

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

# MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :  
**Énergies Renouvelables**  
*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

**Intitulé :**

---

## MODELISATION ET SIMULATION STOCKAGE D'ENERGIE PAR DES BATTERIES DANS UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE SOUS L'ENVIRONNEMENT MATLAB / SIMULINK

---

**Présenté par :**

- ELHADI MANAL.
- SAIDI HOUARIA.
- BENSLAMA MOHAMMAD.

*Soutenu le :     / 09     /2022 devant le Jury :*

<i>M. BENMHAMED.F</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. TAIBI IBRAHIM</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examinateur</i>
<i>M. TOUM.K</i>	<i>MAB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciement

*Tous d'abord nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la volonté et la santé nécessaire pour terminer ce modeste travail.*

*Honneur à celui qui fut à l'origine de ce mémoire, on parle évidemment de notre encadreur, monsieur TOUMI Maître de Conférences à Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naama. Sans lui, sans la confiance qui nous a accordé, sans ses conseils, rien, absolument rien de cette extraordinaire aventure n'aurait existé.*

*La collaboration de l'ensemble des enseignants ayant assuré notre formation qu'ils soient vivement remerciés. C'est eux qui nous ont guidé nos premiers pas vers ce monde merveilleux de l'Électrotechnique.*

## **DEDICACES**

**Je dédie ce modeste travail**

**A mon très cher père**

**Tu as toujours été a mes cotés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.**

**A ma très chère mère**

**Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre ,ta bienveillance me guide et ta présence a mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.**

**A mes chers frères**

**Aux chers amis**

**A tous les enseignants au département électrotechnique.**

**A ma promotion de Master électrotechnique 2022.**

**Elhadi Manal**

## **DEDICACES**

**Je dédie ce modeste travail**

**A mon très cher père**

**Tu as toujours été a mes cotés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.**

**A ma très chère mère**

**Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre ,ta bienveillance me guide et ta présence a mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.**

**A mes chères sœurs**

**A mon cher frère**

**A mon marie Addadi brahim**

**Aux chers amis**

**A tous les enseignants au département électrotechnique.**

**A ma promotion de Master électrotechnique 2022.**

**Saidi Houaria**

A decorative border with intricate floral and scrollwork patterns in black and white, framing the central text.

## *DEDICACES*

*Dieu soit loué, qui nous a aidés à terminer ce travail. Quant à ce qui suit, nous dédions ce travail à nos parents et à tous ceux qui ont été la raison de terminer ce travail depuis l'école primaire jusqu'à aujourd'hui, et à chaque apprenant qui a bénéficié de ses connaissances notre chère patrie.*

*Benslama Mohammad*

**Chapitre I**

Tableau I.1. Comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique.....22

Tableau I.2 Comparaison des caractéristiques techniques des batteries.....27

**Chapitre IV**

Tableau IV.1 Caractéristiques du système PV étudié..... 64

**Chapitre I**

Figure I.1 Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné. ....	5
Figure I.2 l'effet photovoltaïque. ....	6
Figure I.3.Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.4.Principe de fonctionnement de panneau solaire. ....	7
Figure I.5.Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire. ....	9
Figure I.6.Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque. ....	11
Figure I.7. La caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairage.....	13
Figure I.8.Les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	14
Figure I.9.Structure d'un module photovoltaïque.....	15
Figure I.10.Stockage par volant d'inertie. ....	17
Figure I.11.Principe de stockage gravitaire hydraulique.....	18
Figure I.12. Stockage à air comprimé en caverne. ....	19
Figure I.13. Système de stockage thermique.....	20
Figure I.14.Principe de fonctionnement d'une cellule.....	21
Figure I.15. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible .....	22
Figure I.16. Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb/acide. ....	25

**Chapitre II**

Figure II.1 état de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de l'électrolyte.	32
Figure II.2 Modèle idéal d'une batterie.....	35
Figure II.3 Modèle simplifié de la batterie.....	36
Figure II.4 Modèle R-C de la batterie. ....	37
Figure II.5 Modèle de traction.....	38
Figure II.6 Modèle de Thévenin.....	38



## Liste des figures

---

Figure II.7 Modèle modifié de Thévenin. ....	39
Figure II.8 Modèle dynamique linéaire de Thévenin. ....	40
Figure II.9 Modèle dynamique non linéaire de Thévenin. ....	41
Figure II.10 Modèle dynamique du 4 <sup>ème</sup> ordre. ....	41

### **Chapitre III**

Figure III.1 Schéma électrique équivalent d'une batterie de n éléments. ....	43
Figure III.2 Influence de la température sur la capacité en fonction de courant pour différents températures. ....	47
Figure III.3 Influence de la température sur l'état de charge en fonction de capacité de la batterie pour différents températures. ....	48
Figure III.4 Influence de la température sur l'état de décharge en fonction de capacité de la batterie pour différents températures. ....	48
Figure III.5 Influence de la température sur la tension de charge en fonction de courant pour différents températures. ....	49
Figure III.6 Influence de la température sur la tension de décharge en fonction de courant pour différents températures. ....	49
Figure III.7 Résistance de la batterie en charge. ....	50
Figure III.8 Résistance de batterie en décharge. ....	50

### **Chapitre IV**

Figure IV.1 Schéma équivalent du générateur photovoltaïque. ....	52
Figure IV.2 Schéma bloc du GPV. ....	55
Figure IV.3 Caractéristique courant –tension du générateur photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ . ....	55
Figure IV.4 Caractéristique puissance –tension du générateur photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$ . ....	56
Figure IV.5 Caractéristique puissance tension du générateur pour différents niveaux d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000\text{W/m}^2$ ) et $T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$ . ....	56
Figure IV.6 Caractéristique courant tension du générateur pour différents niveaux d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000\text{W/m}^2$ ) et $T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$ . ....	57

## Liste des figures

---

Figure IV.7 Caractéristique courant tension du panneau PV pour une variation de température ( $T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et $G = 1000\text{W/m}^2$ .....	57
Figure IV.8 Caractéristique puissance tension du panneau PV pour une variation de température ( $T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et $G = 1000\text{W/m}^2$ .....	58
Figure IV.9 Synoptique du système étudié.....	59
Figure IV.10 Hacheur boost.....	60
Figure IV.11 Diagramme de l'algorithme P&O.....	61
Figure IV.12 Principe de gestion de l'énergie par le module de supervision.....	62
Figure IV.13 Puissance des panneaux PV en fonction du temps.....	64
Figure IV.14 Courant des panneaux PV en fonction du temps.....	65
Figure IV.15 Tension des panneaux PV en fonction du temps.....	65
Figure IV.16 Tension de charge en fonction du temps.....	66
Figure IV.17 Puissance des panneaux PV et charge en fonction du temps.....	66
Figure IV.18 Courant des batteries en fonction du temps.....	67

## Liste des symboles

---

PV : photovoltaïques.

$V_{mpp}$  : Tension au point de Puissance maximale (V).

$I_{mpp}$  : Courant au point de Puissance maximale (A).

$P_{mpp}$  : puissance du point maximale (W).

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

$I_{sc}$  : Courant de court-circuit (A).

$A_c$  : air de la cellule.

FF : facteur de forme.

NOCT : Température de fonctionnement nominal des cellules (Nominal operating cell temperature).

STC : conditions du fonctionnement normal.

$n_s$  : Nombre de module en série.

$n_p$  : Nombre de module en parallèle.

$\eta_f$  : rendement faradique de la batterie.

$\eta_e$  : rendement énergétique de la batterie.

$C_n$  : capacité nominale ou évaluée de la batterie.

$I_{bat}$  : courant de la batterie(A).

EDC : état de charge de la batterie.

EDD : Etat de décharge.

$V_{co}$  : tension en circuit ouvert de la batterie (V).

$U_{bat}$  : tension aux bornes de la batterie. (V).

$n_b$  : nombre de cellule de la batterie.

$E_b$  : La force électromotrice.

$R_i$  : La résistance interne d'une cellule de la batterie.

## Liste des symboles

---

$C_{10}$  : c'est la capacité de la batterie déchargée en 10 heures.

$I_{10}$  : le courant de décharge en 10 heures.

$\Delta T$  : l'échauffement de la batterie.

$Z_{bat}$  : L'impédance complexe de la batterie ( $\Omega$ ).

$R_{bat}$  : Partie réelle de l'impédance ( $\Omega$ ).

$X_{bat}$  : Partie imaginaire de l'impédance

( $\Omega$ ).  $I_{pv}$  : courant du module.

$I_{ph}$  : photo courant.

$I_D$  : courant de la diode.

$I_{Rp}$  : courant de la résistance shunt.

$\Delta T_c$  : variation de la température.

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

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

$\alpha_{sc}$  : Coefficient d'incrémentatation du courant  $I_{sc}$  ( $mA/^\circ C$ ).

$\beta_{oc}$  : Coefficient d'incrémentatation de la tension  $V_{oc}$  ( $mV/^\circ C$ ).

$G$  : niveau d'insolation dans des conditions quelconques.

$T_c$  : température dans des conditions quelconques.

$G_{stc}$  : niveau d'insolation dans les conditions STC.

$T_{stc}$  : température dans les conditions STC.

$V_{out}$  : Tension de sortie dans le convertisseur élévateur (V).

$V_{in}$  : Tension d'entre dans le convertisseur élévateur (V).

$\alpha$  : rapport cyclique du hacheur.

MPPT: Recherche de point de puissance maximale (Maximum Power Point Traker).

$P_{ch}$  : puissance de la charge (W).

$V_{ch}$  : tension de la charge (V).

$P_{pv,tot}$  : puissance totale des panneaux PV [W].

$B_j$  : les besoins énergétiques journaliers [Wh].

$E_s$  : rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable :  $E_s$  [kWh/m<sup>2</sup>/j].

$C_p$  : coefficient de perte.

$N_{pv}$  : nombre de panneaux PV.

## Liste des symboles

---

$P_{pv,uni}$  : puissance d'un panneau PV.

$C_{batt}$  : la capacité nominale des batteries [Ah].

Aut : le nombre de jour d'autonomie.

$U_{batt}$  : la tension nominale des batteries [V].

$P_{DD}$  la profondeur de décharge des batteries.

$\eta_b$  : rendement de la batterie.

# Sommaire

---

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Liste des symboles

Introduction générale.....1

## Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque et stockages

I.1 Introduction.....	3
I.2 L'énergie solaire.....	3
I.3 Le rayonnement solaire.....	4
I.4 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire .....	4
I.4.1 Le rayonnement direct.....	4
I.4.2 Le rayonnement diffus.....	4
I.4.3 Le rayonnement réfléchi.....	4
I.4.4 Le rayonnement global.....	5
I.5 L'effet photovoltaïque.....	5
I.6 La cellule photovoltaïque.....	6
I.7 Principe de fonctionnement.....	7
I.8 Les Différents types des cellules solaires.....	7
I.8.1 Les cellules monocristallines.....	8
I.8.2 Cellules poly cristallines.....	8
I.8.3 Cellules amorphes.....	8
I.9 Circuit équivalent et modèle mathématique.....	9
I.10 Générateur photovoltaïque.....	10
I.11 Paramètre photovoltaïque.....	11
I.11.1 Courant de court-circuit ICC.....	11
I.11.2 Tension en circuit ouvert $V_{co}$ .....	12
I.11.3 Point de puissance maximale $P_m$ .....	12
I.11.4 Facteur de forme FF.....	12
I.11.5 Rendement énergétique $\eta$ .....	12
I.12 Les zones de caractéristiques $i(v)$ d'un générateur photovoltaïque.....	12
I.13 Module photovoltaïque.....	14
I.14 Systèmes de stockage.....	15

## Sommaire

---

I.14.1	Techniques de stockage à court terme.....	16
I.14.1.1	Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES Superconductor Magnetic Energy Storage).....	16
I.14.1.2	Stockage par Condensateurs à double couche: super condensateurs.....	16
I.14.1.3	Stockage sous forme d'énergie cinétique: volant d'inertie (Fly Wheel).....	17
I.14.2	Techniques de stockage à long terme.....	18
I.14.2.1	Stockage sous forme gravitaire.....	18
I.14.2.2	Stockage sous forme d'air comprimé (pression).....	18
I.14.2.3	Stockage sous forme thermique.....	19
I.14.2.4	Stockage sous forme chimique.....	20
I.14.3	Comparaison entre les modes de stockage présentés.....	22
I.15	Principe du fonctionnement des Batteries.....	23
I.15.1	Les différents types de Batteries.....	24
I.16	La Batterie au plomb.....	27
I.16.1	Historique.....	27
I.16.2	Paramètres de la batterie au plomb.....	28
I.16.3	Les comportements de la batterie.....	28
I.17	Conclusion.....	28

## Chapitre II : Caractéristiques et modèles de la batterie de stockage

II.1	Introduction.....	29
II.2	Grandeurs caractéristiques des Batteries.....	29
II.2.1	Capacité de stockage.....	29
II.2.2	Rendement.....	29
II.2.3	Tension à vide.....	30
II.2.4	Durée de vie.....	30
II.2.5	Profondeur de décharge.....	30
II.2.6	Auto décharge.....	30
II.2.7	L'état de charge.....	31
II.3	Différentes méthodes pour estimer l'état de charge d'une batterie.....	31
II.3.1	Méthode de la mesure de la densité de l'électrolyte.....	31
II.3.2	Méthode par intégration du courant (coulométrie).....	33
II.3.3	Méthode de la mesure de tension en circuit ouvert.....	33
II.3.4	Méthode utilisant la mesure d'impédance.....	34
II.3.5	Méthode adaptative.....	35

## Sommaire

---

II.4 Modèles électriques de la Batterie.....	35
II.4.1 Le modèle idéal.....	35
II.4.2 Modèle simplifié de la batterie.....	35
II.4.3 Modèle R-C de la batterie.....	37
II.4.4 Modèle de traction.....	37
II.4.5 Modèle de Thévenin.....	38
II.4.6 Modèle modifié de Thévenin.....	39
II.4.7 Modèle dynamique linéaire de Thévenin.....	40
II.4.8 Modèle dynamique non linéaire de Thévenin.....	40
II.4.9 Modèle dynamique du 4 <sup>ème</sup> ordre.....	41
II. 4.10 Modèle de CIEMAT.....	42
II.5 Conclusion.....	42

### **Chapitre III: Simulation De Modèle De CIEMAT De La Batterie**

III.1 Introduction .....	43
III.2 Le Modèle CIEMAT.....	43
III.3 Equation De Modèle CIEMAT.....	44
III.3.1 La Capacité.....	44
III.3.2 L'état de charge.....	44
III.3.3 Tension de batterie en régime de décharge.....	45
III.3.4 Tension de batterie en régime de charge.....	45
III.3.5 Résistance de la batterie.....	46
III.3.6 Rendement de charge et de décharge.....	46
III.4 Résultat de simulation.....	46
III.5 Conclusion.....	51

### **Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage.**

IV.1 Introduction.....	52
IV.2 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque.....	52
IV. 3 Simulation du modèle de générateur PV.....	54
IV. 3.1 Simulation dans les conditions STC.....	54



## Sommaire

---

IV. 3.2 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque.....	56
IV. 4 Présentation du système étudié.....	58
IV.4.1 Le convertisseur d'énergie (DC/DC).....	59
IV.4.2 Recherche du point de puissance maximale.....	60
IV. 4.3 Le module de supervision.....	61
IV.5 Dimensionnement du système PV.....	62
IV. 6 Résultats de simulation.....	64
IV.6.1 Simulation dans les conditions STC.....	64
IV.7 Conclusion.....	67
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>68</b>
<b>Annexes</b>	
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Résumé</b>	

# *Introduction générale*

## Introduction

---

L'énergie est un besoin primordial pour l'humanité, et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz et charbon), la science s'est tournée vers l'énergie dite renouvelable et la source la plus importante de ces énergies renouvelables reste le soleil, grâce notamment à l'énergie photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïque.

En fin de vie le panneau photovoltaïque aura produit 19 à 38 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage .Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module ou capteur solaire photovoltaïque et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire.

L'électricité est consommée ou stockée sur place ,ou transportée par le réseau de distribution et de transport électrique .

Les générateurs photovoltaïques, sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité d'énergie de façon continue. Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût sont les raisons principales de l'utilisation de ces batteries. [12]

Pour cela nous intéressons, dans le cadre de ce travail, à l'étude d'un système photovoltaïque avec des batteries de stockage.

Le présent travail est subdivisé en 4 chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons découvert les rayonnements solaires et la cellule photovoltaïque avec les différents types des cellules solaires. Après cela, les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque et paramètre/module photovoltaïque. Enfin, on présente le système de stockage.

Le deuxième chapitre, sera consacré à les grandeurs caractéristiques des batteries, les différentes méthodes pour estimer l'état de charge d'une batterie et les modèles électriques de la batterie.

Le troisième chapitre, nous avons choisi le modèle CIMAT, les résultats de simulation obtenus avec MATLAB/SIMULINK sont ensuite présentés. Enfin, dans le présent chapitre, nous avons déterminé l'état de charge de la tension en charge et en décharge en plus de la résistance interne.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude, le dimensionnement et la simulation d'un système photovoltaïque, fonctionnant en commande MPPT, et qui assure le stockage au moyen de batteries afin de répondre à l'exigence de puissance demandée par la charge.

## Introduction

---

Finalemment, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

*Chapitre I :*  
*Généralité sur les*  
*systèmes photovoltaïques*  
*et stockages*

## I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette transformation, qui est réalisé par le biais d'une cellule photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite.

Il y a nécessité de stockage électrique chaque fois que la demande électrique est décalée dans le temps par rapport à l'apport solaire. Pour ce faire il existe plusieurs méthodes de stockage: sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur. [1]

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques est généralement assuré par des batteries et cela pour ses différents avantages.

La batterie est le principal élément dans un système photovoltaïque, par où transite l'énergie électrique fournie par le générateur. [2]

## I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire repose sur l'exploitation directe de la lumière solaire. Le fait que le soleil soit la principale source de production d'énergie peut être définie comme une masse très lourde, 333 000 fois plus lourde que la Terre. Elle contient également la plus grande proportion d'hydrogène, environ 70%, d'hélium. De 27% et le reste de 3% (lithium, carbone, azote, oxygène ...).

L'énergie solaire est l'une des énergies les plus renouvelables que l'homme puisse exploiter. C'est une énergie propre qui ne laisse aucun résidu négatif et qui est permanente et continue tant que le soleil existe. À l'heure actuelle, la recherche et les expériences ont pour but d'utiliser l'énergie solaire et de la convertir en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques [3], qui auront un moderne et détaillé plus tard, L'énergie solaire est largement utilisée en la convertissant en énergie électrique et en énergie thermique par conversion photovoltaïque et conversion thermique de l'énergie solaire [4].

### I.3 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 $\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain (3 $\mu\text{m}$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise.

Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct.

L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 340  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre atmosphère, environ 100  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace, seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [5,6].

### I.4 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé vers le sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature [7] :

#### I.4.1 Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire

#### I.4.2 Le rayonnement diffus

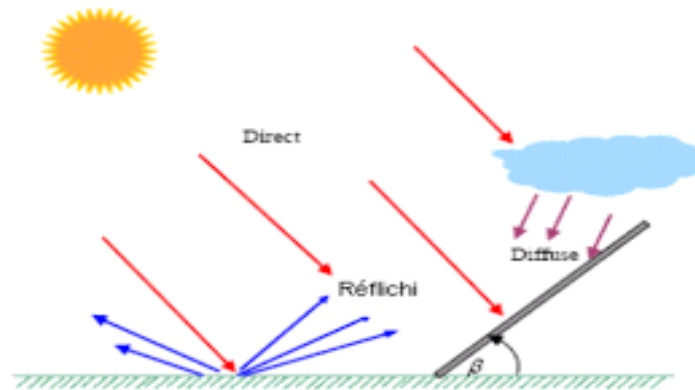
Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions [8].

#### I.4.3 Le rayonnement réfléchi

C'est la fraction du rayonnement incident diffusée ou réfléchi par le sol et les nuages. Ce terme étant généralement réservé au sol, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

### I.4.4 Le rayonnement global

Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements: Direct, Diffus et Réfléchi.[9]



**Figure I.1** Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

### I.5 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. [10]



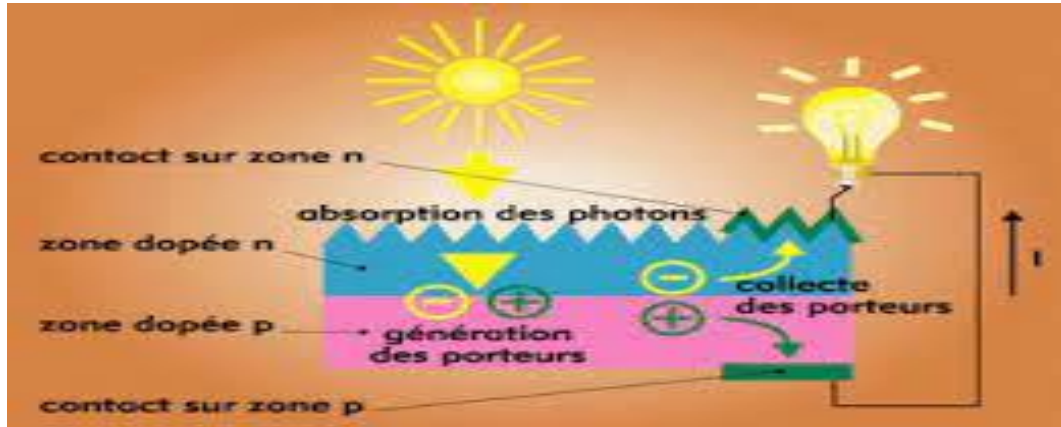


Figure I.2 l'effet photovoltaïque.

### I.6 La cellule photovoltaïque

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photo-sensibilisée du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés"[11].

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du " bande gap ",  $E_g$  en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin, et de 1.7 eV pour le silicium amorphe. La figure I.2 montre le phénomène de conduction dans les matériaux semi-conducteurs [12].

La figure (I.3) suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

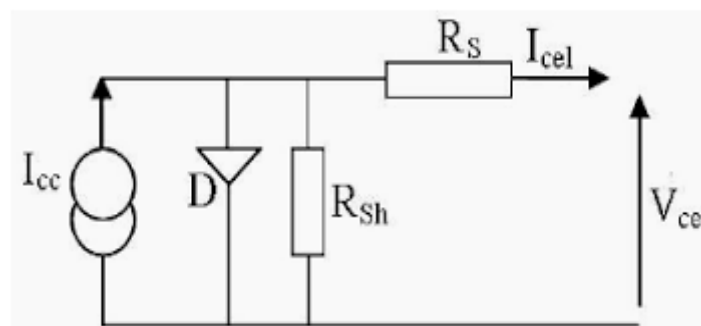


Figure I.3.Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.

### I.7 Principe de fonctionnement

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 à la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium [13].

La transformation de la lumière en électricité est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [14]

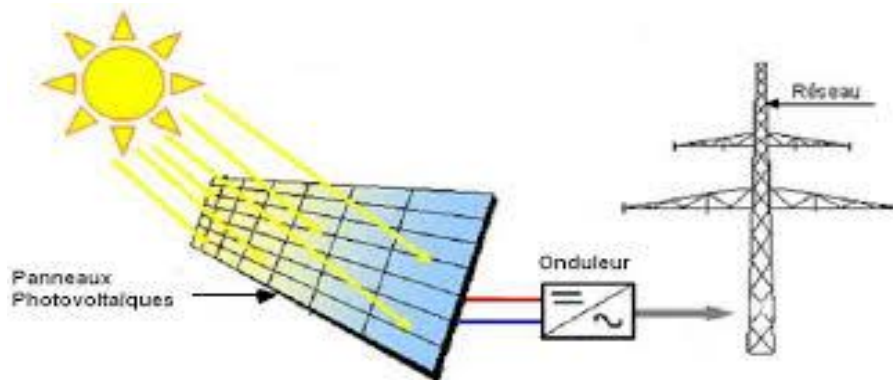


Figure I.4.Principe de fonctionnement de panneau solaire.

### I.8 Les Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules :

### I.8.1 Les cellules monocristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches [15].

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- ✓ Première génération de photopiles.
- ✓ Un taux de rendement excellent de 15% et jusqu'à 24% en labo.
- ✓ Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- ✓ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

### I.8.2 Cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines sont composées de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [16].

Les cellules poly cristallines sont caractérisées par :

- ✓ Coût de production moins élevé.
- ✓ Procédé moins gourmand en énergie.
- ✓ Rendement de 13% et jusqu'à 20 % en labo.

### I.8.3 Cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [16].

- ✓ Coût de production bien plus bas.
- ✓ Rendement 6 % seulement par module et de 14 % en labo.
- ✓ Fonctionne sous très faible éclaircissement.

I.9 Circuit équivalent et modèle mathématique

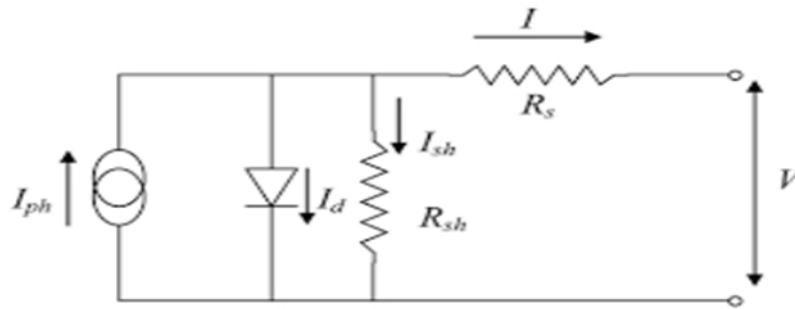


Figure I.5. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.

Une cellule solaire photovoltaïque est une diode électronique PN de grande surface qui est exposée à la lumière (photons), et génère une tension électrique (volts). En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte. La figure présente le schéma équivalent d'une cellule PV. [17] [16]

A partir de ce circuit on peut tirer les équations suivantes : [18] [19]

Avec:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{I.1}$$

I: le courant délivré par la cellule.

I<sub>ph</sub>: Photo courant.

I<sub>d</sub> : Courant de diode.

I<sub>sh</sub> /I<sub>p</sub>: Le courant de la résistance shunt.

R<sub>P</sub> : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R<sub>s</sub> : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V et P-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants:[14]

**Le photo-courant:**

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_i(T - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \tag{I.2}$$

**Le courant de saturation  $I_0$ :**

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\left[ \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \frac{q \cdot E_g}{nK} \right]} \quad (I.3)$$

**Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) :**

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{(q \cdot V_{oc} \cdot n \cdot N_s \cdot KT) - 1}} \quad (I.4)$$

**Le courant de la résistance shunt :**

$$I_{sh} = \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

**Le courant délivré (série) :**

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot N_s \cdot KT} \right) - 1} \right] - I_{sh} \quad (I.6)$$

**Le courant délivré (parallèle) :**

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot N_s \cdot KT} \right) - 1} \right] - N_p \cdot I_{sh} \quad (I.7)$$

**$I_0$  :** est le courant de saturation. [A]     **$I_{rs}$  :** est le courant inverse [A].

**ICC :** le courant de court-circuit de la cellule dépendant de G et T [A].

**V :** la tension aux bornes de la cellule [V].

**Voc :** Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur)[V].

**T :** la température ambiante [K].

**Tref :** Température de référence (298 K). [K]

**K :** la constante de Boltzmann (1.3805 .10<sup>-23</sup> J/K). [J/K]    **Ki :** Coefficient d'Icc.

**q :** la charge de l'électron (1.602. 10<sup>-19</sup> °c). [C]

**Eg :** l'éclairage de référence (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C) [eV]

**n :** le facteur de non idéalité de la jonction. **Ns:** Nombre de cellules connectées en série.

**Np :** Nombre de cellules connectées en parallèle.

**G :** Irradiation sur la surface de la cellule (1000W/m<sup>2</sup>).[W/m<sup>2</sup>]

### I.10 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit [20].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [20].

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

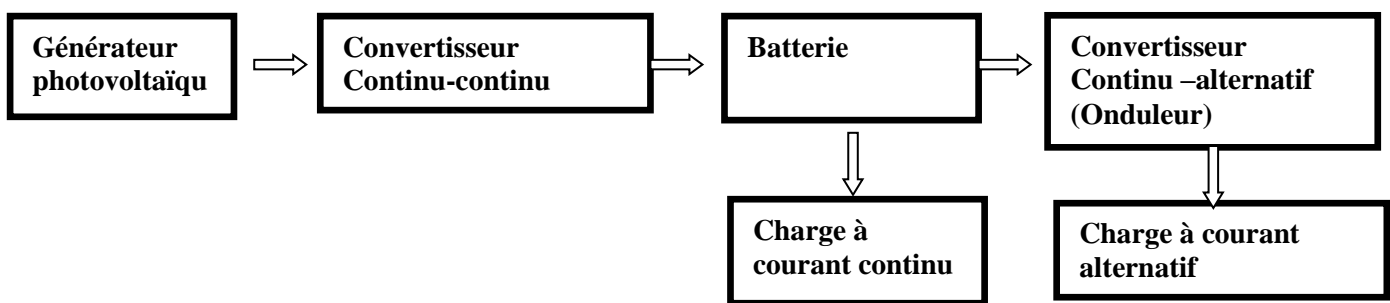


Figure I.6. Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.

### I.11 Paramètre photovoltaïque

Les principaux paramètres des cellules photovoltaïques sont des caractéristiques suivantes :

La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement.

La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{oc}$ .

La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement [17].

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par un certain nombre de paramètres extrait de caractéristique courant-tension :

#### I.11.1 Courant de court-circuit ICC

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P = U.I$  est nulle [21].

### I.11.2 Tension en circuit ouvert $V_{co}$

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P = U.I$  est nulle [22].

### I.11.3 Point de puissance maximale $P_m$

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; donnée par la relation suivante :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (I.8)$$

Le point du fonctionnement  $P_m$  ( $V_m$ ,  $I_m$ ) qui est situé au coude de la caractéristique  $I(V)$ , dite point de puissance maximale où les valeurs de tension  $V_m$  et du courant  $I_m$  appelées également tension et courant maximums respectivement [23].

### I.11.4 Facteur de forme FF

C'est un paramètre important, son utilisation c'est à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque, et représente aussi Le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle ( $I_{cc} \times V_{co}$ ).

Quand la puissance exploitable sera grande donc le facteur est grand. L'objet qui fait compromis technologie pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales c'est des meilleures cellules. Ce facteur est défini par la relation suivante [23]:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.9)$$

### I.11.5 Rendement énergétique $\eta$

Le rendement énergétique d'un générateur photovoltaïque est défini par le rapport entre la puissance électrique maximale générée et la puissance incidente sur sa superficie [24]

$$\eta = \frac{P_{max}}{G.S} \quad (I.10)$$

Avec :

**G** : L'éclairement en Watt/mètre carré ( $W/m^2$ )

**S** : La surface active du générateur photovoltaïque en mètre carré ( $m^2$ )

**Pmax**: La puissance maximale délivrée par le générateur PV en watt (W).

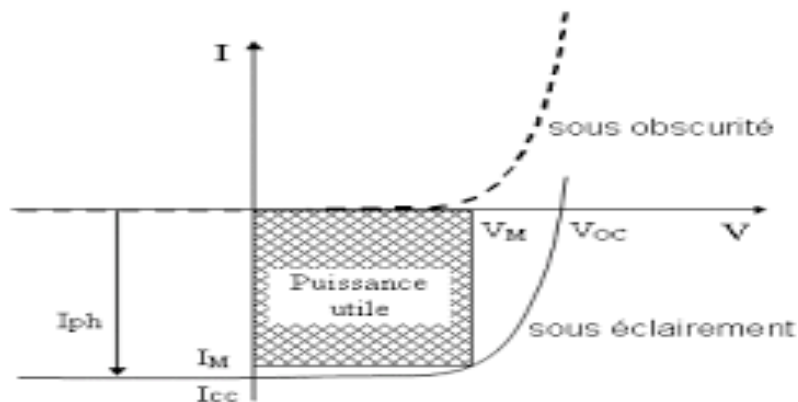
Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 13%.

### I.12 Les zones de caractéristiques $i(v)$ d'un générateur photovoltaïque

La courbe de la caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum ne produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule). Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée).

En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement [26].

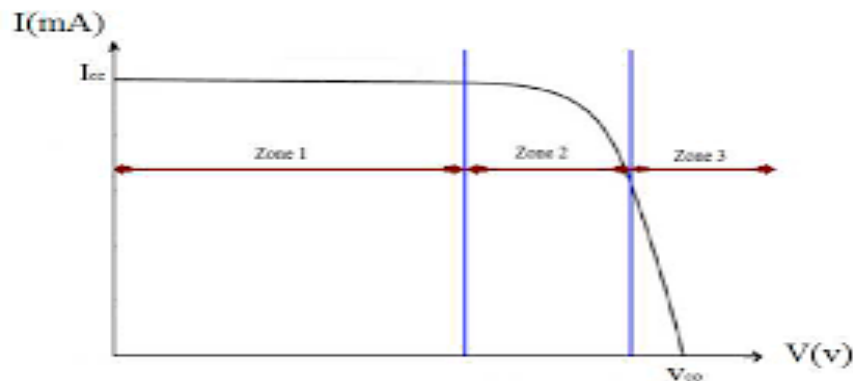
A température fixés, pour les deux régimes (sous obscurité et sous éclairement) la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :



**Figure I.7.** La caractéristique d'une cellule photovoltaïque non éclairée est celle en présence d'un éclairement.

Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant  $I_{cc}$  (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en  $V_{co}$  (tension maximale de circuit ouvert). On peut regrouper trois zones essentielles :





**Figure I.8.** Les différentes zones de caractéristique  $I=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

- **La zone 1 :** où le courant reste constant quelle que soit la tension. Pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant [26].
- **La zone 2 :** correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé [26].
- **La zone 3 :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilable à un générateur de tension [26].

### I.13 Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu lorsqu'il est exposé à la lumière. Le module photovoltaïque est constitué d'un cadre rigide le plus souvent en aluminium permettant la fixation et d'une vitre transparente en verre trempé sur le dessus.

A l'intérieur se trouve un ensemble de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles. En effet ce sont elles qui génèrent le courant. Elles sont assemblées en série ou en parallèle à l'intérieur du module afin de cumuler leur puissance et de les rendre plus résistantes à l'environnement externe.



**Figure I.9.** Structure d'un module photovoltaïque.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium mono cristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24,48) et des puissances entre 10 et 100 WC (watt- crête : puissance obtenue pour (l'ensoleillement maximal) [28].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module .Il ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%.

### I.14 Systèmes de stockage

Dans une installation photovoltaïque, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques.[29]

Le stockage de l'énergie électrique passe plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire quelconque, (gravitaire, décompression, électrochimique, électrostatique, électromagnétique, cinétique, thermique, etc...) transformable en second temps en électricité. Il y a deux types de

stockage à envisager :

- Stockage à court terme:(temps de stockage inférieur à10minutes).
- Stockage à long terme:(temps de stockage supérieurà10minutes).

Le choix du système de stockage se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont: [30]

- La puissance massique(en W/kg).
- L'énergie massique (en Wh/kg).
- Le nombre de cycles de fonctionnement.
- Le coût.
- Le rendement énergétique.

### **I.14.1 Techniques de stockage à court terme**

#### **I.14.1.1 Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES Superconductor Magnetic Energy Storage)**

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, on l'introduit dans un cryostat rempli d'hélium liquide. La bobine court-circuitée permet de stocker l'énergie sous forme de  $\frac{1}{2}.L.I_{sp}^2$ . Avec L l'inductance de la bobine et  $I_{sp}$  le courant la traversant.

Pour récupérer l'énergie il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur le récepteur et l'énergie stockée est transférée en un temps très court. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu de SMES en fonction. Même si les recherches envisagent des SMES s de l'ordre de 10 – 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1et 10 MW.[30]

#### **I.14.1.2 Stockage par Condensateurs à double couche: super condensateurs**

Le condensateur électrique à double couche est un condensateur à très forte capacité ; on le dénomme couramment "super condensateur". Les modèles actuels se caractérisent par leur densité de puissance très élevée (bien supérieure à 1000 W/kg), leur longévité (plus de 100.000 cycles) et par un rendement relativement élevé (en général supérieur à 80%).

De par ces caractéristiques, ils sont généralement bien adaptés à la fonction d'égalisation de charge pour une batterie ou une pile à combustible.

En effet, ils présentent une densité d'énergie forte inférieure à celle des autres sources de puissance: seulement de 3 à 7Wh/kg! Compte tenu par ailleurs des considérations de poids et

D'encombrement, on n'arrive ainsi qu'à une ou deux centaines de wattheures d'énergie. [15]

### I.14.1.3 Stockage sous forme d'énergie cinétique: volant d'inertie (Fly Wheel)

Le système de volant d'inertie est composé d'une masse inertielle mouvante, circulaire ou non tournant à une vitesse de rotation  $\Omega$ , construite en matériau composite ou en acier pour le stockage d'énergie et un moteur/générateur à haute vitesse de rotation pour le transfert de cette énergie.

Ce système, suspendu sur des paliers magnétiques ou à billes, opère dans une enceinte sous vide afin de limiter les pertes par ventilation et par frottement. L'enceinte externe doit être très résistante afin d'éviter une dispersion des débris en cas de rupture du disque d'inertie en cours de fonctionnement.

L'énergie cinétique emmagasinée s'exprime par:  $W=1/2J\Omega^2$ .

Le fonctionnement du système de stockage inertiel est basé sur la conversion de l'énergie sous forme cinétique, qui est reconvertie en cas de besoin en énergie électrique. Pour cela un volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible fonctionnant dans un premier temps, en moteur pour fournir de l'énergie à la masse inertielle. Le système d'entraînement désaccouplé, le volant d'inertie stocke de l'énergie dans sa rotation. A la demande cette dernière sera transformée en énergie électrique par le générateur. Il est utilisé en application de véhicules électriques. [30], [31]

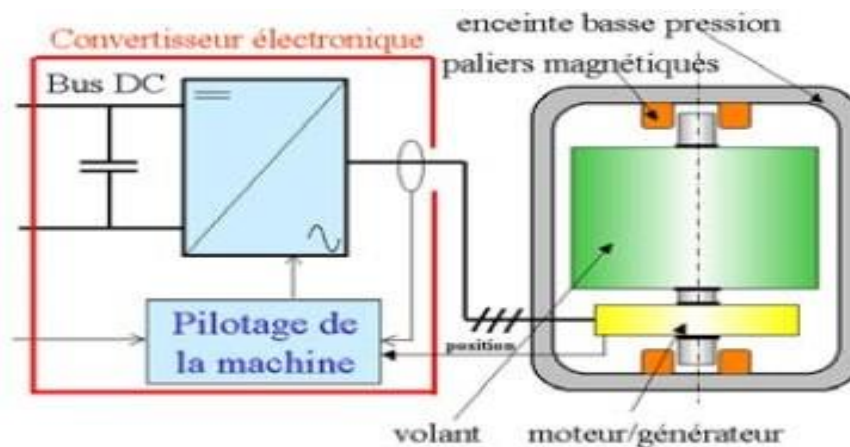


Figure I.10. Stockage par volant d'inertie. [32]

### I.14.2 Techniques de stockage à long terme

#### I.14.2.1 Stockage sous forme gravitaire

Cette technique est ancienne et nommée aussi stockage par pompage hydraulique.

Ce système de stockage est constitué de deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes, l'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur. L'eau pompée revient au bassin inférieur selon la demande toute en traversant une ou plusieurs turbines qui transforment l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, cette dernière est régie par la formule ( $w = mgh$ ), puis des générateurs entraînés par ces turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

Cette technique de stockage nous fournis jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction. Ce dispositif ne peut pas être implanté au voisinage des centres de consommation et ils sont difficilement transportables. En général, le rendement associé à cette technique de stockage est de l'ordre 75%. [13]

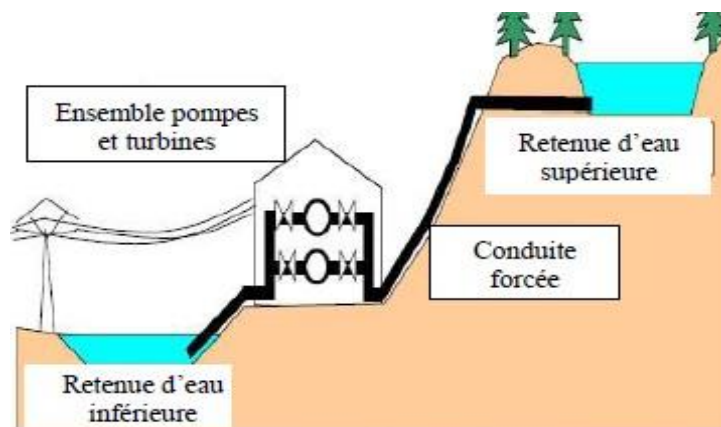


Figure I.11.Principe de stockage gravitaire hydraulique. [30]

#### I.14.2.2 Stockage sous forme d'air comprimé (pression)

Dans ces installations, l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbo compresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Le poids des terrains au-dessus de la caverne permet de résister à la pression de l'air.

Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel, puis détendu dans la turbine. La chaleur résiduelle des fumées est récupérée. Dans une installation moderne, pour restituer 1 kWh au réseau, il faut utiliser 0,75 kWh d'électricité

durant la phase de pompage et brûler 1,22kWh de gaz naturel durant le déstockage .[31]

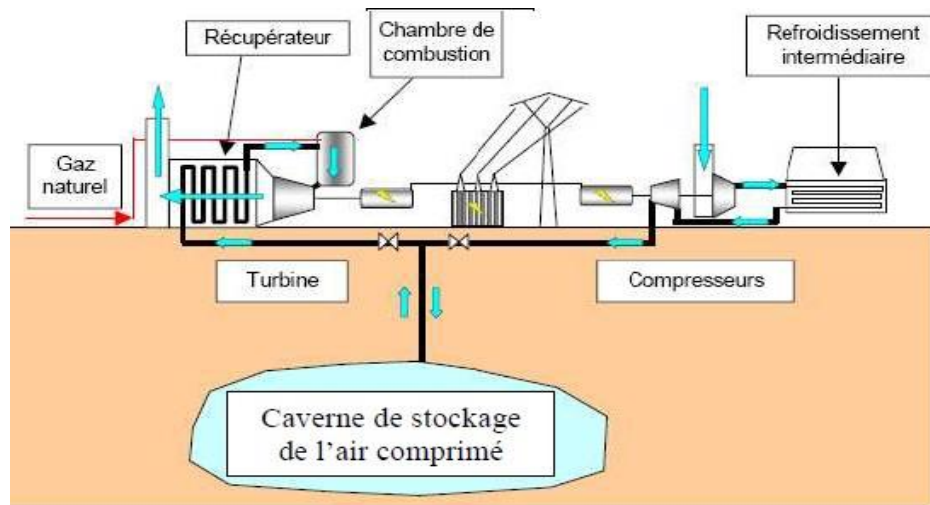


Figure I.12. Stockage à air comprimé en caverne. [30]

### I.14.2.3 Stockage sous forme thermique

Le principe de stockage thermique consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc..) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turbo alternateur.

Pour stocker l'électricité sous forme thermique, il faut:

- Transformer l'électricité en chaleur dans des résistances électriques.
- Stocker la chaleur produite dans des réfractaires.
- Transformer la chaleur en électricité grâce à une turbine à gaz.

Cette idée qui aurait pu paraître incongrue il y a quelques années devient maintenant envisageable grâce au développement des turbines à gaz à haute température (supérieure à 1400°C), qui autorisent un rendement de conversion de la chaleur en électricité de 60 % dans les cycles combinés. De plus, à ce niveau de température, la densité d'énergie qu'il est possible de stocker dans des réfractaires est considérable. (Il faut 500 kWh pour chauffer une tonne de réfractaires à 1400°C).

Les résistances nécessaires existent. Les réfractaires nécessaires pour stocker la chaleur à 1400°C sont déjà largement employés en sidérurgie. L'isolation thermique à ce niveau de

## Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque et stockages

Température est également bien maîtrisée par cette industrie. Une première analyse montre d'ailleurs que les pertes thermiques d'un tel système sont relativement d'autant plus réduites que la taille du stockage est grande. En plus tous les ingrédients nécessaires pour développer de tels systèmes de stockage sont disponibles. [30]

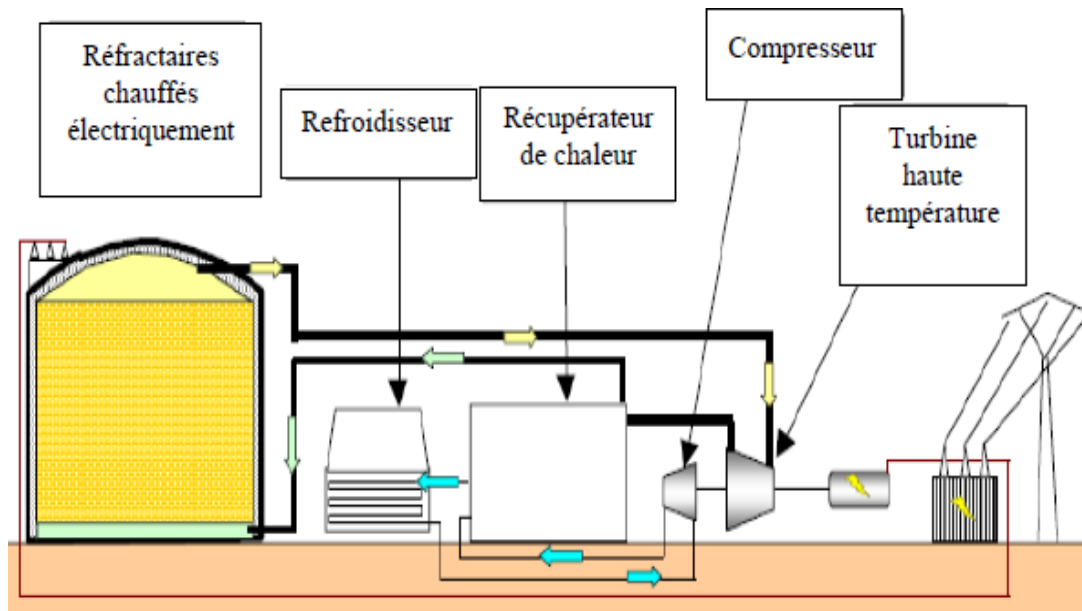


Figure I.13. Système de stockage thermique. [32]

### I.14.2.4 Stockage sous forme chimique

#### a- Les Batteries

Lorsqu'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux batteries électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière.

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité.

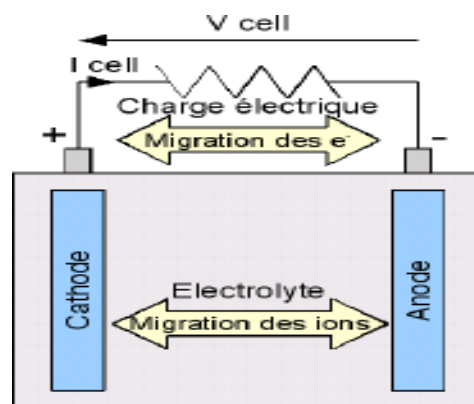
Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus relevée aux bornes du dispositif. Une cellule est constituée de trois éléments de base :



- Une électrode positive (cathode),
- Une électrode négative (anode),
- Un électrolyte.

Globalement, l'objectif d'une cellule est de créer une différence de potentiel entre les deux électrodes liée à leurs matériaux constitutants. L'électrolyte permet la migration des ions entre l'anode et la cathode tout en interdisant le transfert des électrons. Ceux-ci devront transiter au travers d'un circuit électrique qui est la charge.

En règle générale, une technologie de batterie est définie par le couple des matériaux d'électrodes. Au besoin, le type d'électrolyte peut également être précisé. [32]



**Figure I.14.**Principe de fonctionnement d'une cellule.[32]

### b- Les piles à combustibles

La pile à combustible est parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée tel qu'elle suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite et fortement, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs de piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables .[33]

La pile à combustible est un dispositif électrochimique réalisant l'opération inverse de l'électrolyse de l'eau. Là où une électrolyse dissocie la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène grâce au passage d'un courant; la Pile à combustible permet de les réunir en produisant donc de l'électricité et de l'eau et également de la chaleur.

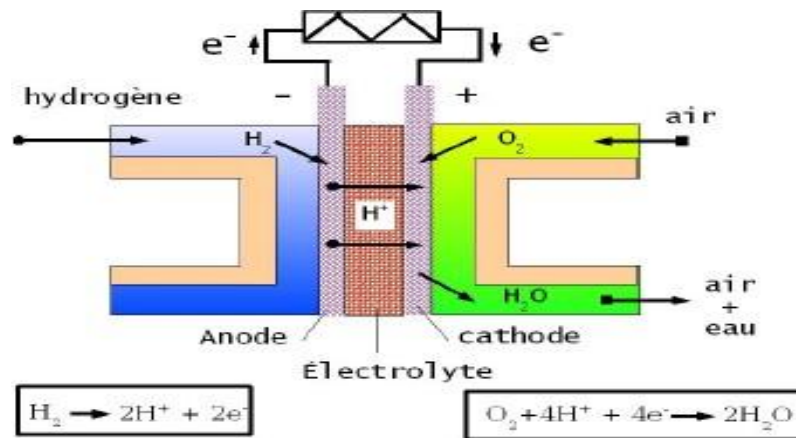
Une cellule de pile à combustible comporte deux électrodes : l'anode et la cathode. A l'anode, se produit une réaction d'oxydation du carburant (par exemple, de l'hydrogène) tandis que, à la cathode, se produit une réaction de réduction de comburant (le plus souvent de



## Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque et stockages

L'oxygène). Les électrodes sont recouvertes d'un catalyseur afin de faciliter les réactions d'oxydoréduction et séparées par un électrolyte. Ce dernier laisse transiter les protons de l'anode à la cathode mais bloque les électrons. Ainsi, ils doivent emprunter un circuit extérieur (la charge) afin de migrer.

Il existe plusieurs technologies de PAC, généralement classifiées en fonction du type de leur électrolyte et de leur température de fonctionnement. [32]



**Figure I.15.** Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. [32]

La réaction globale s'écrit:



### I.14.3 Comparaison entre les modes de stockage présentés

Technologie	Avantages	Inconvénients
Batterie	Faible coût	Durée de vie
Air comprimé	Capacité de stockage importante.	Site spécifique Coulé avec le gaz naturel
Pompage hydraulique	Stockage important Faible coût	Délais de construction Site favorable
Volant d'inertie	Puissance élevée	Faible densité d'énergie Le coût
Supraconducteur	Puissance élevée	Coût élevé Faible densité d'énergie
Super condensateur	Durée de vie Bon rendement	Faible densité d'énergie

**Tableau I.1.** Comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique.

- ✓ Les barrages hydro électriques et le stockage d'air comprimé : sont des dispositifs gigantesques et nécessitent de disposer d'une géologie favorable.
- ✓ Les supraconducteurs : leur développement est encore à ce jour limité, ce qui les rend très onéreux.
- ✓ Pour le volant d'inertie, le coût élevé de cette technologie risque d'être un obstacle à son développement et son utilisation en plus de sa sensibilité aux chocs malgré les différents avantages qu'il possède.
- ✓ Les piles à combustibles ont un coût d'investissement encore prohibitif, leur rendement global est très faible et leur durée de vie insuffisante.
- ✓ Les accumulateurs électrochimiques, se reconnaissent par une bonne énergie massique. Leur utilisation paraît intéressante dont la charge très peu fluctuante.

En plus, ils respectent certaines contraintes notamment un bon rapport coût/performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité.

Vu tous les avantages présentés par le stockage par batteries, leur association au système photovoltaïque est presque impératif dans les systèmes de production décentralisée. Voilà pourquoi on a opté dans la suite de ce travail à l'étude et à l'application du système de stockage par batteries, dans un système de production photovoltaïque autonome.

### I.15 Principe du fonctionnement des Batteries

Deux électrodes plongeant dans un électrolyte constituent une chaîne électrochimique. Des lames métalliques de nature différente peuvent jouer, par exemple, le rôle d'électrodes. La chaîne électrochimique joue le rôle d'un générateur de courant par la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. C'est au niveau de ces électrodes que se passent les réactions électrochimiques. On peut décrire en générale ces réactions comme suit :[34]

Au niveau de l'anode qui est l'électrode négative se fait la réaction de l'oxydation pendant la décharge et cela se caractérise par la formule suivante:



$M_1$ : étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés vont transiter via le circuit extérieur pour atteindre la cathode, qui est l'électrode positive, là où se fait la réaction de réduction:



$M_2$ : étant l'espèce active de la cathode.

La réaction de l'oxydoréduction globale est la suivante:



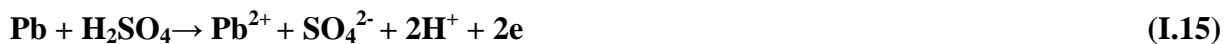
### I.15.1 Les différents types de Batteries

#### 1. La Batterie au plomb

Elle se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte.

L'électrode positive est en dioxyde de plomb ( $PbO_2$ ) et la négative en plomb ( $Pb$ ). L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. La densité de l'électrolyte décroît lors de la décharge lorsque la batterie débite un courant les matières actives vont se transformer en sulfate et en eau.

La réaction chimique au niveau de l'anode



La réaction chimique au niveau de la cathode



La réaction globale en partant des produit chimiques  $PbO_2$ ,  $Pb$ , et  $H_2SO_4$  est la suivante :

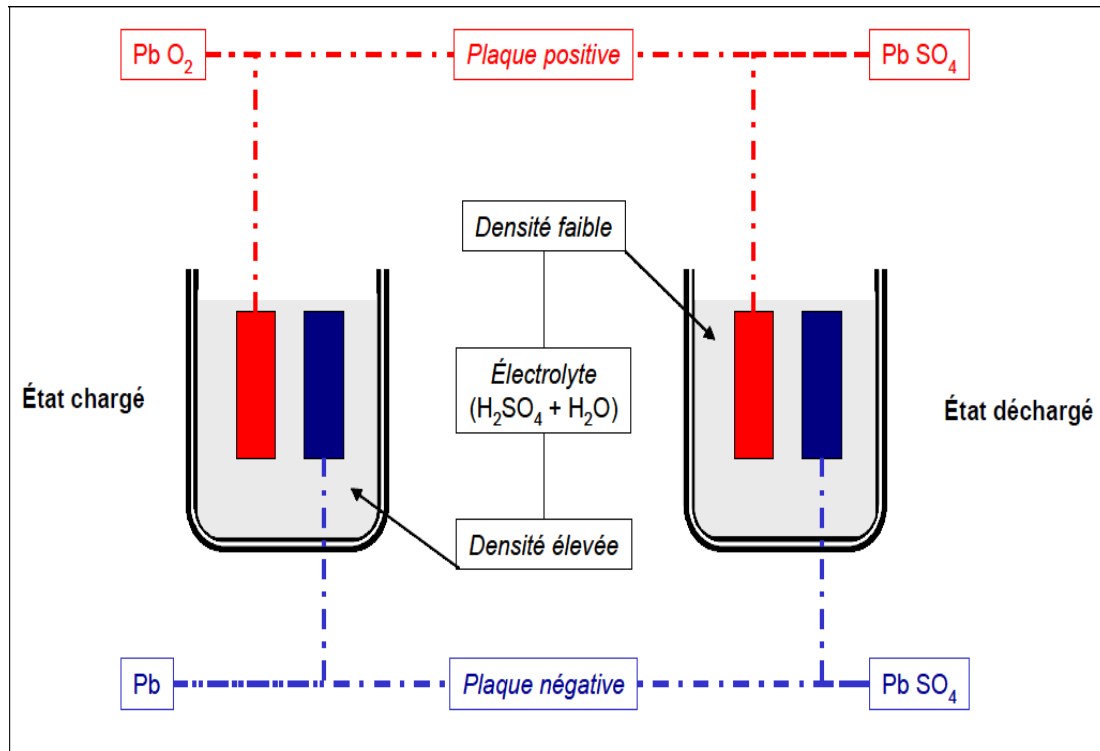


Cela se passe pendant la décharge et pour la charge ça se fait en sens inverse

La tension de ce type d'accumulateur est voisine de 2V.

On parle ici d'une cellule et une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module appelé batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus élevée aux bornes du dispositif.

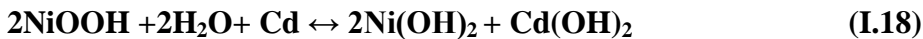
- ✓ Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité.
- ✓ si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre une valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène  $O_2$  gazeux à l'électrode positive et en dihydrogène  $H_2$  gazeux à l'électrode négative.[34]



**Figure I.16.** Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb/acid.

### 2. La Batterie Nickel-Cadmium

Les batteries Cadmium-Nickel sont réalisées à partir de 2 électrodes (hydroxyde de Nickel et Cadmium) immergés dans une solution de potasse. La réaction réversible globale est la suivante:



L'électrode positive est l'hydroxyde de Nickel, et le Cadmium l'électrode négative.

L'électrolyte est à base de potasse, d'où le nom d'accumulateur alcalin. La tension varie de 1.15 à 1.45V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V.

Bien que moins performants que les accumulateurs au Plomb, les accumulateurs au Cd-Ni présentent les avantages suivants:

- ❖ Très bonne résistance mécanique (applications embarquées)
- ❖ Ne craignent pas le gel et supportent les températures élevées.
- ❖ Supportent les décharges totales
- ❖ Pas d'émanation toxique.

### 3. La Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

Les batteries Ni-MH diffèrent des Ni-Cd de part la constitution de l'électrode négative, ici basée sur de l'hydrogène adsorbé dans un métal, Cette technologie apporte des améliorations Intéressantes par rapport au Ni-Cd. Tout d'abord, l'énergie spécifique est plus élevée. Ensuite,

L'absence de cadmium rend le retraitement de l'accumulateur en fin de vie beaucoup plus aisé et une éventuelle rupture de la cuve moins problématique. Le coût de ce type de batterie reste malheureusement des plus élevés. Ces batteries ont été développées avec 3 objectifs:

- ❖ Augmenter la capacité par unité de volume.
- ❖ Favoriser les charges rapides.
- ❖ éliminer le cadmium, toxique pour l'environnement et est déjà interdit dans certains pays.

A part la première caractéristique (ils sont plus compacts), ces batteries ne sont pas meilleurs que les Ni-Cd pour le solaire. Ils sont même moins bons en ce qui concerne la tenue au froid.

#### **4. La Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)**

L'électrolyte est constitué d'une solution organique ou d'un polymère solide. La grande légèreté de ce métal autorise l'obtention de densité énergétique extrêmement élevées et la tension de cellule, une densité de puissance importante. Leur coût est 10 fois plus élevé que le Pb (600€/ kWh) et ils ne sont encore utilisés couramment que pour les applications de petites puissances.

#### **5. La Batterie Nickel-Na Cl**

Simple, de très forte capacité pouvant subir un très grand nombre de cycles et extrêmement robustes. Ces accumulateurs fonctionnent malheureusement à 200°C et nécessitent qu'une partie de l'énergie soit utilisée pour les maintenir à cette température. Leur développement est provisoirement arrêté mais pourrait bien reprendre.

#### **6. La Batterie Nickel-Zinc**

Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du Cadmium par le Zinc serait le bienvenu et ces batteries ont une densité d'énergie élevée (25% plus que la batterie Ni Cd). La tension d'une cellule varie de 1.6 à 1.8 V. La durée de vie reste le problème majeur à résoudre.

Il existe d'autres types de batteries qu'on n'a pas citées. On donne ci-dessous un tableau de comparaison entre quelques différents types batteries.

Technologie	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	Li/Ion
Energie spécifique (Wh/kg)	35-50	50-60	70-95	60-130
Puissance spécifique (W/kg)	80-150	150-400	200-1000	500-4000
Rendement(%)	>80	75	70	>95
Nombre cycle	500-1000	800	750-1200	1000
Avantages	Faible coût	Fiabilité Performances à froid	Très bonne Densité d'énergie	Excellente puissance et énergie
Inconvénient	Durée de vie	Toxicité	Comportement En température	Le coût élevé

**Tableau I.2** Comparaison des caractéristiques techniques des batteries.

Notre travail consiste à étudier le système photovoltaïque avec stockage et on a opté pour une batterie au plomb et cela pour les avantages suivants:

- Faible coût.
- Bon rendement.
- Meilleur compromis en termes de cout/performance/entretien.
- Sa durée de vie.
- Caractéristiques électrochimiques favorable.
- Une large disponibilité.
- Entretien faible ou nul.
- Bonne tenue aux températures extrêmes.

### I.16 La Batterie au plomb

#### I.16.1 Historique

C'est en 1859 que Gaston Planté réalisa l'accumulateur au plomb par formation de feuilles de plomb pur, dans de l'acide sulfurique et sous l'influence d'un courant électrique. Il fallut cependant attendre l'apparition en 1880 de la dynamo Gramme et la réalisation de l'accumulateur Faure à grilles et à oxyde rapporté pour que l'industrie de l'accumulateur

commence à se développer.[35]

### I.16.2 Paramètres de la batterie au plomb

On peut classer les paramètres de la batterie en 2 groupes:

Les accessibles représentés par les données physiques visibles et mesurables depuis l'extérieur de la batterie (température, tension, courant, impédance, et quantité d'énergie stockée « capacité») : ce sont ces grandeurs qui intéressent l'utilisateur et servent à définir les caractéristiques des accumulateurs. Parmi ces grandeurs nous différencierons les grandeurs externes (courant et tension) et internes (résistance et l'état de charge).

- Les inaccessibles qui sont des grandeurs internes qui concerne la chimie et représentent l'état de l'accumulateur (quantité de matière active, la densité de l'électrolyte, pression interne).

### I.16.3 Les comportements de la batterie

Les batteries possèdent quatre comportements distincts:

- En charge: la batterie est connectée à une source d'énergie et agit comme un récepteur tel qu'elle stocke de l'énergie.
- En décharge: la batterie est connectée à un récepteur elle lui fournit de l'énergie.
- En stockage: la batterie n'est connectée à aucune alimentation ou récepteur. Il n'y a pas d'échange avec le milieu extérieur.
- Le floating (tampon): l'alimentation et l'utilisation restent branchés en permanence sur la batterie.

## I.17 Conclusion

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque ainsi que les différents modes de stockage, notamment, le stockage électrochimique et ses constituants. Nous avons par la suite présenté une brève comparaison entre les systèmes de stockage et décrit de façon détaillée le fonctionnement du système de stockage choisi.

*Chapitre II : Caractéristiques  
et Modèles de la Batterie de  
stockage*



### II.1 Introduction

Compte tenu du caractère relativement complexe des accumulateurs électrochimiques, Il s'avère difficile de développer un modèle général. Les différents modèles existant dans la littérature, pour la technologie plomb-acide, sont d'une mise en œuvre complexe notamment à cause du nombre élevé de paramètres à déterminer. [38]

Aucun de ces modèles n'est complètement précis et les facteurs qui affectent l'exécution des batteries sont :

- ❖ L'état de charge.
- ❖ La capacité de stockage de la batterie.
- ❖ La température.
- ❖ La durée de vie. [39]

### II.2 Grandeurs caractéristiques des Batteries

#### II.2.1 Capacité de stockage

La capacité de stockage  $C$  exprimée en ampères-heures représente la quantité de charge qu'il est possible d'obtenir lors d'une décharge complète de la batterie, initialement chargée, avec un courant constant. La nomenclature utilisée pour désigner la capacité de stockage obtenue pour une décharge de  $n$  heures est  $C_n$ . De manière générale, lorsque l'on parle d'une capacité  $C_5$ , cela revient à évoquer la quantité de charge obtenue lors d'une décharge de 5 heures. De même, lorsque l'on parle d'une capacité  $C_{0.5}$ , cela revient à désigner la quantité de charge mesurée pendant une décharge de  $\frac{1}{2}$  heure. [39]

Les courants de décharge, appelés aussi régime de décharge, utilisent la même nomenclature que la capacité  $C_n$  et sont définis de la manière suivante :

$$I_n = \frac{C_n}{n} \quad (\text{II.1})$$

#### II.2.2 Rendement

##### a. Rendement faradique

Le rendement en ampères-heures (ou faradique)  $\eta_f$  est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge  $C_d$  et la quantité d'électricité fournie lors de la charge  $C_c$  (Ah récupérés lors de la décharge/ Ah fournis pendant la charge).

Pour la batterie au plomb il est supérieur à 90%. [10]

$$\eta_f = \frac{C_d}{C_c} \quad (II.2)$$

### b. Rendement énergétique

La définition du rendement énergétique est analogue à celle du rendement faradique à la différence que les grandeurs mises en jeu sont des énergies et non des quantités de charge. [39]

$$\eta_e = \frac{E_d}{E_c} \quad (II.3)$$

### II.2.3 Tension à vide

La tension à vide (open circuit voltage) désigne la tension d'équilibre de la batterie au repos. Elle est définie comme la différence des potentiels d'équilibre entre les deux électrodes.

### II.2.4 Durée de vie

Les batteries vont voir leurs performances décroître durant toute leur vie. Celles-ci sont considérées en fin de vie lorsque leurs performances ne répondent plus à celles nécessaires pour l'application visée. [39]

Les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25 °C. Elle varie de 2 à 7ans pour les batteries au Pb et de 10 à 25 ans pour les Ni-Cd. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10°C de la température d'utilisation.

### II.2.5 Profondeur de décharge

Sans importance pour le Ni-Cd qui peut se décharger complètement. Ce paramètre en revêt une importance considérable pour les batteries au Pb puisqu'elles survivent rarement à une décharge totale.

On limite en général la décharge à 80% de la capacité nominale. Pour les applications solaires, la profondeur de décharge ne dépasse guère 40 %, les accumulateurs étant souvent sur dimensionnés afin d'augmenter leur durée de vie.

### II.2.6 Auto décharge

Le taux d'autodécharge d'un accumulateur représente la perte moyenne relative de capacité par mois et pour une température donnée. Cette autodécharge peut résulter de plusieurs causes .En premier lieu, la densité de l'électrolyte diminue au cours du temps. Elle est principalement due à la présence de petites impuretés métalliques sur les électrodes, conduisant à la formation de micro piles et la génération d'un faible courant

interne.

Elle est généralement donnée pour une température de 20°C .Les valeurs typiques sont de 3 à 15%/mois pour le Pb et jusqu'à 30%/mois pour le Ni-Cd.

### II.2.7 L'état de charge

L'état de charge d'une batterie **EDC**, noté SOC pour "State Of Charge" en anglais, est un paramètre vital pour la plupart des applications faisant intervenir des accumulateurs. Dire dans quel état est une batterie est une étape primordiale pour sa bonne utilisation.

Il est alors possible d'éviter des modes de fonctionnement dommageables à la batterie comme des surcharges, des sur-décharges. Mais aussi, il est possible de prévoir si la batterie peut assurer ou non sa fonctionnalité par exemple, autonomie restante d'une voiture électrique.

L'état de charge n'étant pas, loin s'en faut, lié de manière univoque à un ou quelques paramètres facilement mesurables, il est nécessaire de travailler avec plusieurs propriétés électriques et électrochimiques de la batterie, comme par exemple la tension à vide, la tension en charge, le courant, la température, l'impédance interne, la gravité spécifique de l'électrolyte ainsi que sa conductivité, ... Un bon "mixage" de ces paramètres par divers algorithmes permet d'obtenir une estimation de cet état de charge. Il fournit également des informations précieuses sur l'état interne de la batterie et peut renseigner l'utilisateur sur sa durée de vie restante.

## II.3 Différentes méthodes pour estimer l'état de charge d'une batterie

Il existe trois manières principales d'estimer l'état de charge d'une batterie:

- ❖ **Méthodes physiques:** basées sur la mesure des changements physiques (concentration de l'électrolyte) prenant place dans la batterie durant la décharge.
- ❖ **Méthodes électriques:** basées sur la modification des paramètres électriques (tension, courant) de cellules ou de la batterie complète durant la décharge.
- ❖ **Méthodes de mesure d'impédance:** basées sur la superposition d'un signal alternatif par-dessus la composante continue afin d'avoir une estimation de l'état interne de la batterie.

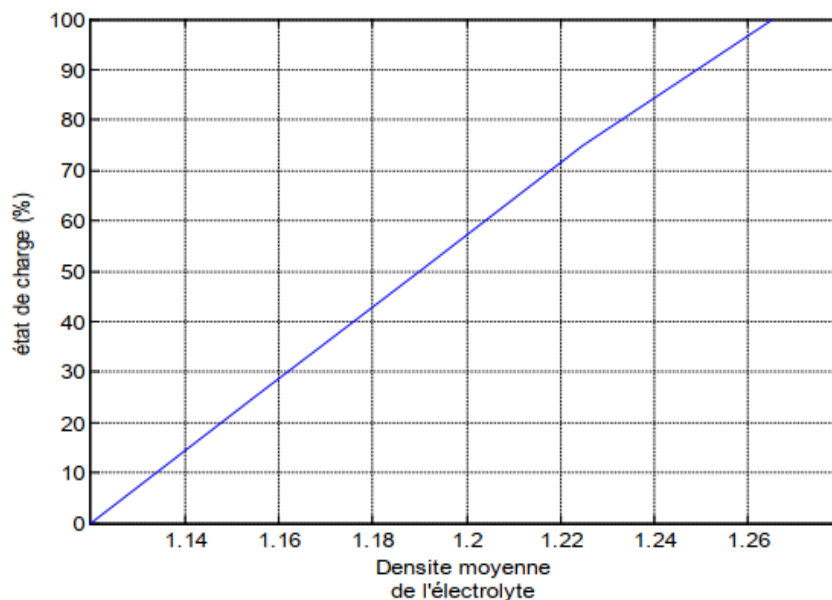
### II.3.1 Méthode de la mesure de la densité de l'électrolyte

Pour certains types de batteries, comme les batteries au plomb, la densité (ou la gravité spécifique) de l'électrolyte est une fonction quasi linéaire de l'état de charge. Par contre, dans les cellules pour lesquelles l'électrolyte n'intervient pas, dans la réaction, comme c'est

le cas des batteries au nickel-cadmium, la densité de l'électrolyte est quasi constante lors de toute la décharge et ne peut par conséquent pas fournir d'indication sur le EDC.

Pour les batteries au plomb, la mesure à l'aide d'un hydromètre de la densité de l'électrolyte permet donc en théorie d'obtenir une estimation directe de l'état de charge. Malheureusement, cela n'est pas aussi simple en réalité: cette densité n'est pas homogène dans toute la batterie, et la relation n'est vraiment linéaire que lors d'une décharge à courant constant. Des variations relativement brusques peuvent apparaître lors de transitoires de courant importants et induire en erreur un estimateur basé sur une telle relation linéaire. De plus, la mesure de cette densité impose l'installation de capteurs à l'intérieur même des batteries, ce qui risque de poser des problèmes d'étanchéité et d'aménagement intérieur des cellules. Le capteur risque en outre d'être induit en erreur par des dépôts de métaux provenant de la dégradation des électrodes, et l'état d'une ou deux cellules du pack de batteries n'est pas toujours une bonne indication de l'état de la batterie complète.

La figure ci-dessous, montre l'évolution de l'état de charge d'une batterie de 12 V en fonction de la densité de l'électrolyte.



**Figure II.1** état de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de l'électrolyte.

### II.3.2 Méthode par intégration du courant (coulométrie)

Cette technique de contrôle de l'état de charge de la batterie 'EDC', est la plus pratique et la plus utilisée, consiste en la mesure et le calcul des quantités d'électricité entrantes et sortantes dans les deux processus de charge et de décharge en termes d'ampères-heures. Cette technique est appelée la mesure coulomb métrique.

Pendant la charge, le courant est pris positif alors que lors de la décharge le courant est négatif.

L'état de charge de la batterie à un instant donné dépend directement de l'état de charge précédent, qui doit être connu au préalable, et cela est l'inconvénient de cette méthode. [40]

$$\text{EDC}_t = \text{EDC}_{t-1} + \frac{1}{C_n} \int \delta \cdot I_{\text{bat}} dt \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\text{EDC}_t$ : état de charge estimé.

$\text{EDC}_{t-1}$ : état de charge initiale.

$C_n$  : Capacité nominale ou évaluée de la batterie.

$I_{\text{bat}}$ : Courant de la batterie.

$\delta$ : C'est le coefficient de perte courant en général il est compris entre 0.98-1.

### II.3.3 Méthode de la mesure de tension en circuit ouvert

Cette méthode consiste à mesurer la tension en circuit ouvert de la batterie. Pour cela, il faut une stabilisation de la tension de circuit-ouvert. Cette dernière, n'est atteinte qu'après plusieurs heures de repos.

La tension au repos est la tension de batterie non chargée. Cela veut dire il n'y a pas de courant qui écoule.

Alors le terme "tension au repos" est équivalent au terme "tension de source".

Parce que la tension de repos dépend de la masse volumique de l'électrolyte, elle peut servir comme indication de l'état de charge.

Une fois que la tension en circuit ouvert est mesurée alors il est très facile de déterminer l'état de charge de la batterie par l'équation suivante (II.5):

$$\text{EDC}_t = S(t) = \frac{V_{\text{co}} - b}{a} \int \delta \cdot I_{\text{bat}} dt \quad (\text{II.5})$$

Avec:

EDC(t) : état de charge de la batterie.

V<sub>co</sub>: Tension en circuit ouvert de la batterie.

Les valeurs des paramètres a et b peuvent être trouvées expérimentalement quand la batterie est chargée entièrement (EDC = 100%) et quand la charge de batterie est vidangée complètement (EDC= 0%), respectivement. Alors l'état de charge (EDC) de la batterie peut être facilement déterminé connaissant la tension en circuit ouvert (V<sub>co</sub>) de la batterie à n'importe quel instant donné.[41],[42]

Dans un système photovoltaïque, où dans toute application faisant intervenir une batterie de stockage, Il est insensé de laisser le système photovoltaïque hors service durant toute cette période pour le relevé de l'état initial ou la mise à jour de l'état de charge.

Pour cela, il est nécessaire de prédire la valeur de la tension de circuit-ouvert avant que la batterie se stabilise complètement après une période de repos raisonnable.

Le modèle de prédiction de la tension de circuit-ouvert tient compte de la réduction adéquate du temps de repos de la batterie 'durée de stabilisation de la tension' a été développé par K. Shortet J.H. Aylor.

Dans ce modèle, permet de prédire la tension par réduction du temps de repos, la tension est exprimée par la relation linéaire simple suivante:

$$V_{CO}=1.64M+V_0 \quad (II.6)$$

La pente de cette droite est calculée par l'expression suivante:

$$M = \frac{V_1-V_0}{0.7} \quad (II.7)$$

Avec:

V<sub>0</sub> : tension en circuit-ouvert a t = 1 minute.

V<sub>1</sub>:tensionencircuit-ouvert a t = 5 minute.

### II.3.4 Méthode utilisant la mesure d'impédance

Ces méthodes sont apparues assez récemment et présentent une approche relativement différente de celles présentées jusqu'alors. Leur principe de base est d'imposer à la batterie une excitation en tension ou en courant afin de déduire, par la réponse de la batterie à cette excitation, une image "ohmique" de son état interne.

Les recherches s'orientent actuellement vers la liaison entre l'impédance interne et l'état de charge, mais il a déjà été prouvé que cette impédance pouvait assez facilement être liée à l'état interne global de la batterie, c'est-à-dire sa durée de vie restante. L'impédance

interne d'une batterie augmente en effet tout au long de sa vie, et sa valeur peut avoir doublé voire même triplé en fin de vie utile.

En pratique, les mesures d'impédances ont souvent été utilisées sur des batteries stationnaires pour des raisons de facilité.

### II.3.5 Méthode adaptative

Les estimations du filtre de Kalman reposent avant tout sur une modélisation de dynamique du système observé.

**Filtrage de Kalman:** il s'agit d'une structure d'observateur dont la correction est effectuée de manière optimale et utilisée pour ajuster la variable EDC.

L'état de charge est mis comme une variable d'état du système pour qu'il soit estimé instantanément. [41]

## II.4 Modèles électriques de la Batterie

Il existe dans la littérature plusieurs modèles pour simuler le comportement d'une batterie, on donne quelques modèles parmi les plus utilisés.

### II.4.1 Le modèle idéal

Dans ce modèle la batterie est représentée simplement par une source de tension comme circuit équivalent et tous les autres paramètres internes ne sont pas pris en compte.

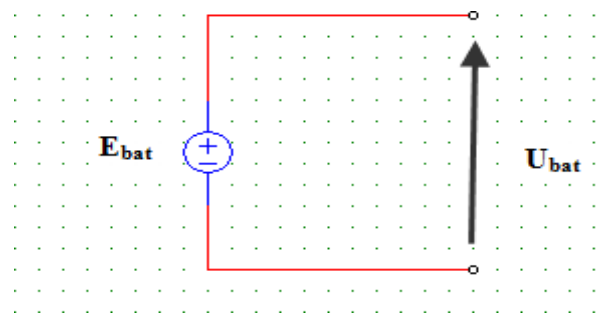


Figure II.2 Modèle idéal d'une batterie. [43]

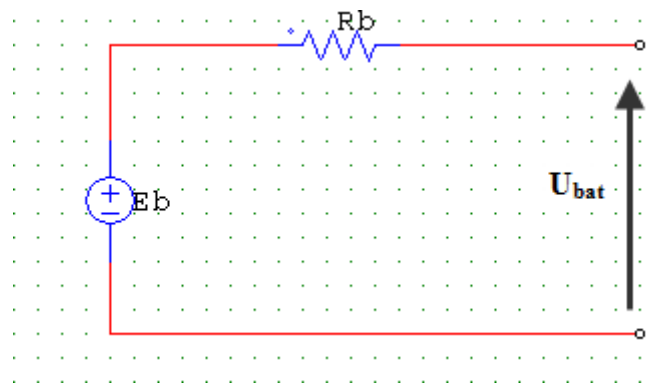
### II.4.2 Modèle simplifié de la batterie

Le modèle de la batterie généralement utilisé est montré dans la figure (II.3). Il utilise la

tension à vide de la batterie  $E_b$  en série avec une résistance interne  $R_b$ . Il est très utilisé, et ne tient pas compte des variations de l'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge et de la température. Un tel modèle est seulement applicable dans certaines simulations où l'état de charge de la batterie a moins d'importance. [44]

Ce modèle tient compte d'un autre effet, qui est donné par l'équation de Peukert.

**L'équation de Peukert :** est une manière commode de caractériser le comportement de cellules et de mesurer la capacité excentrée en termes mathématiques. C'est une formule empirique qui rapproche comment la capacité disponible d'une batterie change selon le taux de décharge. [45]



**Figure II.3** Modèle simplifié de la batterie.[44]

**L'équation de Peukert:**

$$C = (I_d)^n \cdot T_d \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$I_d$  : courant de décharge en ampère.

$n$  : constante de batterie ( $n=1.35$  pour les batteries d'acide de plomb).

$T_d$  : temps de décharge en heure.

$C$  = Capacité théorique de la batterie en ampère heures.

L'équation de Peukert prouve qu'à des courants plus élevés, il y a moins d'énergie disponible dans la batterie.

Le nombre de Peukert  $n$  est directement lié à la résistance interne de la batterie. Des courants plus élevés signifient plus de pertes et moins de capacité disponible. Une valeur de près de 1 indique que la batterie est très performante ; plus le nombre est haut, plus la capacité est perdue quand la batterie est déchargée aux courants élevés. Le nombre de



Peukert d'une batterie est déterminé empiriquement. Pour les batteries d'acide de plomb le nombre est typiquement entre 1.3 et 1.4. [45]

### II.4.3 Modèle R-C de la batterie

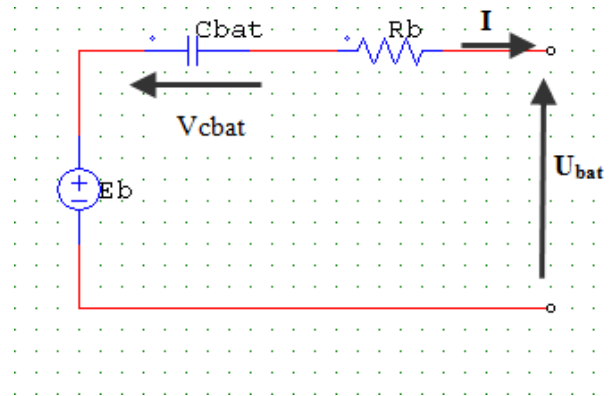


Figure II.4 Modèle R-C de la batterie.

Le modèle électrique RC comprend une fem.  $E_b$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_{bat}$ ) et une résistance interne ( $R_b$ ).

$$U_{bat} = E_b - V_{cbat} - R_b \cdot I_{bat} \quad (II.9)$$

Avec:

$E_b$ : tension à vide de la batterie.

$R_b$  : résistance interne de la batterie.

$C_{bat}$ : capacité de la batterie.

### II.4.4 Modèle de traction

Ce modèle mathématique est utilisé dans les applications des véhicules électriques et hybrides. Il est modélisé, par la mise en série d'une f.é.m. en série avec une résistance et une capacité. [27]

Le modèle de la batterie est donné par la figure suivante:

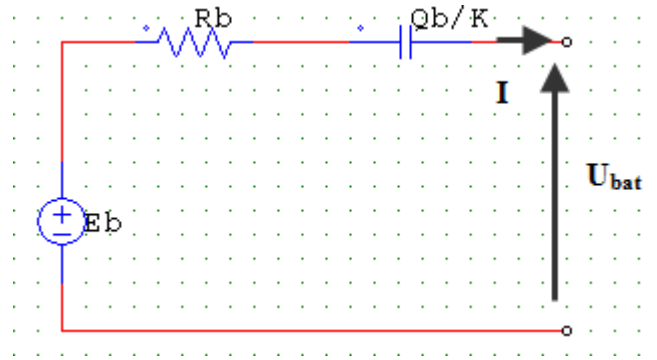


Figure II.5 Modèle de traction. [43]

$$U_{bat} = E_b - R_b \cdot I_{bat} - K \cdot \int \frac{I_{bat}}{Q_b} dt \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$U_{bat}$ : Tension aux bornes de la batterie.

$E_b$ : Tension à vide de la batterie chargée.

$K$  : Constante qui dépend de la batterie.

$R_b$ : Résistance de la batterie.

$Q_b$ : Capacité de la batterie en(Ah).

$\int (I_{bat}/Q_b).dt$ : Indique l'état de décharge de la batterie.

#### II.4.5 Modèle de Thévenin

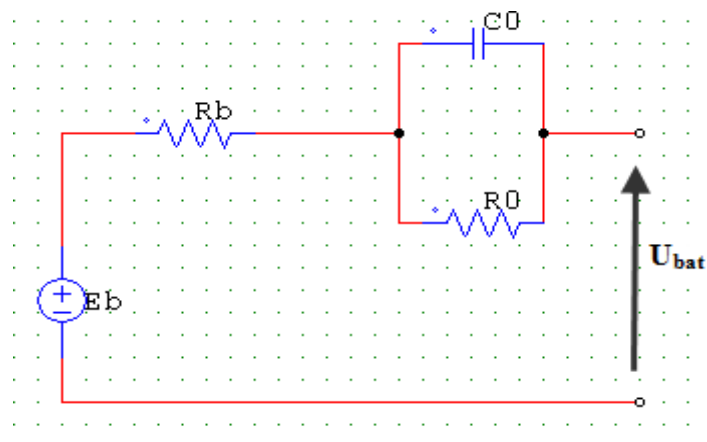


Figure II.6 Modèle de Thévenin. [44]

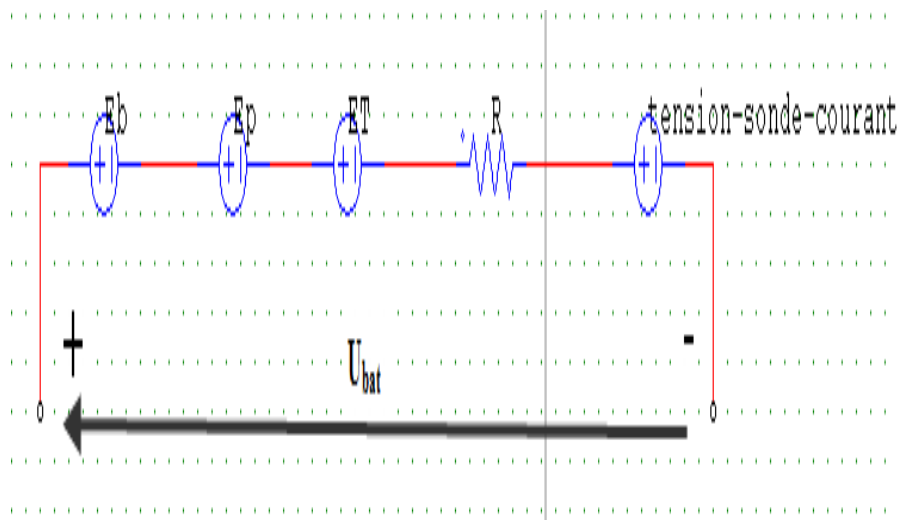
Dans ce modèle la batterie est décrite par une tension idéale de batterie ( $E_b$ ), la résistance interne ( $R_b$ ), et une combinaison d'une capacité  $C_o$  et une résistance tension  $R_o$  comme le montre la figure II.6.

L'inconvénient de ce modèle est que tous les paramètres dans ce modèle sont constants mais en réalité ces paramètres changent selon la température et l'état de la charge de la batterie. [44]

### II.4.6 Modèle modifié de Thévenin

Une nouvelle approche pour évaluer des batteries est un modèle modifié pour le modèle de Thévenin. Le modèle modifié du model de Thévenin est basé sur l'opération de combinaisons d'une gamme de charge.

Le schéma électrique équivalent du modèle proposé est celui représenté sur la figure suivante:



**Figure II.7** Modèle modifié de Thévenin. [45]

Avec:

$E_b$ : C'est une source simple de tension CC Indiquant la tension dans les cellules de batterie.

$E_p$  : Représente les effets de polarisation dus à la disponibilité des matériaux actifs dans la batterie.

$E_T$ : Représente l'effet de la température sur la tension aux bornes de batterie.

$R$  : est l'impédance interne de la batterie, la valeur d'où découle principalement la relation entre la tension de cellules et l'état de charge(EDC) de la batterie.

Tension sonde-courant: est fondamentalement une source de tension avec une valeur de

0V. Elle est employée pour enregistrer la valeur du courant de batterie.

Ainsi, ce modèle de simulation est capable de traiter de divers modes de charge/décharge: Il est comparativement plus précis et peut être prolongé pour l'usage avec les batteries de Cd et de Li-ion, qui pourraient être appliquées aux véhicules électriques hybrides et à d'autres applications de traction. Seulement quelques modifications doivent être effectuées afin de varier les paramètres, tels que l'état de charge, la densité de courant, et la température. [45]

### II.4.7 Modèle dynamique linéaire de Thévenin

Une variante améliorée du modèle de Thévenin est un modèle électrique linéaire de batterie. Ce modèle est une étape en avant du modèle de Thévenin. Il modélise le comportement de la batterie pendant la surtension et la décharge spontanée de la batterie. Ce modèle, représenté sur le schéma la figure(II.8), est plus précis que le modèle de Thevenin mais il ne considère toujours pas la modification des valeurs des paramètres selon différentes conditions de fonctionnement.

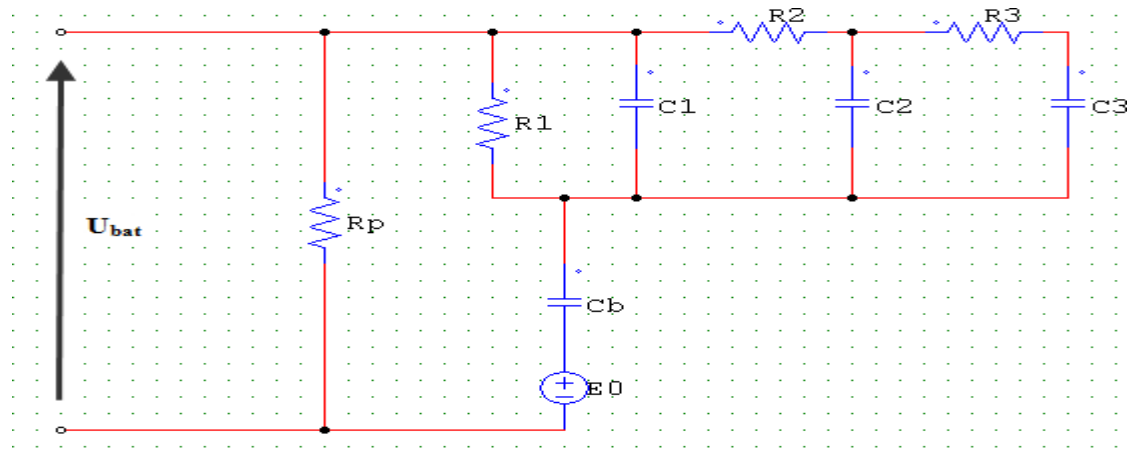


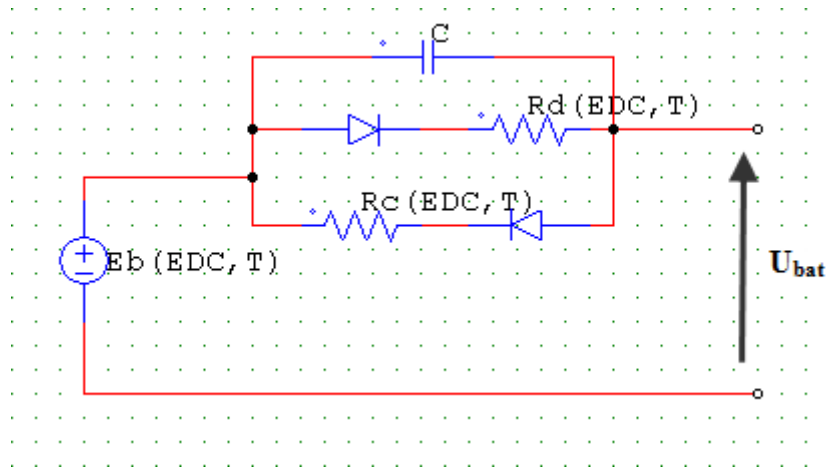
Figure II.8 Modèle dynamique linéaire de Thévenin. [45]

### II.4.8 Modèle dynamique non linéaire de Thévenin

Après avoir passé en revue différentes méthodes de modélisation, il a été décidé pour modéliser la batterie par un modèle dynamique plus réaliste par la modification du modèle de Thévenin. Dans ce modèle tous les paramètres sont affectés par l'état de charge de la batterie et de la température. Ce modèle tient compte de la variation de différents paramètres avec l'état de charge de batterie, et la température de la batterie. Le modèle est montré sur la figure (II.9). Comme il peut être vu dans le modèle, il emploie deux

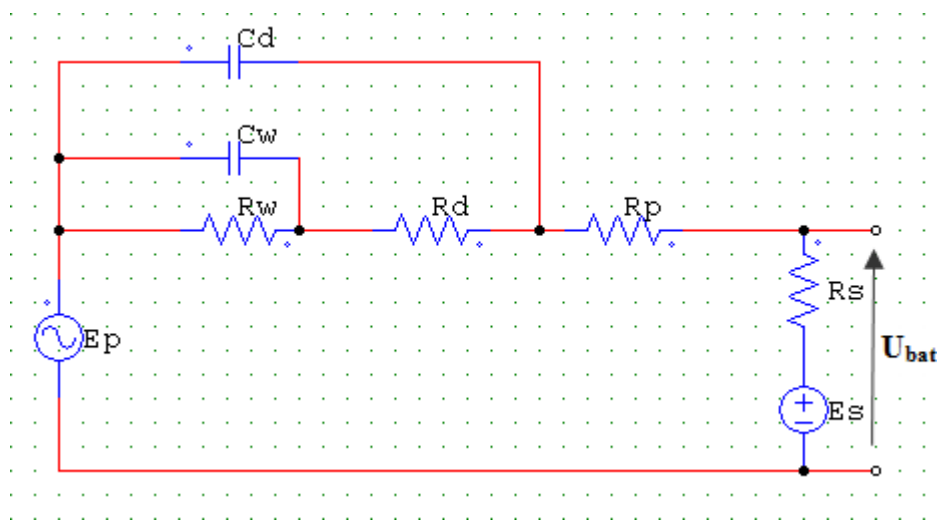
résistances internes différentes pendant la charge et la décharge.

Les diodes dans le modèle sont idéales et elles sont employées pour dévier des résistances internes pendant la charge ou la décharge. Il y a un condensateur dans le modèle qui représente le comportement de coupure de la batterie. [45]



**Figure II.9** Modèle dynamique non linéaire de Thévenin. [45]

### II.4.9 Modèle dynamique du 4<sup>ème</sup> ordre



**Figure II.10** Modèle dynamique du 4<sup>ème</sup> ordre. [44]

Le modèle de batterie présenté dans la figure II.10 est composé de deux parties:

- a) Le courant  $I_p$  traversant la résistance  $R_p$  (réaction d'électrolyte),  $R_d$  (effet ohmique) et sa capacité associée  $C_a$  et  $R_w$  (gaspillage de fuite d'énergie) et son onde entre tenue associée de capacité de fuite,

b) Le courant  $I_s$  traverse la résistance  $R_s$ (décharge spontanée).

Bien que ce modèle soit sophistiqué et précis pour but de simulation, il a toujours quelques inconvénients dans celui:

- ❖ Un plus long temps est exigé pour le calcul dû à l'ordre élevé du modèle.
- ❖ La modélisation du procédé est compliquée. [44]

### II. 4.10 Modèle de CIEMAT

Ce modèle est basé sur le schéma électrique du modèle électrochimique de la batterie.

Celle-ci est alors décrite par deux éléments, une source de tension et une résistance interne  $R_i$  dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres (température et état de charge)

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_i I_{bat} \quad (II.11)$$

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes grandeurs caractéristiques d'une batterie, tel que l'état de charge. Nous avons présenté un état de l'art des méthodes utilisées pour la détermination de l'état de charge ainsi que les quelques modèles de batterie existants dans la littérature.

La modélisation des batteries est indispensable pour comprendre et prédire leur fonctionnement. Le modèle de la batterie doit permettre de prédire l'évolution de la tension de la batterie selon le courant imposé, de suivre l'état de charge, la capacité, et les autres paramètres vitaux de la batterie. Cela est l'objectif du prochain chapitre où on va le consacrer à la simulation pour étudier le comportement de la batterie.

*Chapitre III : Simulation  
De Modèle De CIEMAT De La  
Batterie*

### III.1 Introduction

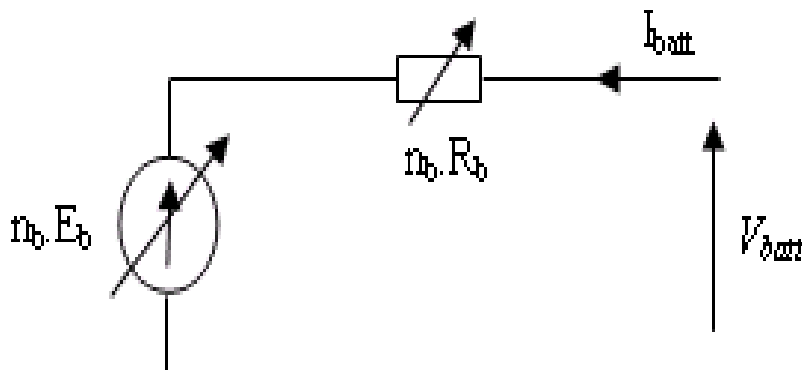
Il n'y a pas de modèle sans défaut et il est très précis pour cela nous avons choisi de simuler le comportement de la batterie un bon modèle en tenant compte de tous ses paramètres.

Nous avons choisi le modèle CIEMAT (Centro de Investigaciones Energeticas, Mediambientales y Technologicas) développé par un centre de recherche espagnol qui est considéré la température comme un standard qui s'appelle un modèle universel et ne nécessite pas de spécification expérimentale comme les autres modèles malgré la présence de quelque défaut.

### III.2 Le Modèle CIEMAT

Nous avons choisi ce modèle mathématique pour simuler le comportement de la batterie comme une mesure pour analyser les différents flux d'énergie et cela dépend du type de problèmes qui seront étudiés.

La batterie est décrite par seulement deux composants, qui sont la source de tension et la résistance interne, et cela est illustré dans le schéma suivant :



**Figure III.1** Schéma électrique équivalent d'une batterie de n éléments. [46]

L'équation suivante décrit les phénomènes physiques de charge et de décharge :

$$V_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_i I_{bat} \quad (\text{III. 1})$$

Avec :

$V_{bat}$ : Tension de la batterie



$n_b$  : Nombre de cellule constituant de la batterie

$E_b$  : La force électromotrice

$I_{bat}$  : Le courant de la batterie

$R_i$  : La résistance interne d'une cellule de la batterie

### III.3 Equation De Modèle CIEMAT

#### III.3.1 La Capacité

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, selon les modèles proposés dans le littérature, il faudrait tenir compte de la température.

Le modèle de la capacité  $C_{bat}$  donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge  $I_{bat}, I_{moy}, I_{dech}$ . Cette capacité est donnée par : [47]

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (\text{III. 2})$$

Le modèle de capacité est exprimé en courant  $I_{10}$  Et correspondant au régime de fonctionnement  $C_{10}$ , dans lequel  $\Delta T$  est l'échauffement par rapport à une température ambiante qui est égal à 25°C [1]

Avec :

$C_{10}$  : La capacité de la batterie déchargée en 10 heures.

$I_{10}$  : Le courant déchargé en 10 heures.

$$C_{10} = 10 I_{10} \quad (\text{III. 3})$$

$\Delta T$  : L'échauffement de la batterie.

#### III.3.2 L'état de charge

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

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{III. 4})$$

Avec :

$Q_d$ : La quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

$C_{bat}$ : La capacité (Ah) nominale de la batterie.

$$Q_d = I_{bat} \cdot t \quad (III. 5)$$

L'état de décharge (EDD) de la batterie par :

$$EDD = 1 - EDC \quad (III. 6)$$

### III.3.3 Tension de batterie en régime de décharge

En régime de décharge, la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{bat-d} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] \quad (III. 7)$$

$$R_{bat-d} = R_{bat} = \frac{1}{C_{bat}} \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (III. 8)$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{bat-d} = n_b E_{bat-d} - n_b R_{bat-d} |I_{bat}| \quad (III. 9)$$

Avec :

$n_b$  : Nombre d'accumulateur de batterie.

$E_{bat-d}$  : Force électromotrice en décharge(V).

$R_{bat-d}$  : Résistance interne en décharge(Ohm).

$I_{bat}$  : Courant de batterie(A).

### III.3.4 Tension de batterie en régime de charge

En régime de charge la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{bat-c} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] \quad (III. 10)$$

$$R_{bat-c} = R_{bat} = \frac{1}{C_{bat}} \left( \frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.5}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (III. 11)$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de charge :

$$V_{bat-c} = n_b E_{bat-c} - R_{bat-c} |I_{bat}| \quad (III. 12)$$

Avec :

$n_b$ : Nombre d'accumulateur de batterie

$E_{bat-c}$ : Force électromotrice en charge (V).

$R_{bat-c}$ : Résistance interne en charge (Ohm).

$I_{bat}$ : Courant de batterie(A).

### III.3.5 Résistance de la batterie

#### a) Résistance en décharge

$$R_d = \frac{1}{C^{10}} \cdot \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (III. 13)$$

#### b) Résistance en charge

$$R_c = \frac{1}{C^{10}} \cdot \left( \frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{EDC^{1.5}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (III. 14)$$

### III.3.6 Rendement de charge et de décharge

$$\eta_{cb-c} = 1 - \exp\left(\frac{20.73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0.55}\right) \cdot (EDC - 1) \quad (III. 15)$$

## III.4 Résultat de simulation

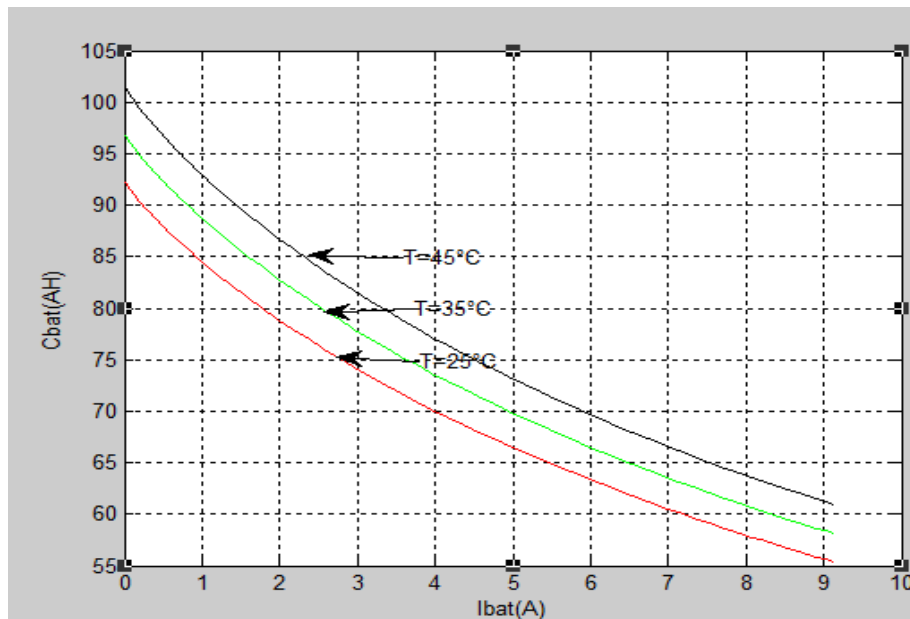
Simulation du modèle de CIEMAT, la batterie est composée de 24 accumulateurs électrochimiques de 2V en séries. La caractéristique de constructeur nous donne pour un élément une capacité  $C_{10}$  ( $C_{10}$  est la capacité en Ah de la batterie en régime de décharge à courant constant  $I_{10}$  durant 10h :  $C_{10}=10.I_{10}$ ) de 92 Ah et une résistance interne variable.  $\Delta T$  est l'échauffement de l'accumulateur par rapport à une température ambiante qui est égale à 25°C.

### ❖ Influence de la température

La température affecte le mouvement des ions, ce qui affecte à son tour les propriétés de la batterie.

#### a. Sur la capacité

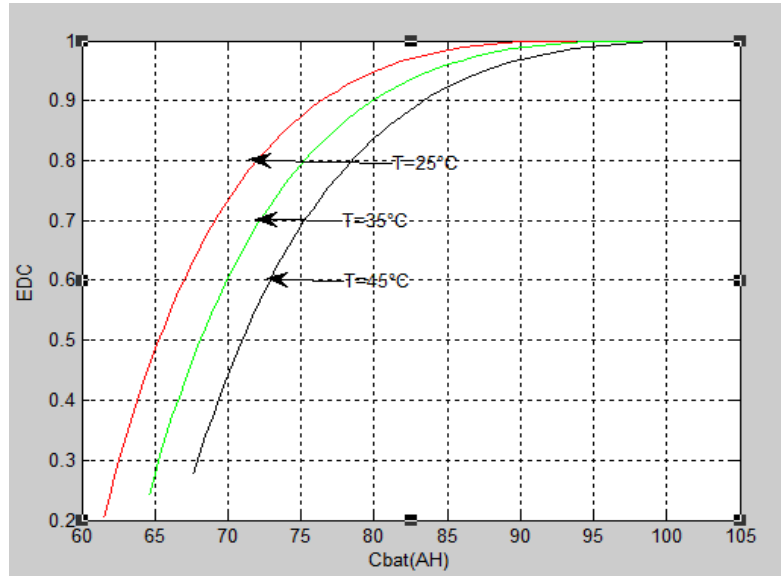
Figure (III.2) montre l'influence de la température sur la capacité de la batterie en fonction du courant pour différentes températures. Et à partir de cela, nous notons que plus la température est élevée, plus l'amplitude est élevée, et vice versa.



**Figure III.2** Influence de la température sur la capacité en fonction de courant pour différentes températures.

#### b. Sur l'état de charge

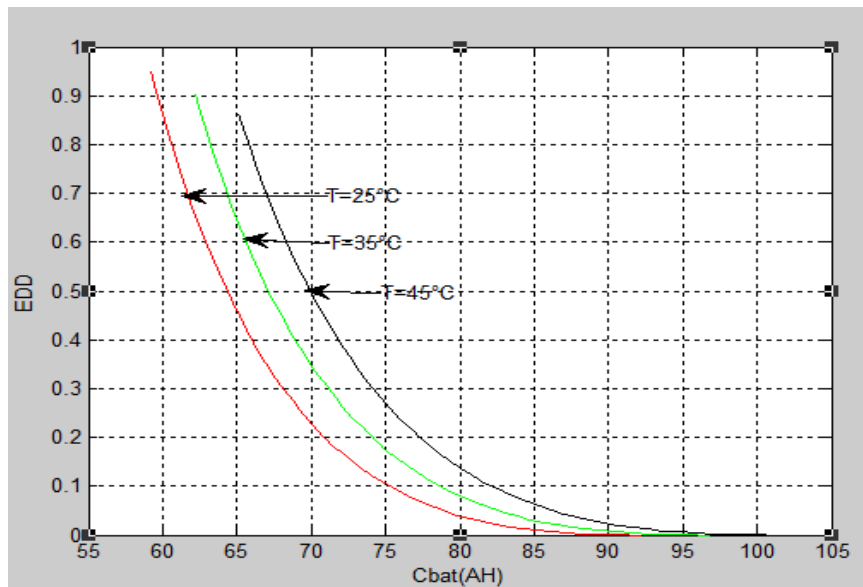
Nous donne dans la figure (III.3) l'influence de la température sur l'état de charge en fonction de capacité de la batterie pour différentes températures. On note qu'à une température de 25°C la valeur de l'état de charge est de 0,2 et à une température de 45°C elle est d'environ 0,3. On remarque également une baisse de température correspondant à une diminution de la valeur de l'état de charge.



**Figure III.3** Influence de la température sur l'état de charge en fonction de capacité de la batterie pour différents température.

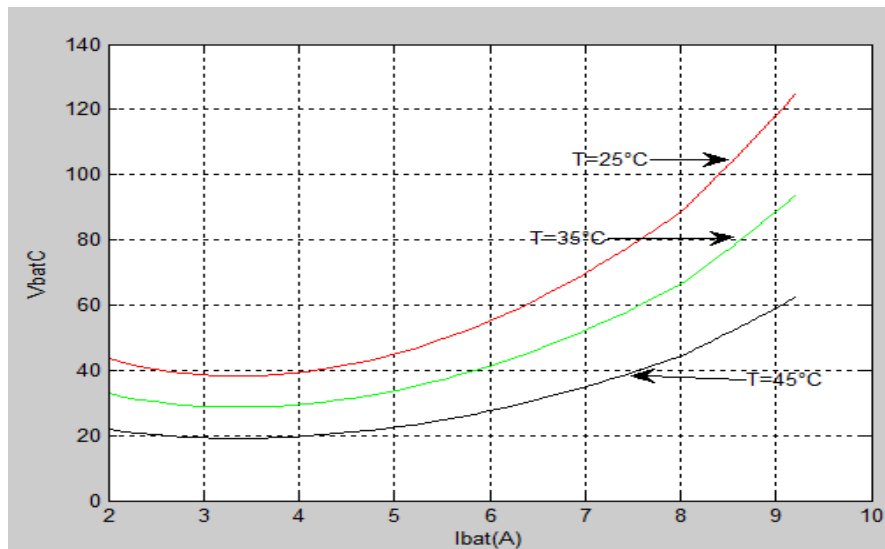
### c. Sur l'état de décharge

La figure (III.4) cela représente l'influence de la température sur l'état de décharge en fonction de capacité de la batterie pour différents température. On remarque qu'il existe une relation directe entre la température et l'état de décharge comme nous remarquons à la température 25°C l'état de décharge est d'environ 1 et sa valeur commence à diminuer que la température diminue.

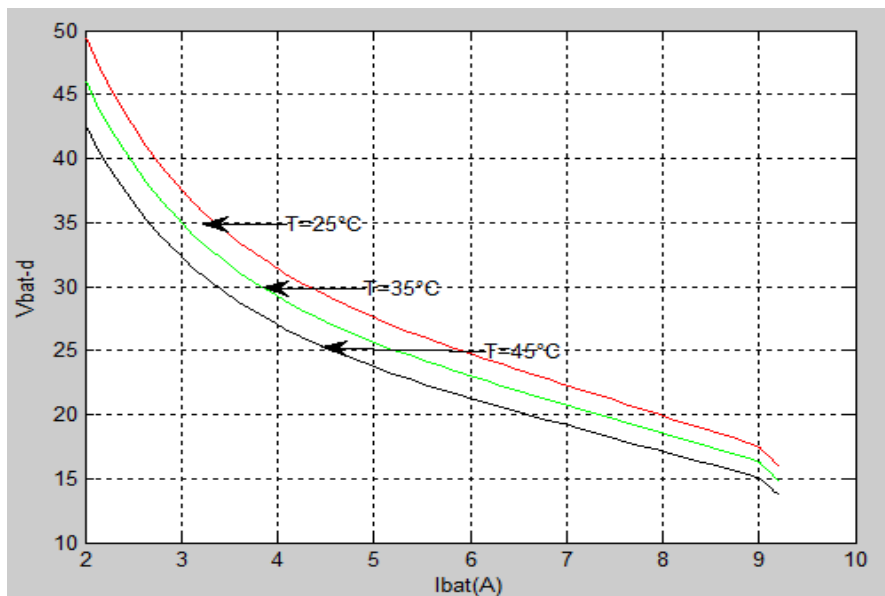


**Figure III.4** Influence de la température sur l'état de décharge en fonction de capacité de la batterie pour différents température.

### d. Sur la tension de charge et de décharge



**Figure III.5** Influence de la température sur la tension de charge en fonction de courant pour différents température.

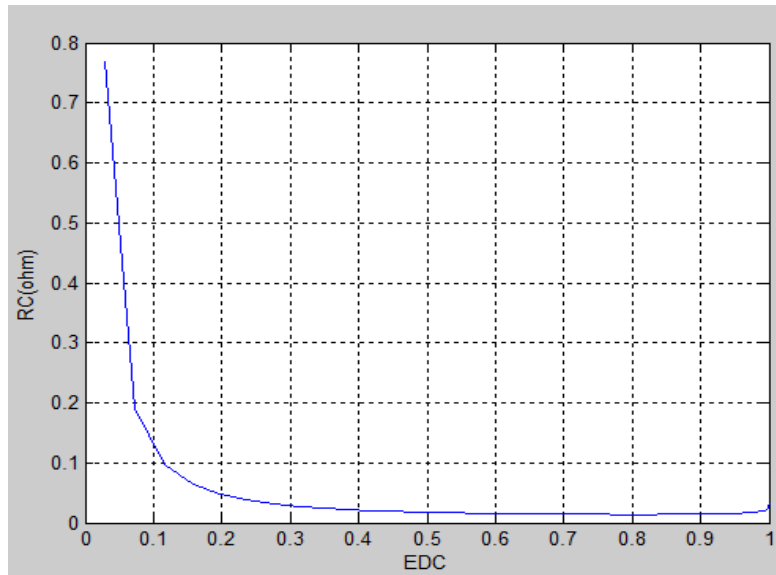


**Figure III.6** Influence de la température sur la tension de décharge en fonction de courant pour différents température.

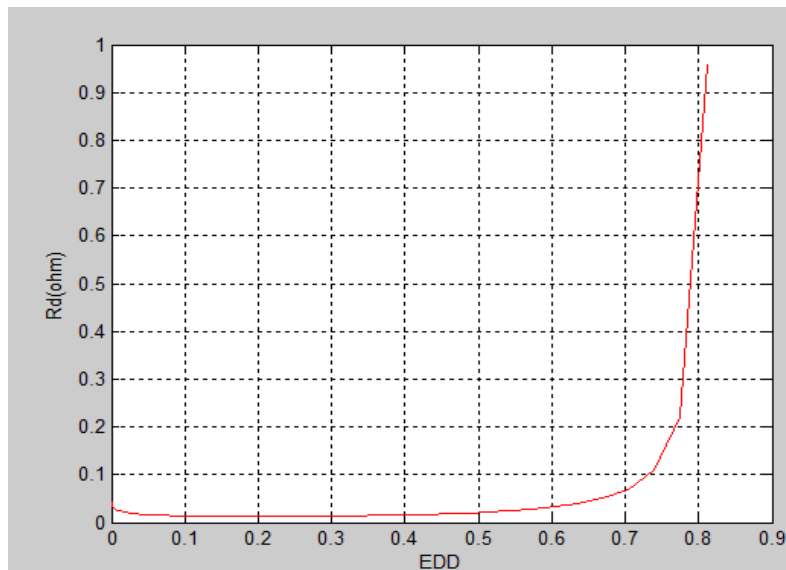
### ▪ La résistance

Ces deux figures (III.7) et (III.8) montrent l'évolution de deux résistances de charge et de décharge de la batterie en fonction de l'état de charge et de décharge, et également la température.

Le statut de charge affecte la résistance interne de la batterie de sorte que plus elle est proche de la charge complète, plus elle sera importante.



**Figure III.7** Résistance de la batterie en charge.



**Figure III.8** Résistance de batterie en décharge.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la simulation du comportement de la batterie à l'aide d'un modèle de CIEMAT et permis de déterminer l'état de charge de la tension en charge et en décharge en plus de la résistance interne.

Résumer les différents phénomènes qui apparaissent à l'intérieur de la batterie n'est pas chose aisée, et on peut dire plutôt compliqué.

Les résultats obtenus montrent que le modèle est précis et peut être utilisé dans la simulation du fonctionnement des batteries.



*Chapitre IV :*  
*Modélisation et*  
*dimensionnement du*  
*système photovoltaïque*  
*avec batterie de*  
*stockage*

# Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

## IV.1 Introduction

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système photovoltaïque avec stockage, nous nous proposons de le modéliser puis de le simuler à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink.[1]

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter le modèle du panneau choisi, ensuite nous présentons brièvement l'architecture de notre système photovoltaïque. Dans la deuxième partie, nous faisons un petit dimensionnement du système que nous modélisons, et nous terminons le chapitre par simulation du système globale.

## IV.2 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

Il existe de nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, notre choix s'est porté sur un modèle simplifié à cinq paramètres ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $R_s$ ), appelé modèle à une diode, permettant de tenir compte de l'influence de la température et de l'ensoleillement. Il peut être décrit d'une manière simple comme une source de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition à cela, le modèle tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série  $R_s$  mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance parallèle  $R_{sh}$ . Le modèle du générateur est donné sur la figure ci-dessous :[1] [32]

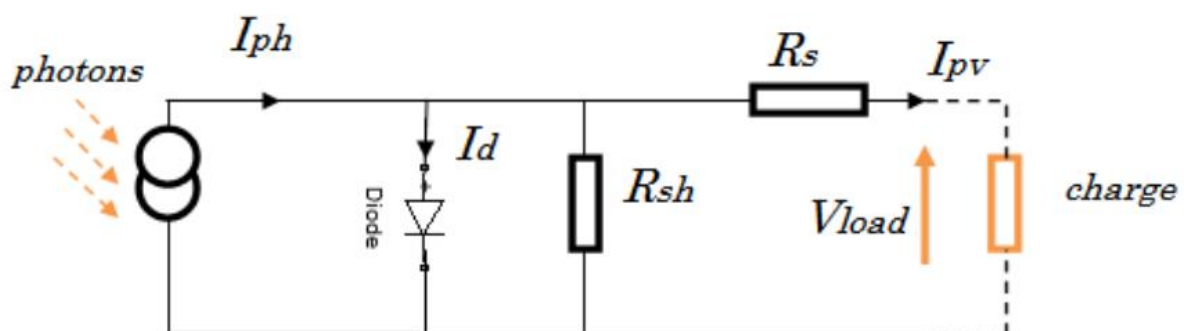


Figure IV.1 Schéma équivalent du générateur photovoltaïque. [32]

L'association série/parallèle de  $n_s$ ,  $n_p$  cellules photovoltaïques élémentaires détermine le module photovoltaïque.

$n_s$  étant le nombre de cellules en série sur une branche et  $n_p$  le nombre de branches en parallèle.

## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

---

Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le module photovoltaïque qui fournit un courant  $I_{pv}$  sous une tension  $V_{pv}$ , Avec :

$$I_{pv} = n_p \cdot I_{pv} \quad \text{et} \quad V_{pv} = n_s \cdot V_{pv}$$

A partir du schéma électrique équivalent de la figure (IV.1) on déduit l'expression du courant du module  $I_{pv}$  :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (IV.1)$$

Avec :

$I_{pv}$  : courant du module.

$I_{ph}$  : photo courant.

$I_D$  : courant de la diode.

$I_{sh}$  : courant de la résistance shunt.

Il est à noter que l'équation (IV.1) n'est applicable que dans les conditions standard du fonctionnement ( $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ).

Le courant passant par la résistance  $R_{sh}$  est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (IV.2)$$

$V_d$  : Tension aux bornes de la diode;

$R_{sh}$  : Résistance Parallèle.

Le courant de la jonction  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_s (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1) \quad (IV.3)$$

Avec :

$I_s$  : Courant de Saturation ;

$V_{th}$  : Tension thermique

$$\text{Avec : } V_{th} = \frac{A \cdot K \cdot T_{mod}}{q} \quad (IV.4)$$

$T_{mod}$  : Température de fonctionnement de la cellule ;

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

$K$  : la constante de Boltzmann ( $1,3854 \cdot 10^{-23}\text{J/K}$ ) ;

$q$  : Charge électrique élémentaire ( $1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$ ).

$$T_{mod} = T_c + T_{ref} + G \left( \frac{NOCT-20}{800} \right) \quad (IV.5)$$

$T_c$  : Température ambiante;

## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

$T_{ref}$ : Température de référence [K];

G : Éclairement.

Le courant de saturation dépend de la température, son expression est sous la forme :

$$I_s = I_{os} \left( \frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q.E_g}{A.K} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad (IV.6)$$

$I_{os}$ : Le courant de court-circuit de la cellule ;

$T_r$ : Température référence de la cellule;

$E_g$ : Énergie de seuil.

Avec NOCT étant Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (Data-Sheet).

La tension  $V_d$  est donnée par :

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (IV.7)$$

Le photon-courant est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température. Son expression est la suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} \quad (IV.8)$$

$I_{cc}$  : Courant de court de circuit ;

$K_i$ : Coefficient de la température de  $I_{pv}$  ;

$G_0$ :Éclairement pour les STC.

En remplaçant dans (IV.1) les équations (IV.2), (IV.3) et (IV.8), nous obtenons :

$$I_{pv} = [I_{cc} + k_i(T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} - I_s \left( e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (IV.9)$$

Ce modèle qui permet de tenir compte de l'influence de la température et de l'ensoleillement a été implémenté sous Matlab Simulink, il a comme paramètres d'entrée : l'ensoleillement et la température.

### IV. 3 Simulation du modèle de générateur PV

#### IV. 3.1 Simulation dans les conditions STC

Les figures suivantes représentent les caractéristiques du module photovoltaïque dans la condition de fonctionnement standard ( $G=1000W/m^2$ ,  $T_c=25^\circ C$ ), les grandeurs intéressantes sont la tension  $V_{oc}$ , le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , et la puissance du panneau. La puissance du panneau utilisé est de 110 W. Les paramètres du panneau sont donnés en Annexe.

# Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

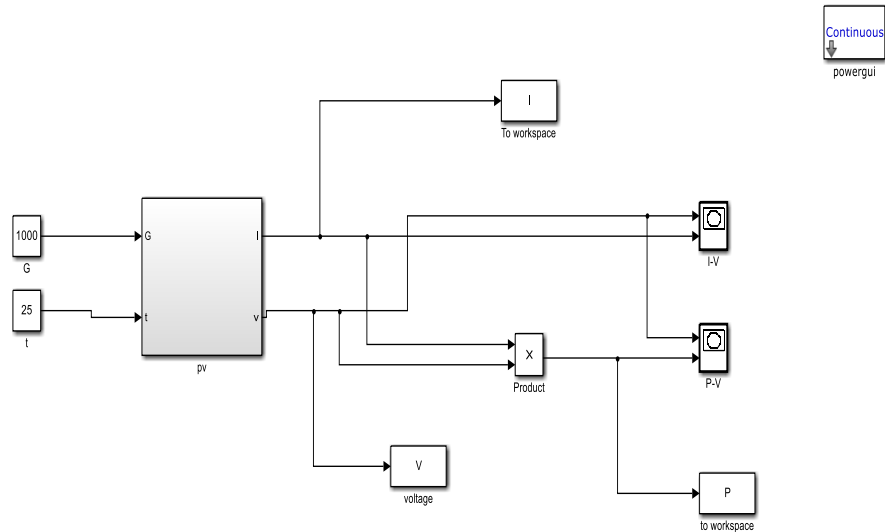


Figure IV.2 Schéma bloc du GPV.

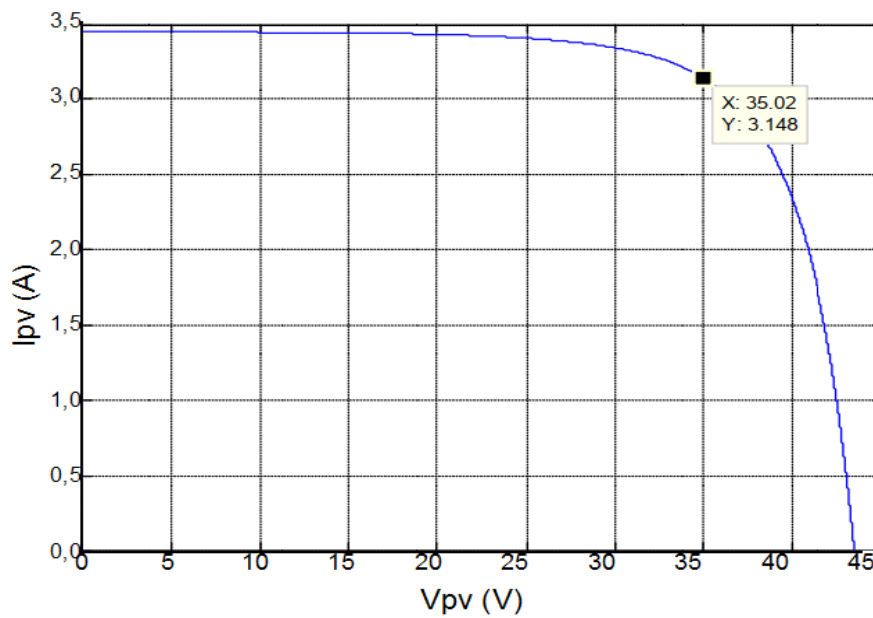


Figure IV.3 Caractéristique courant –tension du générateur photovoltaïque pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ .

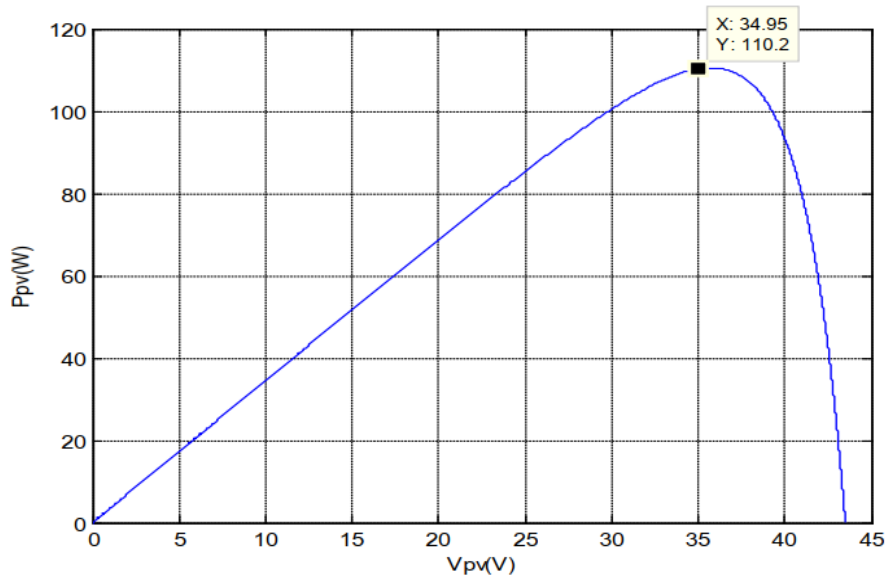


Figure IV.4 Caractéristique puissance –tension du générateur photovoltaïque pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## IV. 3.2 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque

### a. Influence de l'irradiation

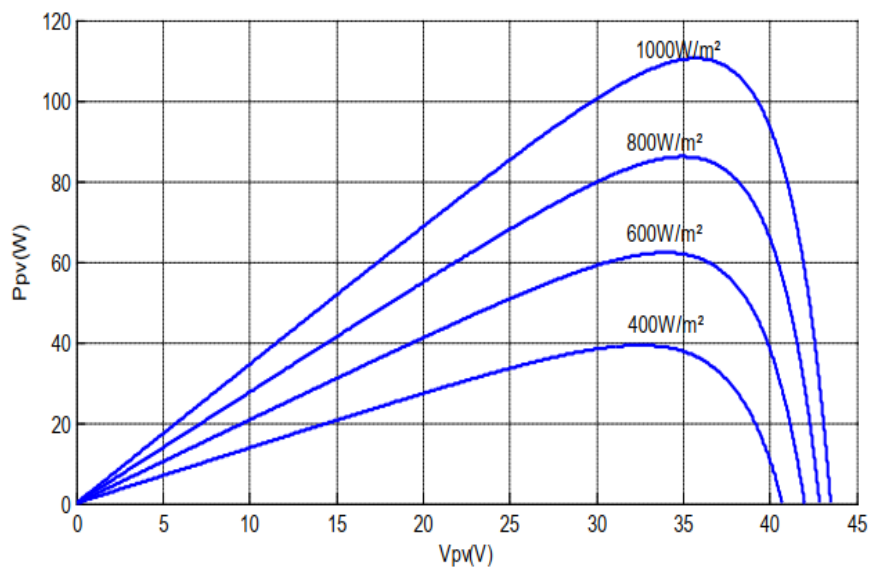
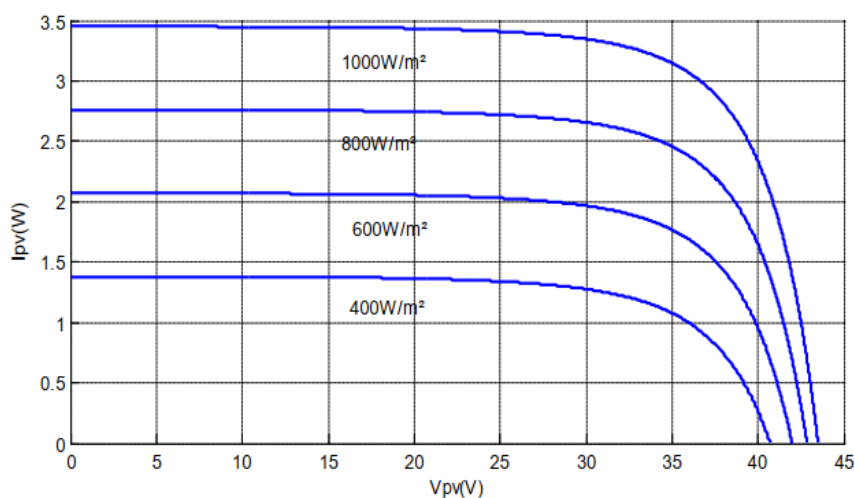


Figure IV.5 Caractéristique puissance tension du générateur pour différent niveau d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) et  $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

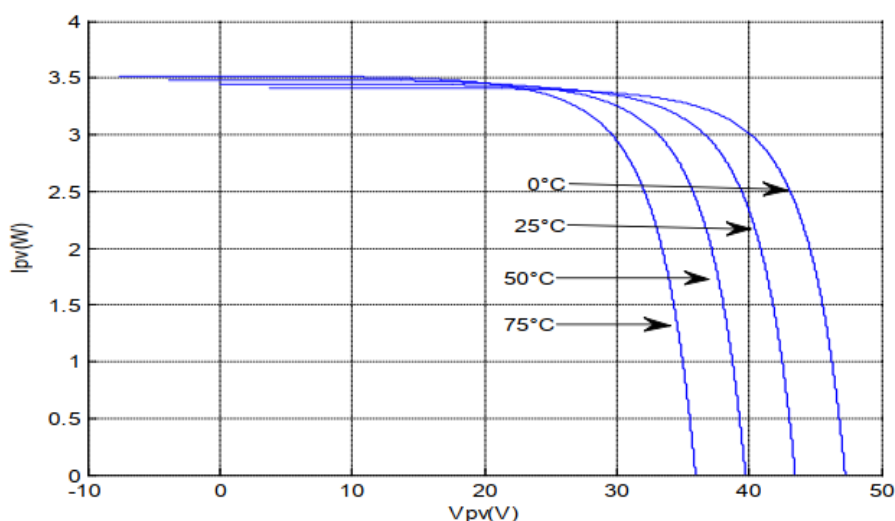


**Figure IV.6** Caractéristique courant tension du générateur pour différent niveau d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000 W/m^2$ ) et  $T_c=25^\circ C$ .

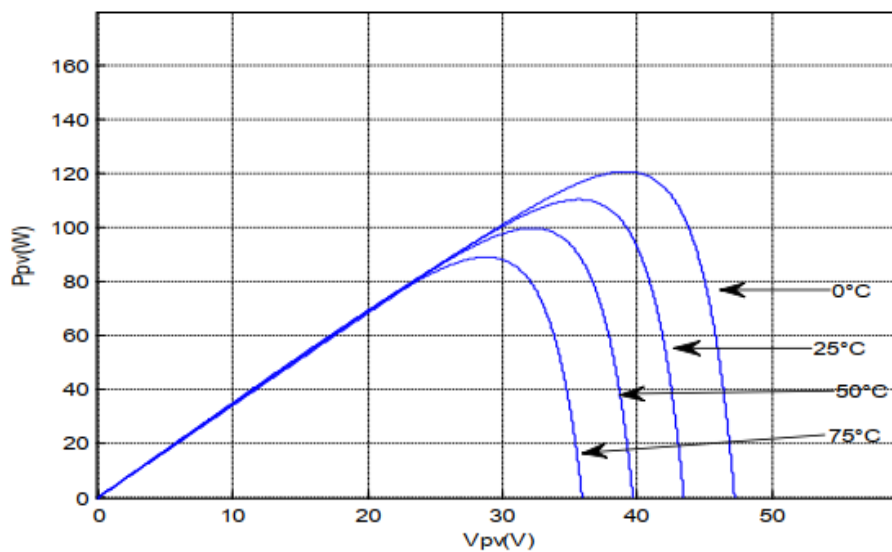
Pour voir l'influence de l'ensoleillement, nous avons tracé les caractéristiques  $I$ - $f(V)$  et  $P$ - $f(V)$  pour différentes valeurs d'ensoleillements mais à une température constante  $T_c=25^\circ C$ .

L'augmentation de l'ensoleillement provoque une augmentation du courant ou le générateur fonctionne comme un générateur de courants, mais il 'y a une légère augmentation pour la tension en circuit ouvert.

### b. Influence de la température



**Figure IV.7** Caractéristique courant tension du panneau PV pour une variation de température ( $T_c=0, 25, 50, 75^\circ C$ ) et  $G = 1000 W/m^2$ .



**Figure IV.8** Caractéristique puissance tension du panneau PV pour une variation de température ( $T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et  $G = 1000\text{W/m}^2$

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques I-V et P-V pour différents niveaux de température mais à un ensoleillement constant de  $E=1000\text{ w/m}^2$ .

Les résultats de simulation sont présentés sur la figure (IV.7). Ces résultats montrent que cette caractéristique est influencée par la température, l'augmentation de la température fait augmenter le courant et diminuer la tension.

Il est à noter que le courant varie peu avec la température tandis que la tension est beaucoup plus influencée.

La température a donc une influence non négligeable sur la puissance du générateur photovoltaïque.

Une diminution de la puissance peut être remarquée quand la température augmente, et cela est remarquable dans la figure (IV.8).

### IV. 4 Présentation du système étudié

Le système photovoltaïque (PV) autonome représenté sur la figure (IV.9) est composé dans son ensemble de :

- ❖ générateur photovoltaïque (panneaux photovoltaïques).
- ❖ moyen de stockage électrochimique (batteries).
- ❖ convertisseur continu/continu (DC/DC) assure une régulation de la tension de sortie aux bornes du bus continu, sachant que la tension du bus est imposée par la tension des batteries. Et la poursuite du point de puissance maximum.



## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

- ❖ module de supervision pour la charge et la décharge des batteries.
- ❖ charge modélisée par le profil de puissance.

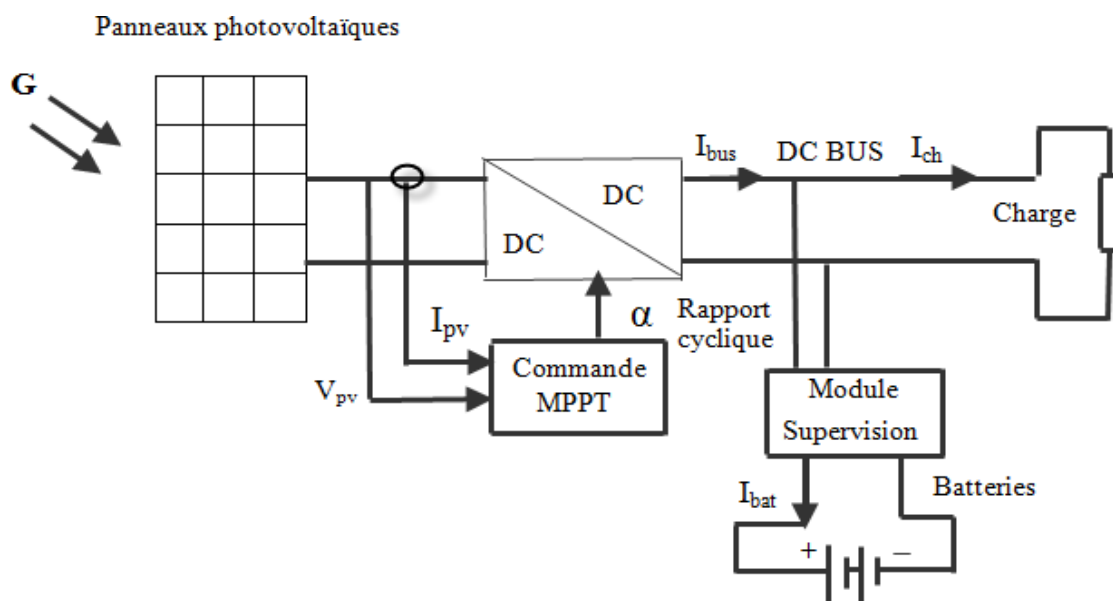


Figure IV.9 Synoptique du système étudié.

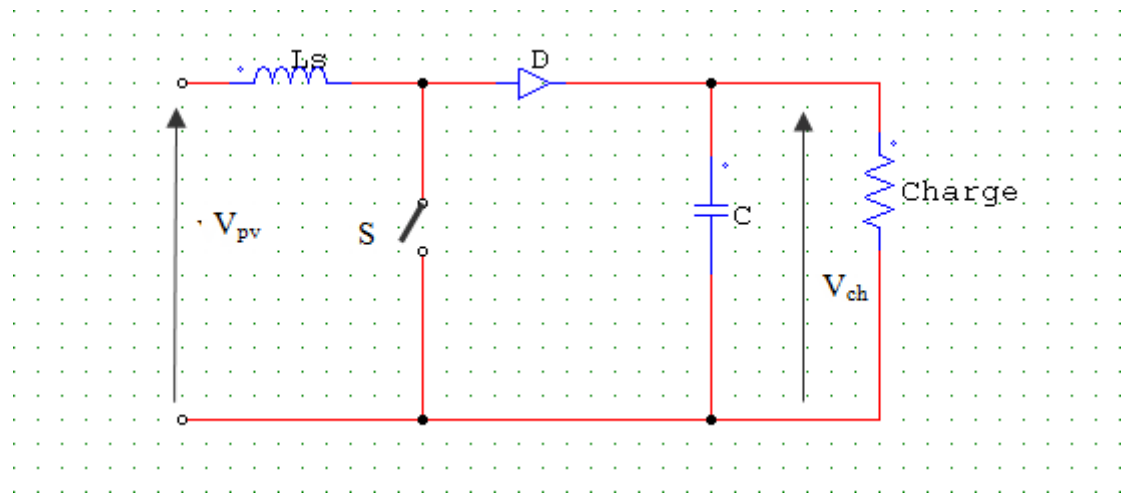
### IV.4.1 Le convertisseur d'énergie (DC/DC)

Le système PV que nous voulons modéliser, comprend un hacheur boost dédié à la conversion de l'énergie provenant des panneaux PV, pour adapter la tension des panneaux à celle de la charge et de la batterie.

Le générateur photovoltaïque, constitué de 5 panneaux PV, fournit une tension de 35V au point de puissance maximale. Le hacheur boost a donc pour rôle d'élever la tension des panneaux à la valeur de la tension de bus continu DC (charge) qui est de 36 V dans notre cas.

Dans cette partie, nous considérons qu'un dispositif MPPT est intégré à la commande de le hacheur et permet de maintenir la tension des panneaux PV à la tension  $V_{mpp}$  (tension au point de puissance maximale).

En mode de conduction continue, quand l'interrupteur S est fermé, la diode D ne voit passeraucun courant,  $V_{in}$  est alors appliqué à travers l'inductance L. Lorsque S s'ouvre, le courant accumulé dans l'inductance passe par D en direction de la charge R, entraînant ainsi une tension de sortie  $V_{out}$  supérieure à la tension d'entrée  $V_{in}$ .



**Figure IV.10** Hacheur boost.

Les équations électriques de le hacheur boost s'écrivent :

$$L_s \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - (1 - \alpha)V_{ch} \quad (IV.12)$$

$$V_{ch} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (IV.13)$$

$\alpha$  : rapport cyclique du hacheur.

#### **IV4.2 Recherche du point de puissance maximale**

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation est très importante. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. [1]

Dans notre cas, on a opté pour la méthode P&O (perturb and observe) qui est largement utilisée, elle se base sur le principe suivant :

On mesure les caractéristiques (puissance et tension) des panneaux PV puis on induit une petite perturbation sur la tension afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

Comme indiqué précédemment, la tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est

## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé, on présente ci-dessous le diagramme de l'algorithme P&O. [32]

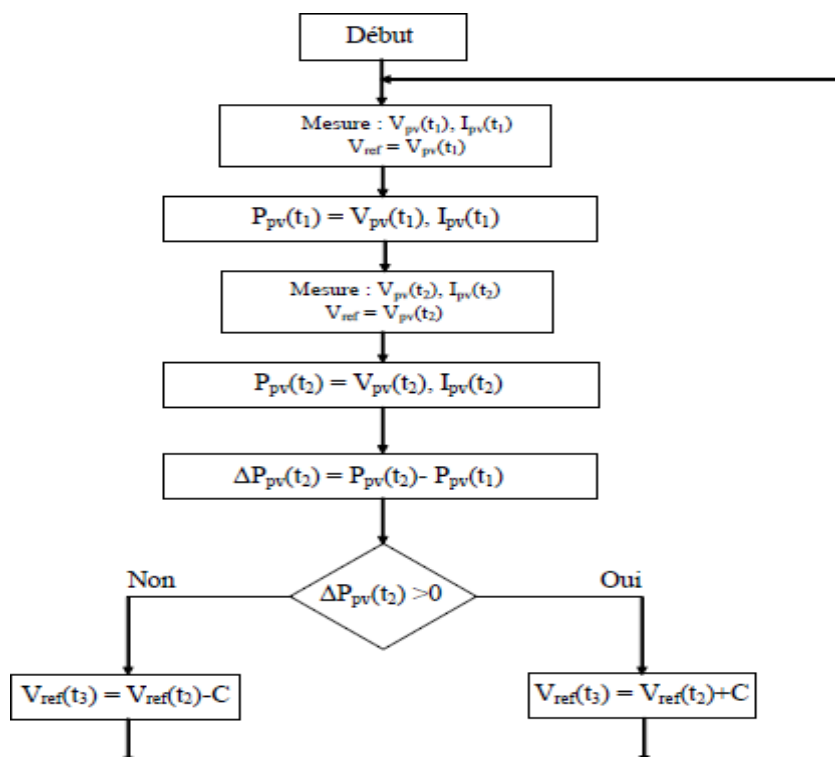


Figure IV.11 Diagramme de l'algorithme P&O. [32]

La méthode P&O présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du MPP qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du MPP doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du MPP. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation.[1]

### IV. 4.3 Le module de supervision

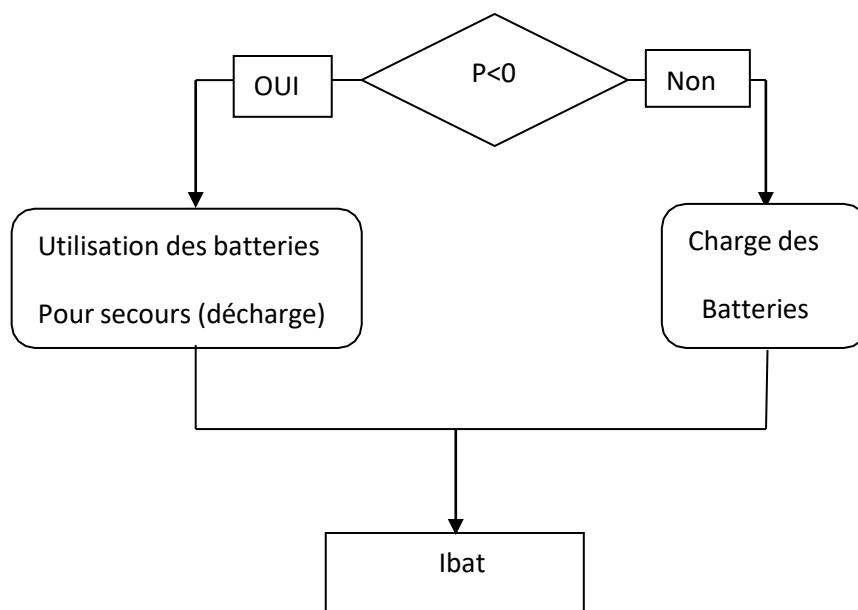
Dans un système photovoltaïque il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part. [1]

A cet effet, le module de supervision sera chargé de gérer l'énergie provenant des panneaux PV et du stockage suivant la demande du consommateur qui est la charge dans notre cas.

## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

Le système de gestion d'énergie, est basé sur deux scenarios :

- ✓ Alimentation de la charge et du stockage par les panneaux PV si énergie solaire suffisante.
- ✓ Alimentation de la charge par les panneaux PV et le stockage si énergie solaire insuffisante.
- ✓ On adopte la convention que lorsque le courant est fourni par les batteries, alors il est négatif et lorsque elle se charge le courant est positif.
- ✓ On pose :  $P = P_{pv} - P_{ch}$



**Figure IV.12** Principe de gestion de l'énergie par le module de supervision.

La tension de la charge est égale à celle aux bornes des batteries et du bus continu.

$$U_{bat} = V_{ch} = V_{bus}.$$

### IV.5 Dimensionnement du système PV

D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes :

- ✓ évaluation des besoins énergétiques.
- ✓ dimensionnement des panneaux PV.
- ✓ dimensionnement du stockage.[1]

Notre système sera dimensionné pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation

## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

---

d'une charge résistive, évaluée à 800 Wh (400W).

Le dimensionnement des panneaux PV se fait suivant la formule suivante :

$$P_{pvtot} = \frac{B_j}{E_s C_p} \quad (IV. 14)$$

$$N_{pv} = \frac{P_{pv,tot}}{P_{pv,uni}} \quad (IV. 15)$$

Avec :

$P_{pv,tot}$  : puissance totale des panneaux PV [W].

$B_j$  : les besoins énergétiques journaliers [Wh].

$E_s$  : rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable :  $E_s$  [kWh/m<sup>2</sup>/j].

$C_p$  : coefficient de perte.

$N_{pv}$  : nombre de panneaux PV.

$P_{pv,uni}$  : puissance d'un panneau PV.

La détermination de la taille des batteries se fait comme suit :

$$C_{batt} = \frac{B_i \cdot Aut}{U_{batt} P_{DD} \eta_b} \quad (IV. 16)$$

Avec :

$C_{batt}$  : la capacité nominale des batteries [Ah].

$Aut$  : le nombre de jour d'autonomie.

$U_{batt}$  : la tension nominale des batteries [V].

$P_{DD}$  la profondeur de décharge des batteries.

$\eta_b$  : rendement de la batterie.

D'après les calculs, les batteries doivent ainsi avoir une capacité de 92 Ah. On utilise alors trois batteries de (12V, 92Ah), montées en série.

Pour assurer la fourniture d'énergie électrique à la charge, les panneaux PV devront avoir une puissance totale de 550W (5 panneaux de 110W montés en parallèles) et le stockage, une capacité nominale de 92Ah.

## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

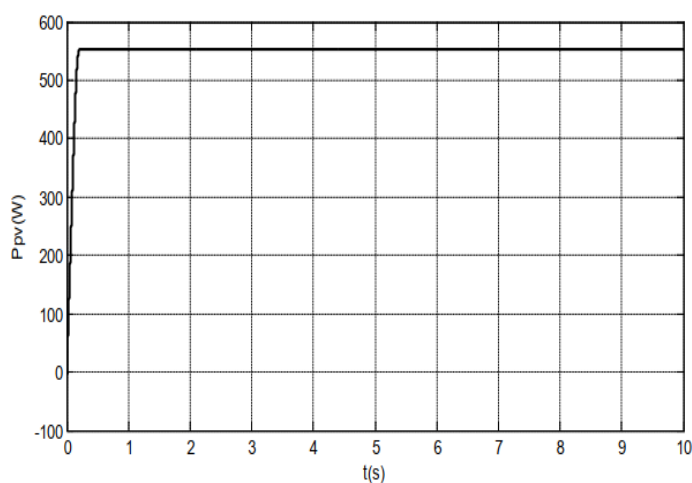
Besoins énergétiques journaliers : $B_j$ [Wh]	800
Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable : $E_s$ [kWh/m <sup>2</sup> /j]	2.2
Tension du bus continu : $U_{batt}$ [V]	36
Nombre de jours d'autonomie : $Aut$	3
Rendement électrique des batteries : $\eta_b$	0.9
Coefficient de perte: $C_p$	0.65
Profondeur de décharge des batteries : $P_{DD}$	0.8
Puissance des panneaux PV (W)	550
Capacité nominale des batteries (Ah)	92

**Tableau IV.1** Caractéristiques du système PV étudié.

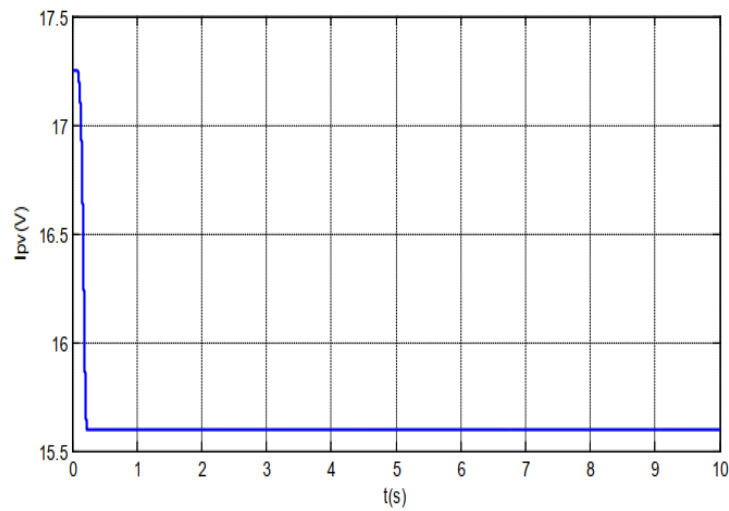
### IV. 6 Résultats de simulation

#### IV.6.1 Simulation dans les conditions STC

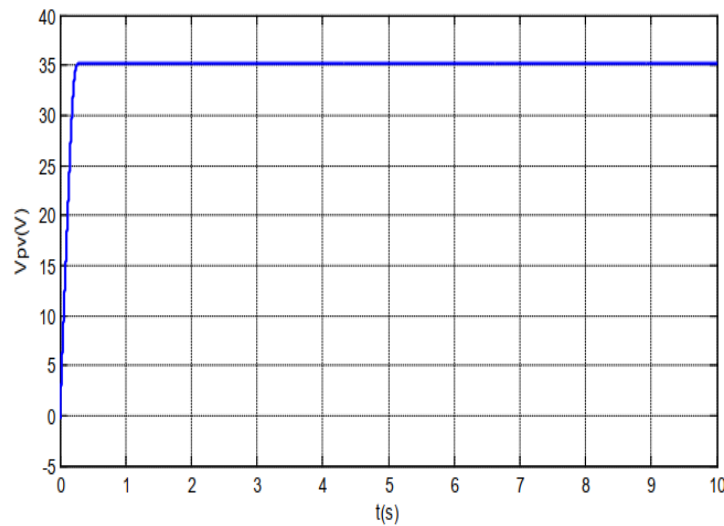
Afin de valider notre travail, le système photovoltaïque autonome fonctionnant à puissance maximale assurant le stockage d'énergie et la régulation de tension de sortie a été simulé par un programme Simulink que nous avons réalisé en utilisant la plateforme Matlab/Simulink



**Figure IV.13** Puissance des panneaux PV en fonction du temps.



**Figure IV.14** Courant des panneaux PV en fonction du temps.

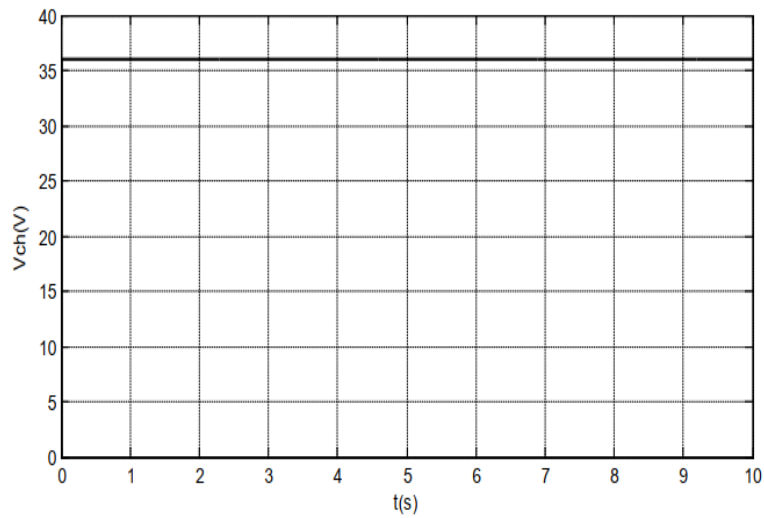


**Figure IV.15** Tension des panneaux PV en fonction du temps.

Grâce à la commande de recherche de puissance maximum (MPPT pour Maximum Power Point Tracking), notre système fonctionne au point de puissance maximale(MPP).

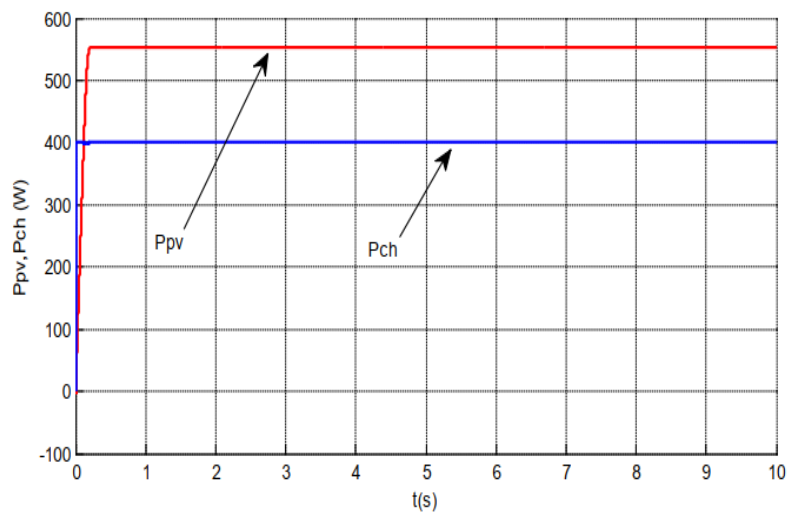
## Chapitre IV : Modélisation et dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie de stockage

---



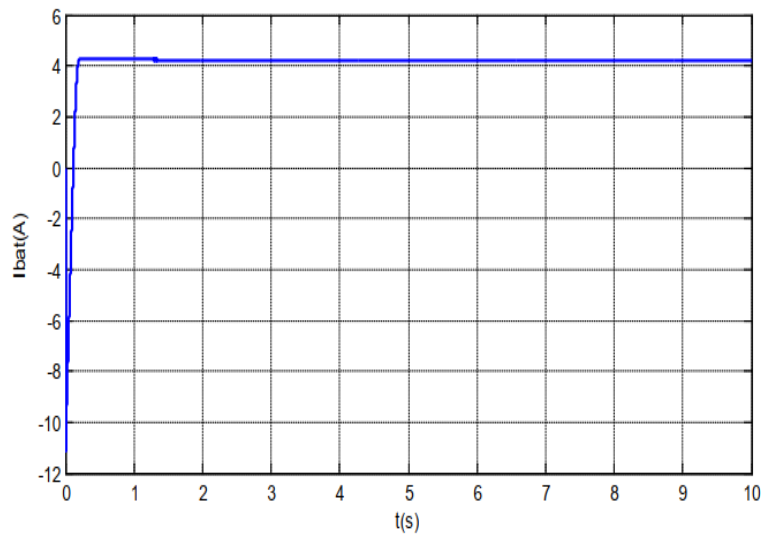
**Figure IV.16** Tension de charge en fonction du temps.

On remarque que la tension de charge reste stabilisée grâce au convertisseur DC/DC qui maintient la tension de bus (charge) à la valeur de 36V.



**Figure IV.17** Puissance des panneaux PV et charge en fonction du temps.





**Figure IV.18** Courant des batteries en fonction du temps.

Initialement, la batterie se décharge à travers la charge  $R_{ch}$ , jusqu'à ce que la puissance des panneaux photovoltaïques  $P_{pv}$  devienne supérieure ou égale à celle de la charge. A ce moment la batterie se met en charge via le bus continu.

### IV.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, un modèle de panneau PV appelé modèle à une diode qui tient compte de la variation d'ensoleillement ainsi que de celle de la température. Pour valider ce modèle nous l'avons simulé en utilisant le modèle mathématique déjà décrit auparavant afin de déterminer ses différentes caractéristiques.

Ensuite nous avons proposé et dimensionné un système photovoltaïque autonome fonctionnant en MPPT, assurant le stockage d'énergie électrique au moyen de batteries qui maintiennent la continuité du transfert d'énergie à la charge surtout lorsque conditions STC.

Les résultats obtenus montrent que le système proposé maintient une tension constante aux bornes de la charge.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude d'un système photovoltaïque énergétiquement autonome couplé à des batteries de stockage assurant une disponibilité d'énergie de façon continue. Ce système fonctionne à sa puissance optimale avec l'utilisation d'un convertisseur DC/DC commandé par MPPT.

Nous avons rappelé dans le premier chapitre le principe de la conversion photovoltaïque, quelques généralités sur la production de l'énergie photovoltaïque, et les différents systèmes de stockage d'énergie électrique, et en particulier les batteries et leur principe de fonctionnement.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre les caractéristiques des batteries, ainsi que les différents modèles de batteries existant dans la littérature.

Dans le troisième chapitre un modèle de batterie au plomb (modèle CIEMAT). Ce modèle tient compte de l'influence de la température et l'état de charge sur le comportement de la batterie a été étudié où nous avons montré ses équations, et quelques résultats de simulation.

Le dernier chapitre a été consacré à la présentation du modèle du générateur photovoltaïque, où on a déterminé ses différentes caractéristiques. On s'est ensuite intéressé à l'étude et dimensionnement du système photovoltaïque fonctionnant en MPPT, avec batteries de stockage afin de répondre à l'exigence de puissance demandée par la charge dans des conditions défavorables.

Enfin nous suggérons comme perspectives d'améliorer nos résultats par l'insertion d'un système de stockage hybride (batteries et super capacités) , et l'insertion d'un contrôleur d'état de charge afin de garantir une meilleure flexibilité et gestion des flux d'énergies au sein du système, et garantir une longue durée de vie du système de stockage.

# *Annexes*

## Annexes

---

### Paramètres du modèle CIEMAT utilisé

$n_b$	24
$C_{10}$	92
$I_{10}$	9.2

### Paramètres d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24

Paramètres	valeurs
Puissance maximale du panneau $P_{mpp}$	110 W
Courant au point de puissance maximale $I_{mpp}$	3.15 A
Tension au point de puissance maximale $V_{mpp}$	35 V
Courant de court-circuit $I_{sc}$	3.45 A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{sc}$ ( $\alpha_{sc}$ )	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{oc}$ ( $\beta_{oc}$ )	-152 mV/°C

### Paramètres de l'hacheur

$L_s$	0.66e-5
C	900e-5

*Références Bibliographie*

## Références Bibliographie

---

- [1] M.makhlouf, « modélisation et optimisation de systèmes de production d'énergies renouvelables couplés au réseau », thèse doctorat, université mentouri de Constantine, 2012
- [2] B.BENMAHREZ, F.OUDIHAT, « étude et dimensionnement d'une alimentation solaire pour les locaux administratifs de la société IFRI", mémoire d'ingénieur, université de Bejaia, 2010.
- [3] S.ABADA, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge photovoltaïque pour la recharger d'une batterie avec un convertisseur sepic », université Laval .Québec ,2011
- [4] K.AMARA, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension », thèse doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [5] F. Hananou et A. Rouabah, 'Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque', master, Université KasdiMerbah–Ouargla, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique 2014
- [6]. Hallali Kamālia, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative", mémoire de Magister en Electronique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2012).
- [7]. Salam Fatah, «Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnecté au réseau électrique", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif-UFAS, (2011).
- [8]. M.N. José 'Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible'.Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [9]. T.S. Akassewa 'Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome'.Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

## Références Bibliographie

---

- [10]. H. Binis, « Contribution à la modélisation du problème de « Hot Spot » dans les modules solaire Photovoltaïque occultées », thèse de magistère, Constantine, 2008.
- [11]. C. Delorme « Revue internationale d'héliotechnique », 1997
- [12]. Corinne ALONSO «Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie». UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III.) 2003.
- [13]. M.Djeroui Salim « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » université Abbes Farhat de Sétif 2011.
- [14].M.BessemAbdelghani«Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque» université Badji Mokhtar- Annaba 2018.
- [15].B. Flèche & D. Delagnes, Energie solaire photovoltaïque, juin 2007.
- [16].BidiManel «Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures» universitéde Msila, 26 juin 2019.
- [17].O. Nichapour 'simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières inter digités', Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [18].Misoum Mohammed «Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie» université HassibaBenbouali de CHLEF,11décembre 2011.
- [19].A.Benayad, « Modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de socomputing », mémoire de Magister, département de Génie Electrique, Université de Béjaia2011.
- [20].BENSACI Wafa, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire master, université kasdiMarbah Ouargla, 2012.
- [21]. R. Jimmy, Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.



## Références Bibliographiques

---

- [22] Abbad Imane «Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairage) sur le rendement d'une cellule solaire», Mémoire de Master, université Larbi Ben Mhidi de Oum El Bouaghi, 2019.
- [23]. Mohamad Mimoun, "Etude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies", Mémoire de Magister, Université du Québec à Trois Rivières, Canada, (2016).
- [24]. S. Petibon « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [25]. T.F. El Shatter & M.T. El Hagry "Sensitivity Analysis of the Photovoltaic Model Parameters", IEEE, Cir and Syst, Vol. 2, pp. 914 - 917, (1999).
- [26]. chapitre 1 «Généralités sur les technologies des cellules solaires», dspace.univ-tlemcen.dz.
- [27]. Serge Poignant - L'énergie photovoltaïque, Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [28]. T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en développement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME).
- [29] Taraft Saci, « Etude Du Stockage Inertiel D'énergie Dans Une Chaîne De Conversion Eolienne A Vitesse Variable Basée Sur Une Machine Asynchrone A Double Alimentation ». Université A/MIRA De Bejaïa, Mémoire De Magister Soutenu Le 14/05/2008.
- [30] Gabriel-Octavian CIMUCA, « Système Inertiel De Stockage D'énergies Associe A Des Générateurs Eoliens ». Ecole Nationale Supérieure d'Arts Et Métiers Centre De Lille, Thèse De Doctorat Soutenu En 2005.
- [31] Fabrice Delfosse, « Détermination De L'état De Charge Des Batteries D'un Véhicule Electrique ». Université De Liège, Mémoire D'ingénieur Année Académique 1997-1998.

## Références Bibliographiques

---

- [32] B. Multon, H. Ben Ahmed, « Le Stockage Stationnaire D'énergie Electrique : Pourquoi Et Comment ? », Revue IEEE., n°48, mars 2007, pp. 18-29.
- [33] B. MULTON, J. RUER., « Stocker L'électricité : Oui, C'est Indispensable Et C'est Possible. Pourquoi, Ou, Comment ? », Publication ECRIN En Contribution Au Débat National Sur L'énergie, Avril 2003.
- [34]Loïc BOULON, « Modélisation Multiphasique Des Eléments De Stockage Et De Conversion D'énergies Pour Les Véhicules Electriques Hybrides. Approche Systémique Pour La Gestion D'énergie »Université De Franche-Comté, Thèse De Doctorat Soutenu Le 3/7/2009.
- [35] Guillaume Fontès, « Modélisation Et Caractérisation De La Pile PEM Pour L'Etude Des Interactions Avec Les Convertisseurs Statiques ». Institut National Polytechnique De Toulouse, Thèse De Doctorat Soutenu Le 16/08/ 2005.
- [36] J.Hladik,« Livre : Accumulateurs Electrique ». 1ere Edition :1er Trimestre, Presses Universités De France 1977.
- [37] Guillaume Dillenseger, « Caractérisation De Nouveaux Modes De Maintien En Charge Pour Batteries Stationnaires De Secours». Université De Montpellier II thèse De Doctorat Soutenu Le 14/12/2009.
- [38] Olivier GERGAUD, «Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur ». Ecole Normale Supérieure De Cachan, thèse De Doctorat Soutenu Le 9 Décembre 2002.
- [39] Maxime Montaru, « Contribution A L'évaluation Du Vieillissement Des Batteries De Puissance Utilisées Dans Les Véhicules Hybrides Selon Leurs Usages». Institut Polytechnique De Grenoble, thèse De Doctorat Soutenu Le 06 / 07 / 2009.
- [40] Martin Coleman, Chi Kwan Lee, Chunbo Zhu, and William Gerard Hurley,« State-of- Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid And Lithium-Ion Batteries». Revue IEEE. VOL. 54, NO. 5, Octobre 2007

## Références Bibliographie

---

- [41] Dinh Vinh Do, «Diagnostic De Batteries Lithium Ion Dans Des Applications Embarquées», Université De Technologie De Compiègne, Thèse De Doctorat Soutenue Le 5 Juillet 2010.
- [42] Baskar Vairamohan, «STATE OF CHARGE ESTIMATION FOR BATTERIES», Université De Tennessee, Knoxville, Memoire De Master Soutenue En Décembre 2002.
- [43] Boussekine Abdeghani,Guermouche Nassim, «Contribution A L'étude Des Systèmes De  
Pompage Photovoltaïque», Université De Bejaïa, Mémoire D'ingénieure D'état Soutenue En 2010.
- [44] H.L. Chan, D. Sutanto ,« A New Battery Model For Use With Battery Energy Storage Systems And Electric Vehicles Power Systems», Université Polytechnique De Hong Kong, Revue IEEE, 0-7803-5935-6/00/\$10.00 (C) 2000.
- [45] Siavash Zoroofi,« Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems».Université De Technologie De Chalmers Suède, Mémoire de master soutenu en 2008.
- [46] A. Ould Mohamed Yahya , A. Ould Mahmoud Et I. Youm , « Modélisation D'un Système De Stockage Intégré Dans Un Système Hybride (PV / Eolien / Diesel) », Revue Des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214.
- [47] Mohamed Karim Abdennadher, « Etude Et Elaboration D'un Système De Maintenance Prédictive Pour Les Condensateurs Et Les Batteries Utilisés Dans Les Alimentations Sans Interruptions », Université Claude Bernard Lyon 1, Thèse De Doctorat Soutenue Le 25/06/2010.

## ملخص

إن إنتاج الطاقة بواسطة الأنظمة الكهروضوئية متقلب للغاية ويعتمد بشكل كبير على الظروف الجوية. هذا هو السبب في أنه من الضروري التفكير في تخزين هذه الطاقة لاستعادتها أثناء الليل والأيام "بدون شمس" ولتعديل نظام الكهروضوئية بشكل أفضل عن طريق تثبيت جهد النظام. في هذه الرسالة سيتم تقديم دراسة نظرية حول الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، وكذلك نظام التخزين الكهروكيميائي باستخدام بطارية مركم ، والجزء الثاني عبارة عن نمذجة للعناصر المختلفة التي تشكل النظام. وأخيرًا محاكاة تحت بيئة برمجيات MATLAB / SIMULINK للهيكل المقترح.

## الكلمات المفتاحية:

الطاقة الشمسية، تخزين الطاقة، المروحية، بطارية التخزين.

## Résumé :

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi il faut penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours « sans soleil » et pour mieux adapter le système PV en fixant la tension de système. Dans ce mémoire, une étude théorique sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que le système de stockage électrochimique à l'aide de batterie d'accumulateur sera présenté. La deuxième partie est une modélisation des différents éléments qui constituent le système. Et enfin une simulation sous environnement du Logiciel MATLAB /SIMULINK de la structure proposée.

## Mots clés :

Énergie solaire, stockage de l'énergie, hacheur, batterie d'accumulateur.

## Abstract:

The production of energy by photovoltaic systems is very fluctuating and depends greatly on weather conditions. This is why it is necessary to think of storing this energy to restore it during the night and the days "without sun" and to better adapt the PV system by fixing the voltage of the system. In this thesis, a theoretical study on photovoltaic solar energy, as well as the electrochemical storage system using an accumulator battery will be presented. The second part is a modeling of the different elements that constitute the system. And finally a simulation under MATLAB / SIMULINK software environment of the proposed structure.

**Key words:** Solar energy, energy storage, chopper, accumulator battery.