à courant constant ( $C=I.t$ ) avec  $t$  : le temps de décharge au bout de laquelle la tension atteint une certaine valeur prédéfinie [6].

- Tension de batterie : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- Performance de la batterie : Si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite [19].
- L'autodécharge : L'autodécharge correspond à la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos.
- Le rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur [20].
- Durée de vie : La durée de vie des batteries solaires dépend en grande partie du nombre de cycles de charge et de décharge qu'elles peuvent supporter. Il est essentiel de comprendre que même si elles sont conçues pour résister à de nombreux cycles, leur performance peut diminuer progressivement avec le temps. En pratique, on estime généralement que ces batteries ont une durée de vie moyenne comprise entre 5 à 10 ans [21].

Cette estimation dépend de divers facteurs tels que les conditions d'utilisation, l'entretien régulier et la qualité initiale de la batterie.

### **I.11.2.3. Les différents types d'accumulateurs électrochimiques**

- Accumulateur Plomb-Acide : L'accumulateur au plomb-acide est le type de batterie le plus ancien et le plus utilisé dans les systèmes solaires aujourd'hui. Il est composé de deux électrodes, une cathode constituée d'oxyde de plomb ( $PbO_2$ ) et une anode constituée de plomb, immergées dans un électrolyte d'acide sulfurique dilué [22]. Cet électrolyte permet le passage d'un flux d'électrons entre les deux électrodes, créant ainsi un courant électrique dans la batterie. Une batterie est constituée d'un ensemble d'éléments de 2 V connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Le rendement du stockage est de l'ordre de 70%.
- Accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd) : Les batteries Nickel-Cadmium sont des accumulateurs électriques rechargeables, conçus avec des électrodes composées d'hydroxyde de Nickel pour l'électrode positive et de cadmium pour l'électrode négative. Ces électrodes sont immergées dans une solution de potassium hydroxyde (KOH) qui est utilisé comme électrolyte qui permet de fournir des ions nécessaires pour faciliter les réactions électrochimiques lors de la charge et de la décharge [22].

Elles offrent une longue durée de vie (20ans), une résistance aux surcharges et aux décharges profonds et un entretien minimal. Le cadmium est un métal lourd toxique ce qui limite leur utilisation.

- Accumulateur nickel-hydrure métallique ou Ni-MH : Dérivés des Ni-Cd, ces accumulateurs ont été développés avec 3 objectifs : augmenter la capacité par unité de volume, favoriser les charges rapides (pour le marché du téléphone portable notamment) et éliminer le cadmium, toxique pour l'environnement et déjà interdit dans certains pays [22].

L'électrode de cadmium est remplacée par un alliage apte à stocker l'hydrogène d'où son nom NiMH. À part la première caractéristique (ils sont plus compacts), ces accumulateurs ne sont pas meilleurs que les NiCd pour le solaire. Ils sont moins bons en ce qui concerne la tenue au froid.

Actuellement, les batteries plomb-acide sont choisies comme des solutions de stockage d'énergie fiables et abordables, jouant un rôle essentiel dans divers secteurs grâce à leur excellent compromis entre performance et coût [23] :

- Faible coût ;
- Un bon rendement ;
- Un meilleur compromis en terme de coût / performance / entretien ;
- Sa durée de vie ;
- Caractéristique électrochimique favorable ;
- Une large disponibilité ;
- Entretien faible ou nul ;
- Bonne tenue aux températures extrêmes.

## I.12. La gestion d'énergie photovoltaïque

Le succès d'un système photovoltaïque réside dans l'optimisation du flux d'énergie entre ses composants. Le module de supervision joue un rôle crucial à cet égard en assumant deux fonctions, le contrôle des échanges d'énergie (entre les panneaux photovoltaïques (PV), les batteries et le consommateur), la régulation (charge/décharge) du stockage d'énergie.

Le choix d'un système de supervision pour une installation photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs comme le prix, la consommation d'énergie, la fiabilité, l'intégration au système photovoltaïque, la taille de l'installation, la présence ou non d'un système de stockage d'énergie et les besoins de l'utilisateur.

Dans notre travail, nous décrivons un système photovoltaïque dont le stockage d'énergie est assuré par des batteries au plomb. A cet effet, le module de supervision sera chargé de réguler l'énergie provenant des panneaux PV et du stockage suivant la demande du consommateur.

L'algorithme de supervision est basé sur deux scénarios :

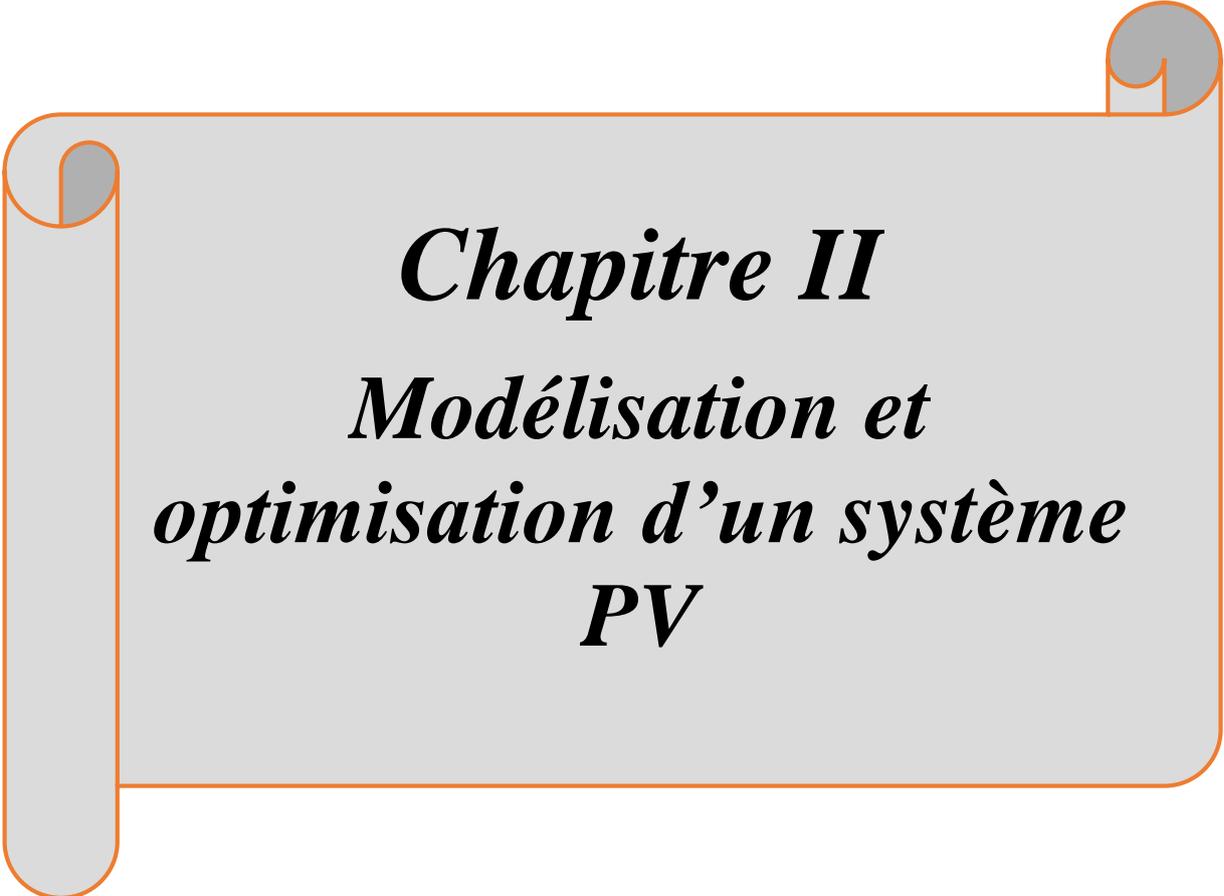
- ✓ Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux PV si l'énergie photovoltaïque est suffisante.
- ✓ Alimentation du consommateur uniquement par les batteries si l'énergie photovoltaïque est absente.

### **I.13. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons défini l'énergie solaire photovoltaïque et présenté les différents types de cellules et modules photovoltaïques, ainsi que leurs caractéristiques. Les différentes configurations de systèmes PV ont également été abordées. Une partie a été consacrée au stockage d'énergie électrique, avec une étude détaillée des diverses solutions existantes, notamment les batteries au plomb retenues pour notre cas d'étude.

Dans la suite, la modélisation du module photovoltaïque sera effectuée, ainsi que celle des autres composants du système PV. Ces modèles permettront de valider dans le prochain chapitre la stratégie globale de gestion énergétique visant une utilisation optimale.

Les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux solaires, cruciales pour exploiter au mieux leur potentiel, seront également présentées et analysées.



***Chapitre II***  
***Modélisation et***  
***optimisation d'un système***  
***PV***

## II.1. Introduction

Les systèmes de conversion photovoltaïques ont connu un développement croissant ces dernières années vu les efforts importants réalisés par les chercheurs ainsi que la commercialisation à grande échelle des panneaux photovoltaïques (PV), ce qui a permis d'améliorer le rendement de façon considérable. Un système photovoltaïque étant composé de plusieurs éléments, l'efficacité du système n'est pas dépendante uniquement de la technologie des cellules solaires implémentées dans le module de conversion photovoltaïque. En effet, une optimisation de l'énergie extraite du panneau solaire est nécessaire, on doit adapter les caractéristiques non linéaires (I-V), (P-V) du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque.

Ce chapitre est consacré à la modélisation et l'optimisation du système photovoltaïque sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Nous présenterons aussi les modèles mathématiques des sous-systèmes du système étudié.

## II.2. Description du système à étudier

Le système étudié se compose de six blocs représentés sur la figure (II.1). Le premier bloc représente la source d'énergie (panneaux photovoltaïques) dont le rôle est de convertir l'éclairement en courant continu. Le deuxième bloc est un convertisseur statique continu-continu qui permet une adaptation d'impédance afin que le panneau délivre un maximum d'énergie. Le troisième bloc représente le système de contrôle MPPT basé sur un algorithme qui permet d'agir sur le rapport cyclique pour extraire en permanence la puissance maximale. Le quatrième bloc représente la batterie qui permet le stockage de l'électricité, reliée au bloc de gestion qui assure la gestion du flux d'énergie en alimentant le dernier bloc, qui est la charge, et en protégeant la batterie contre la surcharge et la décharge profonde.

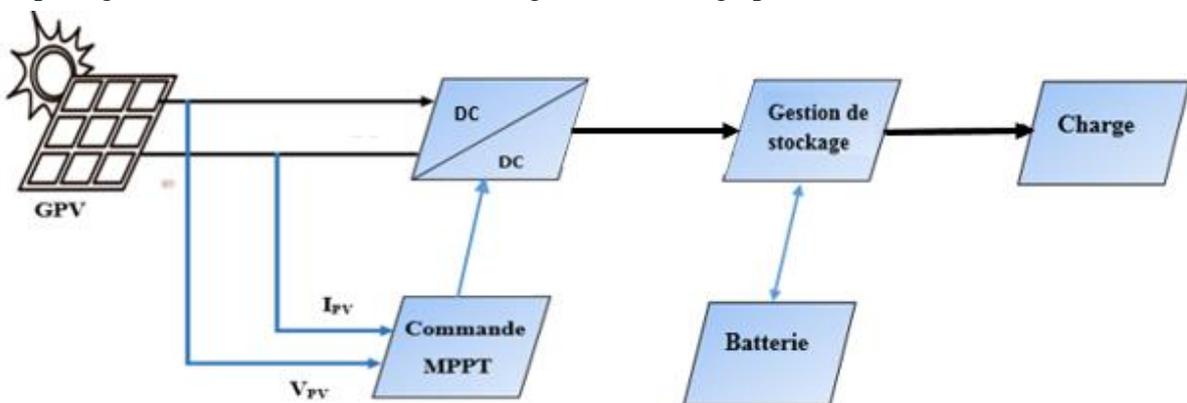


Figure (II.1) : Schéma bloc du système étudié.

### II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque. Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. Parmi ces modèles on peut citer :

#### II.3.1. Modèle idéal

Le cas idéal est obtenu en considérons que la résistance série est négligeable ( $R_s \approx 0$ ) soit les pertes nulles et que la résistance parallèle est infiniment grande ( $R_{sh} = \infty$ ) [20].

Dans ce cas, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.2), qui représente le circuit équivalent d'un panneau photovoltaïque idéal.

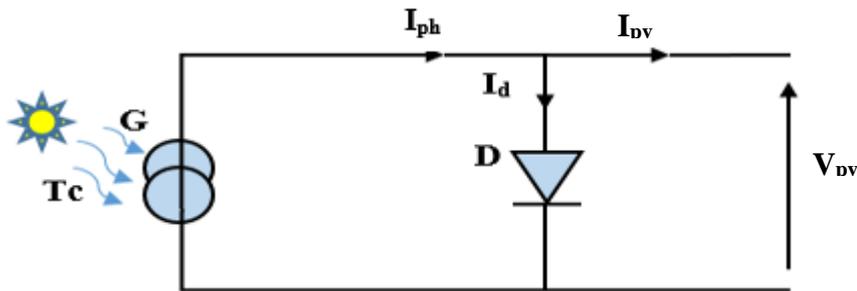


Figure (II.2) : Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque idéal.

❖ Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{cc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{cc} = \frac{G}{G_{stc}} \quad (II.2)$$

$G$  : L'éclairement absorbé par le panneau ;

$G_{stc}$  : L'éclairement de référence ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) ;

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

Avec :  $V_t = \frac{A.K.T_c}{q}$

$I_0$  : Courant inverse de saturation de la diode;

$V_t$  : Tension thermique ;

$A$  : Facteur d'idéalité de la photopile ;

$K$  : Constant de Boltzmann ( $1,38.10^{-23}$  J/K) ;

$q$  : Charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}$  C).

$T_c$ : Température de jonction (K).

### II.3.2. Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le plus utilisé. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision avec la structure de base. Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant ( $I_{ph}$ ), d'une diode qui modélise la jonction PN, une résistance parallèle ( $R_{sh}$ ) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série ( $R_s$ ) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques [24].

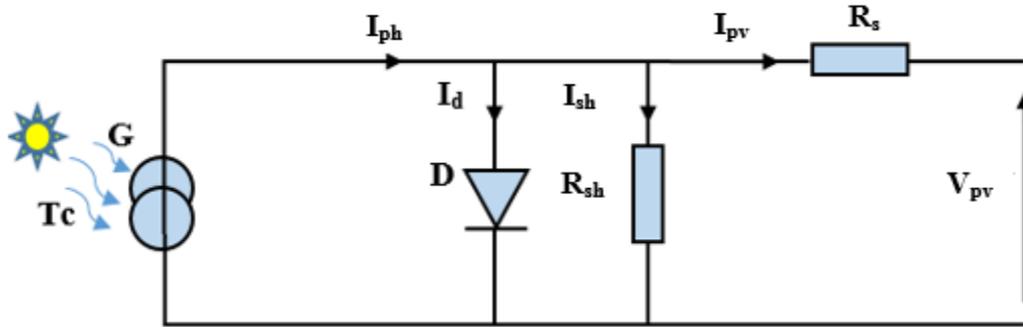


Figure (II.3) : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

❖ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.4)$$

Avec :

$$I_{ph} = P_1 \cdot G [1 + P_2 (G - G_{stc}) + P_3 (T_c - T_{stc})] \quad (II.5)$$

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{AN_sKT_c} \right) - 1 \right] \quad (II.6)$$

Avec : 
$$I_0 = P_4 \cdot T_c^3 \cdot \exp \left( \frac{-E_g}{KT_c} \right) \quad (II.7)$$

$$I_{sh} = \left( \frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \right) \quad (II.8)$$

Tel que :

$I_{pv}$ : Le courant délivré par le module.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$ : Courant de diode.

$I_{sh}$  : Le courant shunt.

$G_{stc}, T_{stc}$  : l'éclairement et la température de jonction sous conditions STC.

$G, T_c$  : L'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : paramètres constants.

$N_s$  : Nombre de cellule en série dans un module.

$K$  : Constant de Boltzmann.

$I_0$  : Le courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

$E_g$ : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.

$R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

$R_{sh}$ : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

### II.3.3. Modèle à deux diodes

Ce modèle est représenté par son schéma électrique équivalent. Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires et de la jonction PN [6].

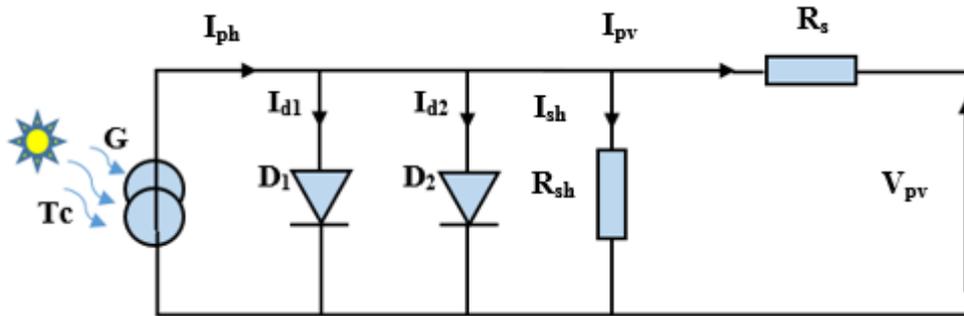


Figure (II.4) : Schéma électrique équivalent du modèle deux diodes.

❖ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (II.9)$$

$I_{ph}$  et  $I_{sh}$  garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode. Le courant traversant les diodes est donné par les équations suivantes :

$$I_{d1} = I_{01} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{A.N_s.K.T_c} \right) - 1 \right] \quad (II.10)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{A.N_s.K.T_c} \right) - 1 \right] \quad (II.11)$$

Où :  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  : les courants de saturation des diodes

$$I_{01} = P_4 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_c}\right) \quad (\text{II.12})$$

$$I_{02} = P_5 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2 \cdot K \cdot T_c}\right) \quad (\text{II.13})$$

### II.3.4. Modèle explicite du module photovoltaïque

C'est un modèle à cinq paramètres ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $R_s$ ) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques . Ce modèle a été précédemment illustré dans la figure (II.3).

❖ L'expression du courant du module photovoltaïque est donnée par :

$$I_{PV} = I_{cc} \left\{ 1 - K_1 \left[ \exp(K_2 \cdot V_{pv}^m) - 1 \right] \right\} \quad (\text{II.14})$$

Où les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  et  $m$  sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (\text{II.15})$$

$$K_3 = \ln\left[\frac{I_{cc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{cc}}\right] \quad (\text{II.16})$$

$$K_4 = \ln\left[\frac{1+K_1}{K_1}\right] \quad (\text{II.17})$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{K_3}{K_4}\right]}{\ln\left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}}\right]} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$I_{mpp}$  : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum ( $I_{opt}$ ).

$V_{mpp}$  : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale ( $V_{opt}$ ).

$I_{cc}$  : Courant en court-circuit.

$V_{co}$  : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.14) donnant le courant photovoltaïque est applicable que pour un niveau d'insolation  $G$  et de température particuliers ( $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{stc}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), relatif aux conditions standard de fonctionnement.

Quand l'insolation et la température varient, le courant  $I_{pv}$  et la tension  $V_{pv}$  changent suivant les équations suivantes :

$$\Delta T_C = T_C - T_{stc} \quad (II.19)$$

$$\Delta I = \alpha_{cc} \left( \frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_C + \left( \frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc,stc} \quad (II.20)$$

$$\Delta V = -\beta_{co} \cdot \Delta T_C - \Delta I \cdot R_s \quad (II.21)$$

Avec :

$\Delta G$  : Représente la variation de l'insolation.

$\Delta T_C$  : Représente la variations de la température.

$\Delta I$  : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

$\Delta V$  : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

$\alpha_{cc}$  : Représente un coefficient d'incrémentatation du courant  $I_{cc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $A/^\circ C$ ).

$\beta_{co}$  : Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension  $V_{co}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $V/^\circ C$ ).

❖ Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{nouv} = V_{stc} + \Delta V \quad (II.22)$$

$$I_{nouv} = I_{stc} + \Delta I \quad (II.23)$$

## II.4. Simulation du modèle PV

Le modèle à une diode avec deux résistances est le modèle choisi pour le reste de nos simulations. En raison de sa simplicité, il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques.

Le module solaire photovoltaïque qu'on va utiliser dans notre installation est bien le SIEMENS SM 110-24 de 110 W.

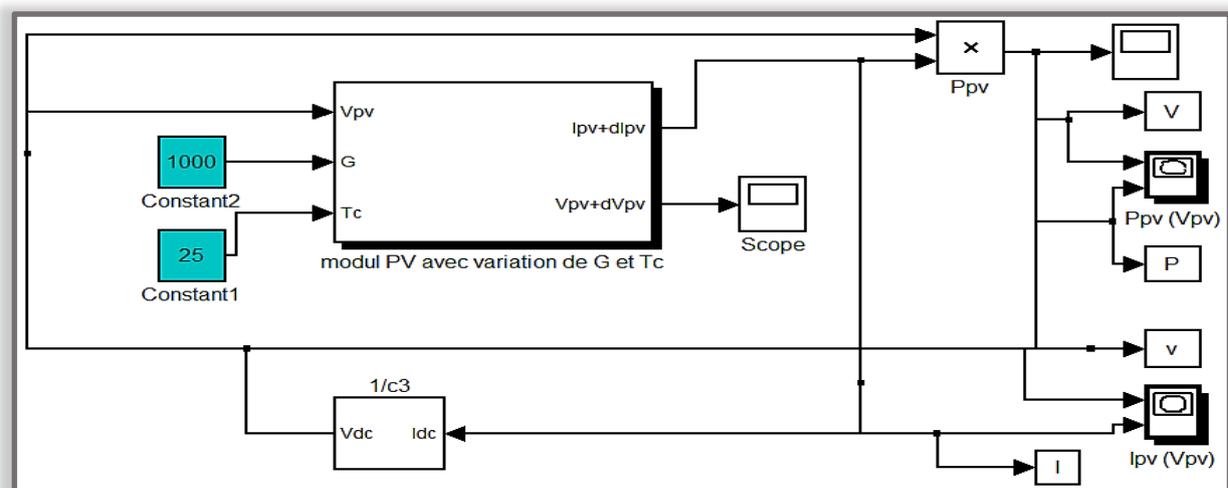
Le tableau (II.1) donne les paramètres électriques de panneaux utilisés dans les conditions standards ( $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{stc}=25 \text{ }^\circ C$ ).

**Tableau (II.1) :** Paramètres électriques des panneaux SIEMENS SM 110-24 de 110W [15].

Symboles	Paramètres	Valeurs
$P_{pv}$	Puissance photovoltaïque (W)	110 W
$I_{mpp}$	Courant maximum au PPM (A)	3.15 A
$V_{mpp}$	Tension maximale au PPM (V)	35 V
$I_{cc}$	Courant de court-circuit	3.45 A
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert (V)	43.5 V
$\alpha_{cc}$	Coefficient de température de court-circuit (A/°K)	1.4 mA/°C
$\beta_{co}$	Coefficient de tension (V/°K)	-152 mA/°C
$P_{mpp}$	Puissance maximale (W)	110 W

### II.4.1. Caractéristiques du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque (I-V), (P-V) varient en fonction des conditions météorologiques (l'éclairement et la température), afin d'étudier l'influence de ces conditions sur les caractéristiques du module PV, on a réalisé le schéma bloc de simulation des générateurs photovoltaïques dans l'environnement Matlab-Simulink, comme représenté la figure (II.5).

**Figure (II.5) :** Schéma de simulation du panneau photovoltaïque.

#### II.4.1.1. Influence de l'ensoleillement

En faisant varier l'éclairement entre 200 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup> avec un pas de 200 et une température constante (T=25°C), pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant/tension ainsi que pour la caractéristique puissance/tension, comme montre la figure (II.6).

On remarque que la valeur du courant est directement proportionnelle au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse, elle reste quasiment identique même à faible éclairement, donc le courant de PV dépend fortement de l'irradiation solaire.

On peut remarquer que l'augmentation de l'éclairement se traduit aussi par une croissance de la puissance.

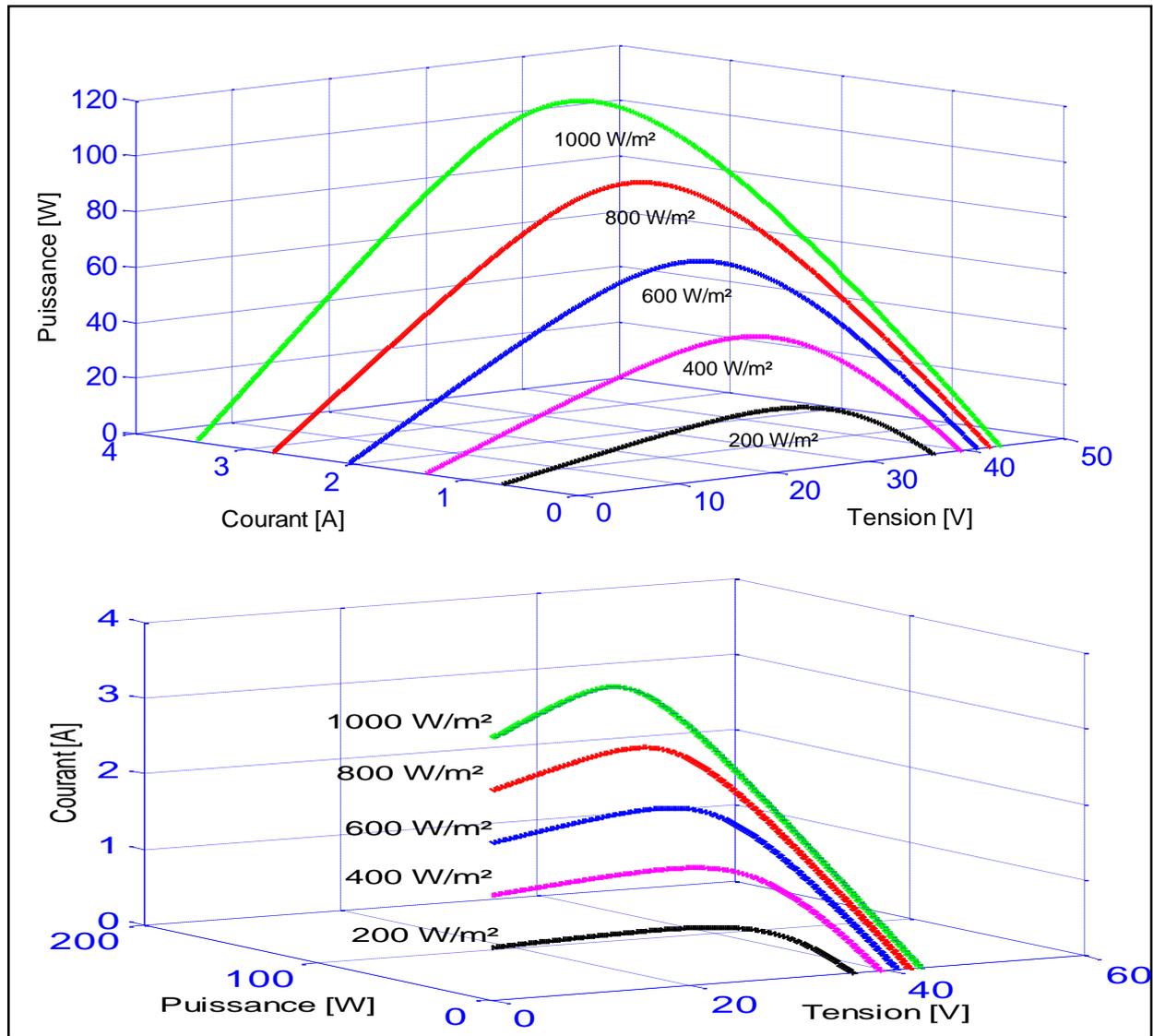


Figure (II.6) : Caractéristiques (P-V) et (I-V) d'un module photovoltaïque avec variation de  $G$ .

#### II.4.1.2. Influence de la température

En faisant varier la température de 0°C jusqu'à 75°C avec une irradiation constante (1000W/m<sup>2</sup>), les caractéristiques (IV), (PV) sont donnée par la figure (II.7). On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant. Par contre, la tension baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent

l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

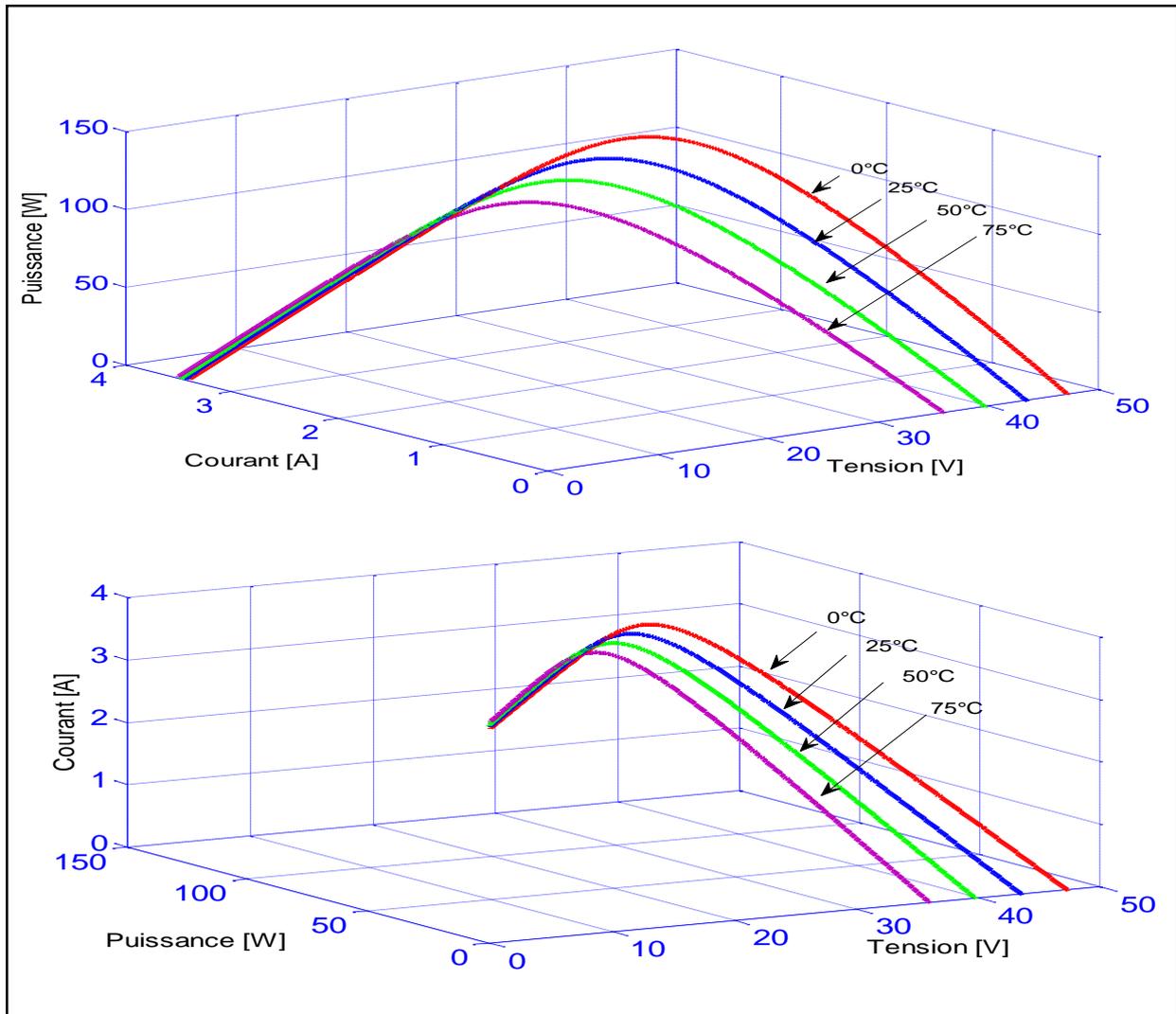


Figure (II.7) : Caractéristiques (P-V) et (I-V) d'un module photovoltaïque avec variation de  $T_c$ .

## II.5. Modélisation des convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Le but de la conversion DC/DC est d'assurer l'adaptation d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu. Dans le présent travail l'intérêt sera porté sur les convertisseurs de types continus appelés "*hacheurs*", qu'ils soient élévateurs de tension (Boost), abaisseur de tension (Buck) ou bien abaisseur-élévateur (Buck-Boost), qui correspondent aux applications moyennes et forte puissance [25]. Ils sont généralement utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et l'alimentation d'une charge continue et pour le stockage d'énergie dans des

batteries. Ils permettent aussi de commander la poursuite du point de puissance maximale d'un système PV en suivant des stratégies de contrôle spécifiques [26]. La conversion d'énergie se fait par commutation.

La commutation se fait à base des interrupteurs réalisés généralement par des transistors *MOSFET* qu'ils sont attaqués par un signal *MLI* (Modulation Large Impulsion) [27].

Pour le fonctionnement du hacheur, on ferme le commutateur avec un temps de fermeture  $\alpha T$  et on l'ouvre dans un temps d'ouverture  $(1 - \alpha) T$ .

$T$  : est la période de la commutation qui est égale à  $\frac{1}{f}$  ( $f$  est la fréquence).

L'interrupteur  $Tr$  (schématisé par un transistor MOS) est un interrupteur commandé à deux segments, unidirectionnel en tension et en courant.

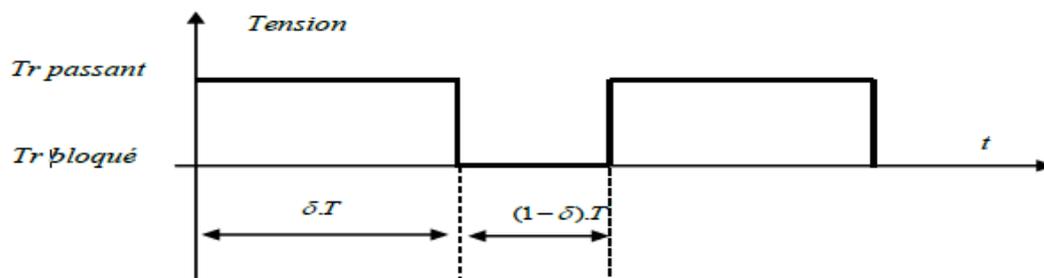


Figure (II.8) : Allure de la tension de commande de l'interrupteur.

➤ Le système PV que nous voulons modéliser, comprend deux convertisseurs :

- Un hacheur boost dédiée à la conversion de l'énergie provenant des panneaux PV.
- Un convertisseur back-boost permettant d'adapter la tension du bus continu à celle de l'utilisateur.

### II.5.1. Hacheurs de type élévateur (Boost)

Le convertisseur Boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée, peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom hacheur parallèle ou survolteur [25]. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale [26]. La figure (II.9) représente la structure d'un hacheur de type Boost :

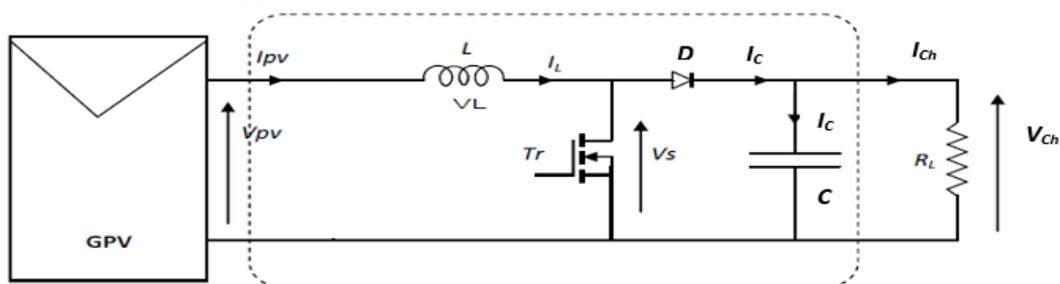


Figure (II.9) : Circuit électrique du hacheur « Boost ».

Dans la première phase  $T_r$  est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_{pv}=V_L$ , le courant traversant l'inductance augmente linéairement, Cette phase dure de  $(0 \text{ à } \alpha.T)$ , ( $\alpha$  rapport cyclique, et compris entre 0 et 1). Dans la deuxième phase de  $(\alpha.T \text{ à } T)$  le transistor est ouvert la diode devient passante. La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L=V_{pv}-V_{ch}$ . Dans cette phase le condensateur  $C$  se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur.

➤ Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.24}$$

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{ch} \tag{II.25}$$

$$I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \tag{II.26}$$

$$V_{ch} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{PV} \tag{II.27}$$

$$I_{ch} = (1 - \alpha) I_L \tag{II.28}$$

### I.5.2.Convertisseur Buck-Boost

Il s'agit d'un convertisseur qui combine les propriétés des convertisseurs Buck et Boost il est donc Abaisseur/Elévateur de tension, de plus, il opère comme un inverseur de tension à stockage inductif, permettant à la tension de sortie d'être soit augmentée soit diminuée en fonction du mode de commutation. Cependant, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension d'entrée [25].

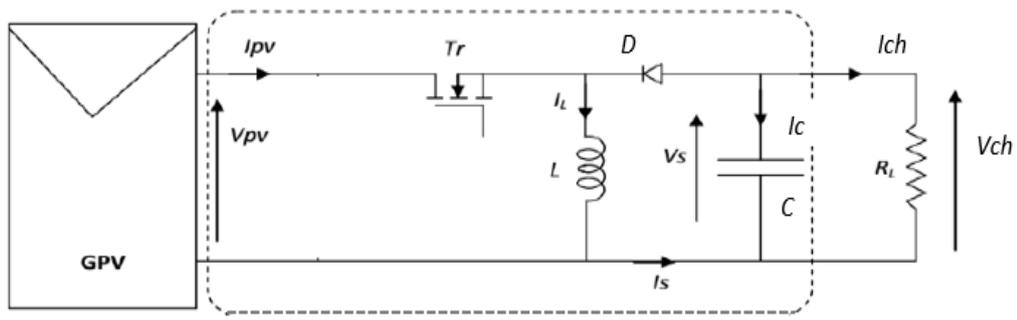


Figure (II. 10) : Système PV conçu autour d'un hacheur Buck-Boost.

Comme le présente la figure (II.10) ;

➤ De  $(0 < t < \alpha T)$  :

Lorsque l'interrupteur du transistor  $T_r$  est sur la position (on), à cet instant la diode (D) est bloquée (off). Le courant de l'inductance de l'hacheur augmente linéairement suivant la relation :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} \quad (\text{II.29})$$

Par conséquent, la valeur de  $I_L$  et  $I_c$  est :

$$I_{L\text{on}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{1}{T} \frac{V_{pv} \cdot \alpha \cdot T}{L} = \frac{V_{pv} \cdot \alpha}{L} \quad (\text{II.30})$$

$$I_c = C \frac{dV_{ch}}{dt} = -I_{ch} \quad (\text{II.31})$$

➤ De ( $\alpha T < t < T$ ) :

Lorsque Tr tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante. Le courant  $I_L$  et  $I_c$  est donnée par :

$$I_{L\text{off}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T \frac{V_L}{L} dt = \frac{1}{T} \frac{V_{ch}(T - \alpha T)}{L} = \frac{V_{ch} \cdot (1 - \alpha)}{L} \quad (\text{II.32})$$

$$I_c = C \frac{dV_{ch}}{dt} = -I_L - I_{ch} \quad (\text{II.33})$$

$$\text{Avec : } V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{ch} \quad (\text{II.34})$$

Le courant  $I_L$  traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_{L\text{on}} + I_{L\text{off}} = 0 \quad (\text{II.35})$$

$$\text{En remplaçant par leur expression, on obtient : } \frac{V_{ch}}{V_{pv}} = -\frac{\alpha}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.36})$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre le générateur et sa charge se conserve, alors nous pouvons écrire :

$$\frac{I_{ch}}{I_{pv}} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} \quad (\text{II.37})$$

## II.6. Modélisation de la batterie

La modélisation des batteries présente un défi particulier en raison de la variété des types d'éléments de batterie et du grand nombre de paramètres qui influencent leur performance, contrairement aux générateurs photovoltaïques, il n'existe pas de modèle unique qui soit applicable à toutes les situations. Les batteries au plomb, par exemple, nécessitent la prise en compte de plusieurs paramètres pour être correctement modélisées, ce qui complique leur mise en œuvre.

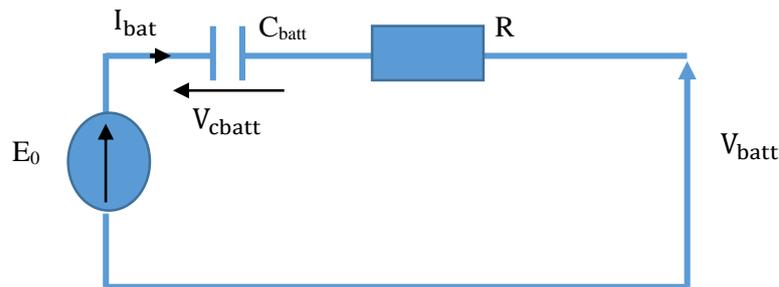
Chaque application et contrainte spécifique entraîne une réaction différente de la batterie, ce qui rend difficile l'obtention d'un modèle précis dans toutes les circonstances. Ainsi, les modèles de batterie sont souvent empiriques, basés sur des données expérimentales et ajustés en fonction des besoins spécifiques de chaque utilisation

Parmi les paramètres critiques d'une batterie, on trouve le SOC (State Of Charge, en anglais, ou EDC - État De Charge, en français), qui impacte significativement la tension aux bornes de la batterie. La capacité est également un élément crucial, ayant une influence majeure sur l'efficacité de la batterie et donc sur sa tension et son état de charge. Pour modéliser efficacement une batterie, il est nécessaire de prendre en compte ces paramètres essentiels [27].

- La capacité notée  $C$  représentant la quantité d'électricité fournie en Ampèreheure (Ah).
- La tension  $V_{\text{bat}}$  exprimé en Volts (V), tension noté  $V_{\text{bat\_CO}}$  mesuré en circuit ouvert.

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le modèle R-C, conçu spécifiquement pour des simulations avec des intervalles de temps très courts. Ces intervalles sont nécessaires pour prendre en compte la fréquence élevée de "hachage" des convertisseurs. Ce modèle comprend une force électromotrice (FEM) ( $E_0$ ) représentant la tension à vide de la batterie, un condensateur symbolisant la capacité interne de la batterie ( $C_{\text{bat}}$ ), et une résistance interne ( $R$ ).

Cette configuration est illustrée dans la figure suivante :



**Figure (II.11) :** Modèle R-C de la batterie.

Nous avons :

$$v_{\text{batt}} = E_0 - R * i - v_{\text{cbat}} \quad (\text{II.38})$$

On définit l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{\text{bat}}} \quad (\text{II.39})$$

$C_{\text{batt}}$ : La capacité (Ah) nominale de la batterie.

$Q_d$ : La quantité de charge manquante par rapport à  $C_{\text{batt}}$ , est calculé par la fonction suivante :

$$Q_d = I_{\text{batt}} * t, \text{ avec } t : \text{ la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant } I_{\text{batt}}.$$

- ✓ L'utilisation du modèle de batterie R-C permet de sélectionner un simulateur à pas fixe dont le pas de calcul est adapté à la période de découpage des convertisseurs. En utilisant

ce modèle R-C et en prenant en compte les pertes constantes dans les convertisseurs, nous pouvons gagner du temps en effectuant un changement d'échelle temporelle. Par conséquent, une simulation d'une seconde équivaut à une simulation d'une heure. Cela facilite ainsi l'analyse du comportement du système sur plusieurs jours [9].

### II.6.1. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation de la batterie RC, générés à l'aide de Matlab/Simulink, sont présentés ci-dessous. Ces données fournissent une analyse détaillée des processus de charge et de décharge des batteries, comme illustré dans la figure (II.12).

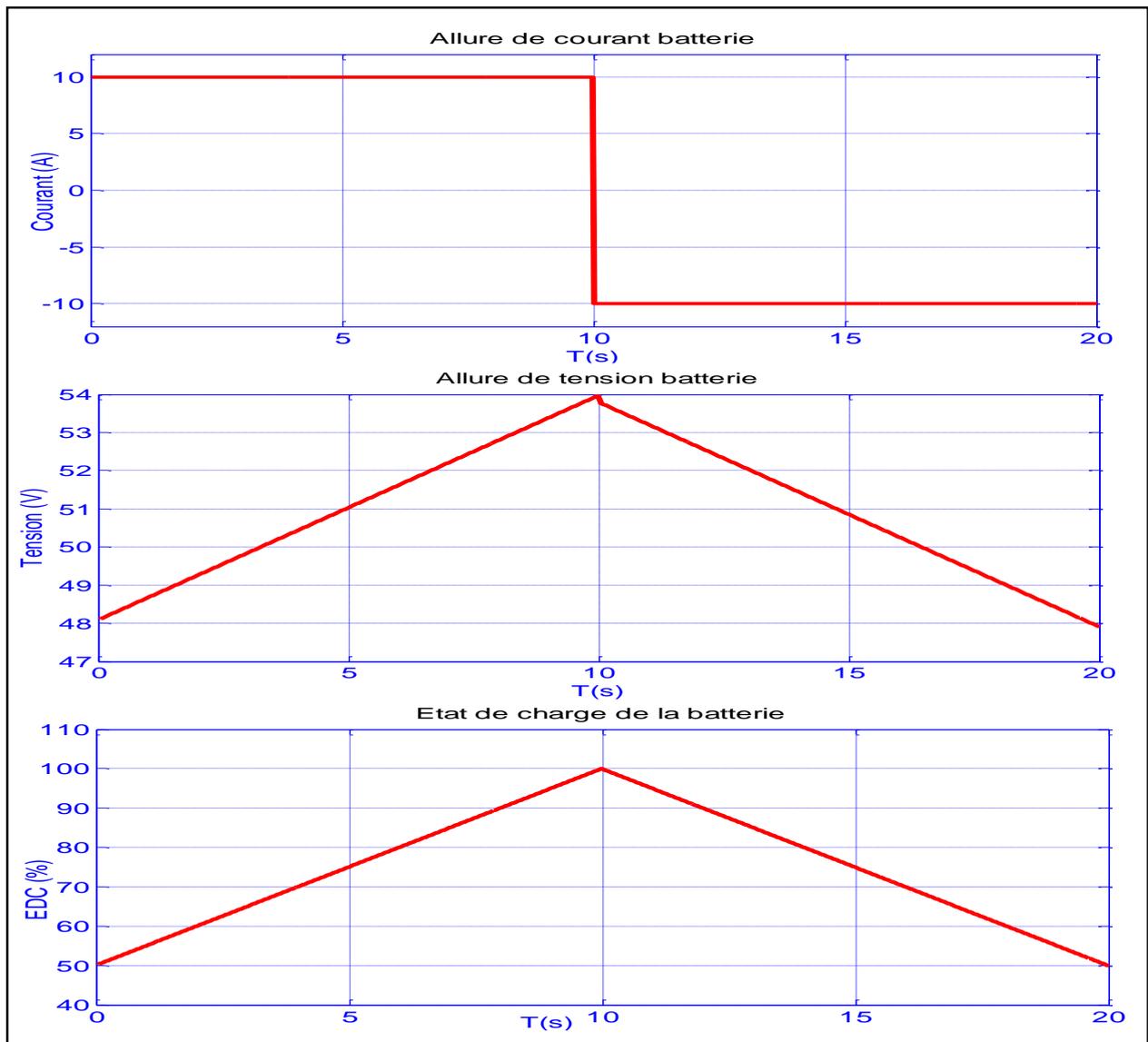


Figure (II.12) : Réponse en tension et état de charge de la batterie.

## II.7. Techniques de poursuite du point de puissance maximale

Comme on a vu précédemment, les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque sont affectées fortement par les changements atmosphériques de la radiation solaire de la température.

Ces deux variables influençant le comportement du système présentent des fluctuations quotidiennes ainsi que saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut produire sa puissance maximale que lorsque la tension et le courant sont à des valeurs spécifiques, déterminées par la charge connectée à ses bornes. Ainsi, pour garantir un fonctionnement optimal, une adaptation continue de la charge doit être intégrée dans le circuit de commande. Cette adaptation peut être réalisée en insérant un convertisseur DC-DC (communément appelé hacheur), dont le rôle est d'ajuster en permanence l'impédance de la charge pour correspondre à celle du champ photovoltaïque. Ce convertisseur est contrôlé par un mécanisme de suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking) qui utilise des techniques d'optimisation pour garantir que le système opère toujours au point de puissance optimal [28].

### II.7.1. La commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque, consiste à maximiser la production d'énergie du photo-générateur tout en minimisant les pertes d'énergie. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale ce qui permet de maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque.

Plusieurs techniques ont été proposées dans la littérature pour optimiser et extraire le maximum de puissance des installations PV, on va présenter quelques méthodes de recherche du point de puissance maximale [19].

- La méthode perturbation et observation (PO).
- La méthode d'incrément de conducteur (CI).
- La méthode avancée (logique floue) (FL).

#### II.7.1.1. Technique de la perturbation et observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation est largement adoptée dans la recherche du Maximum Power Point Tracking (MPPT) en raison de sa simplicité et de ses exigences minimales en termes de mesures, nécessitant uniquement la tension ( $V_{pv}$ ) et le courant ( $I_{pv}$ ) du

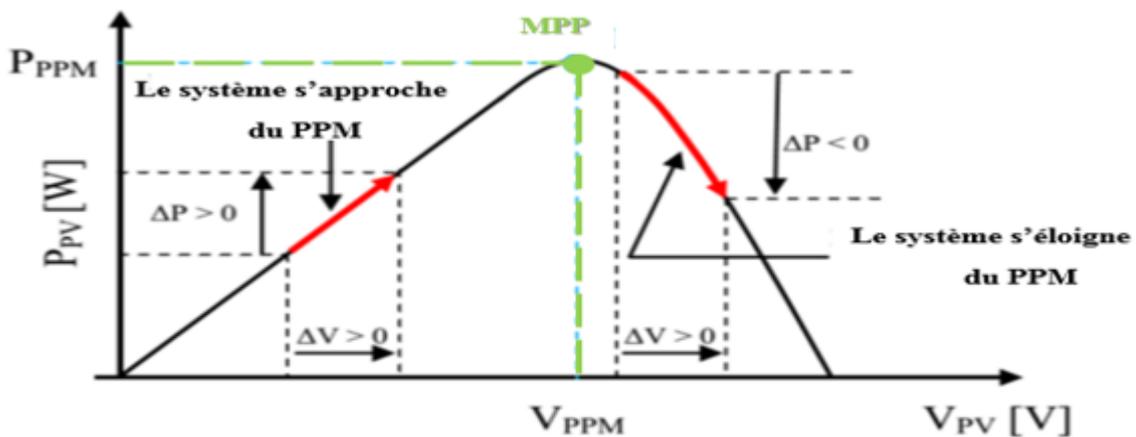
panneau photovoltaïque. Elle permet de retrouver le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température.

Pour cette méthode comme son nom l'indique est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  avec une constante ( $C = 0.02s$ ).

On perturbe la tension de fonctionnement et on observe la variation  $\Delta P$  de la puissance électrique. Si la puissance augmente, cela signifie que l'on se rapproche du point de puissance maximale, donc la perturbation de la tension est poursuivie dans la même direction.

En revanche, si la puissance diminue, cela indique que l'on s'éloigne du MPP. Dans ce dernier cas en doit inverser le sens de perturbation de tension comme il est représenté dans la figure (II.13).

Ce processus répète périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint selon l'organigramme de la Figure (II.14).

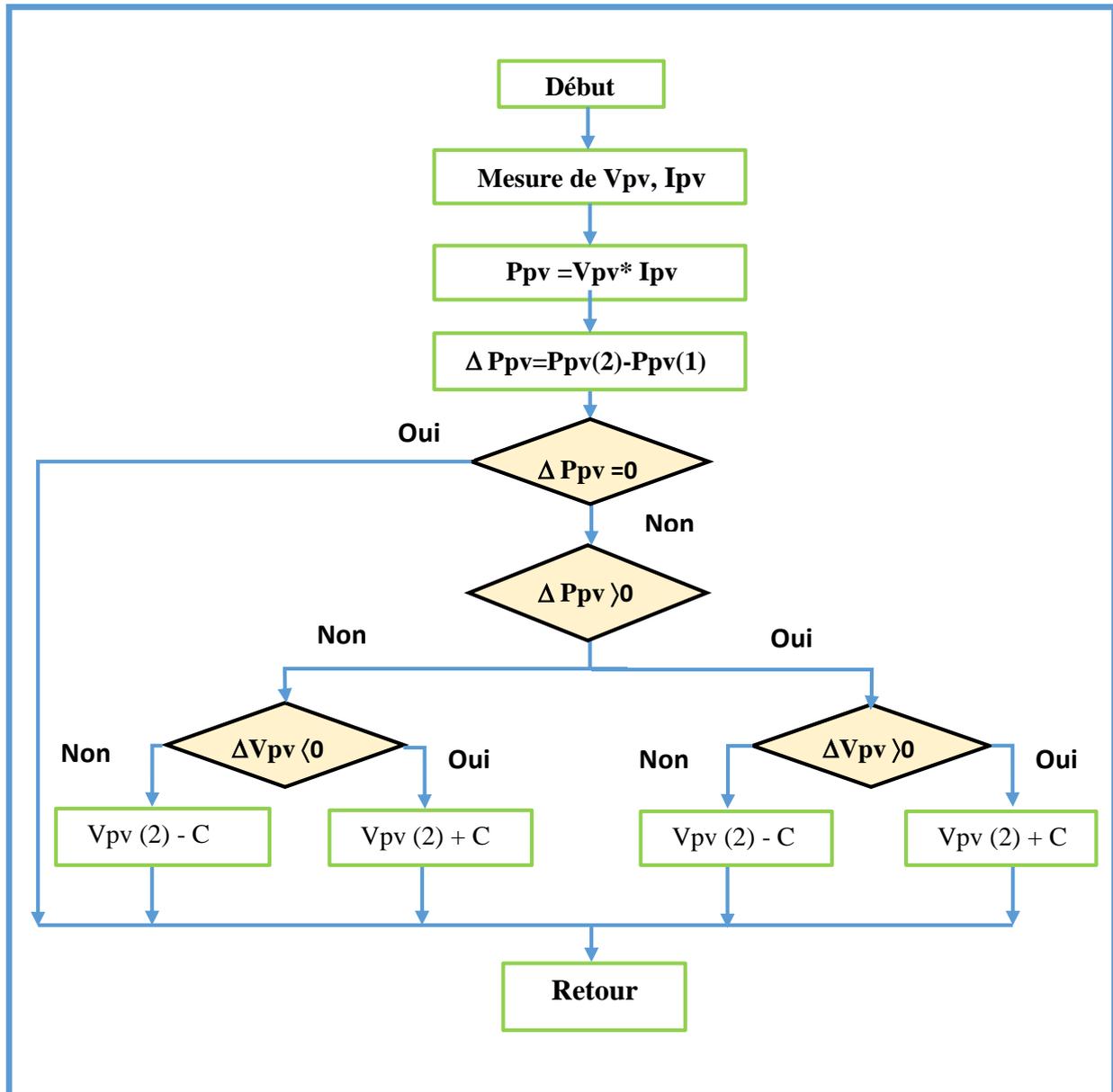


**Figure (II.13) :** Caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation [13].

**Tableau (II.2) :** Table de vérité résume le principe de fonctionnement de la méthode perturbation et observation.

Perturbation de la tension	Observation de la puissance	Prochaine Perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative (-)	Négative (-)	Positive (+)

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure suivante :



**Figure (II.14) :** Organigramme de la méthode perturbation et observation [6].

### ➤ Applications et simulations de la méthode P&O

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque Siemens SM110-24, obtenus à l'aide de Matlab/Simulink et en utilisant l'algorithme de perturbation et observation (P&O), sont présentés ci-dessous dans les figures (II.15), (II.16).

Cette simulation vise à étudier le fonctionnement du panneau solaire dans des conditions spécifiques, en évaluant son rendement énergétique et sa capacité à suivre le point de puissance maximale.

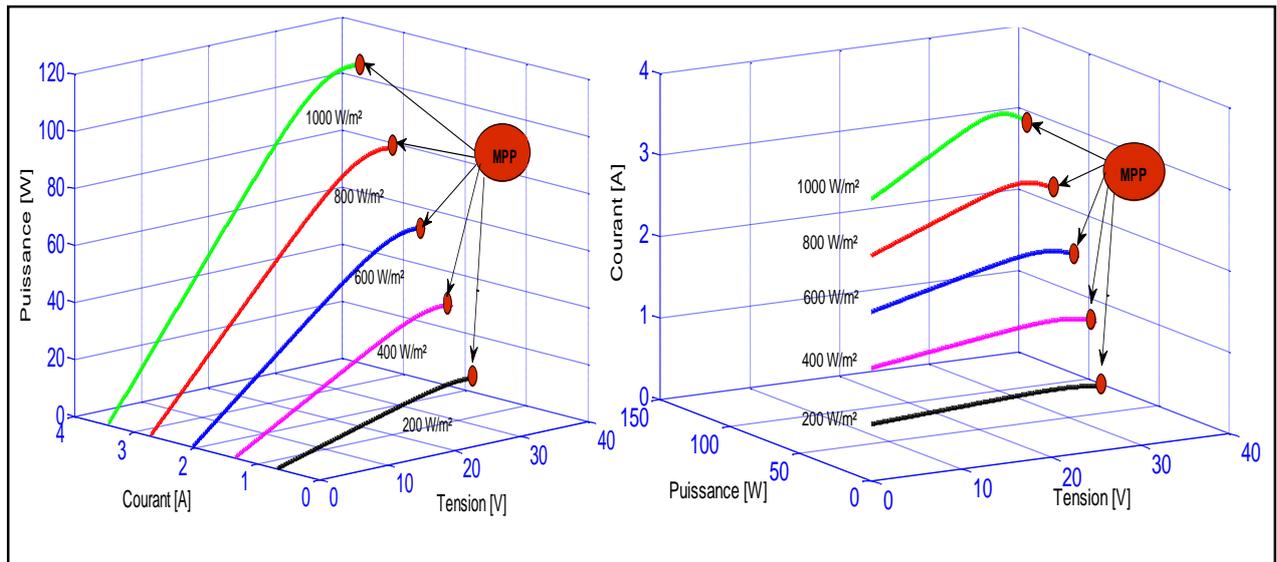


Figure (II.15) : Caractéristiques P(V) et I(V) d'un module PV avec variation de G et T=25°C.

✓ Les résultats de simulation de la tension, le courant et la puissance sous les conditions STC (G=1000W/m², T=25°C).

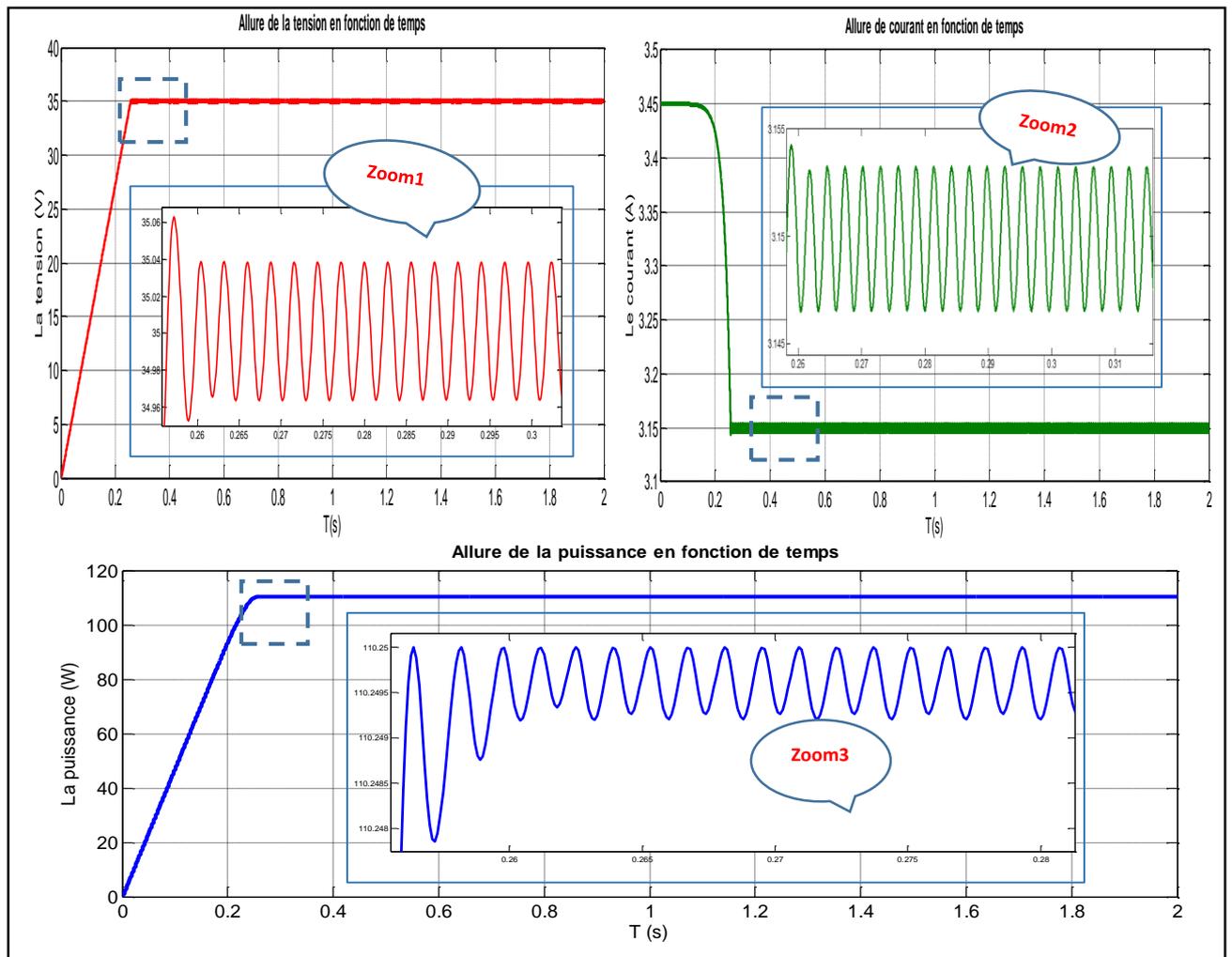


Figure (II.16) : Variation de la tension, le courant et la puissance avec la méthode (P&O).

Les résultats de simulation mettent en évidence plusieurs observations significatives concernant le fonctionnement du système sous la commande MPPT. Lorsque le point de puissance maximale est atteint, la commande MPPT maintient efficacement le système à ce point optimal, assurant ainsi une exploitation maximale de l'énergie solaire disponible, figure (II.15).

De plus, les courbes de tension et de puissance montrent une convergence vers le point de puissance maximale au fil du temps, indiquant la capacité du système à s'ajuster pour maximiser ses performances, figure (II.16).

Cependant, les courbes générées par la méthode de perturbation et observation (P&O) révèlent des oscillations, résultant de la perturbation continue de la tension de fonctionnement. Ces oscillations soulignent la complexité du contrôle du système pour maintenir un suivi précis du point de puissance maximale malgré les variations environnementales.

### II.7.1.2. Technique de l'incrémentation de la conductance (CI)

La méthode d'incrémentation de la conductibilité est une stratégie précise pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques. En se concentrant sur les variations de puissance en fonction de la tension, elle utilise le courant de sortie et la tension du panneau photovoltaïque pour calculer la conductance ( $G$ ) et sa variation incrémentielle ( $\Delta G$ ) selon les équations  $G=I/V$  et  $\Delta G=\Delta I/\Delta V$ .

Cette approche permet de déterminer avec précision la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (MPP). En comparant la conductance  $G$  à sa dérivée ( $\Delta G$ ), elle permet de décider du moment optimal pour ajuster la tension photovoltaïque afin de se rapprocher du MPP, lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela indique que le système est au point de puissance maximale (PPM). Si la dérivée est positive, le point de fonctionnement se trouve à gauche du maximum, tandis que si elle est négative, le système se situe à droite [28].

Les conditions correspondantes peuvent être exprimées à partir de la figure (II.17).

Si  $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le MPP.

Si  $\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche de MPP.

Si  $\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0$ , le point de fonctionnement est à droite de MPP.

La relation entre la conductance et la dérivée de la puissance par rapport à la tension peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\Delta(I*V)}{\Delta V} \tag{II.40}$$

Cette équation peut être reformulée en utilisant la règle du produit de manière suivante :

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = I \frac{\Delta V}{\Delta V} + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \tag{II.41}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \tag{II.42}$$

Ainsi, les nouvelles variations de la conductance peuvent être décrites comme suit :

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ , le point de fonctionnement est sur le MPP.

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ , le point de fonctionnement est à gauche de MPP.

Si  $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ , le point de fonctionnement est à droite de MPP.

Les différentes étapes qui illustrent le fonctionnement de cette méthode (CI), ainsi que l'organigramme fondamental de l'algorithme, sont représentées dans les figures suivantes :

Figure (II.17) et (II.18) respectivement.

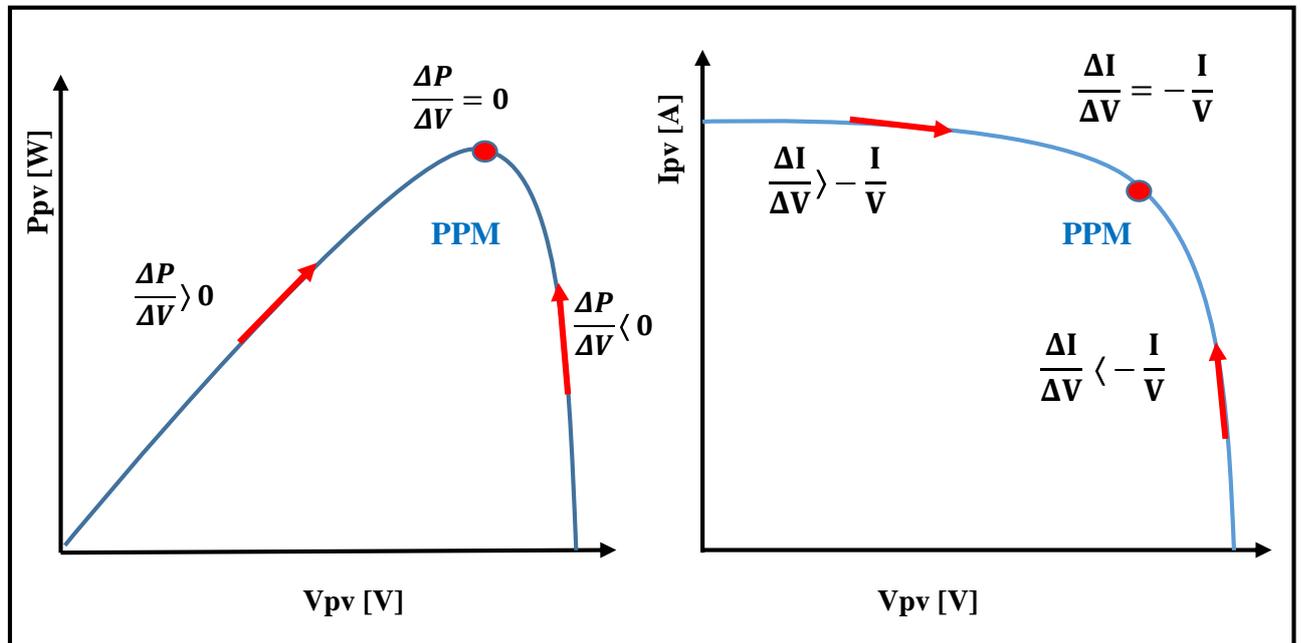


Figure (II.17) : Positionnement du point de fonctionnement.

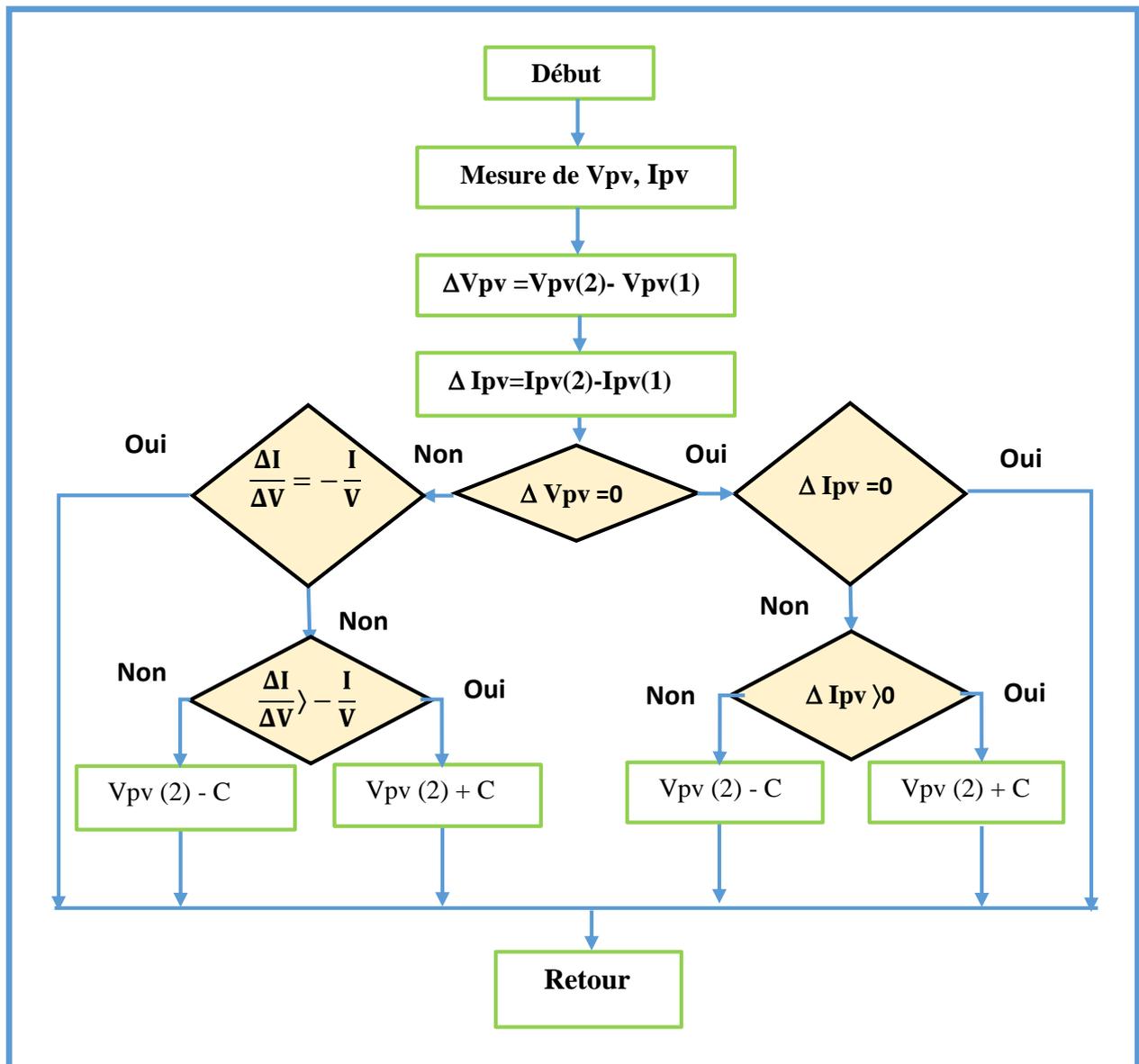


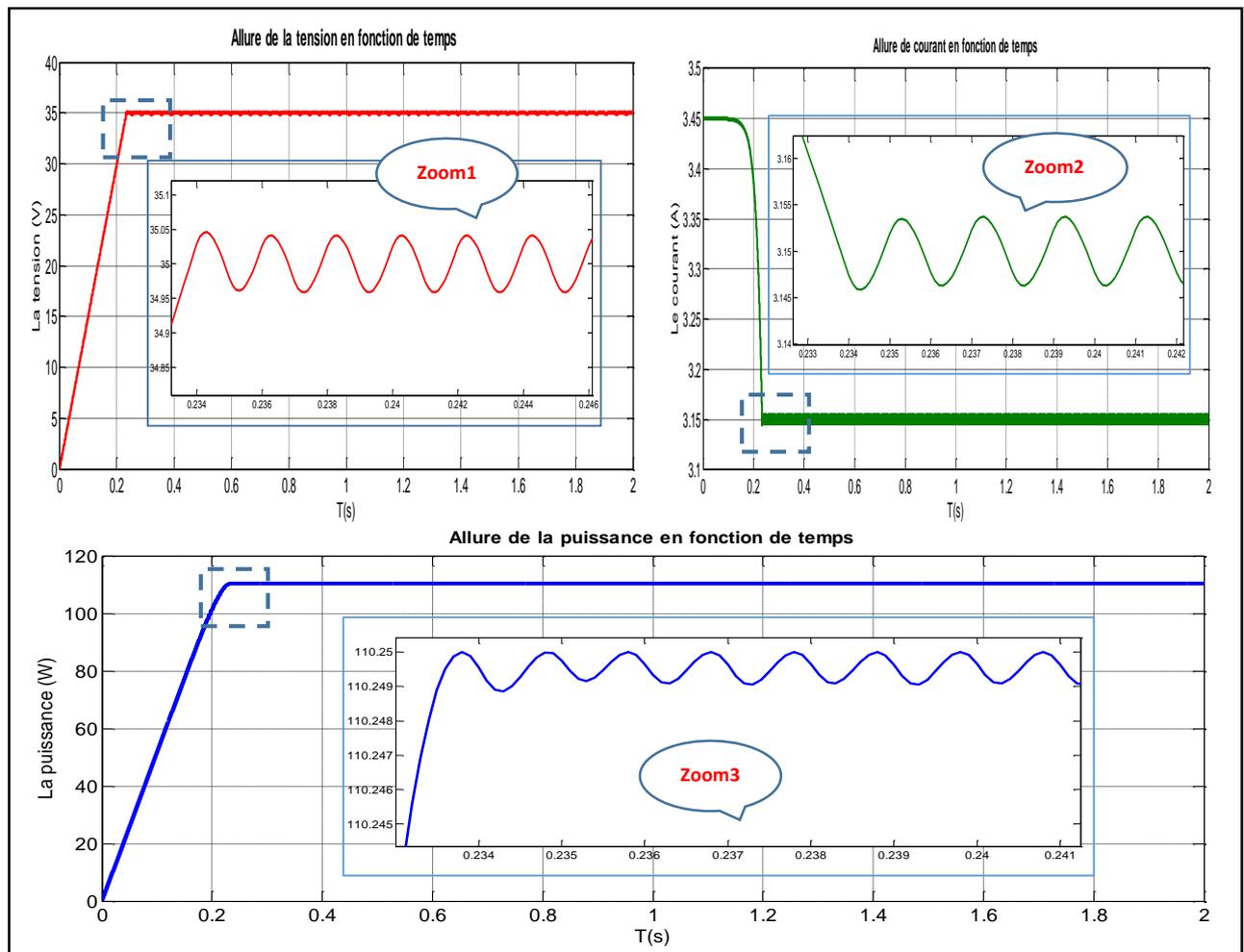
Figure (II.18) : Algorithme basée sur la méthode incrément de conductance [6].

### ➤ Applications et simulations de la méthode CI

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque dans les conditions STC ( $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ), avec l'application de l'algorithme d'optimisation MPPT de la méthode incrément de conductance.

La figure (II.19) illustre la variation en fonction du temps du courant, de la tension et de la puissance photovoltaïque.

D'après les résultats de simulations, on constate que les fluctuations de puissance en régime permanent des allures obtenues par l'application de la méthode de conductance incrémentielle (CI) sont réduites.



**Figure (II.19) :** Variation de la tension, le courant et la puissance en fonction de temps avec la méthode CI sous STC.

### II.7.1.3. Technique de la logique floue (LF)

La logique floue, développée en 1965 par le mathématicien iranien Lotfi Zadeh, est devenue l'une des méthodes les plus utilisées, en grande partie grâce à l'évolution des microcontrôleurs [28]. Son principal avantage réside dans sa capacité à fonctionner efficacement avec des valeurs d'entrée peu précises. Cette approche se distingue par sa robustesse et sa simplicité, ne nécessitant pas une connaissance exacte du modèle à réguler.

Dans le contexte de l'optimisation pour atteindre le Point de Puissance Maximale (MPP), la logique floue trouve une application particulièrement adaptée. Elle repose sur deux critères d'entrée essentiels : l'écart par rapport à la valeur cible ( $E$ ), où un écart nul est idéal, et la variation de l'erreur ( $\Delta E$ ), indiquant la direction et la vitesse de convergence vers le MPP.

En intégrant ces critères, la logique floue génère une variation de sortie ( $\Delta\alpha$ ) qui guide le convertisseur statique vers le MPP. Ce processus permet une optimisation continue de la

production d'énergie, notamment à partir de sources telles que les panneaux solaires, en ajustant les paramètres de fonctionnement pour maximiser les performances du système [29].

La mise en place d'un contrôleur flou se décompose en trois étapes distinctes :

1. **Fuzzification** : Cette première étape consiste à convertir les données d'entrée numériques en valeurs floues, permettant une représentation flexible des entrées.
2. **Inférence** : Une fois que les données d'entrée ont été fuzzifiées, elles sont utilisées dans des règles logiques floues pour déterminer les actions de contrôle à prendre. Cette étape implique l'application des règles logiques qui spécifient comment les entrées floues influencent les sorties floues. Les règles sont généralement formulées en utilisant des opérateurs logiques flous tels que "et", "ou", etc.
3. **Défuzzification** : Enfin, les valeurs floues résultantes de l'étape d'inférence doivent être converties en valeurs numériques précises pour les sorties du système. La défuzzification consiste à agréger les valeurs floues pondérées pour obtenir une valeur de sortie unique et précise.

La figure (II.20) représente le schéma explicatif d'un régulateur flou à deux entrées et une sortie ou  $E$  et  $\Delta E$  représente les variables d'entrées et «  $\Delta\alpha$  » la commande.

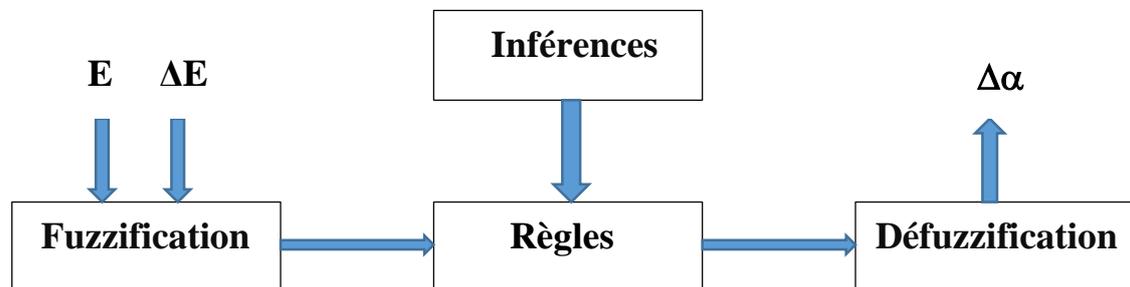


Figure (II.20) : Structure générale d'un système basé sur la logique floue.

### ➤ Applications et simulations de la méthode CI basé sur la logique floue

L'algorithme MPPT proposé est basé sur l'algorithme (CI), tout en intégrant un bloc de contrôle basé sur la logique floue. Ce bloc permet de fournir un pas variable, afin de surmonter la limitation qui existe dans les implémentations de l'algorithme (CI).

Dans notre travail, les entrées du contrôleur de logique floue sont la variation de la puissance du générateur PV et la variation de la variation de la tension  $V_{pv}$ , et le contrôleur ajuste le pas de l'algorithme CI en fonction de l'éclairement et de la température. Pour réduire le coût et la complexité de la mise en œuvre du contrôleur floue, la tension et le courant du GPV sont

utilisent comme des entrées de l'algorithme CI et de bloc FLC, tandis que la variable de sortie du FLC est la variation du pas, C qui est envoyé à l'algorithme CI.

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sorties utilisées dans ce modèle est illustrée dans la figure (II.21). Toutes les fonctions d'appartenance sont exprimées avec une fonction triangulaire et se composent des sous-ensembles flous qui sont notés NG (Négative Grande), NP (Négative Petite), Z (zéro), PP (Positive Petite), NM (Négative Moyenne), PM (Positive moyenne) et PG (Positive Grande), PGP (Positive Grande Petite), PGM (Positive Grande Moyenne), PGE (Positif Hyper Grand).

La variable de sortie est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrées. Comme le montre le tableau des règles de FLC indiqué dans le tableau (II.3) comprend 49 règles.

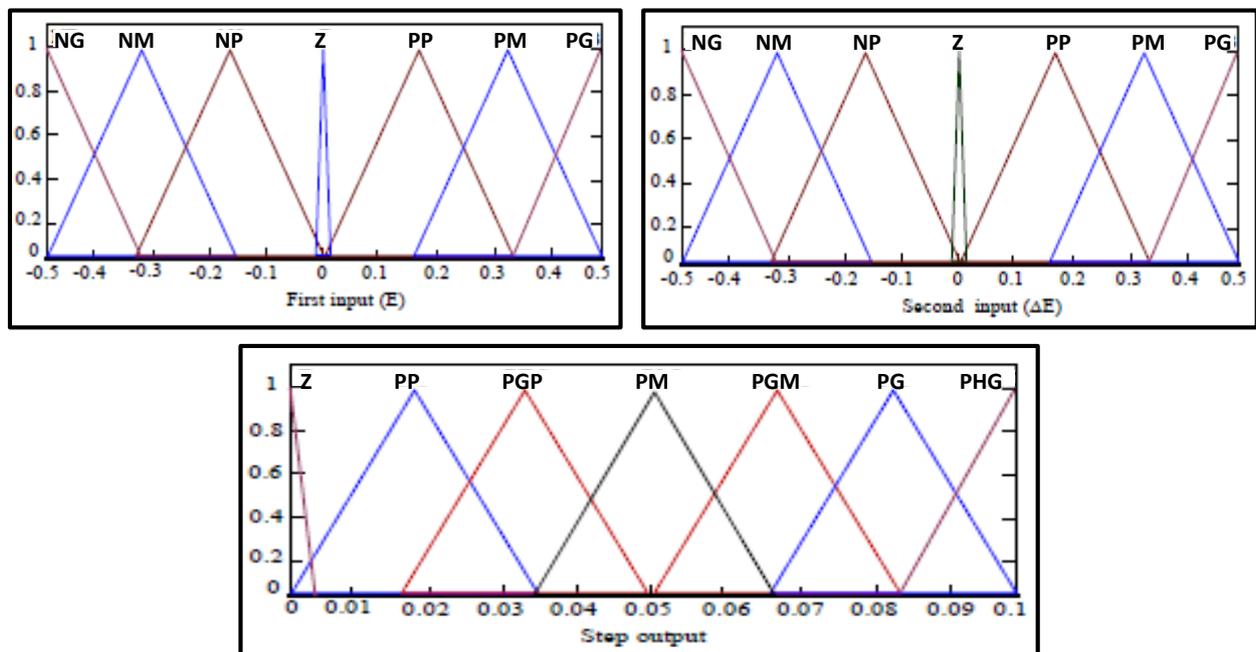
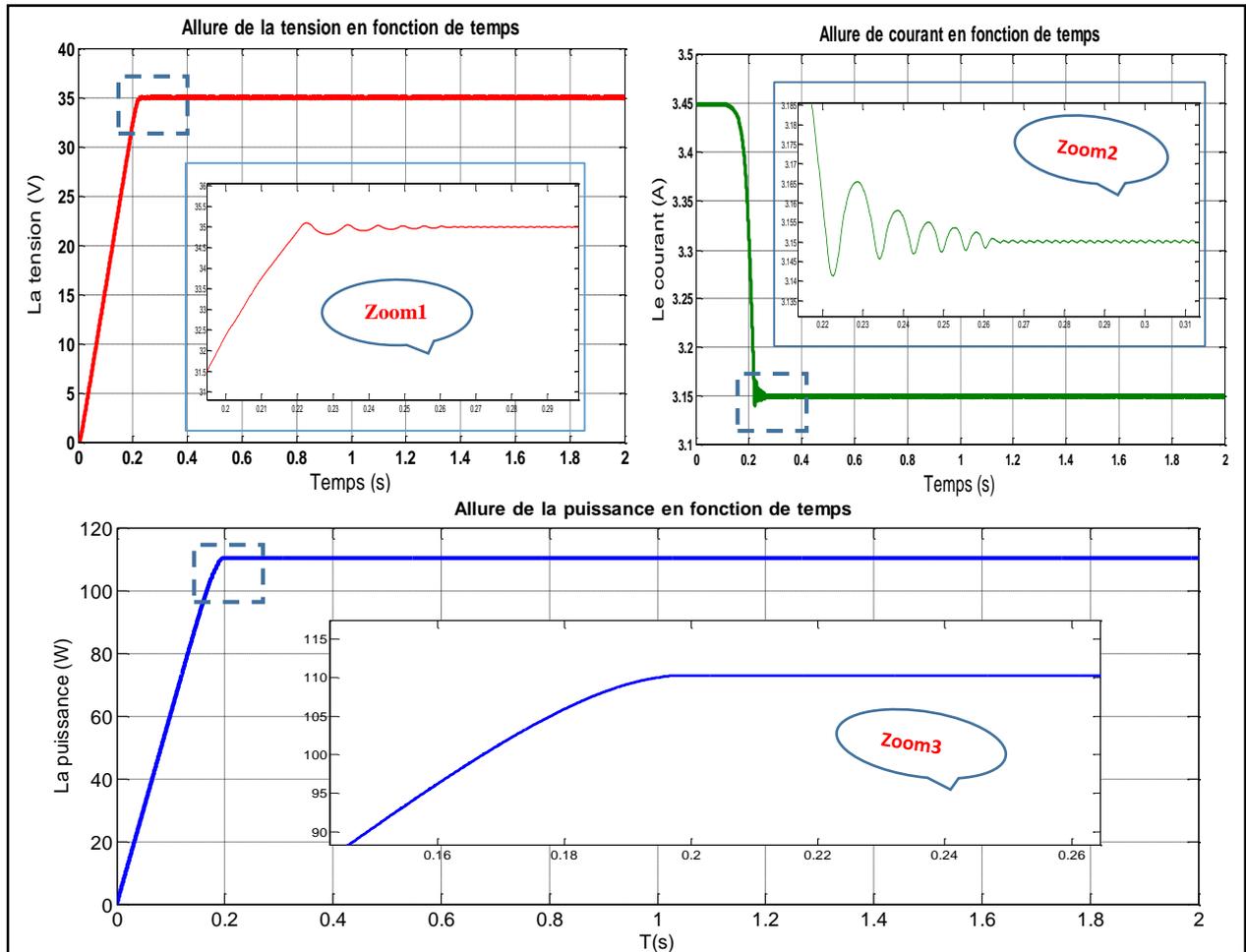


Figure (II.21) : Fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie

Tableau (II.3) : Table du contrôle FUZZY pour déterminer la sortie C [31].

E / ΔE	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	PP	PP	PP	PP	PGP	PM	Z
NM	PP	PP	PP	PGP	PM	Z	PGM
NP	PP	PP	PGP	PM	Z	PGM	PG
Z	PP	PGP	PM	Z	PGM	PG	PHG
PP	PGP	PM	Z	PGM	PG	PHG	PHG
PM	PM	Z	PGM	PG	PHG	PHG	PHG
PG	Z	PGM	PG	PHG	PHG	PHG	PHG

Les résultats de simulation illustrés dans la figure (II.22) représentent les allures de courant, la tension et la puissance délivrée par le GPV de la méthode CI amélioré dans les conditions STC.



**Figure (II.22) :** Variation de la tension, le courant et la puissance en fonction de temps avec la méthode CI amélioré.

### II.7.2. Etude comparative entre les trois algorithmes proposés

Dans cette partie, une analyse comparative par simulation est effectuée, afin d'évaluer les performances et de comparer les trois algorithmes proposés, PO, CI et CI amélioré par la logique floue.

Nous appliquons successivement trois niveaux d'éclaircement :  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  à  $0.5\text{s}$ , puis  $200 \text{ W/m}^2$  à  $1 \text{ s}$ . De plus, la température varie de  $25^\circ\text{C}$  à  $40^\circ\text{C}$  à  $1.2 \text{ s}$ , puis à  $-15^\circ\text{C}$  à  $1.5\text{s}$ . Les résultats de simulation, présentés dans les figures (II.23), (II.24), et (II.25), illustrent les courants ainsi que la tension et la puissance délivrée par le GPV pour les trois algorithmes considérés.

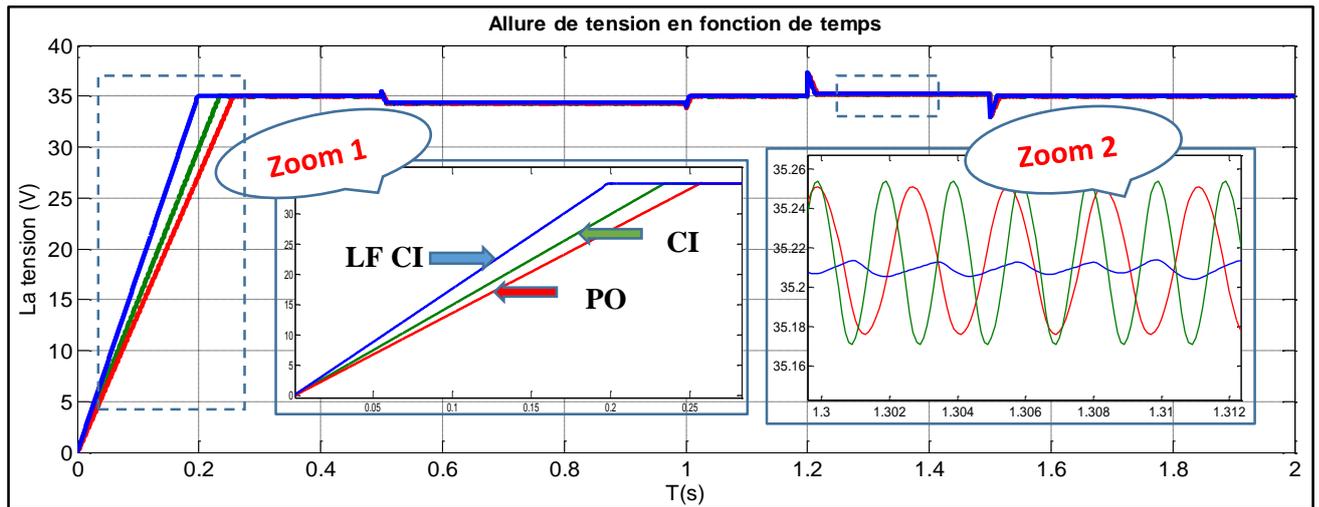


Figure (II.23) : Variation de la tension en fonction de temps.

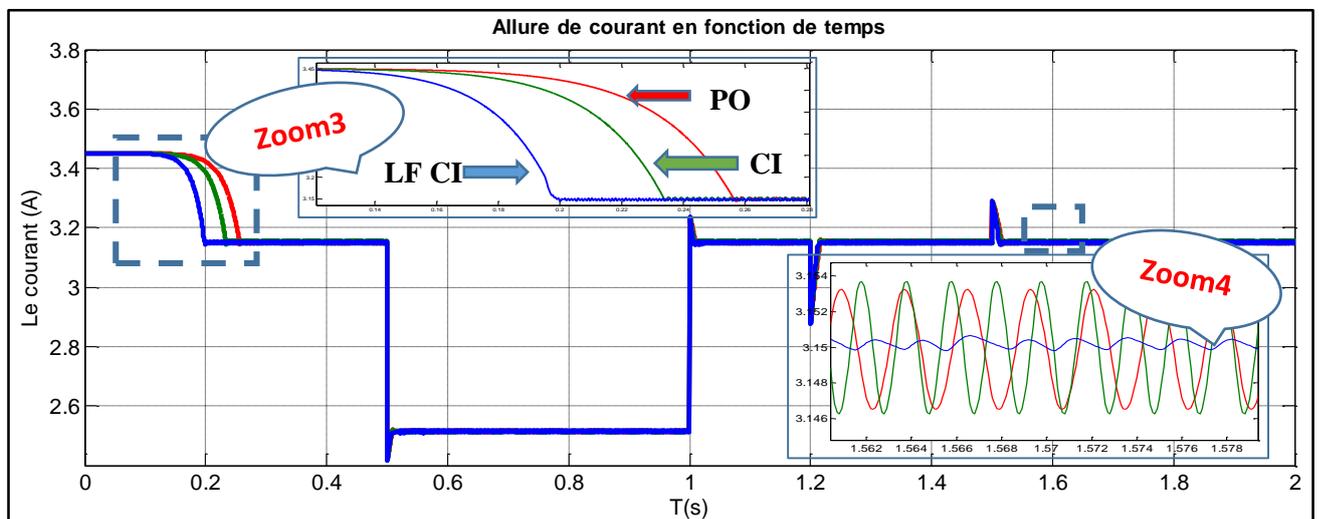


Figure (II.24) : Variation de courant en fonction de temps.

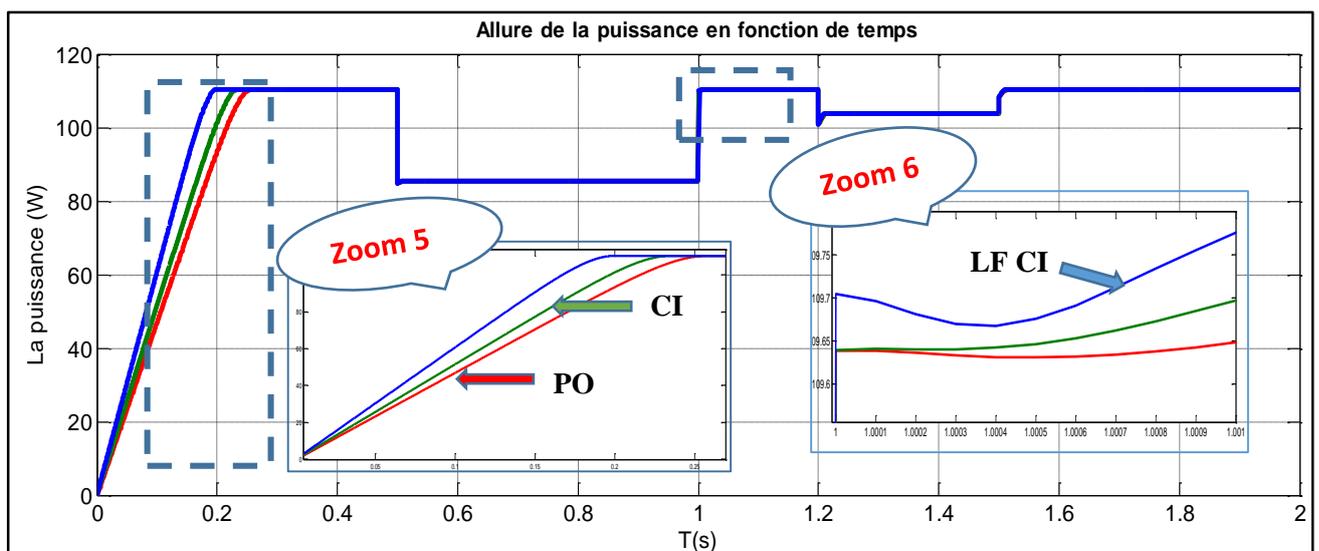


Figure (II.25) : Variation de la puissance en fonction de temps.

D'après les résultats obtenus depuis les simulations faites sur notre système, on constate bien les avantages de la commande MPPT à base de logique floue, en étant plus rapide, plus précis et offre une grande faculté de poursuite que le contrôleur à base d'algorithme PO et CI, ce qui permet au système de bien réagir face aux changements des conditions de fonctionnements et de fonctionner dans la zone de fonctionnement optimal ou la puissance fournit a la charge et maximale.

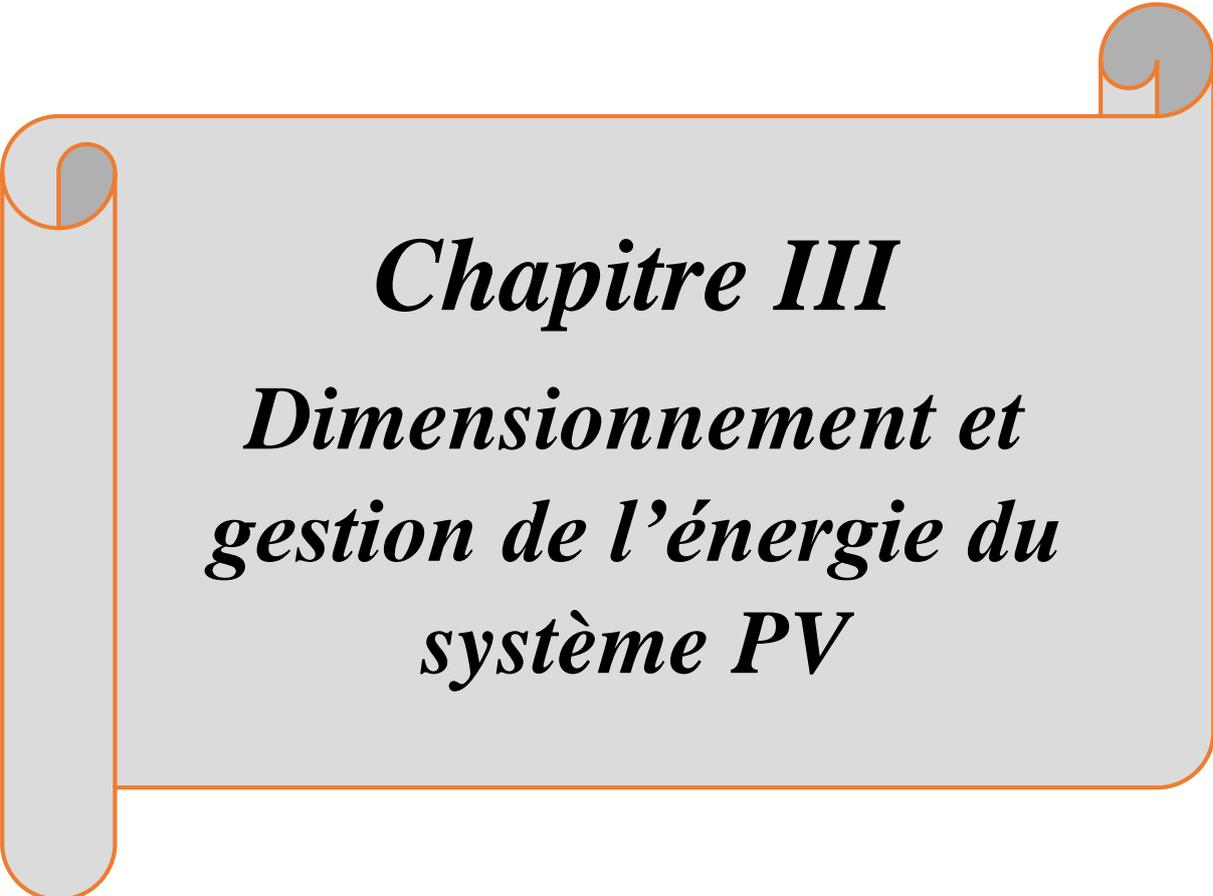
On remarque aussi que l'algorithme CI donne les meilleurs résultats que l'algorithme PO lors d'un changement rapide d'éclairement avec une amélioration au niveau des ondulations (diminution).

## II.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'explorer en profondeur la modélisation mathématique des différents sous-systèmes d'une installation photovoltaïque. Un accent particulier a été mis sur le générateur PV lui-même, en étudiant ses caractéristiques électriques I-V et P-V, et leur variation en fonction des conditions météorologiques comme l'éclairement et la température. Les modèles des autres composants clés ont également été développés, notamment les convertisseurs DC-DC de type hacheur ainsi que la batterie de stockage. Grâce à l'environnement MATLAB/Simulink, diverses simulations ont pu être menées.

L'objectif était d'optimiser le transfert de puissance vers le point de puissance maximale du système PV. Trois algorithmes MPPT ont été analysés et comparés : la perturbation et observation (PO), la conductance incrémentielle (CI) et une version améliorée de la CI par logique floue. D'après les résultats des simulations, la commande MPPT à base de logique floue s'est avérée plus performante, offrant un suivi du point optimal plus rapide, précis et robuste face aux variations des conditions opérationnelles. L'algorithme CI s'est également montré supérieur au PO classique.

Cette étude comparative a ainsi mis en évidence les avantages de la logique floue pour une gestion optimale du système PV. Les prochaines étapes consisteront au dimensionnement et à la gestion du système photovoltaïque.



***Chapitre III***  
***Dimensionnement et***  
***gestion de l'énergie du***  
***système PV***

### III.1. Introduction

Pour la réalisation d'une installation photovoltaïque destinée à électrifier une maison estivale de manière autonome, le dimensionnement est une étape primordiale compte tenu des nombreux paramètres à prendre en considération. Cela nécessite une analyse approfondie des besoins électriques de l'utilisateur, ainsi que de l'ensemble des composants du système : la taille du générateur photovoltaïque, la capacité de stockage des batteries, l'inclinaison optimale des modules, les données météorologiques locales et l'environnement du site d'installation.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes étapes pour dimensionner correctement ce type d'installation photovoltaïque isolée destinée à une maison estivale. Nous allons aussi présenter un système de gestion qui vise à contrôler la production d'énergie des panneaux photovoltaïques et à superviser les échanges d'énergie entre les différents éléments. Ce système assure également le contrôle de l'état de charge de la batterie, offrant une protection contre les surcharges et les décharges profondes.

### III.2. Dimensionnement du système photovoltaïque

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque pour un site isolé est important pour garantir son bon fonctionnement à long terme, sert à déterminer le nombre des panneaux solaire nécessaire pour convertir les besoins énergétiques à tout instant ainsi que toutes les autres composent électrique d'une installation photovoltaïque [29].

Il repose sur plusieurs paramètres, tels que l'ensoleillement annuel, les besoins énergétiques des utilisateurs et l'efficacité des composants.

Une demande énergétique élevée nécessitera un système plus conséquent, ce qui peut augmenter les coûts, mais l'utilisation de composants à haut rendement peut contribuer à les réduire.

En suivant ces étapes avec précision, il est possible de concevoir un système photovoltaïque optimisé pour répondre efficacement aux besoins spécifiques du site isolé :

- \* Évaluation des besoins énergétiques.
- \* Estimation de l'ensoleillement.
- \* Dimensionnement des panneaux PV.
- \* Dimensionnement des éléments de stockage.

### III.2.1. Évaluation du besoin en électricité

Dans un premier temps, nous avons identifié les appareils électriques essentiels présents dans un foyer typique, ces équipements indispensables aux besoins quotidiens. Ensuite, nous avons dimensionné une installation photovoltaïque pour satisfaire la consommation journalière de ces appareils dans une maison isolée, occupée saisonnièrement par une famille de 4 personnes, située dans une région très ensoleillée bénéficiant d'un niveau élevé d'irradiation solaire ( $I_r = 4,1 \text{ kW/ m}^2/\text{j}$ ).

Le système sera composé de panneaux solaires de 110Wc, d'un régulateur MPPT et d'un stockage par batteries permettant une autonomie de 2 jours. Les composants retenus et leur consommation énergétique sont présentés dans le tableau qui suit :

**Tableau (III.1) :** Consommation journalière pour une maison.

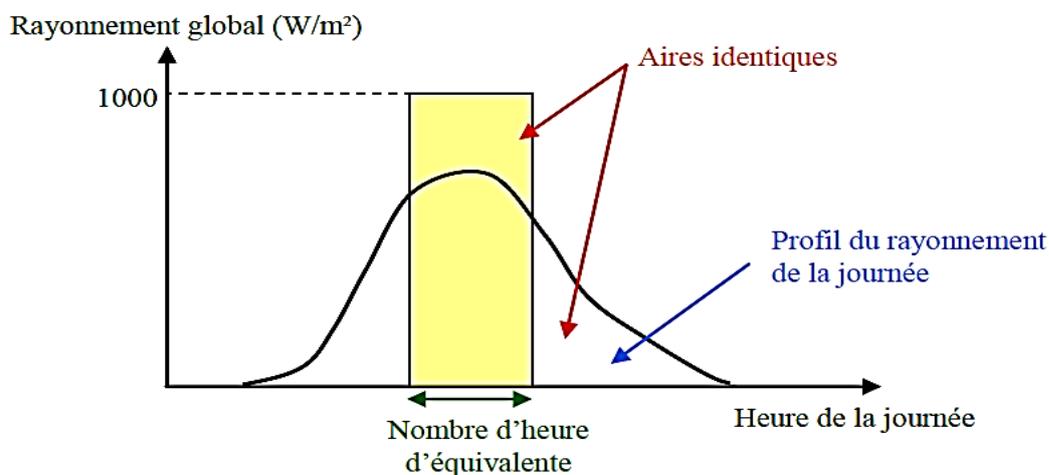
Appareil à brancher	Nombre	Puissance (W)	Durée d'utilisation (h/jour)	Puissance totale (W)	Demande énergétique (Wh/jour)
Lampes	5	10	4	50	200 Wh/j
Lampe économique	2	9	3	18	54 Wh/j
Réfrigérateur	1	70	21	70	1470 Wh/j
Télévision	1	50	3	50	150 Wh/j
PC portable	1	30	2	30	60 Wh/j
Chargeurs téléphones portable	2	5	2	10	20 Wh/j
Machine à laver	1	200	1	200	200 Wh/j
Plaque de cuisson	1	100	3	100	300 Wh/j
Ventilateur	1	50	4	50	200 Wh/j
Autre (Chaine stéréo ; Mixeur fruits ; DVD portable rechargeable)	1	220	1	220	220 Wh/j
<b>Totale</b>				<b>798 W</b>	<b>2874 Wh/j</b>

### III.2.2. Estimation de l'ensoleillement

Le dimensionnement adéquat d'une installation photovoltaïque nécessite une estimation précise de l'ensoleillement dans la zone ciblée. Cette estimation est généralement exprimée en kWh/m<sup>2</sup>/jour ou en heures d'ensoleillement plein (correspondant aux heures équivalentes multipliées par 1000 W/m<sup>2</sup>). On se réfère aux données de la période la moins ensoleillée (ex : hiver) afin de garantir une production d'électricité suffisante, même dans les conditions les plus défavorables [11].

$$E_{sol} = N_{eq} \times 1000$$

**Neq:** Nombre d'heure équivalente d'ensoleillement dans les conditions STC [h/j].



**Figure (III.1) :** Représentation du nombre d'heure équivalente d'une journée de rayonnement solaire [11].

Deux représentations distinctes mais équivalentes peuvent être distinguées :

1. La zone rectangulaire jaune représente le nombre d'heures fictives pendant lesquelles le rayonnement serait constant et optimal à 1000 W/m<sup>2</sup>. Cette durée hypothétique permettrait de recevoir la même quantité d'énergie que celle effectivement reçue pendant la journée réelle.
2. La courbe illustre le profil réel du rayonnement global au fil des heures, avec une augmentation progressive le matin, un pic autour de midi, puis une décroissance en fin de journée.

#### ➤ Fixation des panneaux

La fixation des panneaux solaires doit garantir plusieurs fonctions essentielles :

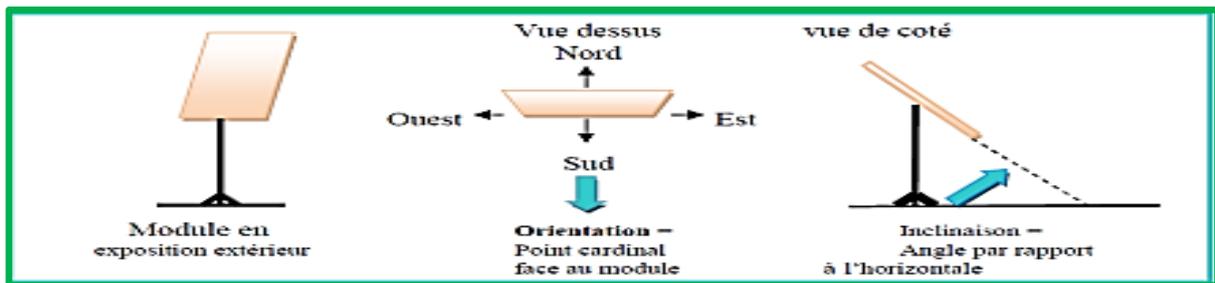
- Maintien de l'orientation pour maximiser l'exposition au soleil.
- Résistance contre le vent et les conditions météorologiques adverses.

- Protection contre les dommages mécaniques et les impacts extérieurs.
- Prévention contre l'accumulation de saletés et autres agressions venant du sol.
- Assurer une ventilation adéquate pour limiter le risque de surchauffe des panneaux solaires.

### ➤ Orientation et inclinaison des panneaux

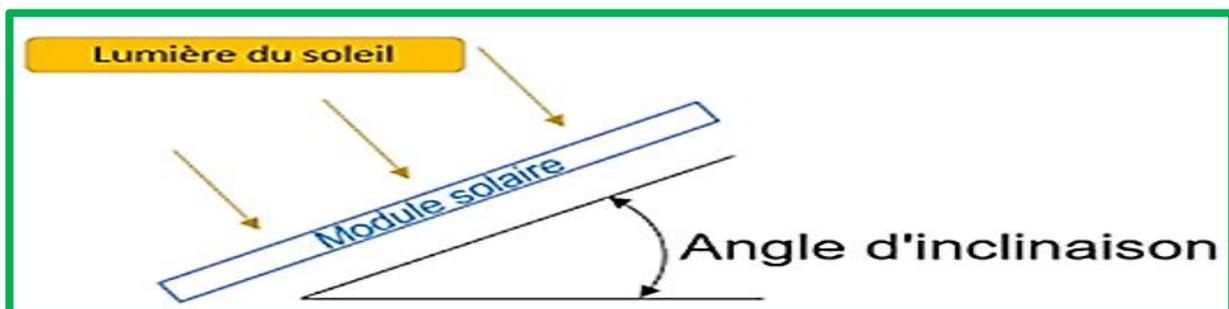
Lors d'un projet d'installation de panneaux solaires, le choix de leur emplacement est une décision de première importance. Deux critères majeurs doivent être pris en compte : l'orientation et l'inclinaison des modules.

L'orientation : Se réfère au point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest, etc). Idéalement, les panneaux solaires doivent être orientés vers le sud dans l'hémisphère nord et vers le nord dans l'hémisphère sud afin de recevoir le maximum d'ensoleillement tout au long de la journée, ce qui permet d'optimiser la production d'énergie solaire [30].



**Figure (III.2) :** L'orientation idéale d'un module photovoltaïque [30].

L'inclinaison des modules : L'angle d'inclinaison des panneaux solaires est mesuré en degrés par rapport à l'horizontale, est important pour optimiser leur production d'énergie en assurant que leurs surfaces soient perpendiculaires aux rayons solaires. Or, le soleil d'une saison à l'autre n'a pas la même inclinaison ; selon les saisons, à midi, il est plus ou moins haut dans le ciel. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. Comme il est difficile de modifier plusieurs fois dans l'année qui est définie par la latitude du lieu [11]. Comme montre la figure (III.3) et le tableau suivant :



**Figure (III.3) :** Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques [30].

**Tableau (III.2) :** Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude [29].

Latitude $\varphi$ (°)	Inclinaison $\beta$ (°)
$\varphi < 10^\circ$	$10^\circ$
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\Phi$
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\varphi + 15^\circ$

- Pour les régions où latitude est inférieure à 10 degrés, l'angle d'inclinaison recommandé est de 10 degrés.
- Pour les régions avec une latitude comprise entre 10 et 30 degrés, l'angle d'inclinaison optimal est égal à la latitude elle-même.
- Dans les zones où la latitude est entre 30 et 40 degrés, l'angle d'inclinaison est égal à la latitude plus 10 degrés.
- Pour les régions où la latitude est supérieure à 40 degrés, l'angle d'inclinaison recommandé est égal à la latitude plus 15 degrés.

Rappelons que la latitude de notre site est de :  $36^\circ$  d'après le tableau (III.2) l'inclinaison des panneaux est :  $\beta = \varphi + 10^\circ$  D'où  $\beta = 36^\circ + 10^\circ = 46^\circ$

### III.2.3. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Cette étape consiste à déterminer le nombre de modules PV que l'on devra posséder pour couvrir ces besoins en électricité, il faut pour cela :

#### III.2.3.1. Estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité

L'estimation des besoins journaliers en électricité d'un utilisateur consiste à évaluer la quantité d'électricité nécessaire pour répondre aux besoins d'un individu ou d'un foyer sur une base quotidienne. Pour estimer la consommation d'énergie d'une charge, deux éléments sont essentiels [29]:

- ✓ Puissance de la charge  $P_{ch}$  [W]
- ✓ Durée de fonctionnement  $T_{ch}$  [h/j]

Ainsi l'énergie consommée par une charge durant la journée s'écrit :

$$E_c = P_{ch} \times T_{ch} \quad [\text{Wh/j}] \quad (\text{III.1})$$

L'énergie moyenne consommée par jour sera la somme de toutes les énergies de chaque appareil.

$$E_c = \sum P_{ch} \times T_{ch} \quad [\text{Wh/j}] \quad (\text{III.2})$$

### III.2.3.2. Estimation de la puissance crête du champ photovoltaïque

La puissance crête du champ photovoltaïque dépend de l'irradiation du lieu. Plus le lieu est ensoleillé, plus la puissance installée peut être grande [30].

$$P_c = \frac{E_c}{I_r \times C_p} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$P_c$  : La puissance crête de générateur photovoltaïque [Wc].

$E_c$  : L'énergie journalière consommée [Wh].

$I_r$  : Nombre d'heure équivalente [kW/ m<sup>2</sup>/j], pour notre cas ;  $I_r = 4,1$  [kW/ m<sup>2</sup>/j]

$C_p$  : Coefficient correctif des panneaux photovoltaïques ; [0,8 à 0,9] pour des panneaux à l'horizontale et non nettoyés, pour notre cas on prendra 0,8.

$$\text{A.N :} \quad P_c = \frac{2874}{4,1 \times 0,8} = 876,21 \text{ W}$$

### III.2.3.3. Choix de la tension de fonctionnement

Le choix de la tension de fonctionnement d'un système photovoltaïque dépend de sa puissance crête ( $P_c$ ). Dans notre cas avec une puissance crête de 876,21 Wc, la tension de fonctionnement adaptée est 24V.

**Tableau (III.3) :** Les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance crête [30].

Puissance crête [Wc]	Tension du système [V]
$P_c < 500 \text{ Wc}$	12V
$500 < P_c < 2000 \text{ Wc}$	24V
$2000 < P_c < 10000 \text{ Wc}$	48V
$P_c > 10000 \text{ Wc}$	>48V

### III.2.3.4. Calcul de nombre de panneaux PV (total, séries et parallèles)

Le nombre de panneaux pour fournir la puissance de l'installation est déterminé par les équations suivantes [29] :

#### a. Nombre de panneaux PV total

$$N_{pt} = \frac{P_c}{P_{pv,u}} \quad (III.4)$$

AN: 
$$N_{pt} = \frac{876,21}{110} = 7,96 \approx 8 \text{ (8 panneaux)}$$

Avec :

$N_{pt}$ : Le nombre total de modules

$P_c$ : La puissance crête.

$P_{pv,u}$  : La puissance unitaire d'un panneau choisi.

#### b. Nombre de panneaux PV en série

$$N_{pv-série} = \frac{U_{tension-sys}}{V_{mpp}} \quad (III.5)$$

AN: 
$$N_{pv-série} = \frac{24}{35} = 0,65 \approx 1 \text{ (1 panneau en serie)}$$

Avec :

$U_{tension-sys}$  : La tension du système choisie en fonction de la puissance à produire,

$V_{mpp}$  : La tension point de puissance maximale du panneau photovoltaïque,

#### c. Nombre de panneaux PV en parallèle

$$N_{pv-parallèle} = \frac{N_{pt}}{N_{pv-série}}$$

(III.6)

AN: 
$$N_{pv-parallèle} = \frac{8}{1} = 8 \text{ (8 panneaux en parallèle)}$$

### III.2.4. Dimensionnement de la batterie de stockage

Afin d'assurer une continuité d'alimentation pendant les journées peu ensoleillées, un système de stockage composé de batteries est prévu. Leur capacité de stockage est calculée en fonction des besoins énergétiques, avec une profondeur de décharge de 75%. L'objectif est de trouver la capacité optimale offrant l'autonomie requise au meilleur coût.

La capacité totale des batteries peut être approchée par la formule suivante [27] :

$$C_{\text{batt}} = \frac{E_c \times N_{\text{ja}}}{V_{\text{batt}} \times P_D \times \eta_B} \quad (\text{III.7})$$

AN: 
$$C_{\text{batt}} = \frac{2874 \times 2}{48 \times 0,75 \times 0,8} = 199,58 \approx 200 \text{Ah}$$

Avec:

$$V_{\text{batt}} = 48 \text{ V}$$

$C_{\text{batt}}$  : Capacité nominale des batteries en [Ah]

$E_c$  : L'énergie journalière consommée en [Wh/j]

$N_{\text{ja}}$  : Le nombre de jour d'autonomie

$\eta_B$  : Rendement énergétique des batteries [80%]

$P_D$  : Profondeur de décharge des batteries (75%)

Dans notre système, pour une batterie de 48V-200Ah équivalente à 4 batteries de 12V-200Ah connectées en série, lorsque des batteries identiques sont mises en série, leurs tensions s'additionnent mais leurs capacités en ampères-heures (Ah) restent les mêmes. Ainsi :

- Tension totale = 4 x 12V = 48V
- Capacité totale = 200Ah (puisque c'est la capacité de chaque batterie de 12V)

Donc connecter 4 batteries de 12V-200Ah en série donne une batterie de 48V avec une capacité totale de 200Ah, identique à chaque batterie initiale.

### III.2.5. Dimensionnement de l'onduleur

Pour une installation photovoltaïque autonome, l'onduleur joue un rôle important en convertissant la tension continue (DC) fournie par les panneaux ou batteries en une tension alternative (AC) nécessaire pour alimenter les charges AC. Son dimensionnement doit prendre en compte plusieurs aspects :

La puissance apparente de l'onduleur, exprimée en voltampères (VA), doit être supérieure à la somme des puissances maximales des charges AC à alimenter. Cela permet de faire face aux éventuels pics de consommation et aux facteurs de puissance défavorables.

Pour produire une alimentation AC de qualité, un bon onduleur générera un signal de sortie AC sous forme d'onde carrée ou sinusoïdale. Son rendement de conversion DC/AC doit être élevé, supérieur à 90%, d'autant plus que la tension d'entrée est important.

Lors du choix d'un onduleur, les caractéristiques clés à considérer sont [29]:

- La tension d'entrée continue, égale à celle du bus continu
- La puissance nominale conseillée, basée sur les besoins exprimés
- La tension de sortie alternative (220V monophasé ou 380V triphasé)
- Le rendement de conversion DC/AC

Pour notre installation, un onduleur monophasé d'une tension d'entrée 24V et une tension de distribution : 220V-50HZ a été sélectionné. Sa puissance nominale  $P_n$  est calculée selon :

$$P_n = \frac{P_{ch,max}}{\eta_{ond}} \quad (III.8)$$

$$AN: \quad P_n = \frac{798}{0,9} = 886,66VA$$

$P_{ch,max}$  : Puissance maximale quand tous les récepteurs fonctionnent simultanément,

$\eta_{ond}$  : Le rendement de l'onduleur 90 %.

Pour les différents calculs de notre installation PV, on les représente dans le tableau suivant :

**Tableau (III.4) :** Résultats de calcul du dimensionnement de l'installation photovoltaïque

Consommation journalière $E_j$ [Wh/j]	2874
Puissance maximal du champ photovoltaïque $P_c$ [W]	876,21
Nombre des panneaux PV $N_{pt}$	8
Nombre des panneaux en série $N_{pv-série}$	1
Nombre des panneaux en parallèles $N_{pv-parallèle}$	8
Capacité de la batterie $C_{batt}$ [Ah]	200
Nombre des batteries $N_{batt}$	4
Puissance de l'onduleur $P_n$ [VA]	886,66

### III.3. Gestion d'énergie du système photovoltaïque avec batterie

Il est préférable de gérer de manière idéale les flux d'énergie entre les nombreux composants du système afin de le faire fonctionner de manière totalement autonome. Ainsi, la mise en place d'un système de gestion de l'énergie est indispensable. Cette énergie peut être stockée dans des batteries ou distribuée vers les charges en fonction des besoins.

Pour une gestion efficace de l'énergie, il faut prendre en compte le profil de charge, l'état de charge et de décharge des batteries, ainsi que les conditions d'ensoleillement favorables nécessaires à la production d'énergie par les panneaux photovoltaïques. L'objectif de cette gestion est d'extraire l'énergie demandée tout en optimisant le transfert d'énergie vers la charge. Dans cette partie, nous traiterons le cas d'une maison d'été isolé par un système photovoltaïque avec stockage d'énergie. Un algorithme de gestion de flux d'énergie a été développé, figure (III.4).

#### III.3.1. Algorithme de gestion de l'énergie du système

La figure (III.4) représente l'organigramme de l'algorithme de gestion de l'énergie. L'algorithme fonctionne principalement en se basant sur trois éléments : la production d'énergie photovoltaïque (PV), le niveau de charge des batteries, et le courant ( $I_{\text{batt}}$ ) qui indique si la batterie est en charge ou en décharge.

L'idée principale est d'exploiter au maximum la production d'énergie photovoltaïque (PV) pour atteindre l'autoconsommation, tout en considérant la batterie comme une deuxième source d'énergie après le générateur PV.

Il alimente d'abord prioritairement les charges de la maison avec la production solaire. Si la production solaire est insuffisante pour répondre à la demande, les batteries vont fournir l'énergie nécessaire jusqu'à un seuil de décharge de 20%, puis une fois la PV est disponible elles vont recharger avec le surplus de la production jusqu'à 95%, (on prend une plage bornée d'états de charge des batteries pour assurer leurs protections, un état de charge minimum  $EDC_{\text{min}} = 20\%$  et un état de charge maximum  $EDC_{\text{max}} = 95\%$ ).

Cet algorithme fonctionne selon différents modes opérationnels :

**Mode 1 :** Dans le cas de  $P_{\text{pv}} = P_{\text{ch}}$ , ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge par le générateur photovoltaïque donc la batterie sera déconnecté,  $P_{\text{bat}}=0$ .

**Mode 2 :** La puissance photovoltaïque est nulle ( $P_{\text{pv}}=0$ ), alors la charge est alimentée par les batteries.

**Mode 2' :**  $EDC > EDC_{\text{min}}$  et  $P_{\text{pv}}$  est insuffisante pour alimenter la charge  $P_{\text{pv}} < P_{\text{ch}}$ , donc le manque de puissance sera compensé par la batterie  $P_{\text{ch}} = P_{\text{pv}} + P_{\text{bat}}$ .

**Mode 3 :** Ce cas représente la situation où la puissance PV est insuffisante pour alimenter la charge, et  $EDC \leq EDC_{\min}$ , alors on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible.

**Mode 4 :** Quand la puissance PV est supérieur à la puissance demandée par la charge,  $P_{pv} \geq P_{ch}$  et que  $EDC \leq EDC_{\max}$ , on alimente la charge et on charge la batterie.

**Mode 5 :** Quand  $P_{pv} \geq P_{ch}$  et  $EDC \geq EDC_{\max}$ , on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par le générateur PV.

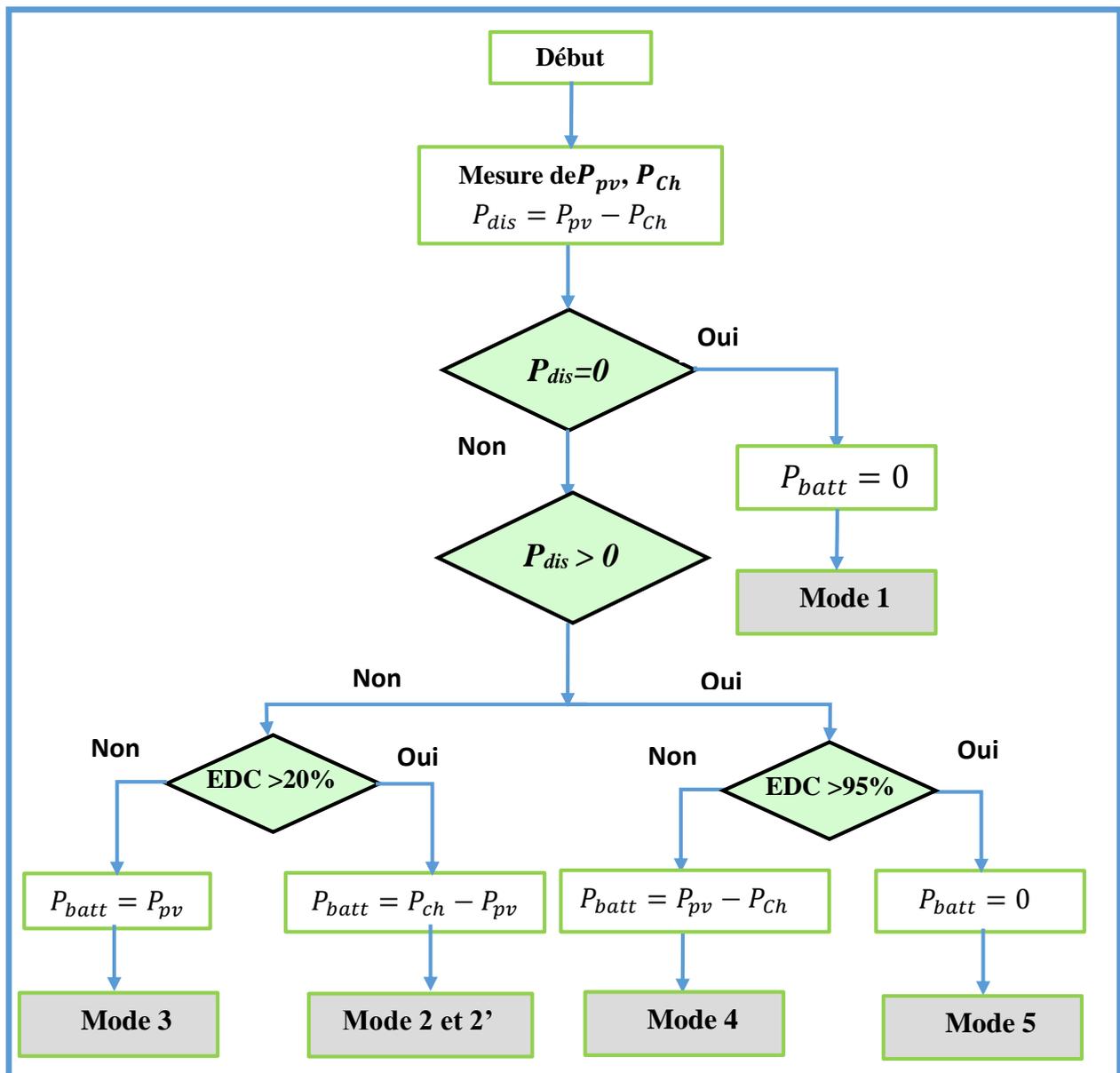


Figure (III.4) : Diagramme de gestion d'un système PV avec batteries

### III.3.2. Le profil de consommation

Dans cette étude, le profil de consommation de la maison a été établi pour une semaine d'été spécifique. Cela a été réalisé en prenant en considération la consommation quotidienne de chaque appareil, leur puissance nominale, ainsi que les heures auxquelles ils fonctionnent chaque jour. En additionnant les diverses consommations, on obtient le profil global quotidien de consommation, comme illustré dans la figure (III.5).

Le profil de consommation de la maison a montré une variation significative tout au long de la semaine, avec des niveaux de consommation variant entre 80 W et 500 W.

Chaque jour a présenté des fluctuations et des pics de puissance élevée pendant les heures de forte consommation, ce qui pourrait indiquer des besoins énergétiques importants à ces moments-là.

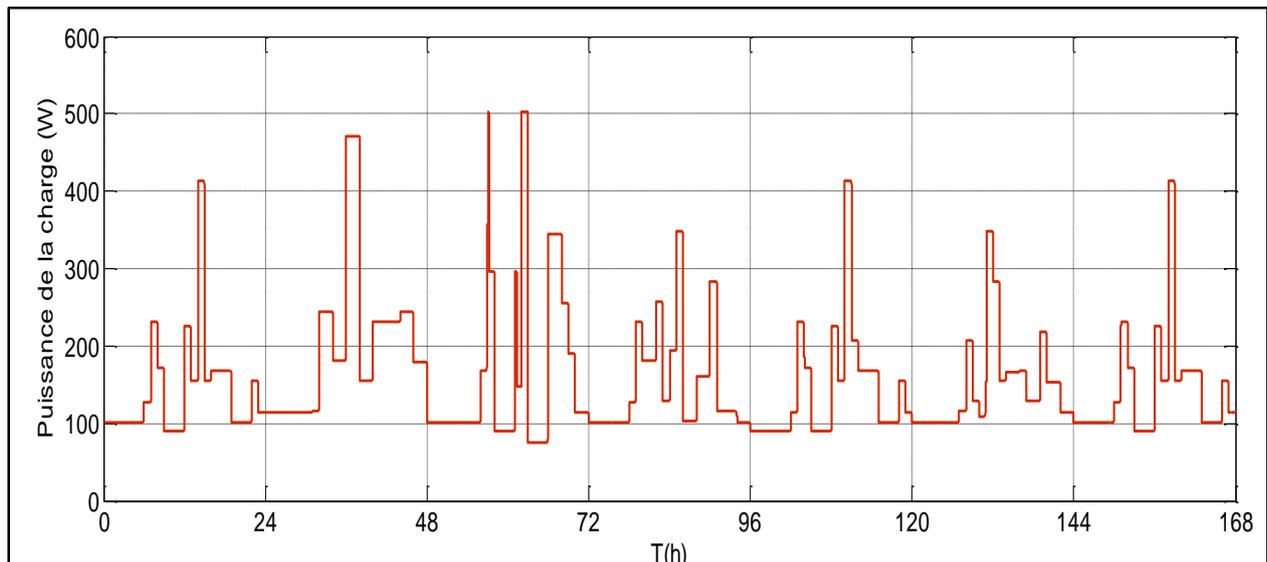


Figure (III.5) : Allure de profil de consommation de la maison.

### III.3.3. Le profil d'ensoleillement et de température

Pour visualiser les différentes variations météorologiques, nous avons sélectionné des profils d'ensoleillement et de température sur une semaine figure (III.6). Chaque jour de la semaine présente des conditions environnementales distinctes les unes des autres.

La figure (III.6.a) représente le profil d'ensoleillement : Les deux premiers jours ont été caractérisés par un ciel bien dégagé, offrant un ensoleillement intense et stable, cela a certainement contribué à créer une allure lisse. Par la suite, les jours suivants présentent un

mélange de nuages et des fluctuations dans l'intensité du soleil, donnant lieu à une dynamique plus variée.

La figure (III.6.b) représente le profil de la température : Les variations de température sur les 7 jours ont créé un profil météorologique différent d'un jour à l'autre. Avec des températures oscillant entre 19°C et 42°C, chaque journée a apporté des changements rapides.

Ces écarts importants de température ont donné au profil une dynamique marquée par des variations remarquables, représentant une météo changeante et diverse au fil de la semaine.

Ces profils nous permettent de comprendre comment la lumière du soleil et la température influent sur la consommation d'énergie de notre maison.

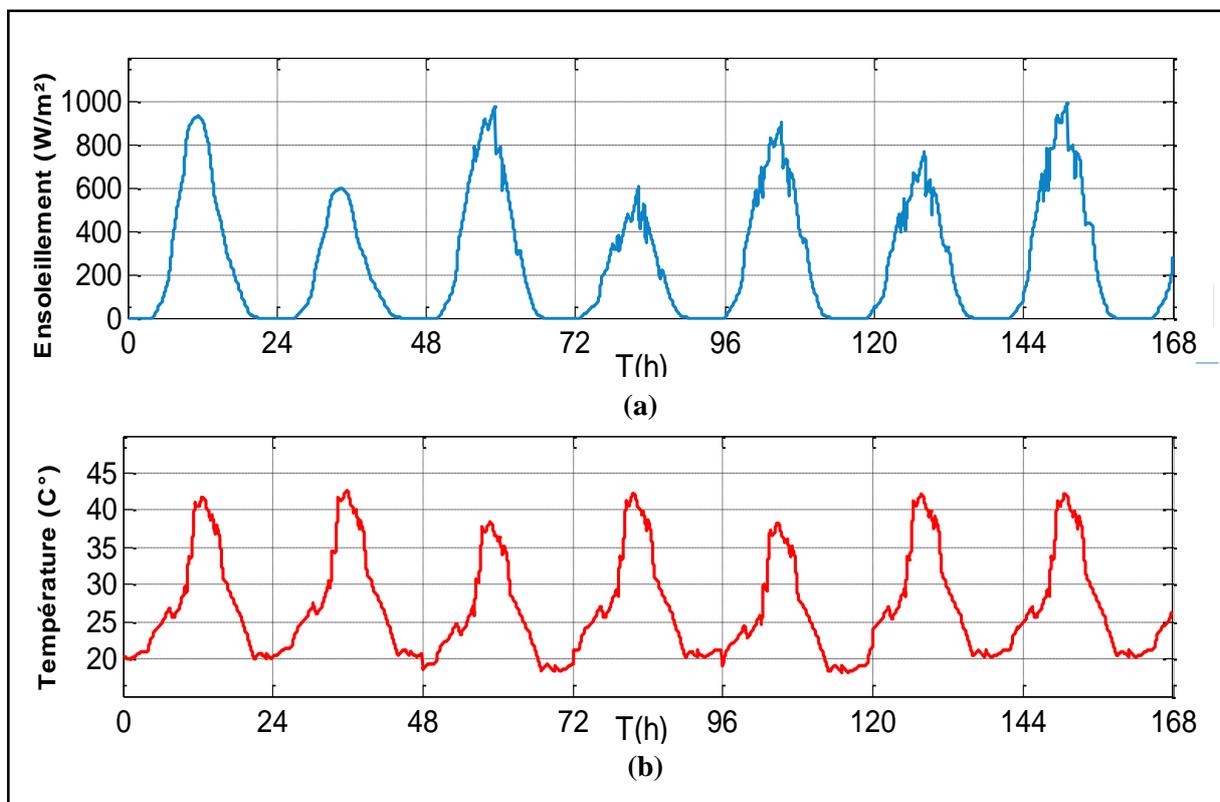


Figure (III.6) : Allures des profils, (a) d'ensoleillement, (b) de température.

### III.3.4. Simulation du système de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque avec stockage

Afin de vérifier l'efficacité de l'algorithme de gestion de l'énergie, qui vise à satisfaire la demande énergétique d'une maison solaire alimentée par un système photovoltaïque, nous allons procéder à une simulation du système sur une période correspondant à une semaine réelle de 168 heures. Cette simulation utilisera le profil de charge ainsi que les données d'irradiation solaire et de température pour une semaine d'été.

En suivant l'organigramme précédent, nous avons réalisé un bloc de gestion du système photovoltaïque. Ce bloc a été intégré dans le système global, comprenant le générateur photovoltaïque optimisé par MPPT (LF CI), le convertisseur et les batteries avec une charge variable. Par la suite, nous avons effectué une simulation de ce système dans l'environnement Matlab/Simulink.

La figure (III.7) présente le bloc Simulink du système PV global.

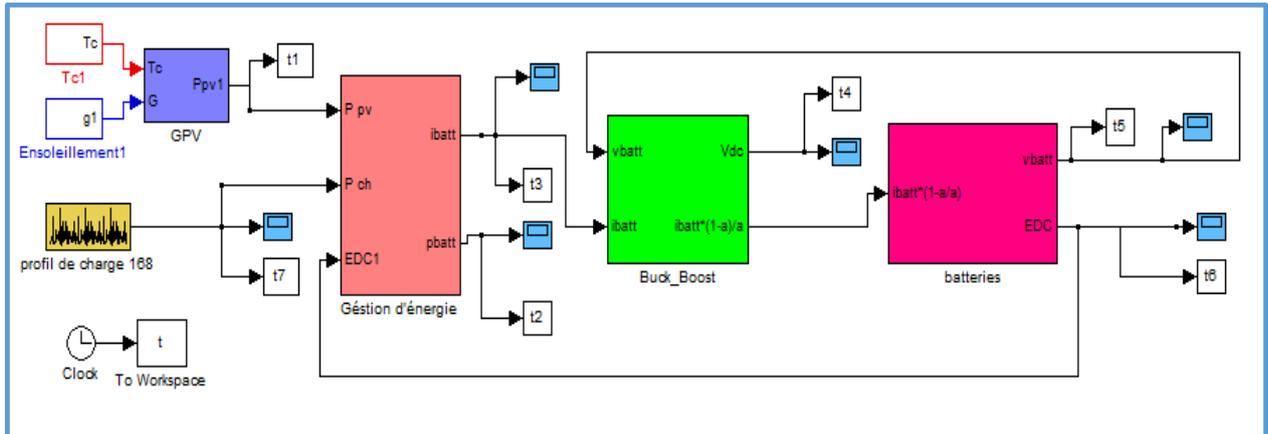


Figure (III.7) : Bloc de simulation de système global.

### III.3.4.1. Les résultats de simulation du système global

Nous allons présenter les résultats de notre simulation basée sur une semaine ensoleillée. Cette simulation a pris en compte les profils d'ensellement et de température correspondants pour évaluer les performances de notre système. Nous avons examiné la production photovoltaïque, la consommation électrique et l'état des batteries afin de déterminer si notre système peut efficacement répondre aux besoins énergétiques grâce à l'énergie solaire local, lors des conditions météorologiques favorables.

Les résultats seront illustrés dans les figures suivantes, (III.8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13).

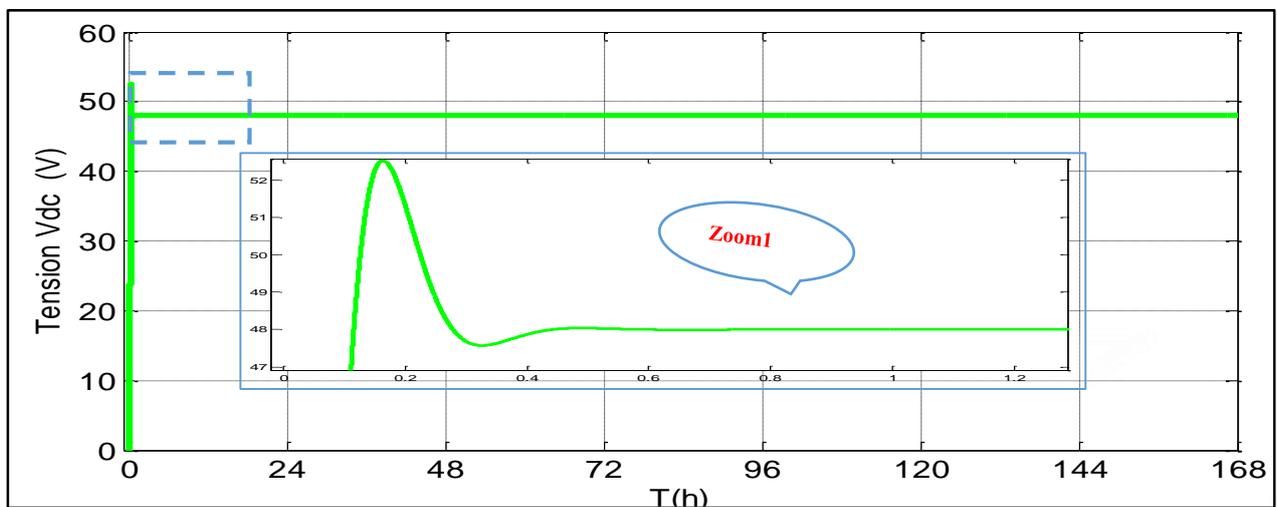


Figure (III.8) : Allure de la tension du bus continue Vdc.

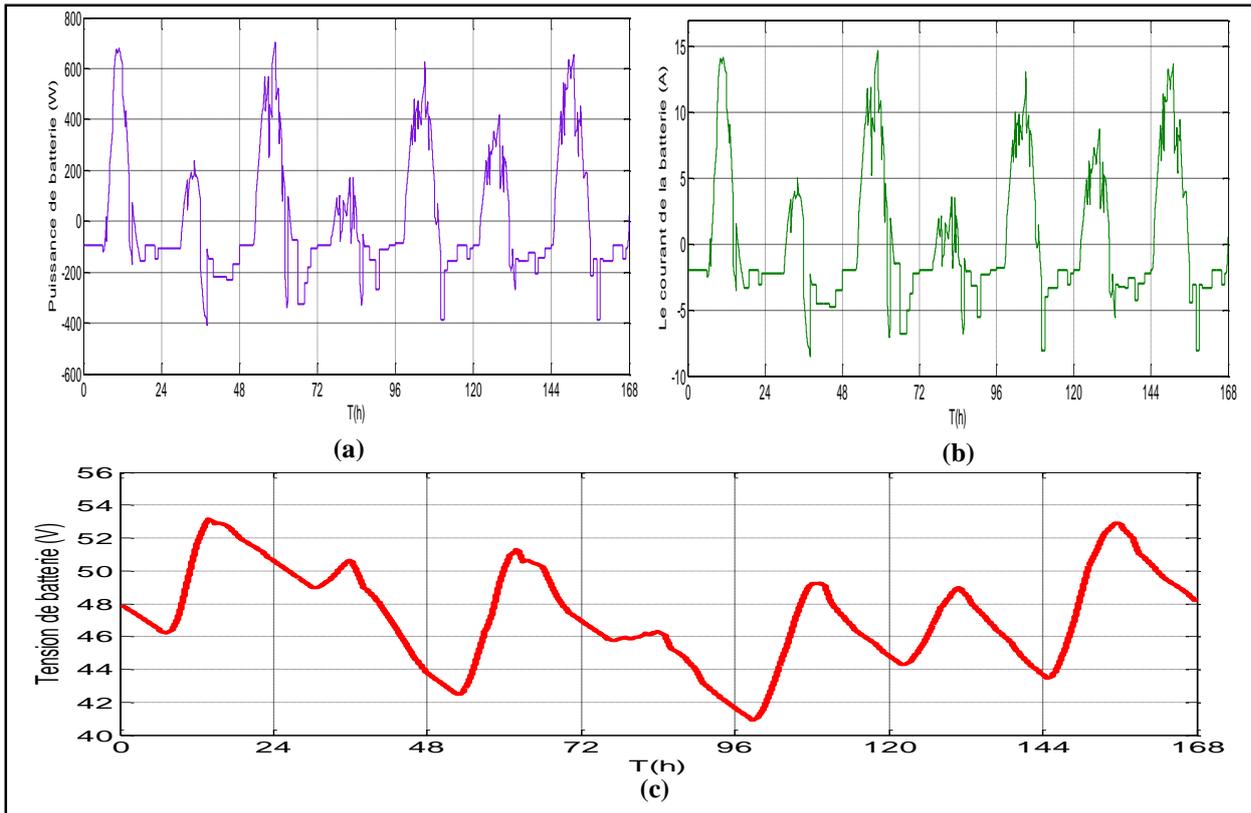


Figure (III.9) : Allure de puissance de batterie(a), courant de batterie (b) et la tension de batterie (c).

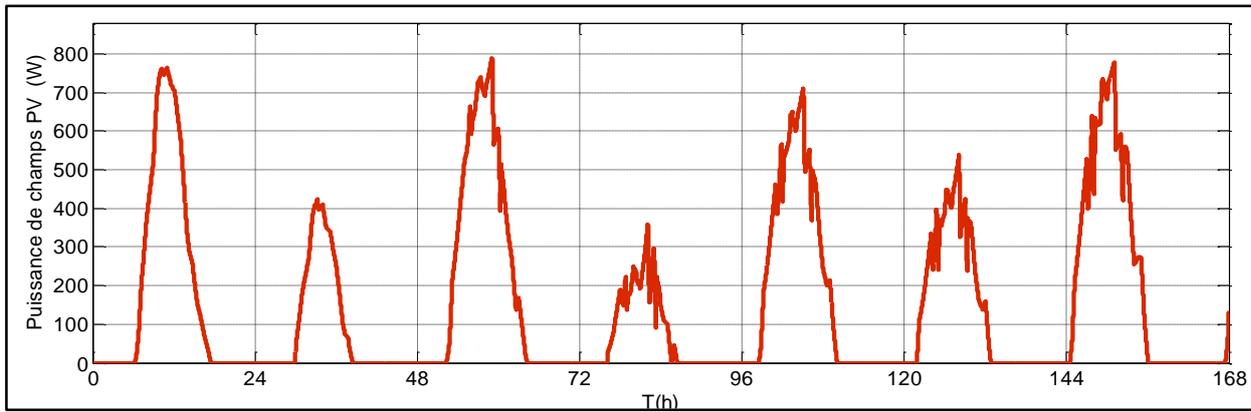


Figure (III.10) : Allure de la puissance de panneau photovoltaïque.

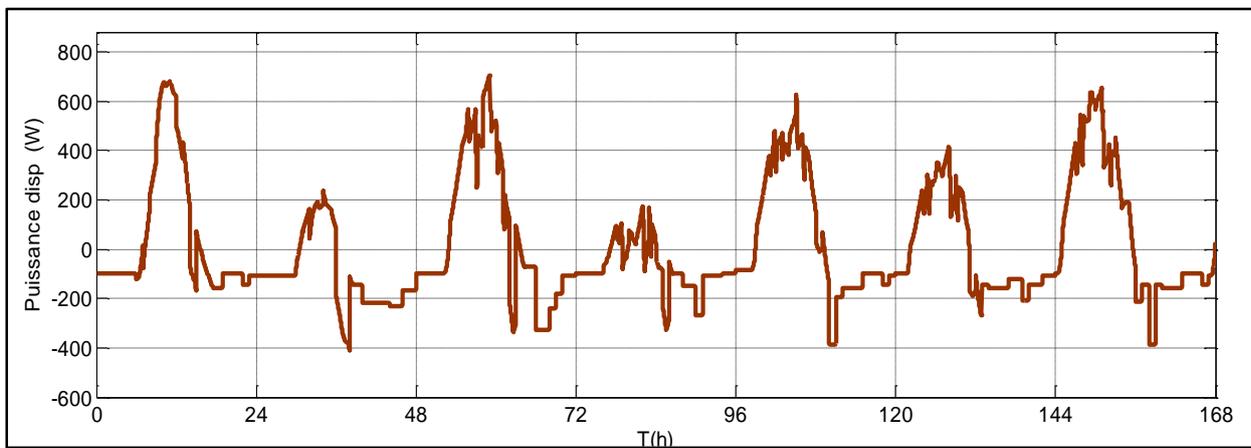


Figure (III.11) : Allure de la puissance disponible.

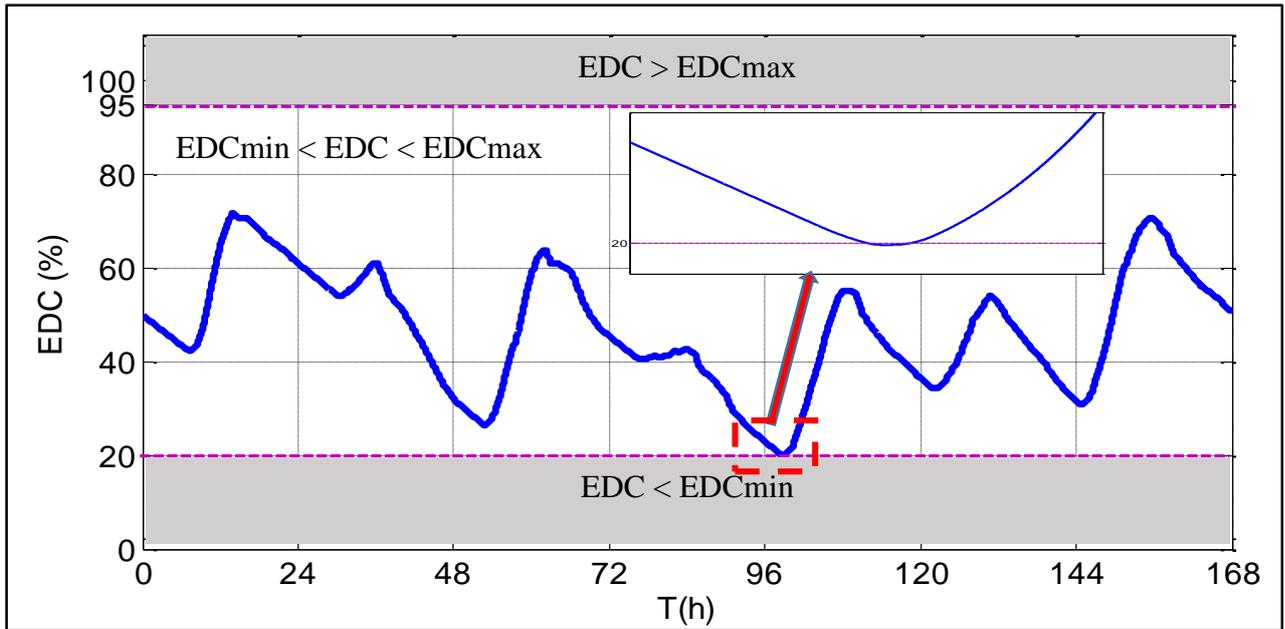


Figure (III.12) : Etat de charge de la batterie.

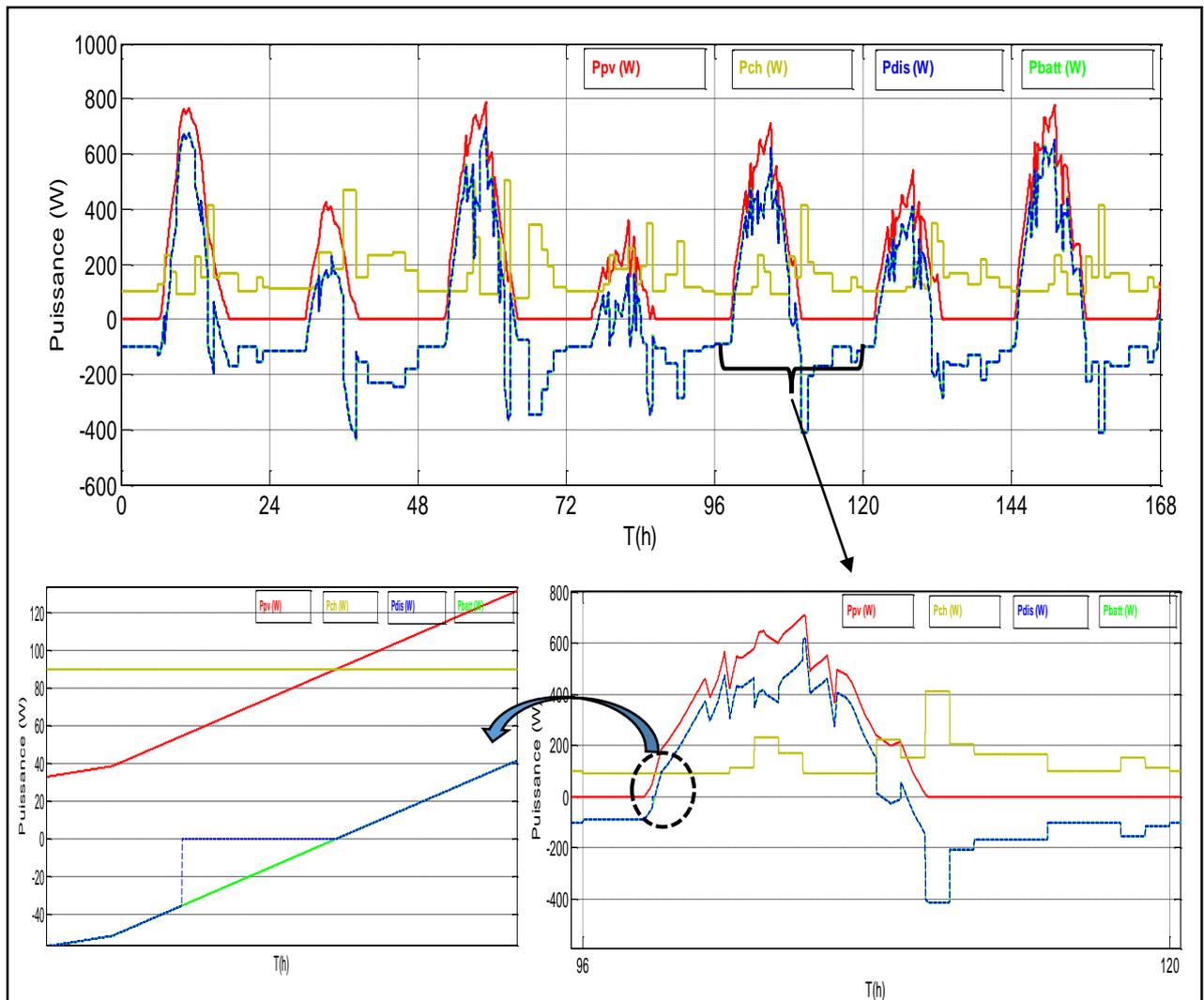
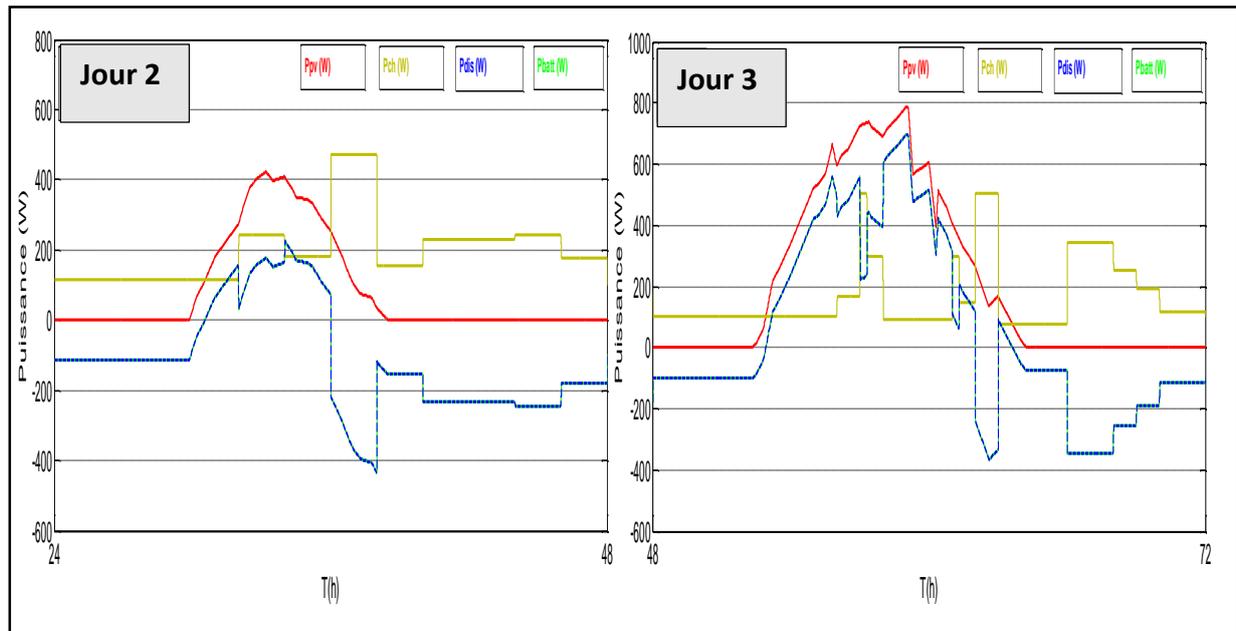


Figure (III.13) : Allure de la superposition des différentes puissances ( $P_{pv}$ ,  $P_{ch}$ ,  $P_{dis}$ ,  $P_{batt}$ ).



**Figure (III.14) :** Zooms des 2 jours (1 et 3).

### III.3.4.2. Interprétation des résultats

A partir des résultats présentés sur les figures précédentes et notamment les résultats trouvés pour les 7 jours choisies en été, nous pouvons retirer les conclusions suivantes :

Les figures (III.9.a ; 9.b ; 9.c ; III.12), montrent l'évolution de la tension, du courant et de la puissance de batterie ainsi que son état de charge. Les batteries ont un état de charge initial de 50%. La tension de la batterie varie entre 40.92V et 53.2V. Une observation importante est que la tendance de la tension de la batterie suit de près celle de l'état de charge, indiquant ainsi que l'état de charge est essentiellement l'image de la tension.

La figure (III.8) illustre la tension du bus continu  $V_{dc}$ , qui reste régulée à sa valeur de référence de 48V, même en cas de variations des conditions environnementales et de la charge.

Les figures (III.11) et (III.13) représentent respectivement la puissance disponible, calculée comme la différence entre la puissance générée par le système photovoltaïque (figure III.10) et la puissance de la charge (figure III.5), ainsi que la superposition des différentes puissances ( $P_{pv}$ ,  $P_{ch}$ ,  $P_{dis}$ ,  $P_{batt}$ ).

Au cours de la journée, la production photovoltaïque atteint des niveaux très élevés pendant les heures ensoleillées, atteignant parfois des pics supérieurs à 800Wh. Cette production électrique est suffisante non seulement à la demande énergétique variable, mais permet également une recharge efficace des batteries de stockage en cas de surplus de production

pendant la journée. Ces batteries se déchargent ensuite durant la nuit pour alimenter la charge pendant les périodes de faible production photovoltaïque.

La figure (III.12), montre que l'état de charge de la batterie varie de 19,9% à 73%, atteignant brièvement la limite minimale de 20%. Malgré cette courte période sous la limite basse, la batterie reste la plupart du temps dans la plage admissible de 20% à 95%, permettant une utilisation normale sans risque de dommage.

D'après la figure (IV.13) des puissances représentées on déduit les différentes phases :

**Phase 1 :** Représente le cas d'équilibre entre la production photovoltaïque et la consommation ( $P_{pv} = P_{ch}$ ), se reproduisant à différents instants, dont un exemple illustré dans le tableau (III.5), (Mode 1).

**Phase 2 :** La puissance produite par les panneaux photovoltaïque est nulle et  $EDC > EDC_{min}$ , alors la charge est alimentée par les batteries (Mode 2).

**Phase 3 :** La puissance photovoltaïque est insuffisante pour l'alimentation de la charge et  $EDC > EDC_{min}$ , dans ce cas les batteries vont se décharger afin de satisfaire la charge (Mode 2').

**Phase 4 :** Cette situation présente le cas où la puissance PV est supérieure à la puissance demandée et  $EDC < EDC_{max}$ , alors les batteries se chargent (Mode 4).

**Phase 5 :** Dans cette phase la production de l'énergie photovoltaïque ne peut pas satisfaire la demande de la charge, les batteries sont complètement déchargées dans ce cas la charge est déconnectée. Alors on charge les batteries ( $P_{pv} = P_{batt}$ ), (Mode 3).

Enfin le mode 5 est toujours en Off car on n'atteint pas le cas de l'état de charge de la batterie  $EDC_{max}$ .

En résumé, le système est dimensionné et géré de manière à couvrir de façon optimale les besoins énergétiques grâce à l'énergie solaire locale et un bon usage du stockage des batteries. Différents modes d'alimentation de la charge ont été présentés, utilisant soit les panneaux photovoltaïques lorsque l'ensoleillement est suffisant pour alimenter directement la charge, soit la batterie qui prend le relais en cas de faible ensoleillement ou d'absence de rayonnement solaire pour fournir l'énergie nécessaire.

Cette combinaison de sources d'énergie renouvelable et de stockage permet une couverture fiable des besoins énergétiques en s'adaptant aux variations d'ensoleillement.

En présente les périodes de chaque phase pendant 7 jours dans le tableau suivant :

Tableau (III.5) : Synthèse sur fonctionnement par phase du système PV.

Période t(h)	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
[6h57.9min, 6h57.96min]	✓				
[00h, 6h18min]		✓			
[6h18min, 6h29.4min]			✓		
[6h56.4min, 7h]				✓	
[7h, 7h15min]		✓			
[7h15min, 14h0.3min]				✓	
[14h0.3min, 15h0.3min]			✓		
[15h0.3, 15h36min]				✓	
[15h36min, 17h30.6min]			✓		
[17h30.6min, 29h52.2min]		✓			
[29h52.2min, 30h30.6min]			✓		
[30h30.6min, 36h]				✓	
[36h, 38h30min]			✓		
[38h30min, 52h18.6min]		✓			
[52h18.6min, 52h54min]			✓		
[52h54min, 62h]				✓	
[62h, 63h0.48min]			✓		
[63h0.48, 63h39min]				✓	
[63h39min, 64h15min]			✓		
[64h15min, 76h4.2min]		✓			
[76h4.2min, 77h10.2min]			✓		
[77h10.2min, 79h3min]				✓	
[79h3min, 79h48min]			✓		
[79h48min, 82h13.8min]				✓	
[82h13.8min, 82h43.8min]			✓		
[82h43.8min, 84h6min]				✓	
[84h6min, 86h27min]			✓		
[86h27min, 98h31.2min]		✓			
[98h31.2min, 98h50.4min]			✓		
[98h50.4min, 98h56.4min]					✓
[98h56.4min, 108h12min]				✓	
[108h12min, 109h]			✓		
[109h, 109h18min]				✓	
[109h18min, 110h7.8min]			✓		
[110h7.8min, 121h51min]		✓			
[121h51min, 122h10.2min]			✓		
[122h10.2min, 131h]				✓	
[131h, 132h48min]			✓		
[132h48min, 144h27min]		✓			
[144h27min, 144h54.6min]			✓		
[144h54.6min, 155h37.8min]				✓	
[155h37.8min, 156h7.2min]			✓		
[156h7.2min, 168h]		✓			

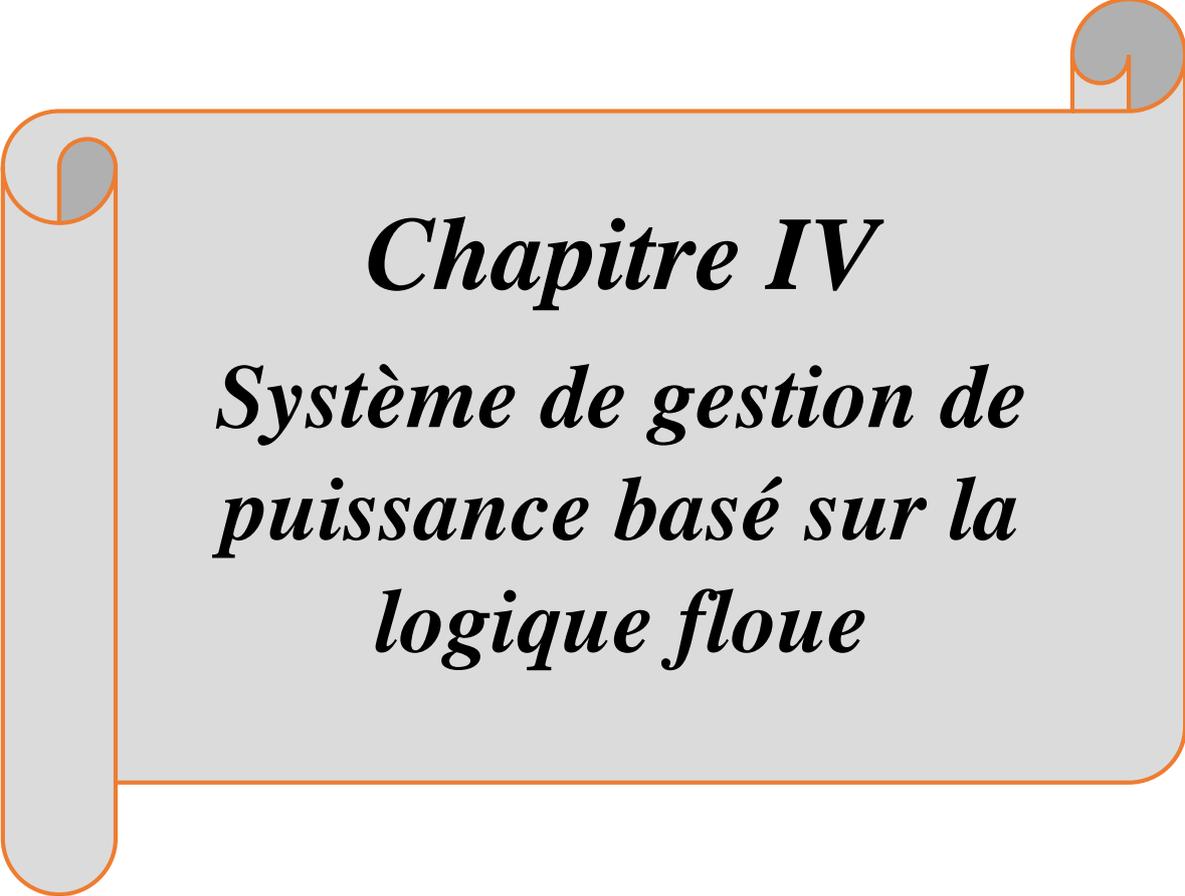
### **III.4. Conclusion**

Ce chapitre a présenté les résultats de simulation d'un système photovoltaïque autonome avec stockage, pour répondre aux besoins énergétiques d'une maison, on a entamé une description générale d'une méthode de dimensionnement du système. Ensuite nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie qui permet de vérifier à chaque instant l'état de charge et de décharge des batteries et l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. L'utilisation d'un système de gestion garantit le fonctionnement optimal de notre système en suivant une stratégie de contrôle établie.

Il évalue la puissance disponible du générateur photovoltaïque et la demande en puissance des charges. Lorsque le générateur photovoltaïque ne peut pas fournir suffisamment de puissance pour alimenter les charges, les batteries interviennent pour compenser le manque de puissance.

Enfin, nous avons procédé au calcul et à la simulation du système global dans des conditions météorologiques variables.

Le chapitre suivant introduira une nouvelle approche basée sur la logique floue, cette stratégie intelligente vise à atteindre une gestion optimale de l'énergie pour notre système.



***Chapitre IV***  
***Systeme de gestion de  
puissance basé sur la  
logique floue***

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle méthode intelligente pour gérer l'énergie dans les maisons équipées des panneaux solaires et des batteries. Cette méthode utilise la logique floue. Contrairement à la logique booléenne, la logique floue permet des définitions partielles ou "floues" des règles de contrôle, ce qui s'apparente au raisonnement humain.

Un ensemble de règles floues définit les priorités d'utilisation de l'énergie : consommer d'abord la production solaire, stocker les excédents dans les batteries et satisfaire au mieux les besoins énergétiques de notre installation.

Après une présentation du système de gestion basé sur la logique floue, nous procéderons à des simulations pour évaluer l'efficacité du système de gestion développé dans différents scénarios de production et de consommation.

## IV.2. Présentation du système de gestion

Comme mentionné précédemment, cette étude traite un système photovoltaïque avec stockage par batteries visant à fournir une alimentation électrique autonome pour une maison de vacances isolée dont la consommation journalière est estimée à 2874 Wh/j. Le système comprend 08 panneaux photovoltaïques de 110W et 04 batteries d'une capacité de stockage de 200Ah. Une gestion intelligente de l'énergie par logique floue sera mise en place afin de satisfaire les besoins énergétiques des charges de la maison, tout en évitant les pénuries. Ces charges électriques sont répartis en trois niveaux de priorité: P1 (charges prioritaires), P2 (charges optionnelles) et P3 (charges facultatives non indispensables).

- Les charges prioritaires (P1) regroupent les équipements essentiels et indispensables tels que le réfrigérateur et l'éclairage.
- Les charges optionnelles (P2) comprennent les appareils électroménagers comme le lave-linge, le ventilateur, les téléviseurs et la plaque de cuisson.
- Les charges facultatives non indispensables (P3) englobent les équipements non cruciaux comme les ordinateurs, les téléphones, ainsi que d'autres appareils tels que le mixeur, lecteur DVD...etc.

Le fonctionnement dépend de la puissance produite par les panneaux ( $P_{pv}$ ), de l'état de charge des batteries (SOC) et de la puissance consommée ( $P_{ch}$ ).

### IV.3. Mise en œuvre du système flou

Dans le système de gestion intelligente étudié, trois contrôleurs flous sont utilisés, chaque contrôleur flou comprend deux entrées floues: l'état de charge de la batterie (SOC%) exprimé en pourcentage, et la variation de puissance requise ( $\Delta P$ ). La sortie de chaque contrôleur est une variable  $P(n)$  représentant la puissance à fournir sachant que  $n = (1, 2, 3)$ .

$$\text{Avec : } \Delta P = P_{pv} - P_{ch}$$

Le système fonctionne en utilisant d'abord l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques lorsque le soleil est suffisamment présent. Tout surplus d'énergie produit est stocké dans les batteries pour alimenter le système dans le cas de faible rayonnement solaire ou d'absence totale. Cependant, lorsque le niveau de charge des batteries est insuffisant pour répondre à l'ensemble des besoins énergétiques, une gestion par ordre de priorité intervient.

Celle-ci alimente d'abord la charge la plus essentielle (P1 seule), avant d'ajouter progressivement les charges suivantes (P1+P2, puis P1+P2+P3) selon la puissance restante disponible. Cette approche permet de maximiser l'autonomie restante en concentrant l'énergie sur les charges les plus importantes, garantissant ainsi un service continu en évitant les coupures, même en cas de niveau de charge des batteries bas.

Les différents modes de fonctionnement du système de gestion sont présentés ci-dessous et détaillés dans le tableau (IV.1).

Avec ; 1 = charge connectée

0 = charge déconnectée

**Mode 1 :** (SOC  $\geq$  95%), les batteries sont complètement chargées. Dans ce mode, si  $P_{pv}$  est suffisante pour alimenter toutes les charges (P1 + P2 + P3), elles seront toutes connectées. Si  $P_{pv}$  n'est pas suffisante, les batteries se déchargeront pour compléter l'alimentation des charges.

**Mode 2 :** (20% < SOC < 95%), les batteries ont un niveau de charge intermédiaire. Les charges sont connectées par ordre de priorité (P1, P2, P3) en fonction de  $P_{pv}$  disponible. Si  $P_{pv}$  excède les besoins énergétiques, les batteries se chargeront.

**Mode 3 :** (SOC  $\leq$  20%), les batteries ont atteint leur limite inférieure, elles sont presque déchargées. Seules les charges de haute priorité (P1) seront alimentées si possible, sinon aucune charge ne sera connectée. La priorité est donnée à la charge des batteries.

Tableau (IV.1) : Modes de fonctionnement du système de gestion intelligent:

Mode	Conditions		$P_{pv}$	Etat des batteries	P1	P2	P3
1	SOC $\geq$ 95%	a) $P_{pv} = P1 + P2 + P3$	1	Déconnexion	1	1	1
		b) $P_{pv} < P1 + P2 + P3$	1	Décharge	1	1	1
		c) $P_{pv} > P1 + P2 + P3$	1	Déconnexion	1	1	1
2	20% < SOC < 95%	a) $P_{pv} > P1 + P2 + P3$	1	Charge	1	1	1
		b) $P_{pv} = 0$	0	Décharge	1	1	1
		c) $P_{pv} < P1 + P2 + P3$ ET $P_{pv} > P1 + P2$	1	Charge	1	1	0
		d) $P_{pv} < P1 + P2$ Et $P_{pv} > P1$	1	Charge	1	0	0
3	SOC $\leq$ 20%	a) $P_{pv} = 0$	0	Décharge	1	0	0
		b) $P_{pv} < P1$	0	Charge	0	0	0
		c) $P_{pv} < P1 + P2$ Et $P_{pv} > P1$	1	Charge	1	0	0
		d) $P_{pv} < P1 + P2 + P3$ Et $P_{pv} > P1 + P2$	1	Charge	1	1	0
		e) $P_{pv} > P1 + P2 + P3$	1	Charge	1	1	1

### IV.3.1. Établissement des règles de décision

Cette étape concerne la définition des règles de décision qui déterminent le comportement des contrôleurs flous. Ces règles associent les entrées floues (état de charge SOC% et variation

de puissance  $\Delta P$ ) à la sortie, la variable  $P(n)$  pour chaque niveau de priorité, en se basant sur l'expertise humaine.

➤ **Entrées floues**

- SOC% (état de charge des batteries) :
  - (Small) Niveau bas: batterie en décharge profonde
  - (Medium) Niveau moyen
  - (Big) Niveau haut: batterie pleinement chargée
- $\Delta P$  (variation de puissance) :
  - BN (Big Négative) : forte baisse de puissance
  - SN (Small Négative) : légère baisse
  - Z (Zéro) : pas de variation
  - SP (Small Positive) : légère augmentation
  - BP (Big Positive) : forte augmentation

➤ **Sortie floue**

- $P(n)$  (puissance à fournir selon la priorité) :
  - VL (Very Low) : Puissance très faible
  - L (Low) : Puissance faible
  - M (Medium) : Puissance moyenne
  - H (High) : Puissance élevée
  - VH (Very High) : Puissance très élevée

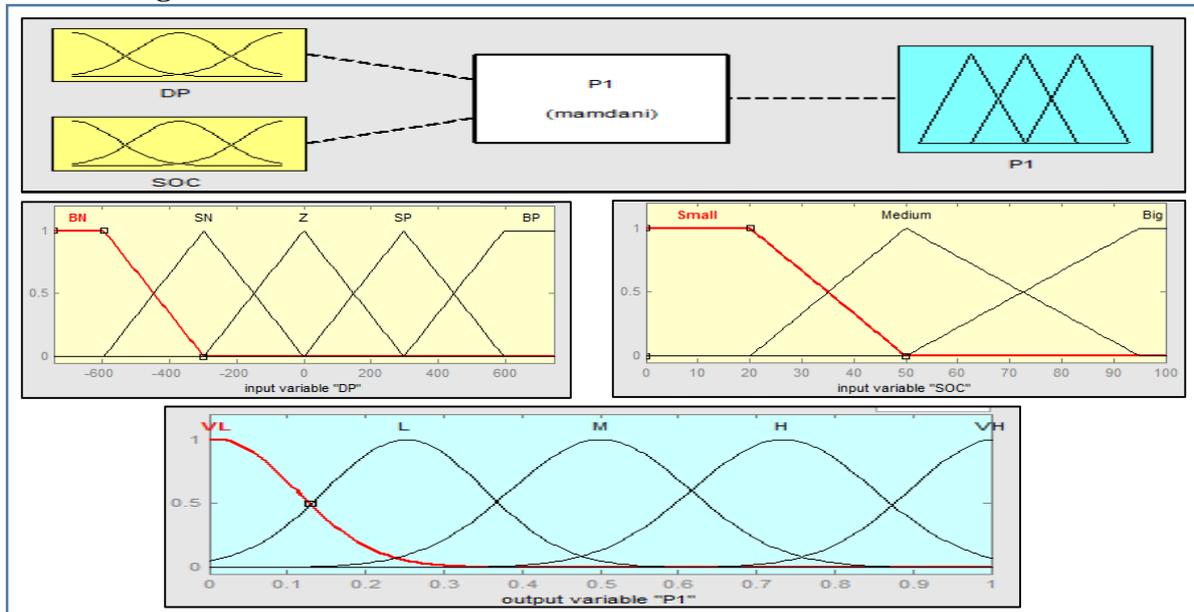
Les règles de décision floues associent ces entrées aux sorties pour chaque niveau de priorité, permettant de définir la stratégie de gestion optimale de l'énergie selon des conditions. Pour illustrer la mise en œuvre de ces règles de décision, un exemple est fourni pour chaque niveau de priorité.

- ✓ Si  $\Delta P$  est BN (Big Negative) et SOC est Big, alors la probabilité de démarrer uniquement les appareils de priorité P1 est élevée.
- ✓ Si  $\Delta P$  est BN (Big Negative) et SOC est Small, alors la probabilité de démarrer les appareils P1+P2 est très faible.
- ✓ Si  $\Delta P$  est BP (Big Positive) et SOC est Big, alors la probabilité de démarrer les appareils P1+P2+P3 est très élevée.

Les fonctions d'appartenance des entrées floues SOC% et  $\Delta P$ , ainsi que de la sortie floue  $P(n)$  pour chaque niveau de priorité (P1, P1+P2, P1+P2+P3), sont illustrées respectivement par les figures (IV.1), (IV.2), (IV.3), tandis que les tableaux (IV.2), (IV.3), (IV.4) détaillent la base

des règles du contrôleur logique flou (FLC) associant les entrées aux sorties selon les différentes conditions.

➤ Charge P1 :

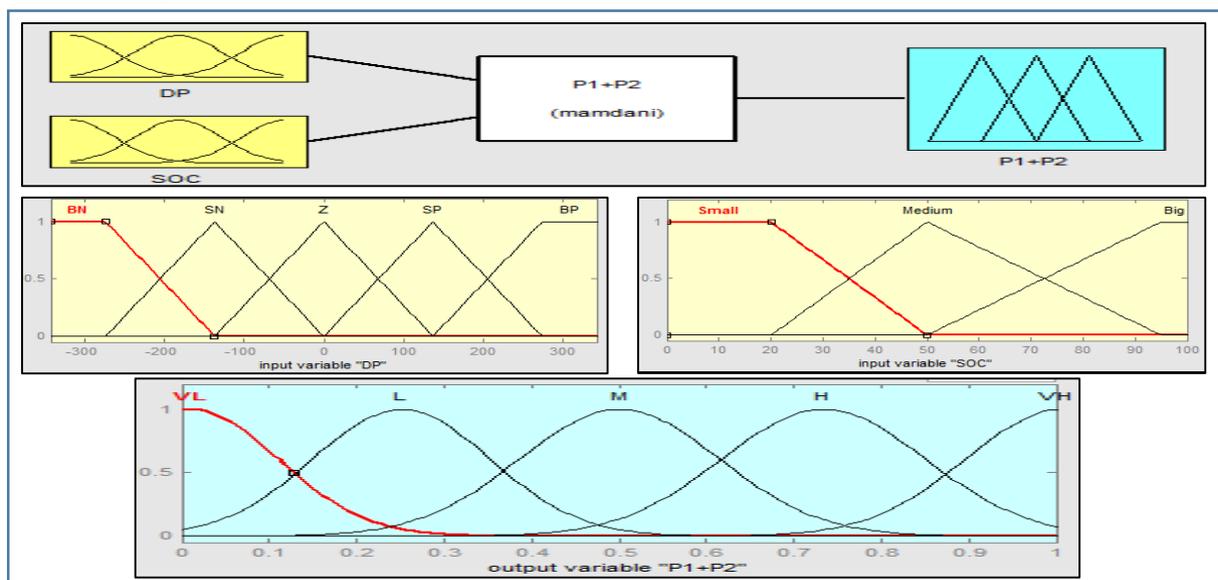


Figure(IV.1): Fonctions d'appartenances des entrées et de la sortie de la charge P1.

Tableau (IV.2) : Les règles du contrôleur logique flou (P1):

$\Delta P$ \ SOC	Small	Medium	Big
Big negative	VH	VH	H
Small negative	VH	VH	M
Zero	VH	H	M
Small positive	VH	M	L
Big positive	H	L	VL

➤ Charge P1+P2 :

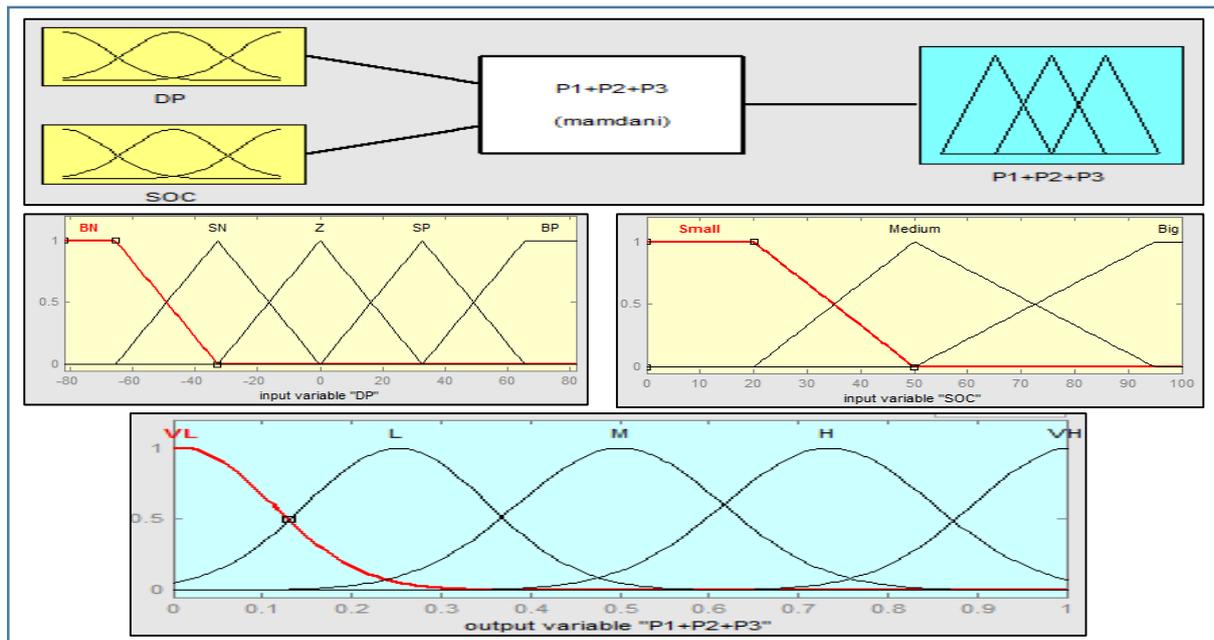


Figure(IV.2): Fonctions d'appartenances des entrées et de la sortie de la charge (P1+P2).

**Tableau (IV.3) :** Les règles du contrôleur logique flou (P1+P2) :

$\Delta P$ \ SOC	Small	Medium	Big
Big negative	VL	VL	M
Small negative	VL	L	M
Zero	VL	M	H
Small positive	VL	M	VH
Big positive	L	H	VH

➤ **Charge P1+P2+P3 :**



**Figure(IV.3):** Fonctions d'appartenances des entrées et de la sortie de la charge (P1+P2+P3).

**Tableau (IV.4) :** Les règles du contrôleur logique flou (P1+P2+P3):

$\Delta P$ \ SOC	Small	Medium	Big
Big negative	VL	VL	VL
Small negative	VL	VL	VL
Zero	VL	L	L
Small positive	VL	M	M
Big positive	L	M	VH

**IV.3.2. Simulation du système global avec le système de gestion intelligent**

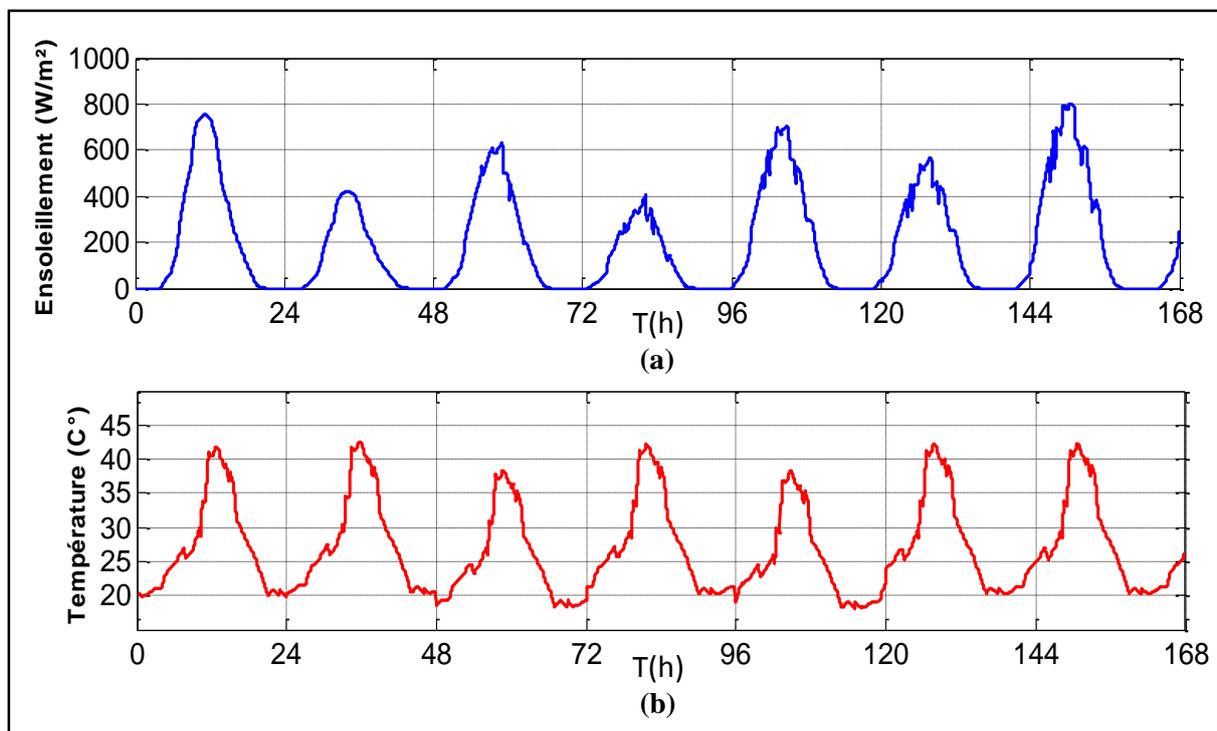
Dans le but d'évaluer le comportement du système de gestion intelligent appliqué au système photovoltaïque déjà étudié, nous avons soumis les modules photovoltaïques à diverses conditions d'irradiation et de température. Cela nous a permis de tester la plupart des modes opérationnels définis pour couvrir un large éventail de situations susceptibles d'être rencontrées.

Pour cette évaluation, nous avons utilisé une simulation dans l'environnement Simulink/Matlab en appliquant des profils de charge spécifiques :

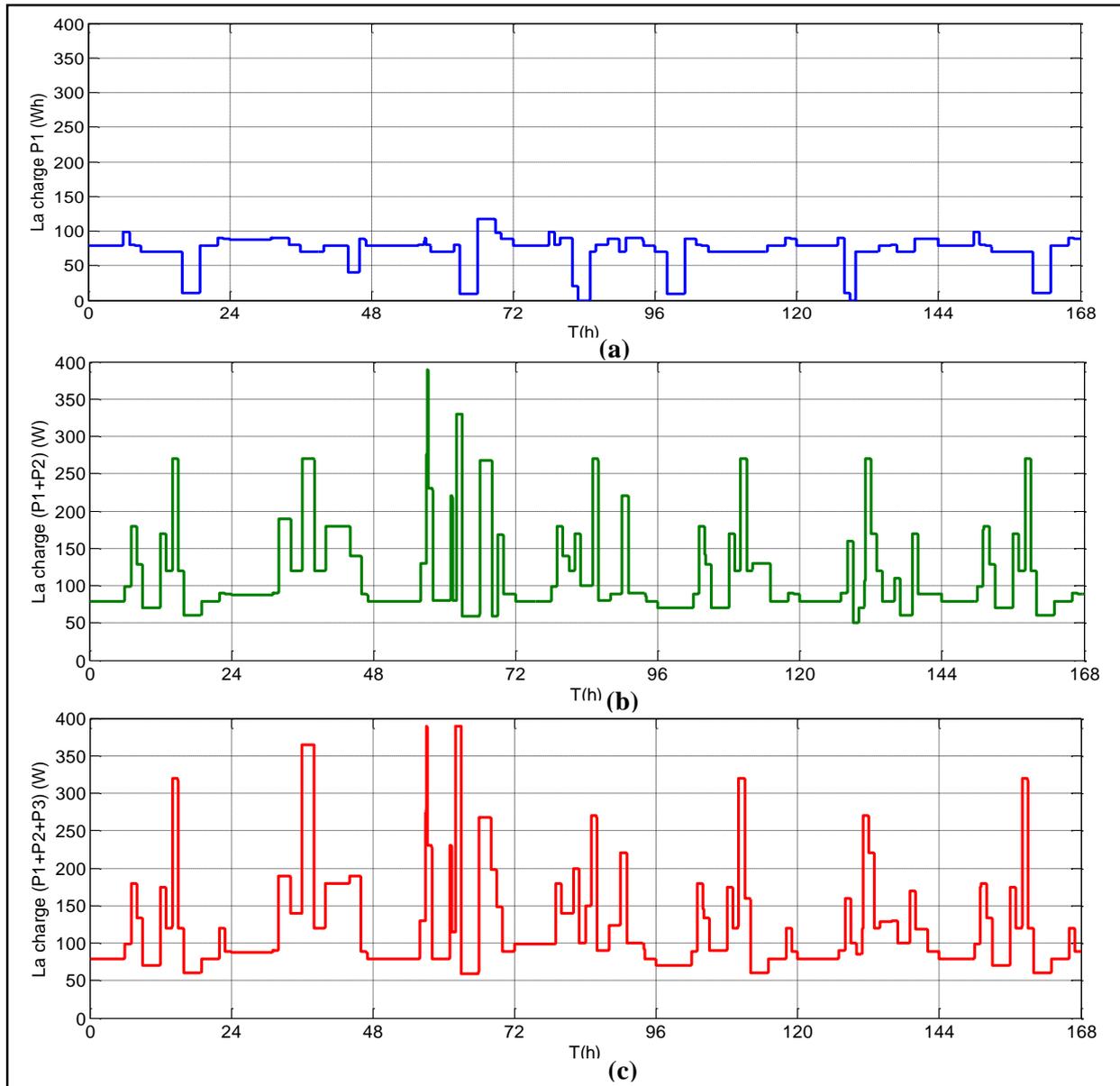
- Une charge maximale de 138W relative à une énergie de 1724 Wh pour la première priorité (P1).
- Une charge de 400W relative à une énergie de 850 Wh pour la deuxième priorité (P2).
- Une charge de 260W relative à une énergie de 300 Wh pour la troisième priorité (P3).

Les figures (IV.4), (IV.5) présentées illustrent les profils d'ensoleillement, de température et de charge électrique pour chaque niveau de priorité (P1, P1+P2, P1+P2+P3) pendant une durée de sept jours. Ces profils variables permettent d'analyser les performances du système dans des conditions réalistes.

En analysant ces données simulées, nous pourrions mieux comprendre comment adapter la gestion de l'énergie pour optimiser les performances globales du système et d'étudier l'impact des variations d'irradiation et de température sur l'efficacité énergétique du système photovoltaïque et sur l'état de charge des batteries. Par ailleurs, nous évaluerons l'influence des différents scénarios sur l'efficacité du système. Ces simulations nous permettront d'obtenir des résultats significatifs pour notre étude sur la gestion d'énergie photovoltaïque.



**Figure(IV.4):** Profil d'ensoleillement (a), et de température (b) pour une période de 7 jours.



**Figure(IV.5):** Allures des différents profils de charge, la charge ( $P_{ch1}=P1$ ) (a), la charge ( $P_{ch2}=P1+P2$ ) (b) et la charge ( $P_{ch3}=P1+P2+P3$ ) (c).

### IV.3.2.1. Résultats de simulation

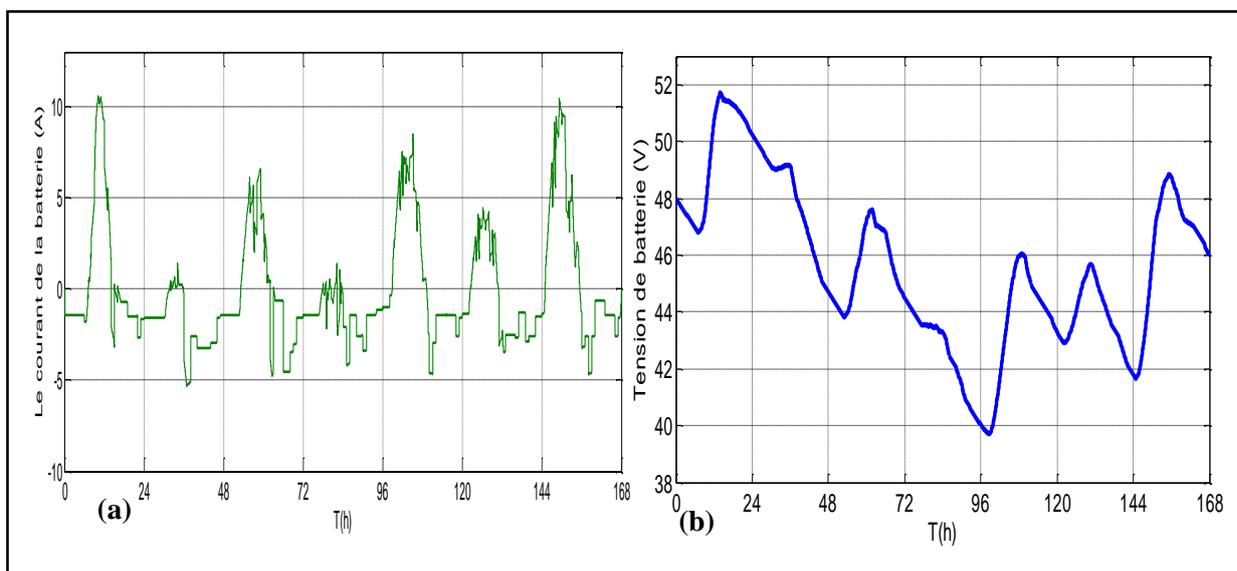
Les figures (IV.6 - 7 - 8 - 9) mettent en évidence les résultats de simulation réalisées sur les performances du système de gestion d'énergie intelligente basé sur la logique floue. Ces simulations ont été menées sur diverses périodes et dans différents scénarios d'ensoleillement, de température et de charge, sachant que ( $P_{ch1}=P1$  ;  $P_{ch2}=P1+P2$  ;  $P_{ch3}=P1+P2+P3$ ).

La figure (IV.6) illustre le courant (a) et la tension (b) des batteries, la figure (IV.7) montre l'évolution de l'état de charge des batteries pour une période de 7 jours. On peut observer que l'état de charge varie en fonction du temps et atteint un niveau minimal inférieure à 20% de [94h à 102h].

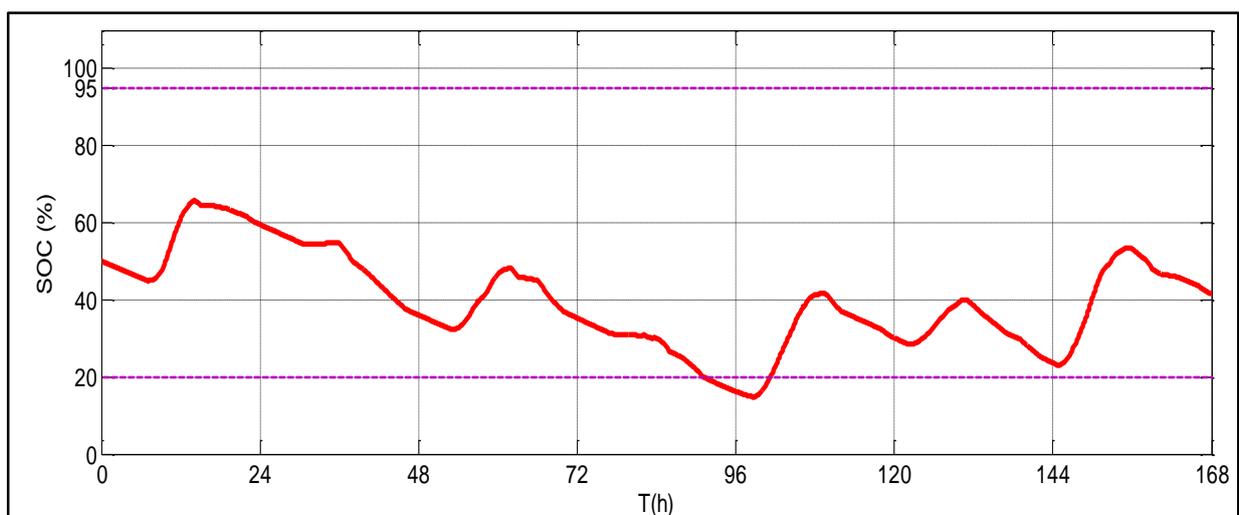
Les différentes puissances disponibles dans les batteries pour chaque puissance de charge ( $P_{ch1}$ ,  $P_{ch2}$ ,  $P_{ch3}$ ) sont représentées dans la figure (IV.8). On peut constater que les puissances disponibles varient au fil du temps en fonction des conditions de l'ensoleillement, de la température et de la charge à alimenter.

La figure (IV.9) regroupe les allures des différentes puissances photovoltaïques, de charge et des batteries.

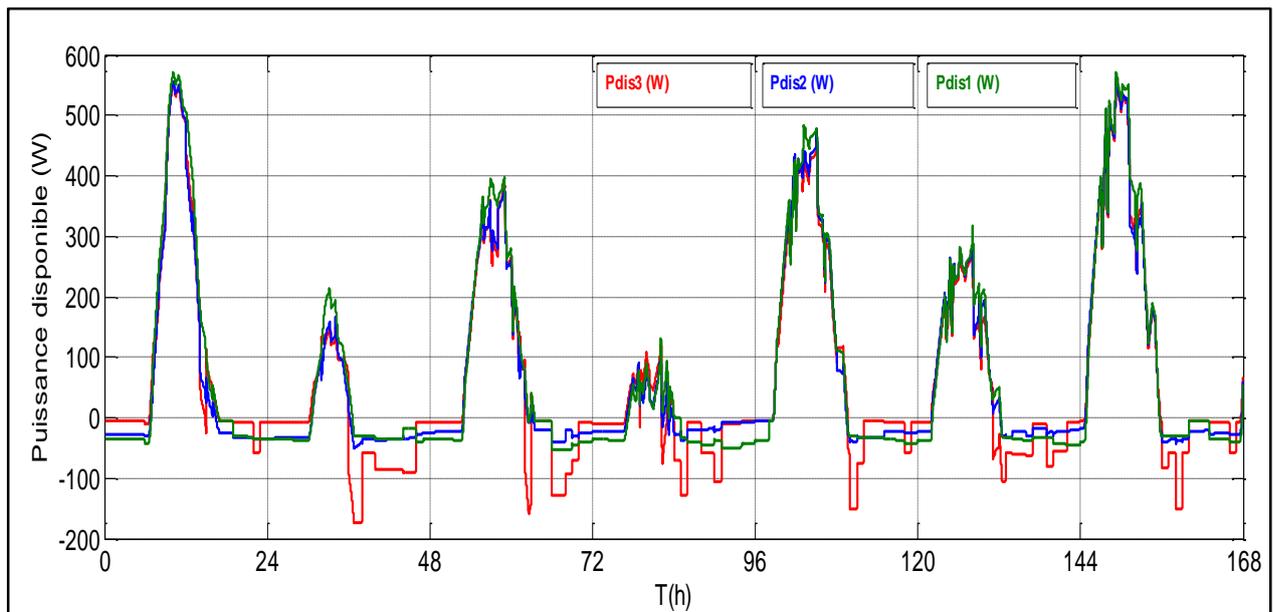
Ces résultats permettent d'évaluer les performances du système de gestion d'énergie intelligente dans différents scénarios d'ensoleillement, de température et de charge. Cela peut aider à optimiser et ajuster les paramètres du système pour une gestion efficace de l'énergie.



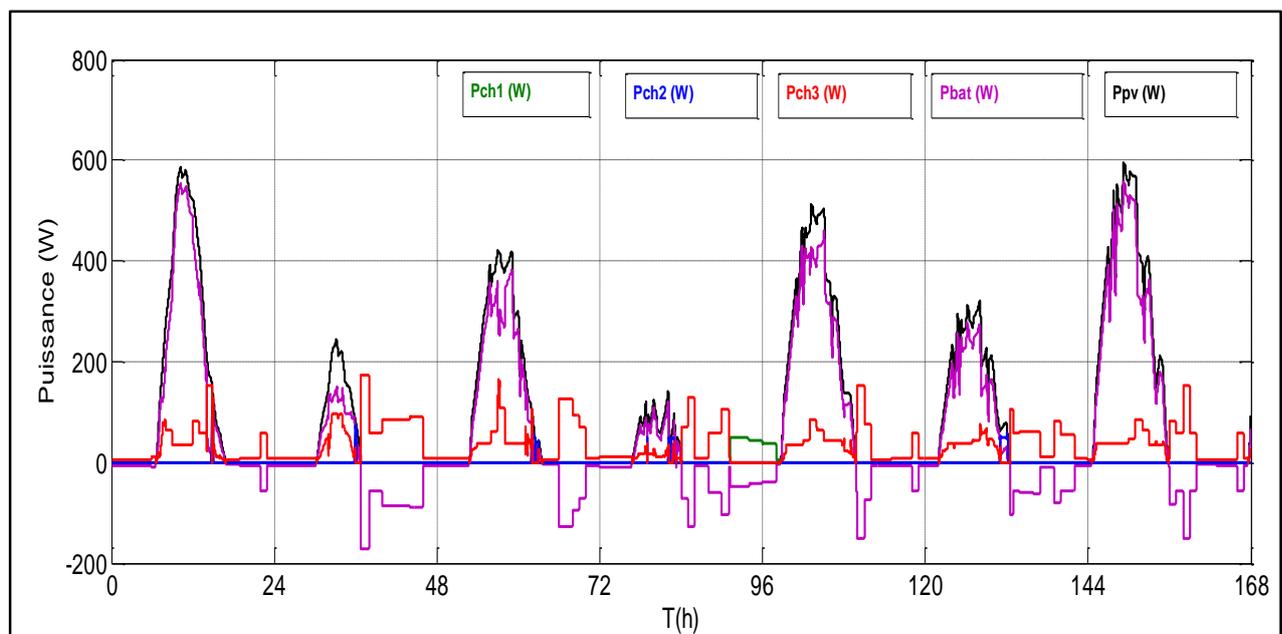
**Figure(IV.6):** Le courant (a) et la tension(b) de batterie.



**Figure(IV.7):** Etat de charge des batteries (SOC).



**Figure(IV.8) :** Puissances disponibles.



**Figure(IV.9) :** Allures des différentes puissances : PV, charges, batteries.

Chaque mode est caractérisé par une combinaison spécifique de conditions d'entrées, telles que l'état de charge des batteries (SOC), la puissance photovoltaïque disponible ( $P_{pv}$ ) et les besoins énergétiques des charges ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ).

En zoomant sur certaines parties spécifiques de la figure (IV.9), il est possible de visualiser clairement les différents modes opérationnels du système de gestion d'énergie basé sur la logique floue. En observant les variations des courbes de puissance et en les corrélant avec les

conditions d'entrées correspondantes définies dans le tableau des règles. Cette représentation graphique facilite la compréhension du comportement du système dans diverses situations et permet d'évaluer son efficacité.

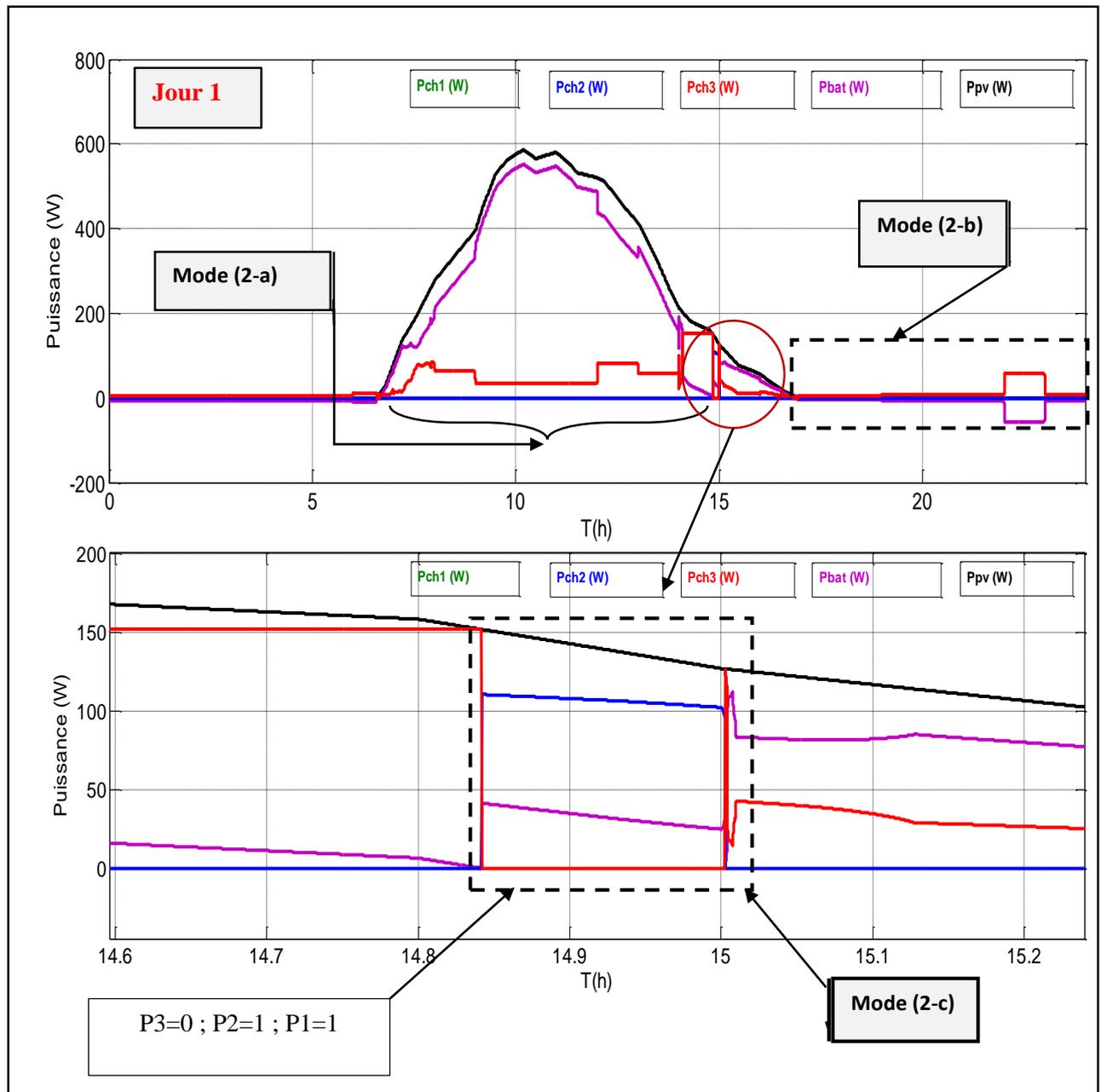


Figure (IV.10) : Zoom du jour1.

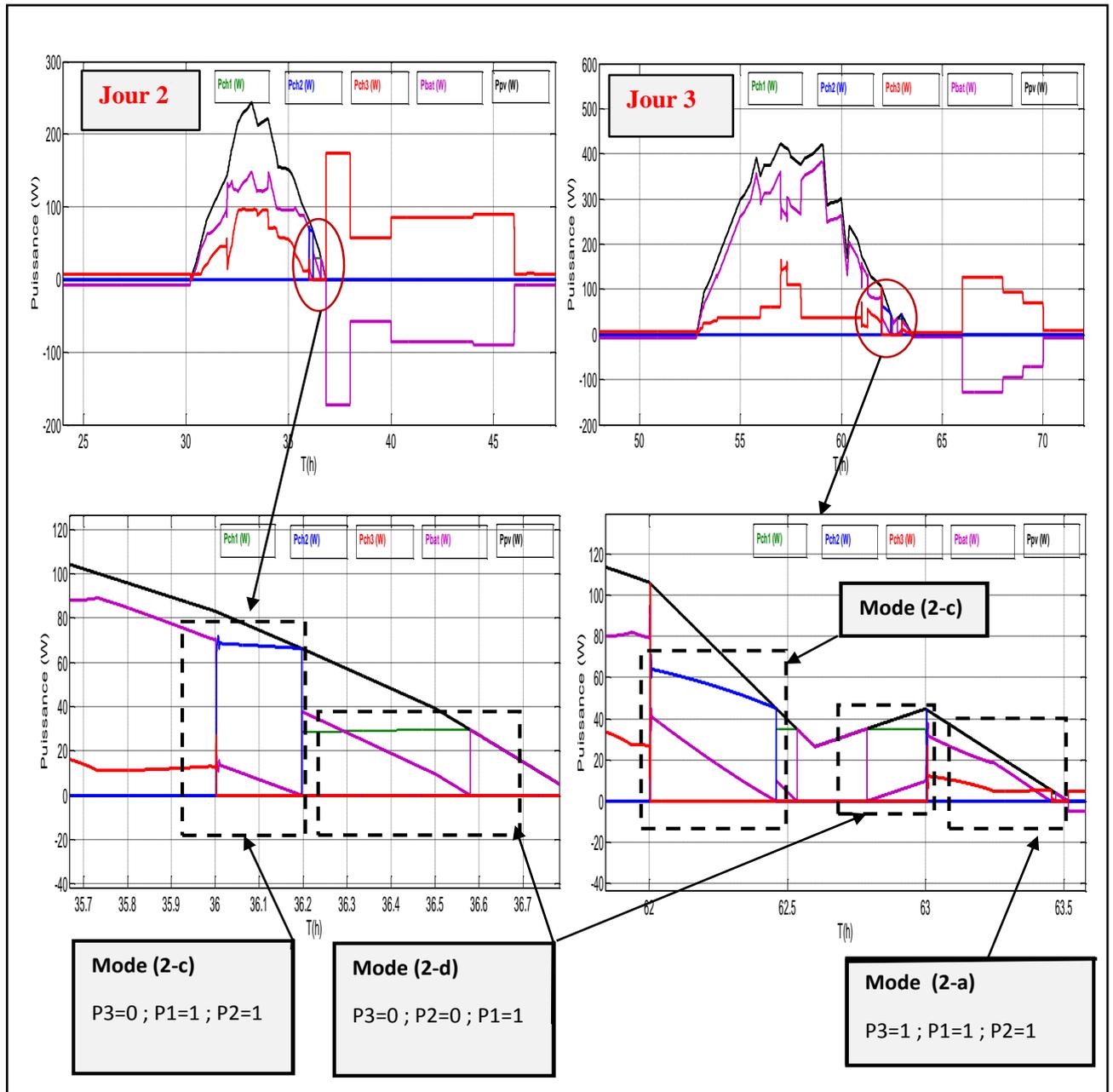


Figure (IV.11) : Zoom des jours 2 et 3.

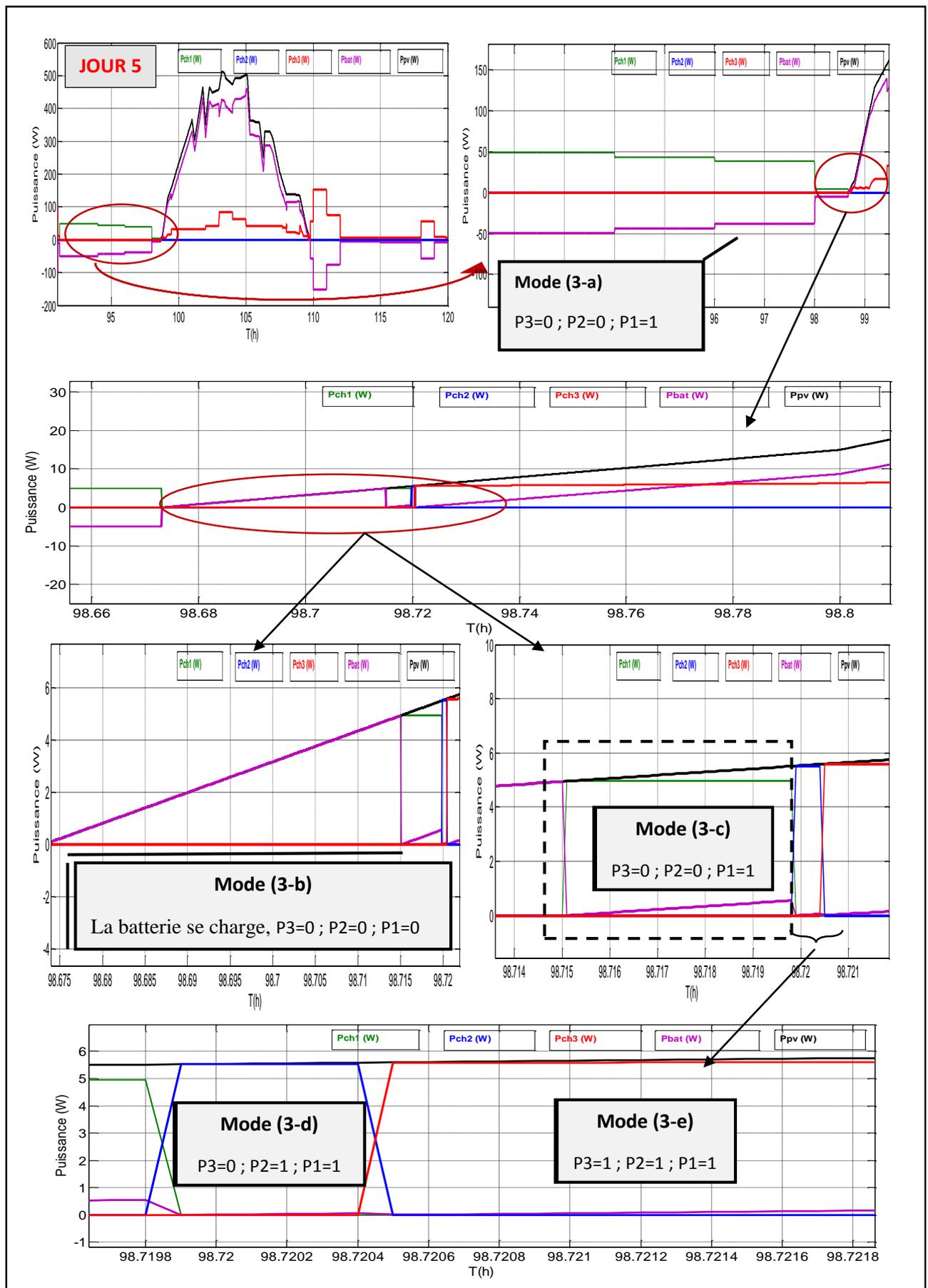


Figure (IV.12) : ZOOMS du jour 5.

### IV.3.2.2. Interprétation des résultats

Le système autonome piloté par logique floue propose une gestion avancée de l'énergie pour alimenter une maison en utilisant des entrées clés telles que l'ensoleillement, la puissance de charge et l'état de charge (SOC) des batteries. Cette approche permet de répondre efficacement aux variations des conditions météorologiques et aux besoins énergétiques en ajustant dynamiquement les paramètres du système.

À travers une simulation détaillée sur MATLAB Simulink, nous avons pu tester les deux modes (2 et 3), observer et évaluer les performances du système. Ces résultats illustrent comment la logique floue peut être adaptée pour optimiser l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables de manière intelligente et efficace.

❖ **Mode 2** : Les batteries sont maintenues avec un état de charge (SOC) compris entre 20% et 95%. Les différentes configurations de ce mode, illustrées dans les figures (IV.10) et (IV.11), sont présentées.

**Mode (2-a)** : Dans ce cas, le générateur photovoltaïque (PV) produit suffisamment d'énergie électrique, bénéficiant de conditions climatiques favorables. En conséquence, toutes les charges sont connectées et alimentées directement par l'énergie produite  $P_{pv} > P_1 + P_2 + P_3$ . L'excédent de production, soit le surplus d'énergie non consommée par les charges, est alors dirigé vers la charge des batteries.

**Mode (2-b)** : Se caractérise par une puissance du générateur photovoltaïque nulle ( $P_{pv} = 0$ ). Dans cette configuration, les batteries alimentent les charges selon un ordre prioritaire établi. L'alimentation des charges dépend de la puissance disponible dans les batteries ( $P_{bat}$ ) : si  $P_{bat}$  est supérieure à  $P_{ch1}$ , la première charge est alimentée ; si  $P_{bat}$  dépasse  $P_{ch2}$ , la deuxième charge est également alimentée ; et si  $P_{bat}$  excède  $P_{ch3}$ , la troisième charge sera aussi alimentée.

Dans notre cas, représenté dans la figure (IV.10), on observe que  $P_{ch3}$  est alimentée, indiquant que  $P_{bat}$  est suffisante pour couvrir cette charge. Cette stratégie de gestion optimise l'utilisation de l'énergie stockée dans les batteries en l'absence de production solaire, garantissant ainsi l'alimentation des charges les plus importantes en fonction de l'énergie disponible.

**Mode (2-c)** : La puissance produite par les panneaux photovoltaïques a diminué, entraînant la déconnexion de la charge P3, moins prioritaire. Cette situation illustre que la puissance

combinée de la batterie et des panneaux photovoltaïques est insuffisante pour alimenter toutes les charges. Conformément à l'ordre de priorité établi, seules les charges P1 et P2 restent alimentées  $P_{pv} > P1 + P2$ . L'excès de la puissance permet de charger la batterie.

**Mode (2-d) :** Ce mode est similaire au mode (2-c), mais avec une diminution plus importante de la puissance produite par les panneaux photovoltaïques. Dans ce cas, les charges P3 et P2 sont déconnectées du système, seule la charge P1, la plus prioritaire, reste alimentée  $P_{pv} > P1$ . Comme illustré dans les figures (IV.11), (IV.12).

❖ **Mode 3 :**  $SOC \leq 20\%$ , la figure (IV.12) présente les divers cas de ce mode, illustrant la gestion de l'énergie selon la production solaire et les besoins des charges, en considérant le faible niveau des batteries.

**Mode (3-a) :** Ce mode s'active lorsque la production solaire est nulle ( $P_{pv}=0$ ), et que la charge des batteries est faible ( $SOC \leq 20\%$ ). Il utilise le peu d'énergie restante pour alimenter uniquement la charge P1, assurant un éclairage minimal nocturne malgré les réserves d'énergie limitées. C'est une solution d'urgence pour éviter une coupure totale quand les ressources énergétiques sont au plus bas.

**Mode (3-b) :** S'active quand la production solaire est insuffisante pour alimenter la charge P1 ( $P_{pv} < P1$ ) et que les batteries sont faiblement chargées ( $SOC \leq 20\%$ ). Dans cette situation, le système priorise la recharge des batteries avec l'énergie solaire disponible comme montre la figure (IV.12).

Dans ce cas, P1 peut être alimentée par les batteries uniquement si cela ne risque pas de les vider complètement. Si ce n'est pas possible, aucune charge n'est alimentée pour préserver les batteries et maximiser leur recharge avec la faible production solaire.

**Mode (3-c) :** Dans cette situation,  $P_{pv} < P1 + P2$  et  $P_{pv} > P1$  donc seule la charge P1 est alimentée directement par l'énergie solaire. Le surplus d'énergie photovoltaïque, bien que faible, est utilisé pour recharger la batterie.

**Mode (3-d) :** Représente une évolution par rapport au mode (3-c), où la puissance photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) augmente suffisamment pour alimenter à la fois P1 et P2, mais reste inférieure à  $P1 + P2 + P3$ . Tout surplus éventuel est utilisé pour recharger les batteries.

**Mode (3-e) :** Dans ce mode, la puissance du panneau photovoltaïque est suffisante pour alimenter les 3 charges. L'excédent d'énergie produit par le panneau est utilisé pour charger les

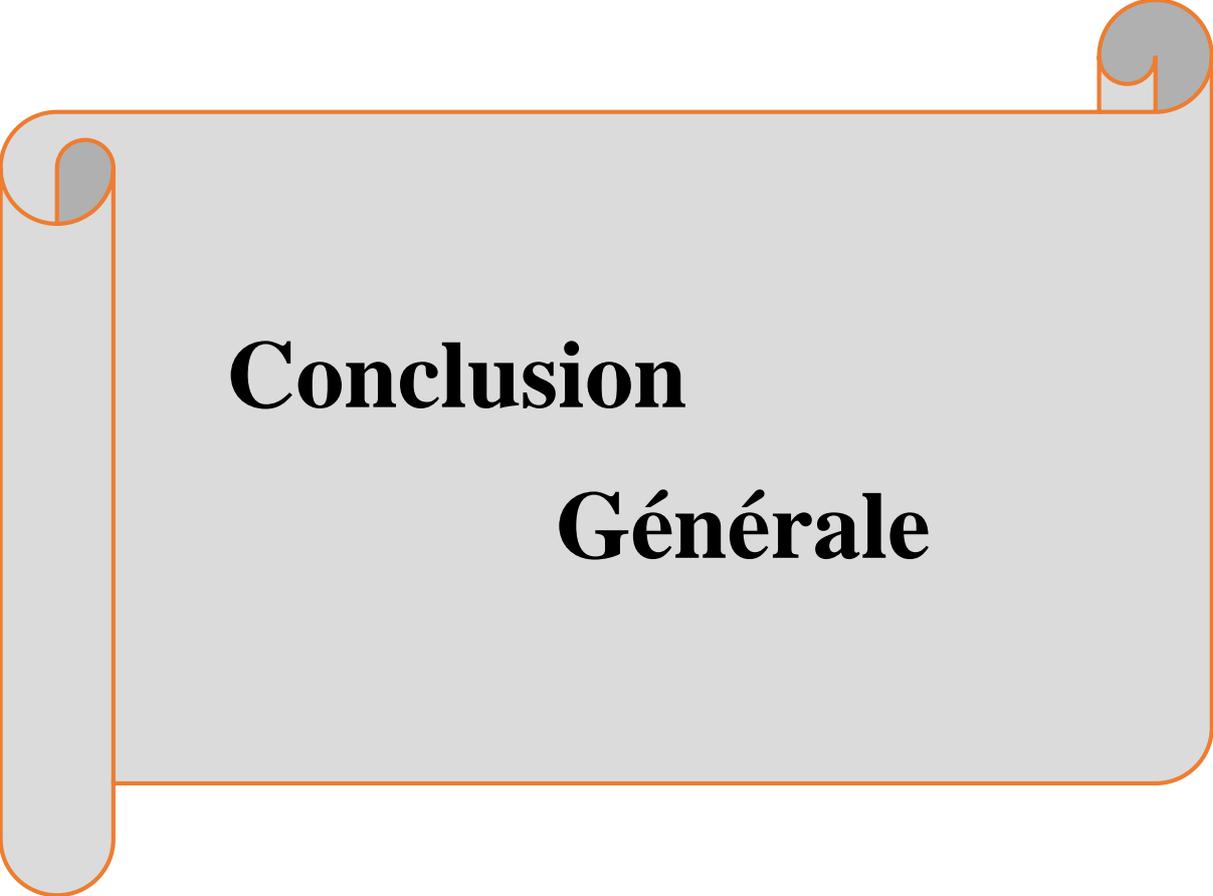
batteries, permettant ainsi d'augmenter leur niveau de charge tout en assurant l'alimentation de toutes les charges connectées. Cette gestion efficace de l'énergie optimise l'utilisation de la production photovoltaïque.

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé une méthode avancée de gestion énergétique basée sur la logique floue, visant à maximiser l'efficacité d'un système autonome (photovoltaïque - batteries), pour alimenter une maison isolée. L'avantage majeur par rapport à la gestion classique réside dans sa capacité à augmenter l'efficacité globale du système, en ajustant dynamiquement la production et la consommation d'énergie selon les besoins spécifiques et les conditions environnementales.

Les résultats obtenus ont confirmé la capacité du système à s'adapter aux variations du climat et aux exigences de charge des batteries, assurant ainsi une utilisation optimale des ressources renouvelables comme l'énergie solaire.

En conclusion, l'application de la logique floue dans ce contexte se révèle être non seulement efficace mais aussi adaptable, offrant une gestion énergétique intelligente qui favorise la durabilité et l'efficacité dans l'utilisation des ressources disponibles.



**Conclusion**

**Générale**

## **Conclusion générale**

Cette étude visait à optimiser les systèmes photovoltaïques autonomes pour un usage domestique. Notre étude, structurée en quatre chapitres, a couvert les aspects fondamentaux, la modélisation, le dimensionnement et la gestion de l'énergie. Cette approche nous a permis d'identifier les défis des systèmes photovoltaïques et de développer des solutions adaptées.

Le premier chapitre de notre étude a été consacré à une présentation générale des systèmes solaires photovoltaïques. Nous avons exploré les principes de base des cellules photovoltaïques, examiné les diverses technologies disponibles et étudié la structure des générateurs PV. Cette partie a aussi abordé les différentes méthodes de stockage d'énergie couramment utilisées.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur la modélisation des composants nécessaires à notre étude : panneau photovoltaïque, batterie et convertisseurs statiques. Pour optimiser le fonctionnement du système, nous avons implémenté une commande MPPT avec différents algorithmes : "Perturbation et observation" (P&O), Conductance Incrémentale (CI) et CI avancé basé sur la logique floue. Les simulations ont démontré que la commande MPPT à base de logique floue offre de meilleures performances en termes de rapidité, précision et capacité de poursuite par rapport aux algorithmes P&O et CI classiques. Cela permet d'optimiser l'extraction de la puissance maximale du système sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

Dans le troisième chapitre, nous avons dimensionné le système photovoltaïque, calculant le nombre des batteries à associer aux panneaux pour couvrir les besoins de la charge. Nous avons détaillé les étapes de ce dimensionnement. De plus, nous avons abordé un algorithme de gestion d'énergie classique qui vérifiait en permanence l'état de charge et de décharge des batteries dans différents modes. Cet algorithme a été testé avec une simulation sous l'environnement Simulink MATLAB. Les résultats obtenus ont démontré son efficacité dans certains modes de fonctionnement. Cependant, des limitations ont été observées, notamment la possibilité de tomber dans un état critique où les charges devaient être déconnectées. Face à ces contraintes, nous avons proposé dans le chapitre suivant un algorithme de gestion d'énergie amélioré, visant à optimiser les performances du système et à réduire les risques de déconnexion des charges.

Le dernier chapitre de cette étude a été consacré au développement d'une gestion d'énergie intelligente pour notre système photovoltaïque autonome. Nous avons dépassé les limites de la gestion classique en introduisant une approche basée sur la logique floue. Cette méthode

avancée a pris en compte différents profils de charge prioritaire, générant des règles de décision adaptatives à l'aide de tables de règles spécifiques. L'implémentation de ce système de gestion intelligent s'est avérée plus performante que l'approche classique, notamment sous l'influence variable de l'ensoleillement et des températures. Notre algorithme a démontré sa capacité à assurer une gestion optimale entre la production et la consommation d'énergie, tout en minimisant efficacement les risques d'états critiques d'alimentation. Les résultats obtenus ont mis en évidence une amélioration significative de la continuité de l'alimentation énergétique de la maison. Le système a réussi à éviter les situations de pénurie totale d'énergie, contribuant ainsi à une plus grande fiabilité et à une meilleure satisfaction des besoins énergétiques des utilisateurs.

En conclusion, cette approche intelligente ouvre de nouvelles perspectives pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques autonomes dans le contexte domestique. Elle offre non seulement une meilleure efficacité énergétique, mais aussi une plus grande adaptabilité aux conditions environnementales changeantes et aux habitudes de consommation variables des utilisateurs.

## **Bibliographie**

- [1] : M.Raddoui, «Étude et validation en temps réel d'une stratégie de contrôle innovante basée sur un système photovoltaïque pour le contrôle et la gestion d'un chargeur de voiturette électrique », Mémoire de master, Université de Montréal, 2022.
- [2] : G,R.Tapsoba, «Maximisation du transfert de l'énergie d'un champ photovoltaïque tenant compte du phénomène d'ombrage partiel : connexion réseau électrique», Mémoire de master, Université de Montréal, 2019.
- [3] : S.Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de magister, Université de Sétif, 2011.
- [4] : Site web, [<https://www.energy.gov>], Energy efficiency and renewable energy, Consulté le 21/02/2024.
- [5] : Site web [<https://www.planete-energies.com>], La cellule photovoltaïque, consulté le 23.02.2024.
- [6] : S.Lalouni, Energie solaire photovoltaïque, Cours destiné aux étudiants ER , 2015.
- [7] : M.Tansaout, S.Khemmar, « Modélisation et simulation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB », Mémoire de master, université de Tizi-ouzou, 2016.
- [8] : Site web, [<https://mypower.engie.fr>], Engue my power, le 23/02/2024.
- [9] : Site web, [<https://ekwateur.fr>], blog/autoconsommation/meilleur-panneau-solaire-2024, consulté le 18 /04/2024.
- [10] : N.Toumi,I.Kouda,« Energir solaire photovoltaïque et système photovoltaïque autonome » ,Mémoire de licence ,Université d'Annaba , 2021 .
- [11] : A. Labouret, M.Villoz, Energie solaire photovoltaïque, livre édition DUNOD, 3ème édition, 2006.
- [12] : Site web, [<https://dautrylimoges.scenaricommunity.org>], consulté le 05/03/2024.
- [13]: S.Moussane, S.Kiciri, « Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec stockage », Mémoire master, Université de Bejaia, 2014.

- [14] : L. Abbasen. « Etude de la connexion au réseau électrique d'une Centrale photovoltaïque », Mémoire de magistère, Université de Tizi-Ouzou ,2011.
- [15] : S.Bensmail, «Contribution à la modélisation et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques », Mémoire de magister, Université de Béjaia , 2012.
- [16] : Site web, [<https://www.futura-sciences.com>], Futura-sciences, electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12, consulté le 18/03/2024.
- [17] : Site web, [<https://www.solaire-offgrid.com>], Devenir-autonome-en-electricite-grace-au-solaire-photovoltaïque/, Consulté le 27/02/2024.
- [18] : H.Belhaoua,Y.Djeddou, « Commande et gestion d'énergie dans un système photovoltaïque en mode isolé et connecté au réseau électrique », Mémoire master , Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2021.
- [19] : M.Ghebbache, « Stratégies de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie", Mémoire master, Université de Québec, ,2019.
- [20] : Y.Belkhir, K. Babahamed, « Etude et faisabilité d'une installation photovoltaïque pour une mosquée », Mémoire master, Université de Bejaia, 2020.
- [21] : Site web, [<https://www.tucoenergie.fr>], guides/durée-de-vie-batterie-solaire, consulté le 18 /04/2024.
- [22] : J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy, « Le pompage photovoltaïque: manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF », Université d'Ottawa, 1998.
- [23] : Site web, [<https://www.jycbattery.com/fr>], consulté le 18 /04/2024.
- [24] : H.Essakhi, S. Farhat , « Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque », Conférence JIME, Université Agadir, 3-5 mai 2019.
- [25] : M. Saad Saoud, « Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole », Thèse Doctorat, Université Annaba, 2017.

- [26] : M.Zidane,A. Cheurfa, « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque »,Mémoire master , Université Bejaia, 2020.
- [27] : A,T.Singo, «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse Doctorat, Université Nancy-I, 2010.
- [28] : K.Hamoudi, M.Nasri , «Techniques MPPT pour système photovoltaïque sous des conditions », Mémoire master ,Université Bejaia, 2022.
- [29] : A.Chergui,N.TALBI ; « Intégration de l'énergie solaire dans la gestion énergétique optimisée pour un bâtiment »,Memoir master,Univrsité de Bejaia,2020.
- [30] : T.Mechehat, M.Assal, « Contribution à la gestion d'énergie d'un système renouvelable : Panneau photovoltaïque / batterie», Mémoire master,Univrsité de Ouargla,2023.
- [31] : H.Deboucha , S. Lalouni Belaid , « Improved incremental conductance maximum power point tracking algorithm using fuzzy logic controller for photovoltaic system» ,Conference Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Vol. 62, 4, pp.381–387, Bucarest, 2017.

# Optimisation et gestion énergétique dans une installation photovoltaïque avec stockage

## RÉSUMÉ

Ce projet examine l'amélioration des performances des systèmes photovoltaïques en se concentrant sur deux aspects essentiels : l'extraction de la puissance maximale des panneaux solaires et l'optimisation de l'utilisation de l'énergie produite. L'étude analyse d'abord différents algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) tels que P&O, CI et CI avancé, modélisés et simulés sous Matlab/Simulink. L'objectif est de déterminer la méthode permettant la meilleure extraction de puissance dans diverses conditions d'ensoleillement et de température en considérant la rapidité de convergence et la stabilité en régime transitoire. Ensuite, le travail se concentre sur l'optimisation de l'énergie extraite passant d'un algorithme classique à une approche intelligente par la logique floue. Celui-ci adapte l'utilisation de l'énergie aux besoins d'une habitation, considérant divers profils de consommation et données météorologiques. Une simulation du système complet sous Matlab/Simulink évalue l'efficacité globale en termes de production et d'utilisation optimale de l'énergie solaire.

**Mots-clés:** Système photovoltaïque, Profils de consommation, Gestion de l'énergie, Logique floue FLC, Matlab/Simulink,

---

# Optimization and Energy Management in a Photovoltaic Installation with Storage

## ABSTRACT

This project examines the improvement of the performance of photovoltaic systems by focusing on two essential aspects: extracting the maximum power from solar panels and optimizing the use of the energy produced. The study first analyzes different maximum power point tracking (MPPT) algorithms such as P&O, CI and advanced CI, modeled and simulated in Matlab/Simulink. The objective is to determine the method allowing the best power extraction in various solar and temperature conditions by determining the convergence speed and the stability in transient conditions. Then, the work focuses on the optimization of the extracted energy moving from a classic algorithm to an intelligent fuzzy logic approach. This adapts energy use to the needs of a home, defining various consumption profiles and weather data. A simulation of the complete system in Matlab/Simulink evaluates the overall efficiency in terms of production and optimal use of solar energy.

**Keywords:** Photovoltaic system, Consumption profiles, Energy management, FLC fuzzy logic, Matlab/Simulink,