

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

# MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergies Renouvelables**

*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

**Intitulé :**

---

## ETUDE D'UNE BATTERIE DE STOCKAGE DANS UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

---

**Présenté par :**

- Dahaoui Nor Djihane
- Gueabi Sihem

Soutenu le : 13/09/2020

Devant le Jury :

<b>Dr. Brahimi Mohamed</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. Taibi Ibrahim</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Dr. Khessam Medjdoub</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Examineur</b>

Naama – Algérie - 2020

## *DEDICACE*

*Je dédie ce travail à mes très chers parents qui ont tant prié pour ma réussite et Surtout ma chère mère qui m'a tant encouragé pendant toute ma carrière scolaire.*

*Et qui ont contribué à devenir ce que je suis.*

*À mes sœurs Fouzia, Naima, Omolkhir, Marwa et à toute la famille.*

*Mes collègues GUEABI SIHEM, Dounia, Leyla, Karima, Imane surtout mon ami proche Chouaib cela m'a beaucoup aidé*

*ET à tout la promotion*

*Master2 de l'année 2020*

*À mes très chers amis.*

*NOUR DJIAHEN*

## **DEDICACE**

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail tous ceux que me sont chers,*

***A MA CHÈRE MÈRE "Sayah Tabya"***

*Aucune Dédicace Ne Sourit Exprimer Mon Respect, Mon Amour Eternel Et Maa  
Considération Pour Les Sacrifices Que Vous Avez consenti Pour Mon Instruction Et Mon  
Bien Etre.*

***A LA MEMOIRE DE MON PÈRE "Geuabi tayeb"***

*Ce Travail Est Dédie A Mon Père, Décédé Trop Tôt, Qui M'a Toujours Poussé Et Motivé Dans  
Mes Etude.*

*Il Apprécie Cet Humble Geste Comme Preuve De Reconnaissance De La Part D'un Fille Qui  
qui l'invite toujours dans sa prière de miséricorde et de pardon. Que Dieu Tout-Puissant ait pitié  
de lui!*

***A MON FRÈRE "Lakhider" ET MES SŒURS" Nour Elhouda, Widad, Marwa et Douha"***

*Vous Avez Toujours Eté Présents Les Bon Conseils. Votre Affection Et Votre Soutien M'a Eté  
D'un Grande Secours Au Long De Ma Vie.*

***A MON MARI "Maarouf Habib"***

*Sans Ton Aide, Tes Conseils Et Tes Encouragements Ce Travail N'aurait Vu Le Jour. Que Dieu  
Réunisse Nos Chemins pour Un Long Commun Serein Et Que Ce Travail Soit Témoignage De  
Ma Reconnaissance Et De Mon Amour Sincère Et Fidèle.*

***A MES CHÈRES AMIES ET COLLEÈVES***

*A Tous Mes Amies "Imane Alioune, Dounia Khiteri , Dahaoui Nor Djihane " Qui N'ont Jamais  
Cessée De Me Soutenir.*

*Et A Tout La Promotion Master 2 De L'année 2020*

*SIHEM*

# REMERCIEMENTS

*S'il y a lieu de mettre des remerciements, nous remercierons le dieu le tout puissant.*

*Nous exprimons notre gratitude envers nos encadreurs Dr I. TAIBI Support, ses encouragements et ses conseils judicieux qui nous ont permis de faire ce travail.*

*De plus, nous voudrions le remercier de la confiance dont il nous fait preuve.*

*Nous remercions également Nos famille et nos amis qui donnent une force dans ce travail.*

*Un remerciement du fond du cœur à tous les membres de jury qui ont accepté de jury notre travail.*

*Remerciement particuliers à : tout l'encadrement de spécialité Electrotechnique, sans oublié nos professeurs sans exception.*

*Nous tenons à remercier toute personne ayant Participé de loin ou de près pour réaliser ce Modeste travail.*

---

---

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
LISTE DES FIGURES .....	IX
I.INTRODUCTION GENERALE .....	15
<b>CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES</b>	
I.1. Introduction.....	18
I.2. L'énergie photovoltaïque .....	18
I.2.1. Historique :.....	18
I.2.2. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque : .....	19
I.2.3. Le rendement PV : .....	20
I.2.4. Technologie utilisée :.....	21
I.2.5. Module photovoltaïque : .....	24
I.2.6. Types de systèmes photovoltaïques :.....	25
I.3. Gisement solaire : .....	28
I.3.1. Élément de photométrie .....	29
I.3.2. Le soleil comme un Corp noir : .....	30
I.3.3. Repérage et mesure d'ensoleillement : .....	31
I.3.4. Les cinq temps : .....	33
I.3.5. Appareils de mesure calibration : .....	35
I.4. Conclusion .....	38
<b>CHAPITRE II: MODELISATION ET CARACTERISATION DE LA BATTERIE</b>	
II.1. Introduction .....	40

---

II.2. Système de stockage .....	40
II.2.1. Critère de choix de la technologie de stockage en fonction des applications : .....	40
II.2.2. Technique de stockage à court terme .....	40
II.2.3. Technique de stockage à long terme.....	42
II.2.4. Les différents types de batterie .....	45
II.2.5. Grandeurs caractéristique des batteries .....	53
II.2.6. Durée de vie.....	55
II.3. Modelé électrique de la batterie : .....	56
II.3.1. Modèle R-C de la batterie :.....	56
II.3.2. Modèle de thévenin : .....	57
II.3.3. Modèle modifie de Thévenin :.....	57
II.3.4. Modèle dynamique linéaire de thévenin.....	58
II.3.5. Modèle dynamique non linéaire de thévenin :.....	59
II.3.6. Modèle de CIEMAT :.....	59
II.4. Conclusion.....	61
 <b>CHAPITRE III: SIMULATION DE MODELE DE CIEMAT DE LA BATTERIE</b>	
III.1. Introduction : .....	63
III.2. Le Modèle CIEMAT .....	63
III.3. Equation De Modèle CIEMAT .....	64
III.3.1. La Capacité.....	64
III.3.2. L'état de charge.....	65
III.3.3. Tension de batterie en régime de décharge .....	65
III.3.4. Tension de batterie en régime de charge.....	66

---

III.3.5. Résistance de la batterie .....	66
III.4. Résultat de simulation .....	67
III.4.1. Influence de la température .....	67
III.5. Conclusion.....	72
 <b>CHAPITRE IV: MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC BATTERIE DE STOCKAGE</b>	
IV.1. Introduction .....	74
IV.2. Modélisation et simulation du générateur Photovoltaïque.....	74
IV.2.1. Association en série .....	75
IV.2.2. Association en parallèle .....	75
IV.3. Simulation du modèle de générateur PV .....	78
IV.3.1. Simulation dans les conditions STC .....	78
IV.3.2. Groupement des panneaux photovoltaïques .....	82
IV.3.3. Dimensionnement du système PV avec stockage .....	83
IV.4. Conclusion .....	85
CONCLUSION GENERALE.....	86

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE I**

#### **GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES**

Tableau I-1: Les différents matériaux ont des rendements variables. [18] .....21

Tableau I-2: Potentiel d'Energie solaire en Algérie. [21] .....28

### **CHAPITRE II**

#### **MODELISATION ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES**

Tableau II-1: Caractéristiques de l'accumulateur Ni-Cd. [51] .....47

Tableau II -2 : Caractéristiques de l'accumulateur NiMH.....48

Tableau II-3: comparatif des différentes technologies de batteries. [46] .....50

Tableau II-4: Caractéristique d'un élément accumulateur Plomb-Acide. [43] .....51

---

---

**LISTE DES FIGURES**

**Figure (I-1) :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [9] .....20

**Figure (I-2) :** Cellule monocristalline. [14].....22

**Figure (I-3):** Cellule poly-cristalline. [14] .....23

**Figure (I-4) :** Cellule amorphe. [3] .....24

**Figure (I-5) :** Influence de T et  $R_s$  sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire. ....25

**Figure (I-6):** Exemple d'un système autonome. ....26

**Figure (I-7):** Système photovoltaïque raccordé au réseau. ....26

**Figure (I-8):** Système hybride solaire / éolien. ....27

**Figure (I-9) :** Brilliance du corps noir .....27

**Figure I-10) :** Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.....32

**Figure (I-11) :** L'Héliographe de Campbell– Stokes .....35

**Figure (I-12) :** Le pyranomètre.....36

**Figure (I-13) :** Le pyréliomètre.....37

**Figure (I-14) :** Un spectro-radiomètre.....37

**Figure (II-1) :** Stockage gravitaire hydraulique. [61] .....42

**Figure (II -2) :** Stockage mécanique par air comprimé.....43

**Figure (II-3) :** Principe de fonctionnement de la batterie. [38].....45

**Figure (II-4) :** Batterie nickel-cadmium. [36].....47

**Figure (II-5) :** Caractéristiques de l'accumulateur NiMH. [51].....48

**Figure (II -6) :** Constitution d'une batterie monobloc.....52

**Figure (II -7) :** Modèle R-C de la batterie.....56

**Figure (II-8) :** modèle de thévenin [51] .....57

---

<b>Figure (II-9) :</b> modèle modifié de Thévenin. [63] .....	57
<b>Figure (II-10) :</b> modèle dynamique linéaire de thévenin. [63] .....	58
<b>Figure (II-11) :</b> modèle dynamique non linéaire de thévenin. [51] .....	59
<b>Figure (II-12) :</b> Modèle CIEMAT de la batterie. [64] .....	60
<b>Figure (III-1) :</b> Schéma électrique équivalent d'une batterie de n éléments. [38].....	63
<b>Figure (III -2) :</b> Influence de la température sur la capacité en fonction de courant pour différents températures.....	67
<b>Figure (III-3) :</b> Influence de la température sur l'état de charge en fonction de capacité de la batterie pour différents températures.....	68
<b>Figure(III -4):</b> Influence de la température sur l'état de décharge en fonction de capacité de la batterie pour différents températures.....	69
<b>Figure(III -5) :</b> Influence de la température sur la tension de charge en fonction de courant pour différents températures.....	70
<b>Figure (III -6) :</b> Résistance de la batterie en charge.....	71
<b>Figure (III -7) :</b> Résistance de batterie en décharge.....	71
<b>Figure (IV-1) :</b> Association des modules photovoltaïques. [59].....	75
<b>Figure (IV-2) :</b> Schéma équivalent du générateur photovoltaïque. [38].....	76
<b>Figure (IV-3) :</b> caractéristique courant – tension du générateur photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .....	78
<b>Figure (IV-4) :</b> caractéristique puissance – tension du générateur photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ .....	79
<b>Figure (IV-5) :</b> caractéristique puissance tension du générateur pour différents niveaux d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000\text{ W/m}^2$ ) et $T=25^\circ\text{C}$ .....	79
<b>Figure (IV-6) :</b> caractéristique puissance tension du générateur pour différents niveaux d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000\text{ W/m}^2$ ) et $T=25^\circ\text{C}$ .....	80

<b>Figure (IV-7) :</b> caractéristique puissance tension du panneau PV pour une variation de température ( $T=0,25, 50,75^{\circ}\text{C}$ ) et $G=1000 \text{ W/m}^2$ .....	81
<b>Figure (IV-8) :</b> caractéristique courant tension du panneau PV pour une variation de température ( $T=0,25, 50,75^{\circ}\text{C}$ ) et $G=1000 \text{ W/m}^2$ .....	81
<b>Figure (IV-9) :</b> caractéristique courant tension de ns panneau en série.....	82
<b>Figure (IV-10) :</b> caractéristique courant tension de np panneau en parallèle.....	82
<b>Figure (IV-11) :</b> état de charge de la batterie en fonction de temps.....	84
<b>Figure (IV-12) :</b> la tension de batterie en fonction de temps.....	84

## NOMENCLATURE

$A_C$  : Air de la cellule

$AUT$  : Le nombre de jour d'autonomie

$B_j$  : Les besoins énergétique journalière [wh]

$C_{bat}$  : Capacité nominale de la batterie [Ah]

$C_p$  : Coefficient des pertes

$C_n$  : Capacité nominale ou évaluée de la batterie

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

$E_B$  : La force électromotrice

EDC : Etat de charge de la batterie

EDD : Etat de décharge de la batterie

$E_s$  : Rayonnement moyenne quotidien du mois le plus défavorable [Kwh/m<sup>2</sup>/j]

FF : Facture de forme

$I_{bat}$  : Courant de la batterie [A]

$I_d$  : Courant de la diode [A]

$I_{ph}$  : Photon courant

$I_{pv}$  : Courant de module [A]

$I_{RP}$  : Courant de la résistance shunt [A]

$I_{mpp}$  : Courant au point de puissance maximale [A]

$I_{sc}$  : Courant de court-circuit [A]

$I_{10}$  : Le courant de déchargée en 10 heures

G : Niveau d'insolations dans les conditions quelconque

$G_{STC}$  : Niveau d'insolation dans les conditions STC

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

Nb : Nombre de cellule de la batterie

$N_p$  : Nombre de module en parallèle

NOCT : Température de fonctionnement nominale des cellules (Nominal Operating Cell Temperature)

$N_s$  : Nombre de module en série

$P_{ch}$  : Puissance de charge [W]

PDD : Profondeur de décharge des batteries

PV : Photovoltaïque

$P_{pv,tot}$  : Puissance totale des panneaux P [W]

$P_{pv,uni}$  : Puissance d'un panneau PV [W]

$R_{bat}$  : Partie réelle de l'impédance [ $\Omega$ ]

$R_i$  : La résistance interne d'une cellule de la batterie [ $\Omega$ ]

STC : Condition de fonctionnement normale

$T_c$  : Température dans des conditions quelconques [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{stc}$  : Température dans des conditions STC [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$U_{bat}$  : La tension nominale des batteries [V]

$V_{ch}$  : Tension de la charge [V]

$V_{co}$  : Tension en circuit ouvert de la batterie [V]

$V_{in}$  : Tension d'entre dans le convertisseur élévateur [V]

$V_{mpp}$  : Tension au point de puissance maximale [V]

$V_{oc}$  : Tension de circuit ouvert [V]

$V_{out}$  : Tension de sortie dans le convertisseur élévateur [V]

$X_{bat}$  : Partie imaginaire de l'impédance [ $\Omega$ ]

$Z_{bat}$  : L'impédance complexe de la batterie [ $\Omega$ ]

$\eta_b$  : Rendement de la batterie

$\eta_e$  : Rendement énergétique de la batterie

$\eta_f$  : Rendement faradique de la batterie

$\alpha$  : Report cyclique de hacheur

$\alpha_{sc}$  : Coefficient d'incrémentation du courant  $I_{sc}$  [mA/°C]

$\beta_{oc}$  : Coefficient d'incrémentation de la tension  $V_{oc}$  [mV/°C]

$\Delta V$  : Variation de la tension par apport à l'insolation et la température

$\Delta I$  : Variation du courant par apport à l'insolation et la température

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

$\Delta T_C$  : Variation de la température

## **INTRODUCTION GENERALE**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétique des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront, besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles, de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution, le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse les générations futures. [1]

L'énergie photovoltaïque se développe rapidement, et cela est dû au fait que le monde assiste à une disparition progressive de l'énergie fossiles, où l'on note un décalage entre les deux énergies en termes de coût et de performances de production.

La production d'électricité photovoltaïque se fait depuis le lieu le plus proche utilisé de manière décentralisée directement vers l'utilisateur

Être lié le générateur photovoltaïque avec système de stockage à l'endroit où nous utilisons la batterie au plomb en raison de son faible coût

Et pour cette raison, notre thème est l'étude d'un système photovoltaïque avec des batteries de stockage.

-Le présent travaille subdivise a 4 chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons abordé à quelque généralité sur la production de l'énergie photovoltaïque et des informations sur le gisement solaire.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé sur les différents systèmes de stockage et surtout la batterie et les différentes caractéristiques de la batterie ainsi que leurs différents modèles.

Le troisième chapitre est consacré à un modèle de batterie de type CEIMAT Donc, les résultats sont sur l'influence de la température sur le comportement de la batterie.

Et dans le dernier chapitre le dimensionnement et la simulation d'un système PV et qui assure le stockage a moyen de la batterie.

Enfin, nous complétons notre mémoire par une conclusion générale, qui résume notre travail théorique et simulations des résultats.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les systèmes photovoltaïques*

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

### **I.1. Introduction**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Au sein de matériaux semi-conducteur comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique, ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure, c'est l'effet PV l'énergie est apportée par les photons (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique, ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

Le soleil est l'origine de toute forme d'énergie sur terre, que ce soit pour les énergies conventionnelles d'origine fossile comme les hydrocarbures ou pour les énergies renouvelables dont les plus importantes sont le solaire, l'éolien et la biomasse.

### **I.2. L'énergie photovoltaïque**

#### **I.2.1. Historique :**

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites.

**1839 :** le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque. [1]

Dans les années 1860 et 1870 du 19<sup>ème</sup> siècle, le physicien français Auguste Masha développait des machines à vapeur fonctionnant à l'énergie solaire. [2]

**1873 :** L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photosensibles du sélénium. [3]

**1875 :** Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. [4]

**1958 :** Une cellule avec de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. [1]

**1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware. [3]

**1983** : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie. [4]

### **I.2.2. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :**

L'énergie solaire est convertie en énergie lumineuse par des panneaux solaires. L'unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque est la cellule photovoltaïque.

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque .Elle est composée de matériaux semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. [1]

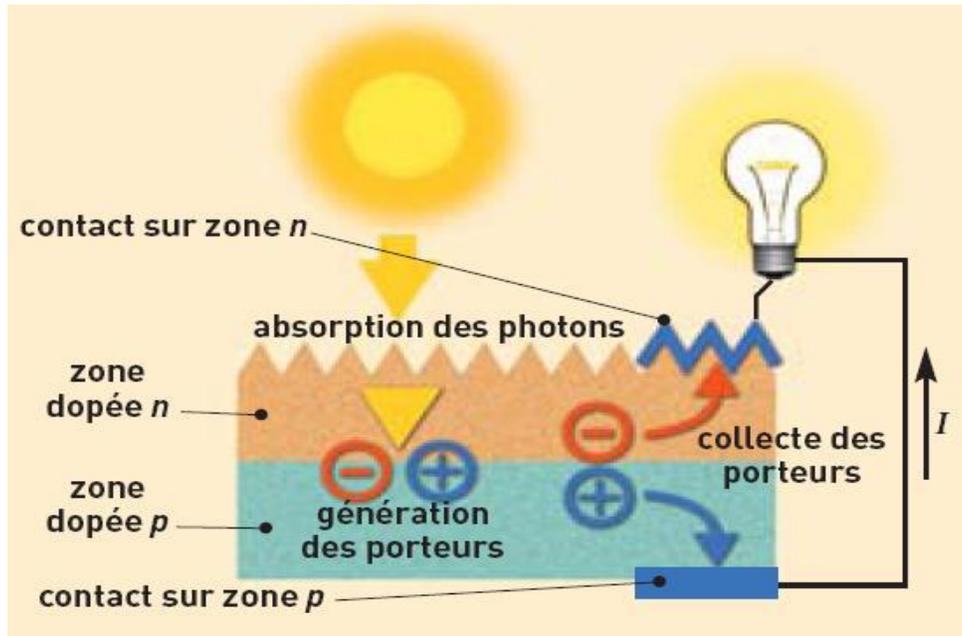
Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. [5]

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (Donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dope P (compose de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction, il existe trois configurations de jonctions :

- une jonction PN (homo-jonction : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas).
- une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires. [6]

Lorsque les photons sont absorbés, des paires de trou électro peuvent être formées. Si ces porteuses de charge atteignent la proximité de la jonction le champ électrique dans la barrière de potentiel pousse les trous dans la zone des charges positives où ils sont accumulés et pousse les électrons dans la zone des charges négatives où ils sont accumulés aussi [7]. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. [8]



**Figure (I-1) :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [9]

### I.2.3. Le rendement PV :

Le rendement,  $\eta$  des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ . [10]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{I.1})$$

P : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm<sup>2</sup>.

La densité de puissance incidente égale à  $\frac{P_{in}}{A}$ .

A : section de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. [11]

### I.2.4 Classement de cellule en fonction de leur rendement

- Silicium monocristallin
- Silicium poly cristallin
- Cellule a couche mince en cuivre-indium-sélénium(CIS)
- Cellule a couche mince en tellure de cadmium(CDTe)

Matériau de cellule	Rendement	Surface PV
Monocristallin	13-15%	App.7m <sup>2</sup>
Poly cristallin	12-14%	App.8m <sup>2</sup>
CIGS	7-11%	10m <sup>2</sup>
CdTe	8-11%	11m <sup>2</sup>
multi jonction	8%	12m <sup>2</sup>
Amorphe	5-7%	15m <sup>2</sup>

**Tableau (I.1) :** Les différents matériaux ont des rendements variables. [18]

### I.2.5 Technologie utilisée :

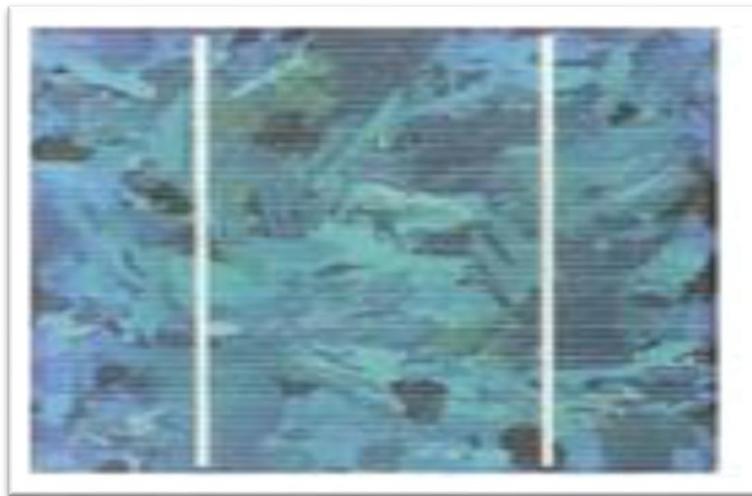
Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. D'autres matériaux sont utilisés : tellure de cadmium, arsénure de gallium, di sélénure de cuivre et d'indium (CIS). Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de dix ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. [12]

Il existe trois types principaux de cellules :

**I.2.3.a. Les cellules mono- cristallines :**

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans). [13]



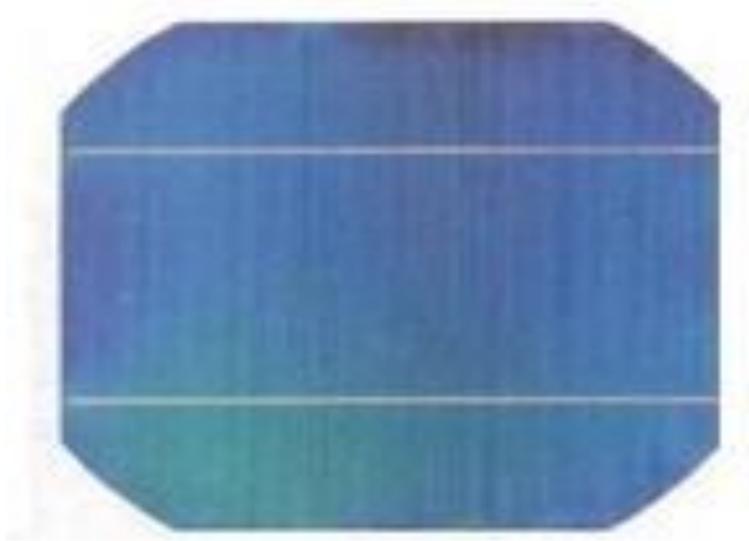
**Figure (I-2) :** Cellule monocristalline. [14]

**I.2.3.b. Cellule en silicium poly cristallin :**

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix). [12]



**Figure (I-3) : Cellule poly-cristalline. [14]**

#### **I.2.3.c. Silicium amorphe en couche mince :**

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).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement. [13]



**Figure (I-4) :** Cellule amorphe. [3]

#### **I.2.4. Module photovoltaïque :**

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ). [3]

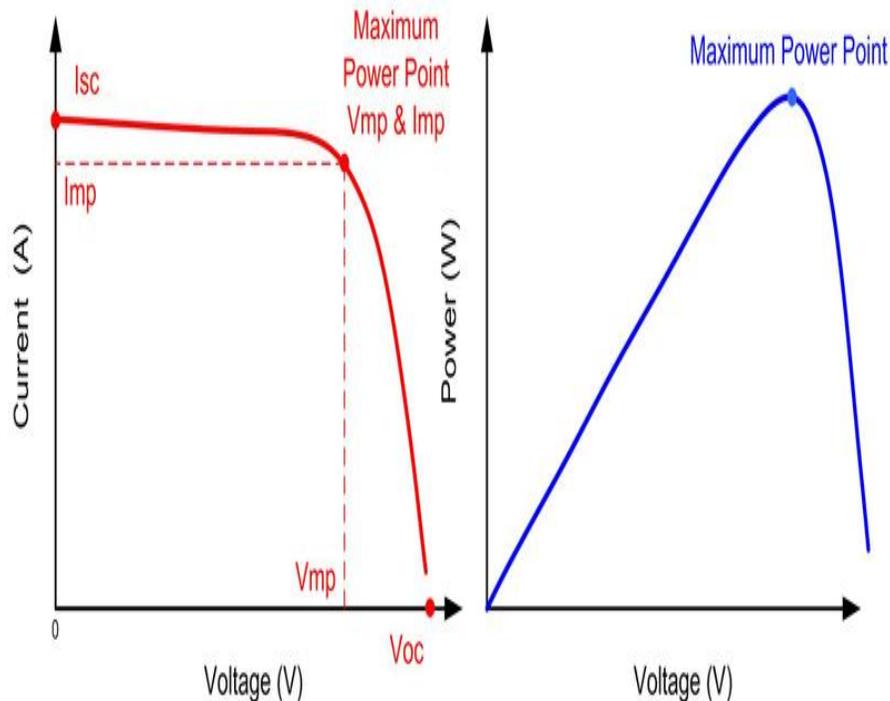
On protège chaque cellule PV contre l'échauffement en lui montant une diode dite « diode by-pass » en parallèle qui court-circuite. Aussi on évite qu'un module PV soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti retour » de chute de tension négligeable. [4]

##### **I.2.4.a. CARACTERISTIQUE D'UN MODULE SOLAIRE I-V, P-V :**

A partir du système d'équations non linéaire la une caractéristique fondamentale du module solaire type *MSX60* d'un nombre de cellule ( $N_{cs} = 36$ ) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalée lelong de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (**Figure (I-5)**).

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes.

L'augmentation de l'éclairement se traduit par le déplacement de la caractéristique I-V suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension en court-circuit. En plein ensoleillement, le module n'étant connectée à aucun circuit, son potentiel est de l'ordre de 21.5 V pour une température de 25 °C. Pour une diminution de l'éclairement de 10 %, la tension produite chute à environ 0.47 V, soit de près 2.18 % de sa valeur initiale ; par contre le rendement varie assez peu avec l'éclairement. Ces courbes se tracent à température constante. [15]



**Figure (I-5) :** Influence de T et  $R_s$  sur les caractéristiques (I-V), (P-V) d'un panneau solaire.

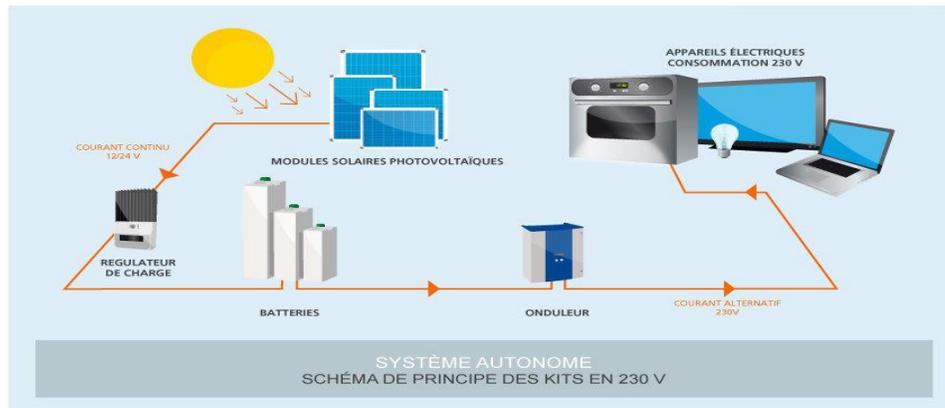
### I.2.5. Types de systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV Sant trois types :

#### I.2.5.a. Systèmes autonomes :

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Dans la majorité des cas, ce système est

utilisé dans les sites isolés. Une tel installation doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a pas de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps). Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée dans des batteries. Cette installation se compose d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et éventuellement d'un onduleur. [16]



**Figure (I-6) :** Exemple d'un système autonome.

#### I.2.5.b. Les systèmes raccordés au réseau :

Le rôle principal d'un système PV connecté au réseau électrique est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les générateurs PV est directement réinjecté sur le réseau électrique. La consommation des charges locales de l'habitat est assurée par le réseau électrique lui-même. Le réseau est utilisé en appoint de la production PV. Actuellement, il est interdit d'utiliser un élément de stockage de l'énergie dans ce type de systèmes. [17]

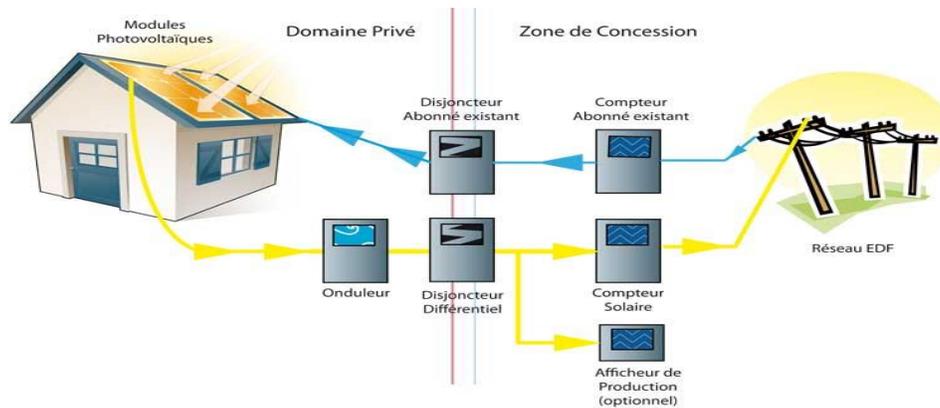


Figure (I-7) : Système photovoltaïque raccordé au réseau.

### I.2.5.c. Système hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaire ,qui sont également indépendantes des réseaux de distribution d'électricité .En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne on a un groupe électrogène à combustible ,ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie .une tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée .

Un système hybride optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergie renouvelable et ou fossiles et des moyens de stockage associés. [1]

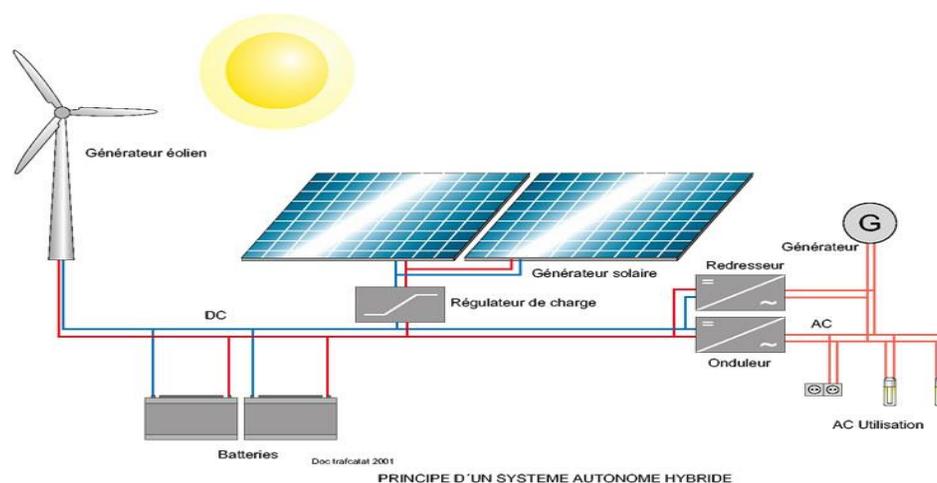


Figure (I-8) : Système hybride solaire / éolien.

### I.3. Gisement solaire :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire. [19]

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la Figure .L'Algérie a un gisement solaire de plus de 2000 kWh/m<sup>2</sup>.an.[20]

Région	Région Côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau (I-2) :** Potentiel d'Energie solaire en Algérie. [21]

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, de par sa situation géographique il dispose d'un gisement solaire très important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux du Sahara. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup> au nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup> au sud du pays [21].

### I.3.1. Élément de photométrie

Une source lumineuse telle qu'une lampe à incandescence n'est rien d'autre qu'un transformateur d'énergie. Le filament chauffé par un courant électrique émet un rayonnement dont la répartition spectrale dépend des caractéristiques du filament, du gaz qui l'entoure, de l'intensité du courant. Le rayonnement électromagnétique transporte à travers l'espace une certaine quantité d'énergie avec une certaine répartition spectrale. L'énergie transportée par unité de temps est la mesure naturelle de l'intensité d'un faisceau. Pour effectuer cette mesure, nous utilisons un récepteur qui a lui-même une certaine réponse spectrale, et qui transforme par exemple l'énergie électromagnétique :

- En influx nerveux s'il s'agit d'un œil.
- En courant électrique s'il s'agit d'une photopile.
- En chaleur s'il s'agit d'un pyranomètre. [22]

La photométrie proprement dite s'occupe de la comparaison quantitative des lumières qu'elles soient émises, transportées ou reçues. [23]

On distingue :

- La photométrie dite visuelle, relative aux radiations qui excitent l'œil, basée sur la réponse de l'œil standard. La grandeur de base est le flux lumineux  $F$  d'unité le lumen (lm).
- La photométrie dite énergétique ou radiométrie, qui s'occupe de la mesure des flux d'énergie transportés par les rayonnements visibles, I.R. ou U.V. La grandeur de base est le flux énergétique  $\phi$  d'unité le watt (W).

#### I.3.1.a. Loi de Stephen Boltzmann :

On sait que le rayonnement qui s'établit à l'intérieur d'une enceinte fermée isotherme dépend uniquement de la température  $T$  de cette enceinte et de l'indice de réfraction du milieu. La connaissance de cette fonction a été précisée par deux lois. La première, énoncée par Stefan, démontrée rigoureusement comme conséquence du principe de Carnot par Boltzmann. [24]

La loi empirique de Stefan-Boltzmann stipule que, l'énergie émise par un corps noir par unité de temps et unité de surface est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température. [25]

### I.3.1.b. Modélisation :

La loi de Planck d'écrit le taux de radiation d'un objet noir (qui ne réfléchit aucune lumière) dans le vide en fonction de sa température T et de la fréquence  $\nu$  de radiation observée : [24]

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (I.2)$$

Où :

$h = 6.626068 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$  est la constante de Planck.

$c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

$k = 1.3806503 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  est la constante de Boltzmann.

## I.3.2. Le soleil comme un Corp noir :

### I.3.2.a. Définition du corps noir :

Un corps noir est par définition un corps idéal parfaitement absorbant pour la lumière et parfaitement émissif pour le rayonnement thermique. On dit que la radiation électromagnétique absorbée par les parois de l'enceinte est en équilibre thermique. Tous les photons sont absorbés en permanence quelle que soit leur longueur d'onde et les photons réémis ont une distribution spectrale qui ne dépend que de la température des parois du corps noir. Il obéit à la fois aux lois de Lambert, de Stefan et de Wien. [22]

### I.3.2.b. Brillance du corps noir :

Dans l'enceinte où est enfermé le rayonnement, perçons un trou de surface  $dS$  suffisamment petit pour ne pas perturber l'équilibre des photons à l'intérieur de l'enceinte. L'élément  $dS$  constitue une source dont nous allons calculer la luminance (brillance).

L'énergie sortant de l'élément  $dS$  dans l'intervalle de temps  $(t, t+dt)$  dans un angle solide  $d\Omega$  faisant un angle  $\alpha$  avec  $dS$ , vaut : [19]

$$du = u \times \frac{d\Omega}{4\pi} \times c dt \times ds \times \cos \alpha \quad (I.3)$$

$c dt$ ,  $ds$ ,  $\cos \alpha$  : sont le volume du cylindre de base.

$ds$  et d'arête  $c dt$  et  $\frac{d\Omega}{4\pi}$  : est la portion du rayonnement isotrope pointant dans la direction  $dW$ .

La densité de flux s'écrira :

$$d^2\phi = \frac{du}{dt} = \frac{uc}{4\pi} \cdot d\sigma \cdot d\Omega = \frac{uc}{4\pi} \cdot dx = L dx = B dx \quad (I.4)$$

$dx$  : est l'étendue du pinceau lumineux.

$B = \frac{uc}{4\pi}$  : est la brillance du corps noir.

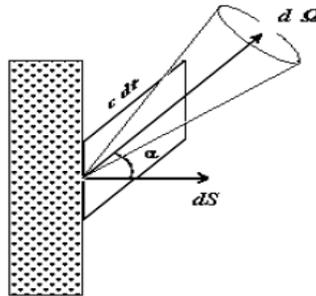


Figure (I-9) : Brillance du corps noir. [22]

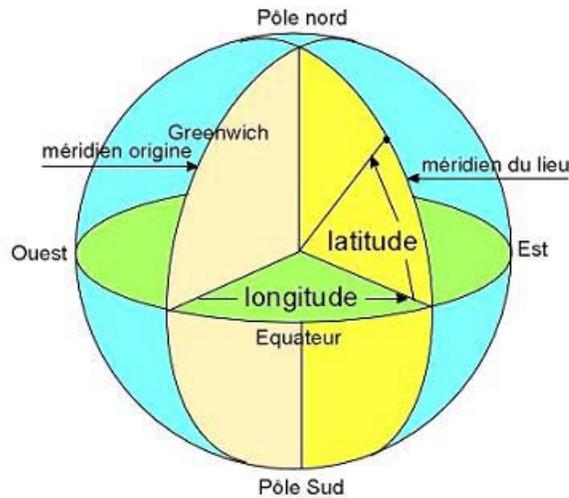
### I.3.3. Repérage et mesure d'ensoleillement :

#### I.3.3.a. La longitude $\lambda$ :

La longitude ( $\lambda$ ) mesure de l'angle entre le méridien du lieu et la méridienne origine des longitudes (Greenwich) Le méridien de Greenwich est un méridien où la longitude est définie comme égale à 0. Les lieux qui sont situés à l'Est sont comptés avec le signe +. Il y a vingt-trois méridiens séparés de  $15^\circ$  donnant naissance aux 24 fuseaux horaires [20]

**I.3.3.b. La latitude :**

La latitude  $\phi$  permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  au pôle Nord. [22]



**Figure (I-10) :** Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné. [60]

**I.3.3.c. Déclinaison solaire  $\delta$  :**

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle est exprimée en degrés( $^\circ$ ). Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique.

En considérant la déclinaison  $\delta$  comme constante sur une journée, l'équation de Copernic

Fournit la relation qui relie ces deux grandeurs [26] :

$$\delta = 23,45 \left[ \sin \left( 2\pi \frac{284+n}{365} \right) \right] \quad (\text{I. 3})$$

$n$  : est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

### I.2.3.4 L'angle horaire $\omega$

L'angle horaire définit le temps solaire vrai TSV, il est midi TSV si  $\omega=0$ . Exprimé en degrés d'angle, sa valeur est nulle à midi solaire, elle est négative le matin, positive en après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (un tour de  $360^\circ$  en 24 heures).

L'angle horaire  $\omega$  ( $^\circ$ ) est donné par la formule suivante [26] :

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I.4})$$

## I.3.4. Les cinq temps :

### I.3.4.a. Temps universel :

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil à la méridienne origine. En France métropolitaine, les longitudes sont comprises entre  $-5^\circ$  (Ouessant) et  $+8^\circ$  (Strasbourg), entraînant des écarts de -20mn à +32mn entre le temps solaire local (TSL) et le temps universel (TU). [22]

### I.3.4.b. Temps solaire local :

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude. La correction de longitude est donnée par la formule. [20]

$$\text{TSL} = \text{Tu} + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I.5})$$

### Equation de temps :

L'expérience montre que les passages du soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas avec exactement 24h d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16mn ou un retard de 14mn par rapport à 12h selon l'époque de l'année. [20]

L'écart  $\Delta t$  entre temps solaire local (TSL) et temps solaire vrai (TSV) est désigné sous le terme d'équation du temps.

**a) le temps solaire vrai :**

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil : [22]

$$TSV = TSL + \Delta T \quad (\text{I. 8})$$

Pour un lieu de longitude, il existe une correspondance directe entre angle horaire AH le temps solaire vrai TSV, le temps solaire local TSL et le temps universel TU tel que : [22]

$$AH = 15(TSV - 12) \quad (\text{I. 9})$$

$$TSL = Tu + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I. 10})$$

$$TSV = TSL + \Delta T \quad (\text{I. 11})$$

$$AH = 15 \left( Tu + \frac{\lambda}{15} + \Delta T - 12 \right) \quad (\text{I. 12})$$

**I.3.4.c. Heure légale – Heure d'été :**

- **Heure légale :**

Pour des raisons évidentes de commodité, il est bon que les horloges d'un même pays indiquent la même heure. On définit ainsi le temps des horloges de façon arbitraire pour tout un territoire. Aux USA le territoire s'étend sur 4 fuseaux horaires ; il a fallu définir trois temps d'horloge : Eastern time, Central time et Western time ce qui fait que le décalage horaire entre

Washington et Paris est de +6h, il est de + 8h avec Denver et + 9h avec Los Angeles. [22]

- **Heure d'été :**

En outre, en France et dans la plupart des pays européens, l'heure légale est changée deux fois par an pour réaliser des économies d'énergie (fort contestées d'ailleurs par certains qui n'y voient que l'arbitraire de la bureaucratie). Pour des raisons évidentes de calcul, il n'est pas tenu compte du décalage de l'heure d'été dans les logiciels. [22]

### I.3.5. Appareils de mesure calibration :

#### I.3.5.a. L'héliographe

L'héliographe est un instrument pour mesurer la durée d'ensoleillement. La durée d'ensoleillement est définie comme le temps pendant lequel le soleil est assez intense pour générer une ombre. L'Organisation Météorologique Mondiale (World Meteorological Organization) la définit comme le temps pendant lequel le rayonnement solaire direct dépasse le niveau de 120 W/m<sup>2</sup>. [28]



Figure (I-11) : L'Héliographe de Campbell– Stokes. [60]

#### I.3.5.b. Le pyranomètre :

Un pyranomètre mesure le rayonnement global solaire reçu par une surface plane sous un angle solide de  $2\pi$  stéradian. Il peut être également utilisé pour mesurer le rayonnement réfléchi par le sol ou le rayonnement diffus de l'atmosphère s'il est accompagné d'un arceau qui masque le rayonnement direct. Le rayonnement direct est un composant essentiel du bilan d'énergie. Il est

indispensable pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle ou ETP (équation de PENMAN) et pour la mise en œuvre des modèles de simulations de croissance des plantes entre autre. Il est la somme du rayonnement diffus et du rayonnement solaire direct. On mesure l'énergie reçue par une surface plane. L'unité SI est donc le watt /mètre carré ( $W / m^2$ ). [29]



**Figure (I-12) :** Le pyranomètre.

### **I.3.5.c. Le pyréliomètre**

Le pyréliomètre mesure les irradiations directe, il comporte une ouverture réduit est une surface réceptrice qui doit être maintenue normale aux rayons de soleil par un système automatique

Pour pouvoir mesurer le rayonnement direct de façon continue, le pyréliomètre doit être muni d'un dispositif charge de l'orienter en permanence vers le soleil. [30]



**Figure (I-13) :** Le pyrhéliomètre.

#### **I.3.5.d. Le spectro-radiomètre :**

Un spectro-radiomètre est un instrument qui permet de mesurer la puissance du flux de rayonnement électromagnétique en fonction de la longueur d'onde. Les spectro radiomètres peuvent couvrir en fonction de leur résolution spectrale, un domaine plus ou moins étendu de longueurs d'onde. Ils peuvent travailler dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge. [31]



**Figure (I-14) :** Un spectro-radiomètre.

**I.4. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes photovoltaïques. Tous les éléments ont été introduits pour simplifier l'effet et le fonctionnement de système photovoltaïque et pour faciliter la conception. Nous pourrions ensuite caractériser le soleil en le considérant comme un corps noir à la température de sa surface.

*Chapitre II*

*Modélisation et*

*caractérisation de la*

*batterie*

## Chapitre II: Modélisation et caractérisation de la batterie

### II.1. Introduction

Pour des raisons de sécurité, de qualité de service, de nombreux domaines souhaitent ou doivent se prémunir contre toute coupure énergétique, en ayant à leur disposition une source d'énergie indépendante et fiable (une énergie de secours). Parmi les choix possibles, les batteries sont des solutions de stockage particulièrement séduisant.

### II.2. Système de stockage

#### II.2.1. Critère de choix de la technologie de stockage en fonction des applications :

En fonction de l'application envisagée, le consommateur est amené à choisir la technologie de stockage la mieux adaptée en fonction de plusieurs paramètres technico-économiques.

Nous présentons brièvement :

- Les grandes familles de systèmes de stockage électrochimiques.
- Les paramètres usuels de caractérisation.
- Les critères de choix prépondérants en fonction des applications. [42]

#### II.2.2. Technique de stockage à court terme

##### II.2.2.a. Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES Super conductor Magnetic Energy Storage)

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créée 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  $\frac{1}{2}L.I^2 S_p$ . 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

maintenances sont très élevées et il y en a très peu de SMES en fonction. Même si les recherches envisagent des SMES de l'ordre de 10-100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW. [1]

### II.2.2.b. Stockage par condensateur à double couche

En régime dynamique, la modification de la répartition des charges liée à un phénomène de double couche crée une densité de courant qui vient s'ajouter à une densité de courant faradique [33] :

$$j(t) = j_f(t) + j_n(t) \quad (\text{II. 1})$$

### II.2.2.c. Stockage sous forme d'énergie cinétique (volant d'inertie)

Le volant d'inertie est un composant intermédiaire entre les capacités diélectriques et les batteries électrochimiques. Il a des performances en énergie et en puissance comparables aux super condensateurs.

Longtemps utilisé pour la régulation des machines à vapeur, le principe du volant d'inertie permet aujourd'hui de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique.

Le stockage d'énergie par Volant d'inertie ou système inertiel de stockage d'énergie (SISE) est utilisé dans de nombreux domaines : régulation de fréquence, lissage de la production éolienne et solaire, stockage et restitution de l'énergie de freinage des véhicules. [34][35]

Ce système, suspendu sur des paliers magnétique 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 magazine s'exprime par: [1]

$$W = \frac{1}{2}J\Omega^2 \quad (\text{II. 2})$$

### II.2.3. Technique de stockage à long terme

#### II.2.3.a. Stockage sous forme gravitaire

L'eau d'un réservoir aval est pompée vers un réservoir amont pendant les périodes creuses, permettent ainsi de stocker l'énergie sous forme gravitaire. Lors des périodes de pointe, l'électricité est réinjectée sur le réseau par l'opération inverse, le turbinage.

La nécessité de trouver un site géographique adapté, réunissant deux bassins superposés, rend la construction de nouvelle STEP de plus en plus difficile et coûteuse. [47]

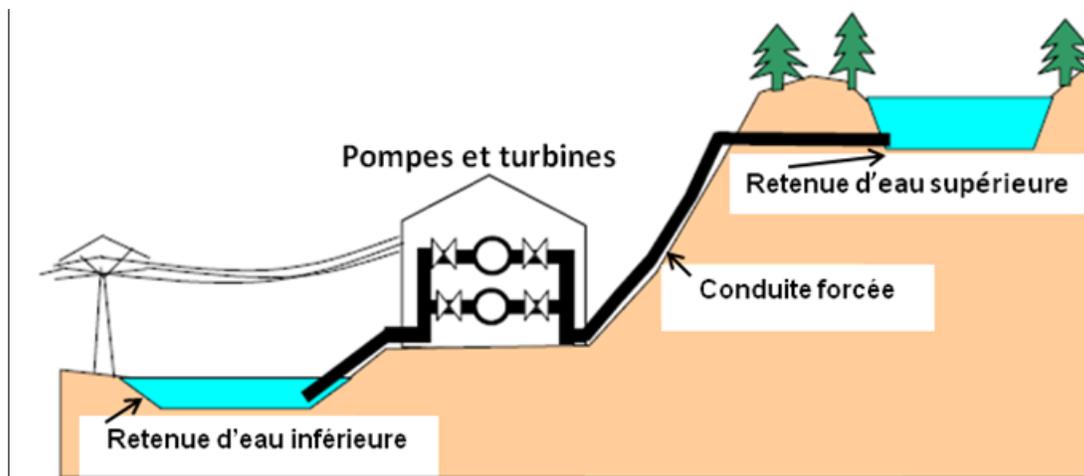


Figure (II-1) : Stockage gravitaire hydraulique. [61]

#### II.2.3.b. Stockage sous forme d'air comprimé (pression) (CAES)

L'électricité est utilisée pour comprimer l'air et le stocker dans des cavités naturelles, des mines abandonnées ou des réservoirs (comme ceux de propane) (chargement). En cas de besoin de l'électricité, cet air est mélangé avec le gaz naturel pour faire actionner une turbine à gaz. La première unité commerciale avec une capacité de 290MW a été opérationnelle en 1978 en

Allemagne [IEC, 2013]. Une installation de 2700MW était prévue à Norton en Ohio en 2012. Cette technologie a une efficacité de 45%.

L'avantage de cette technologie est sa grande capacité. Son inconvénient est l'instabilité du cycle, ainsi que la limitation géographique des lieux. Un CAES adiabatique est en cours de développement. Il consiste à récupérer la chaleur dégagée pendant la compression de l'air et à la réutiliser pour son expansion. Ainsi, l'efficacité énergétique est améliorée et peut atteindre 70%. [32]

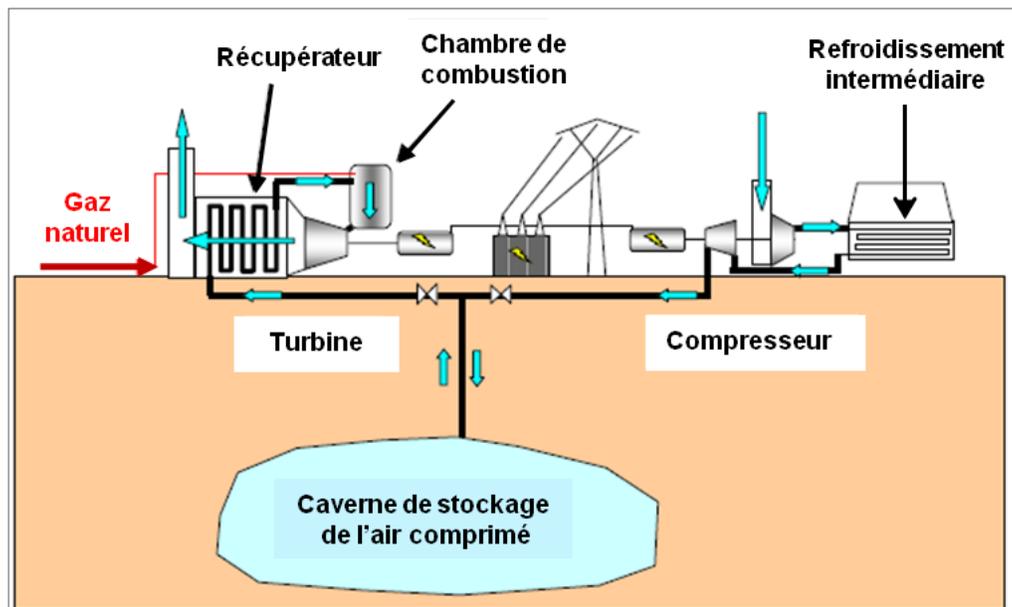


Figure (II-2) : Stockage mécanique par air comprimé. [61]

### II.2.3.c. Stockage sous forme thermique

On peut considérer deux approches en stockage thermique à haut température :

- Le stockage en chaleur sensible (sans changement d'état).
- Le stockage en chaleur latent (avec changement d'état).

Il s'agit du principe physique le plus simple qui consiste à charger et décharger la quantité d'énergie dans un matériau en faisant varier sa température. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la masse de matière utilisée, à sa capacité calorifique et à la variation en température.

Un véritable système de stockage électrique peut être obtenue par pompage thermique, ce concept consiste, en utilisant une pompe à chaleur, à stocker l'énergie sous forme thermique dans des matériaux solides peu coûteux avec un rendement attendu élevé. [40]

### II.2.3.d. Stockage sous forme chimique

#### 1. Les batteries

La batterie est un dispositif de stockage qui répond à nos attentes. Elle est utilisée dans de nombreux domaines et prospère. Grâce à cela, de nombreux efforts ont été déployés pour améliorer leurs performances. [36]

Une batterie est constituée d'un ensemble de cellules électrochimiques, capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces Réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes. Le courant est produit par la circulation D'électrons entre 2 plaques ou électrodes :

- Une électrode positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons.
- Une électrode négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.
- Un électrolyte. [37]

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



$M_1$  : L'espace active de l'anode

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



$M_2$  : L'espace active de la cathode

La réaction de l'oxydoréduction globale est la suivante :

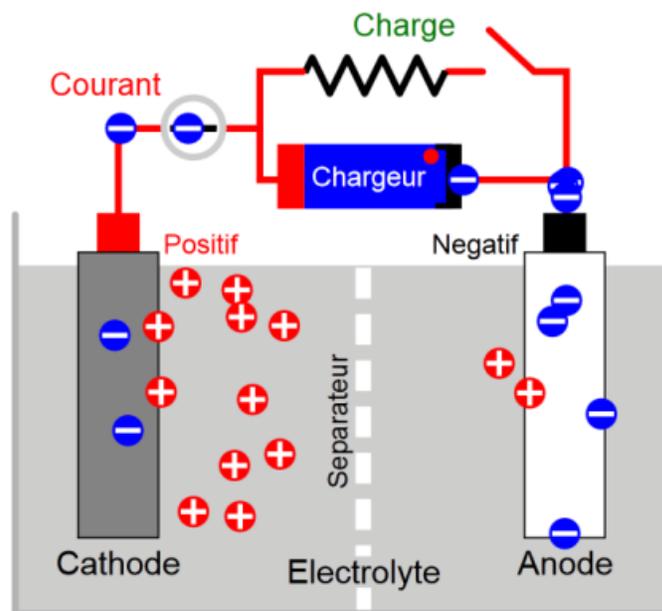


Figure (II-3) : Principe de fonctionnement de la batterie. [38]

## 2. Les piles à combustibles

C'est un peu avant 1840 que William GROVE avocat britannique passionné de la physique, décrit la première pile à combustible (appelée fuel cell dans la littérature anglo-saxonne). Elle utilise de l'hydrogène et d'oxygène, fonctionne à basse température, possède des électrodes de platine et emploie de l'acide sulfurique comme électrolyte. [31]

Une pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui convertit en continu l'énergie chimique d'un combustible et d'un comburant en énergie électrique. [33]

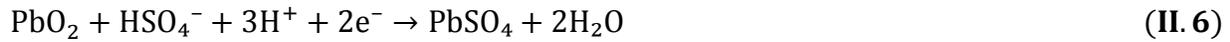
### II.2.4. Les différents types de batterie

#### II.2.4.a. Les batteries à plomb

Le fonctionnement de la batterie au plomb est décrit dans plusieurs références en particulier par Berndt. La batterie est constituée d'une électrode positive en oxyde de plomb, d'une électrode négative en plomb et d'acide sulfurique comme électrolyte ( $Pb/H_2SO_4/PbO_2$ ).

Le fonctionnement normal de la batterie est décrit par les réactions suivantes :

En décharge, l'électrode positive est la cathode, elle est le siège de la réaction :

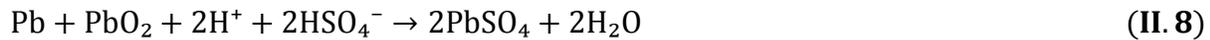


Et l'électrode négative est l'anode, elle est le siège de la réaction :



En tenant compte de la solubilité des ions et de la dissociation majoritaire de l'acide sulfurique en  $\text{H}^+$  et  $\text{HSO}_4^-$  dans le domaine de concentration considéré.

La réaction globale en décharge est :



En charge l'électrode positive devient l'anode et l'électrode négative la cathode et on observe la réaction inverse. [41]

#### II.2.4.b. Les batteries à nickel-cadmium

Les batteries au nickel-cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb-Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. [36]

Composition électrochimique : [43]

- Electrode négative :  $\text{C}_d$  (solide).

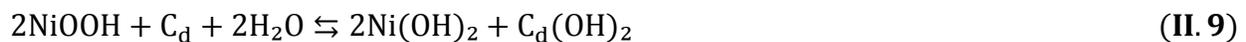
Potentiel standard du couple  $\text{C}_d(\text{OH})_2 / \text{C}_d$ :  $E_{0-} = -0,809\text{V}$ .

- Electrode positive :  $\text{NiO}(\text{OH})$  (solide).

L'oxyhydroxyde de nickel est réduit en hydroxyde de nickel au cours de la décharge.

Potentiel standard du couple  $\text{NiOOH} / \text{Ni}(\text{OH})_2$  :  $E_{0+} = +0,45\text{V}$

- Electrolyte : KOH (solution alcaline, aqueuse composée de potasse KOH, ou de soude  $\text{NaOH}$  et additionnée ou non de lithine LiOH) [26]
- Réaction électrochimique :



<b>Tension nominale par cellule [volt]</b>	1.2
<b>Résistance interne</b>	~ 0.06 ohm par cellule de 1 Ah
<b>Température de fonctionnement [°C]</b>	-40 à+ 80
<b>Autodécharge</b>	0,5 % par jour
<b>Temps de charge [h]</b>	1 heure, charge rapide jusqu'à 60% de la capacité dans les 20 premières minutes.
<b>Nombre de cycles de</b>	Jusqu'à 1200

Tableau (II.1) : Caractéristiques de l'accumulateur Ni-Cd. [51]

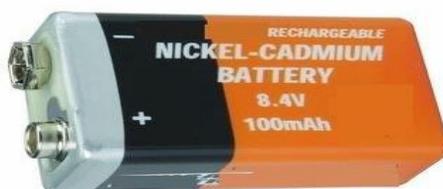


Figure (II-4) : Batterie nickel-cadmium. [36]

#### II.2.4.c. Les batteries à nickel-métal hydrure

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur nickel-hydrure métallique (*NiMH*) est basé sur le transport de charges à l'intérieur de la batterie qui se fait par l'intermédiaire des ions hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ).

L'électrode positive d'accumulateur *NiMH* est à base d'oxyhydroxyde de nickel ( $\text{NiOOH}$ ).

L'électrode négative est composée d'un alliage métallique de type  $\text{AB}_x$ . On peut classer les alliages métalliques en deux classes :  $\text{AB}_5$  (par ex.  $\text{LaNi}_5$ ) et  $2 \text{AB}$  (par ex.  $\text{ZrNi}_2$ ) qui sont tous capables d'absorber l'hydrogène suite à la formation d'hydrures métalliques durant la charge de la batterie. [44]





Figure (II-5) : Batterie hydrures métalliques de nickel. [36]

<b>Tension nominale par cellule [volt]</b>	1,2
<b>Résistance interne</b>	~ 0,06 ohm par cellule de 1 Ah
<b>Température de fonctionnement [°C]</b>	par cellule de 1 Ah
<b>Autodécharge</b>	Faible, jusqu'à 5% par jour
<b>Temps de charge [h]</b>	1 heure, charge rapide jusqu'à 60% de la capacité dans les 20 premières minutes.
<b>Nombre de cycles de vie</b>	Jusqu'à 1000.

Tableau (II-2) : Caractéristiques de l'accumulateur NiMH. [51]

#### II.2.4.d. Les batteries à nickel- $N_aCl$

À une très forte capacité pouvant subir un très grand nombre de cycles 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 provisionnement arrêtee pourrait bien reprendre. [48]

#### II.2.4.e. Les batteries à nickel-zinc

Une batterie nickel / zinc (Ni / Zn) a été assemblée en utilisant un électrolyte hydrogel polymère préparé à partir de poly (acrylate) de potassium réticulé et d'une solution aqueuse de KOH, et ses caractéristiques de charge-décharge ont été étudiées. La cellule expérimentale Ni / Zn avec l'électrolyte d'hydrogel polymère présentait des courbes de charge-décharge bien définies et des performances de cycle de charge-décharge remarquablement améliorées, par rapport à celle d'une solution aqueuse de KOH. De plus, il a été constaté que la croissance dendritique ne se produisait pratiquement pas à la surface de l'électrode de zinc pendant les cycles de charge-décharge dans l'électrolyte d'hydrogel polymère. Ces résultats indiquent que l'électrolyte polymère hydrogel peut être utilisé avec succès dans des batteries Ni / Zn comme électrolyte avec d'excellentes performances. [55]

Notre travail consiste à étudier un système PV autonome avec stockage. Nous avons optés pour les batteries au plomb acide et cela pour les avantages suivant :

- ✓ Faible coût.
- ✓ Un bon rendement.
- ✓ Un Meilleur compromis en terme de coût / performance / entretien.
- ✓ Sa durée de vie.
- ✓ Caractéristique électrochimique favorable.
- ✓ Une large disponibilité.
- ✓ Entretien faible ou nul.
- ✓ Bonne tenue aux températures extrêmes. [48]

Type	Energie massique (en Wh/Kg)	Energie volumique (en Wh/j)	Tension (en V)	Puissance Max. (en W/Kg)	Nombre de cycles	Autodécharge (en %/mois)
<b>Plomb- acide</b>	30-50	75-120	2.25	700	400-800	5
<b>Li-Tio</b>	50-67	75-131	2.4	3000	6000	10
<b>Ni-MH</b>	60-110	220-330	1.2	900	800- 1000	30
<b>Ni-Zn</b>	90	280	1.6	1000	200	20
<b>Li-Po</b>	100-130	220-330	3.7	250	200-300	2
<b>Li-Fe-P</b>	120-140	190-250	3.2	2000	2000	5
<b>Li-Ion</b>	90-180	220-400	3.6	1500	500- 1000	2

**Tableau (II-3) :** comparatif des différentes technologies de batteries. [46]

#### II.2.4.f. La batterie à plomb

##### 1. Bref historique

L'histoire de l'accumulateur au plomb est plus que centenaire et remonte à la découverte du premier générateur électrochimique non réversible (pile) en 1800.

- La réversibilité (cas de l'accumulateur), a été observée pour la première fois en 1801 par le physicien Gautherot.
- En 1859, Gaston Plante reconnaît l'intérêt du plomb pour la construction de l'accumulateur.

- En 1881, l'accumulateur connaît un perfectionnement très important en constituant les matières actives par des oxydes de plomb, rapportés sur des grilles supports.
- Nombreux furent les techniciens qui apporteront ensuite leur contribution pour aboutir à l'accumulateur actuel. [45]

<b>Tension à vide</b>	2 - 2,1V
<b>Capacité spécifique théorique</b>	120Ah.kg-1
<b>Capacité spécifique pratique</b>	7 à 20Ah.kg-1
<b>Densité énergétique massique</b>	15 – 40Wh.kg-1
<b>Densité énergétique volumique</b>	40 – 100Wh.dm-3
<b>Durée de vie</b>	nombre de cycles = 200 – 400 en version étanche, 600 – 1000 en version tubulaire
<b>Températures d'utilisation</b>	de -20°C à +60°C
<b>Rendement faradique global</b>	entre 85 et 90%
<b>Autodécharge</b>	de l'ordre de 0,5% par jour

**Tableau (II-4) :** Caractéristique d'un élément accumulateur Plomb-Acide. [43]

## 2. Paramètre de la batterie au plomb

### • La tension

Le voltage est la tension aux bornes de la batterie  $V_t$ . Il est le paramètre le plus apparent et facile à déterminer. Différente référence de voltages sont définis :

Tension théorique «  $E_{th}$  », Tension nominale, «  $V_n$  », Tension de fin de décharge, « VCut-Off », Tension de fin de charge, « Vfull », Tension à circuit ouvert «  $V_{oc}$  ».

- **La température**

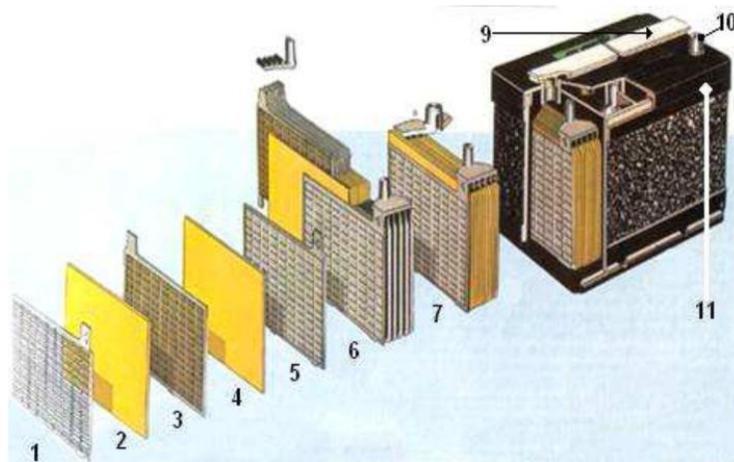
Quand le stockage est en service les températures  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) qui sont très hautes ou basses peuvent influencer fortement sur le fonctionnement de la batterie et par conséquent les autres paramètres.

- **La capacité**

La capacité massique : c'est une forme de l'énergie spécifique, définie comme le rapport entre l'énergie disponible d'une batterie ou d'une cellule et son poids.

La capacité nominale  $C_N$  : c'est la valeur de la capacité donnée par le manufacturier pour une des conditions d'opération préconisées (température  $T^{\circ}$  définie, courant  $I_b$  et  $V_{\text{Cut-Off}}$ ).

- 1 : Grille.
- 2 : Séparateur.
- 3 : Plaque positive.
- 4 : Plaque négative.
- 5 : Barrette.
- 6 : Faisceau négatif.
- 7 : Élément complet
- 8 : Pont
- 9 : Rampe de bouchons.
- 10 : Borne
- 11 : Bac.



**Figure (II-6) :** Constitution d'une batterie monobloc. [60]

- **Phénomène d'autodécharge (self-discharge)**

C'est la décomposition spontanée (sans intervention externe) des matières actives de la cellule d'un état chargé vers un état de décharge.

- **Phénomène de polarisation**

Lorsqu'un courant « $I_b$  » passe dans l'accumulateur, la tension varie de l'équilibre du circuit ouvert « $VOCF$  » vers une valeur plus faible ou plus forte selon la phase (charge ou décharge)

- **La résistance interne ( $R_{int}$ )**

La résistance interne d'une batterie est la somme de plusieurs résistances élémentaires représentant des phénomènes divers observés lors des études électrochimiques et qui sont utilisés pour conception et fabrication.

- **L'état de charge (SOC)**

La batterie peut être vue comme un réservoir d'énergie dont la quantité évolue constamment. En conséquence, son état de charge est identifié comme la capacité contenue dans cette batterie, elle est affectée par les conditions d'opération (le courant, la température...etc.).

- **La profondeur de décharge (DOD)**

Le DOD est la quantité de capacité retirée durant la phase de décharge lors d'un cycle à partir d'une batterie pleinement chargée. Il est exprimé, en pourcentage (%).

- **Le nombre de cycle (Nb Cycles)**

Défini comme le nombre de cycles (charge / décharge) que la batterie peut fournir durant sa vie tout en maintenant sa tension de coupure au-dessus de **V<sub>Cut-Off</sub>**. Ce paramètre correspond à un DOD. [49]

## II.2.5. Grandeurs caractéristique des batteries

### II.2.5.a. Capacité de stockage

La tension de la batterie est déterminée par sa chimie, mais sa capacité représente la quantité maximale d'électricité qu'elle peut fournir. Comme le courant est le nombre d'électrons par unité de temps, la capacité d'une cellule est l'intégral du courant fournie par la batterie.

La capacité est mesurée en ampères-heures ( $Ah$ ) et elle exprimée par l'équation suivante : [51]

$$Q = \int_{t_0}^t I_b(t) dt \quad (\text{II. 11})$$

### II.2.5.b. Rendement

Est le rapport entre l'énergie restituée et l'énergie stockée. La définition du rendement doit se baser sur un ou plusieurs cycles réalistes en rapport avec l'application. La puissance instantanée est l'un des facteurs qui régit le rendement. [53]

#### 1. Rendement faradique

Le rendement faradique représente l'efficacité de la recharge. En effet, dans les batteries à électrolyte aqueux, les réactions aux électrodes sont concurrencées par des réactions secondaires. Ces réactions secondaires représentent des courants de fuite importants notamment lors des charges. Le courant traversant la batterie est donc la somme d'un courant intervenant dans les réactions principales  $I_p$  et d'un courant intervenant dans les réactions secondaires  $I_s$  :

$$I = I_p + I_s \quad (\text{II.12})$$

Ainsi, la quantité de charge fournie à la batterie n'est pas entièrement récupérable. Le rendement faradique est donc défini comme le rapport du courant utilisé dans la réaction principale  $I_p$  sur le courant fourni  $I$  : [54]

$$\eta_f = \frac{I_p}{I_p + I_s} \quad (\text{II.13})$$

#### 2. 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. Il est évalué sur un cycle d'utilisation de la batterie défini en puissance ou en courant pour lequel on calcule le rapport entre l'énergie fournie en décharge  $E_{dech}$  sur celle récupérée en charge  $E_{ch}$  : [54]

$$\eta_e = \frac{E_{dech}}{E_{ch}} \quad (\text{II.14})$$

### II.2.6. Durée de vie

La durée de vie d'une batterie est le nombre de cycle de charge/décharge avant que ces caractéristiques (capacité, résistance interne et autodécharge) ne se dégradent. Le nombre de cycle varie selon la technologie :

- Plomb : 500 cycles - 5 ans.
- Ni-Cd : 2000 cycles - 2 à 3 ans.
- NiMH : 500 à 1000 cycles - 3 à 4 ans.
- Li-on : 1000 cycles - 2 à 3 ans. [50]

#### 1. Profondeur de décharge

Cycle profond dans le domaine solaire, on utilise des batteries dite à «Cycle Profond » en anglais « DeepCycle» car elles peuvent être déchargées à plus de 50% de la capacité nominale. [52]

#### 2. Autodécharge

L'autodécharge est une réaction électrochimique provoquant une réduction progressive du niveau de charge d'une batterie au repos. Cette autodécharge dépend de la technologie utilisée et de la température de stockage :

- Plomb : 1 à 5% par mois environ.
- Lithium-ion : 10% par mois environ. [50]

#### 3. L'état de décharge

État de charge : la quantité de charge qui peut être restituée par rapport à la capacité à pleine charge [%]. [52]

Autres caractéristiques : L'impact sur l'environnement (matériaux aisément recyclable), la facilité de maintenance, simplicité de conception, souplesse de l'exploitation et de l'utilisation (l'exploitant s'intéresse beaucoup à cette caractéristique), la rapidité du système à mettre en disposition l'énergie stockée (temps de réponse du dispositif), etc. Enfin il est très important de

noter que ces caractéristiques s'appliquent au système de stockage dans sa globalité : éléments de stockage et convertisseurs de puissance. [53]

### II.3. Modelé électrique de la batterie :

#### II.3.1. Modèle R-C de la batterie :

Le modèle R-C comprend une Fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant une capacité interne de la batterie  $C_{bat}$  et une résistance interne  $R_s$ . [1]

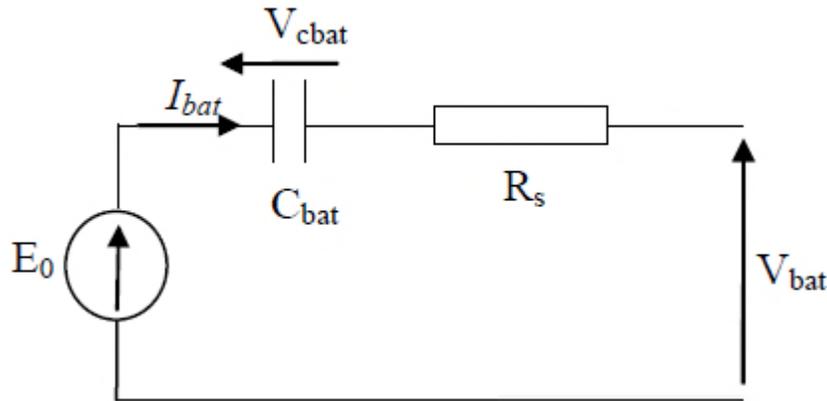


Figure (II-7) : Modèle R-C de la batterie. [62]

On a donc : [62]

$$V_{batt} = E_0 - R_s \cdot I_{batt} - V_{C_{bat}} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$E_0$  : Tension à vide de la batterie.

$R_s$  : Résistance interne de la batterie.

$C_{bat}$  : Capacité nominale de la batterie.

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

$$E_{DC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$Q_d$  : La quantité de charge.

$E_{DC}$  : L'état de charge.

### II.3.2. Modèle de thévenin :

Dans ce modèle, tous les éléments du circuit équivalent sont supposés constants et différents en charge et en décharge. Mais, en réalité ces paramètres varient aussi en fonction de l'état de charge et le taux de décharge. [51]

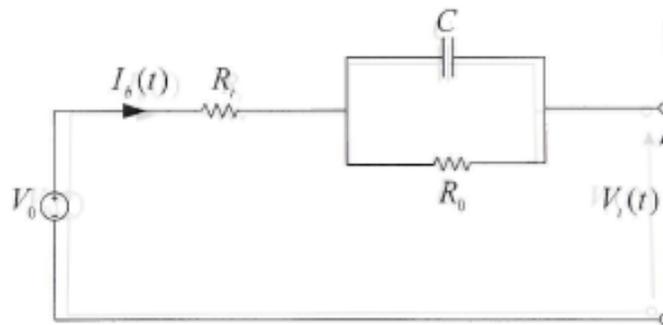


Figure (II-8) : modèle de thévenin [51]

### II.3.3. Modèle modifié de Thévenin :

Une nouvelle approche pour évaluer les batteries est un modèle modifié pour le modèle de Thevenin. Ce modèle est basé sur un fonctionnement sur une gamme de combinaisons de charges. L'équivalent électrique du modèle proposé est tel que représenté sur la figure. [63]

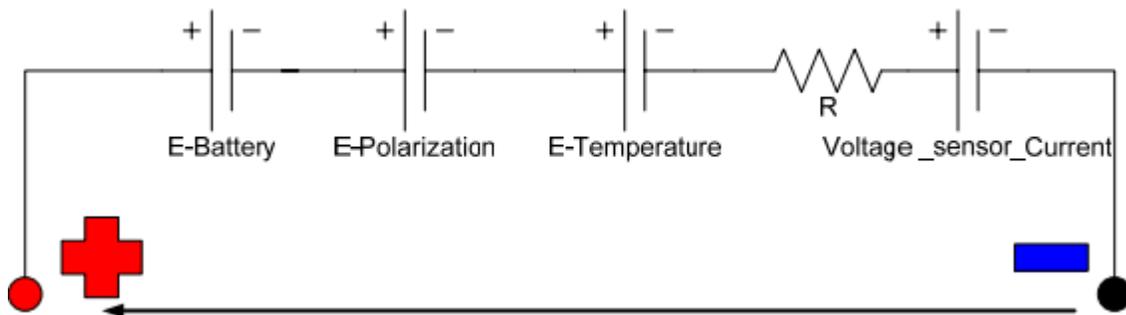


Figure (II-9) : modèle modifié de Thévenin. [63]

Le modèle de circuit principal se compose des cinq sous-circuits suivants : [63]

$E_b$  : Il s'agit d'une simple source de tension continue désignant la tension dans les cellules de batterie.

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

$E_t$ : Elle représente l'effet de la température sur la tension aux bornes de la batterie.

$R$  : Il s'agit de l'impédance interne de la batterie, dont la valeur dépend principalement de la relation entre la tension de la cellule et l'état de charge (SOC) de la batterie.

Tension sonde – courant : Il s'agit essentiellement d'une source de tension avec une valeur de 0V.

C'est utilisé pour enregistrer la valeur du courant de la batterie.

### II.3.4. Modèle dynamique linéaire de thévenin

Une variante améliorée du modèle de Thevenin est un modèle de batterie électrique linéaire. Ce modèle est une longueur d'avance sur le modèle Thevenin. Il modélise le comportement de la batterie pendant la surtension et l'autodécharge de la batterie. [63]

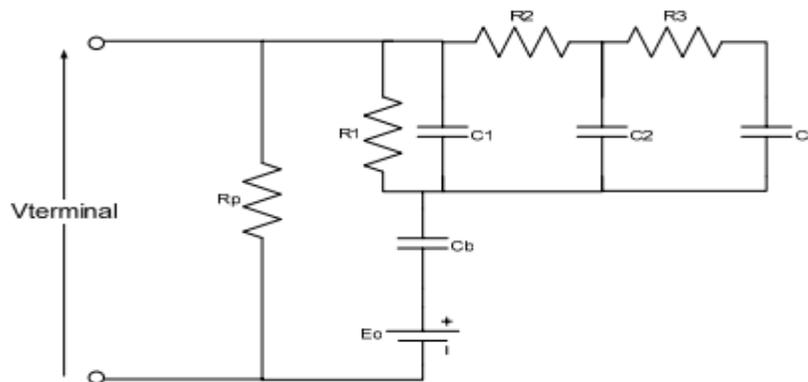
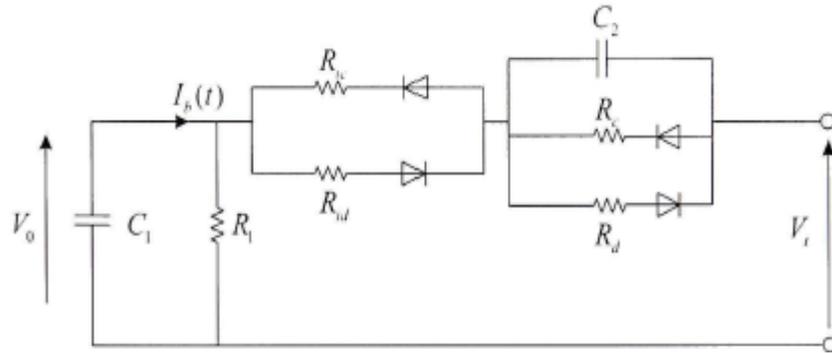


Figure (II-10) : modèle dynamique linéaire de thévenin. [63]

### II.3.5. Modèle dynamique non linéaire de thévenin :

C'est une variante du modèle de Thevenin qui tient compte de la non-linéarité des paramètres. Dans ce modèle, le processus de charge et décharge sont séparés. En plus, tous les paramètres sont en fonction de l'état de charge de la batterie. [51]



**Figure (II-11) :** modèle dynamique non linéaire de thévenin. [51]

Les paramètres du modèle sont définis comme suit :

$C_1$  : Capacité de l'accumulateur.

$R_1$  : Résistance d'auto décharge.

$(R_{ic} \text{ et } R_{id})$  : représentent la résistance interne due à l'électrolyte et aux électrodes respectivement pendant la charge et la décharge.

Les deux circuits RC ( $R_c C_2$  et  $R_d C_2$ ) représentent respectivement la surtension à la fin de la charge et la chute brusque de la tension à la fin de la décharge. Du fait que tous les paramètres de ce modèle sont variables.

### II.3.6. Modèle de CIEMAT :

Dans ce modèle la batterie comprend deux éléments : une source de tension et résistance interne.

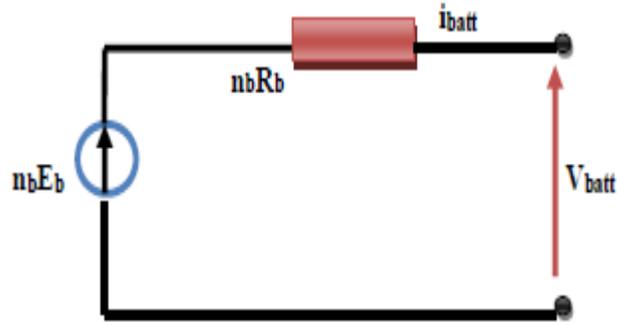


Figure (II-12) : Modèle CIEMAT de la batterie. [64]

Pour  $n_b$  cellules en séries, nous pouvons exprimer la tension aux bornes du système de stockage : [65]

$$V_b = n_b \cdot E_b \pm n_b \cdot R_b \cdot I_{batt} \quad (\text{II. 17})$$

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie  $C_{batt}$  que peut restituer la batterie, en fonction de courant moyen de décharge  $I_{batt}$ . Son expression est établie à partir du courant

$i_{10}$  correspondant au régime de fonctionnement C10. [64]

$$\frac{C_{batt}}{C_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67 \cdot \left(\frac{I_{batt}}{I_{10}}\right)^{0.9}} \cdot (1 + 0.005 \cdot \Delta T) \quad (\text{II. 18})$$

Avec :

$\Delta T$  : Réchauffement de l'accumulateur par rapport à une température ambiante de 25°C.

La capacité  $C_{batt}$  sert de référence pour déterminer l'état de charge (EDC) de la batterie.

Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de chaleur manquante à la batterie. [64]

$$E_{DC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \quad (\text{II. 19})$$

$$Q_d = I_{batt} \cdot t \quad (\text{II. 20})$$

T : la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{batt}$ .

L'équation de la tension en régime de charge est comme suit, elle est en fonction de l'état de charge et du courant de la batterie : [64]

$$V_{batt-charg} = n_s \cdot [2 + 0.16 \cdot E_{DC}] + n_b \cdot \frac{|I_{batt}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1 + (I_{batt})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - E_{DC})^{1.2}} \right) + 0.036 \cdot (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (\text{II. 21})$$

L'équation de la tension en régime de décharge est comme suit, elle est en fonction de l'état de charge et du courant de la batterie : [64]

$$V_{batt-décha} = n_s \cdot [1.965 + 0.12 \cdot E_{DC}] - n_b \cdot \frac{|I_{batt}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1 + (I_{batt})^{0.8}} + \frac{0.27}{(1 - E_{DC})^{1.5}} \right) + 0.02 \cdot (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (\text{II. 22})$$

## II.4. Conclusion

La batterie contient différents quantités distinctes telles que l'état de charge, et nous avons également abordé de différents modèles de la batterie.

Pour comprendre et prédire le processus de la batterie, il doit être modélisé, et c'est l'objectif du chapitre suivant où nous étudions la simulation de comportement de la batterie.

# *Chapitre III*

## *Simulation De Modèle De CIEMAT De La Batterie*

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

### III.1. Introduction :

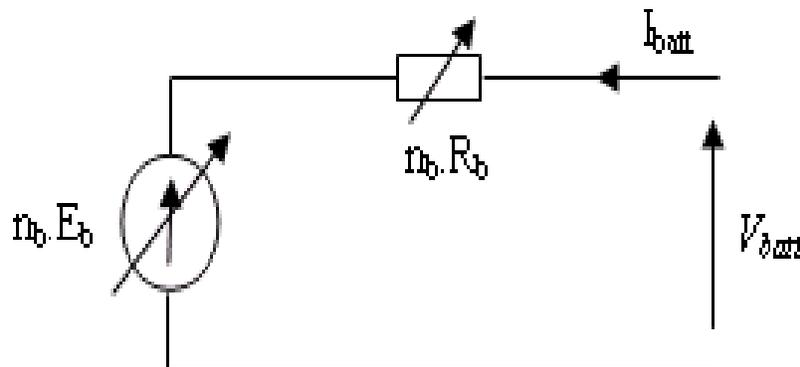
Il n'Ya pas de modèle sans défaut et il est très précis pour cela nous avons choisi de simuler le comportement de la batterie un bon modèle en tenant compte de tous ses paramètres.

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 quelques défauts.

### 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. [38]

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 physique qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, selon les modèles proposes dans le littérature, il faudrait tenir compte de la température. [1]

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 : [39]

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

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 apport à une température ambiante qui est égal à 25°C. [1]

Avec :

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

$I_{10}$  : 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 :

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

**Avec :**

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

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

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

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

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

### 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 :

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

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

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

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

**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 :

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

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

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

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

**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

#### III.3.5.a. Résistance en décharge

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

#### III.3.5.b. Résistance en charge

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

### III.2.6 Rendement de charge et de décharge

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

### 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.

#### III.4.1. Influence de la température

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

##### III.4.1.a. Sur la capacité :

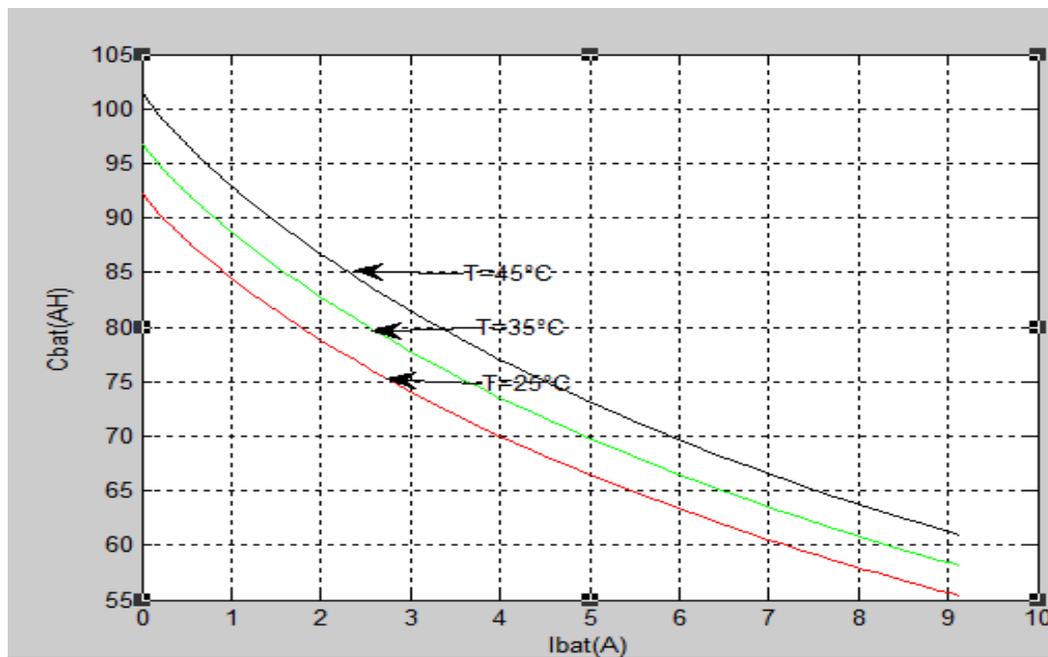
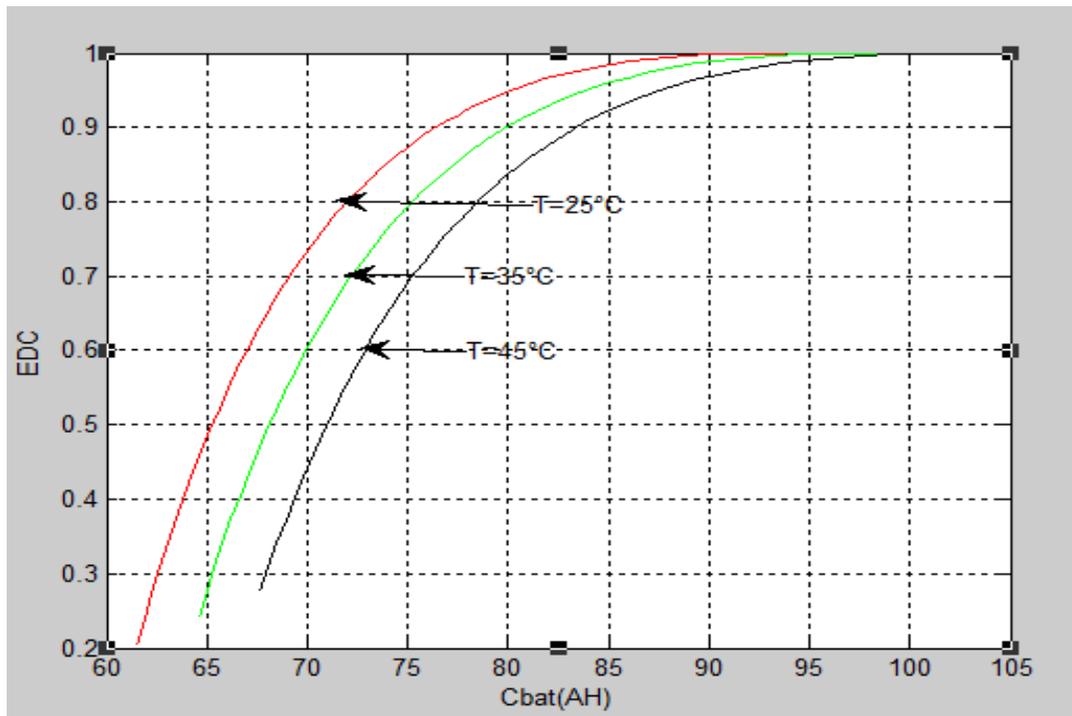


Figure (III-2) : Influence de la température sur la capacité en fonction de courant pour différents température.

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

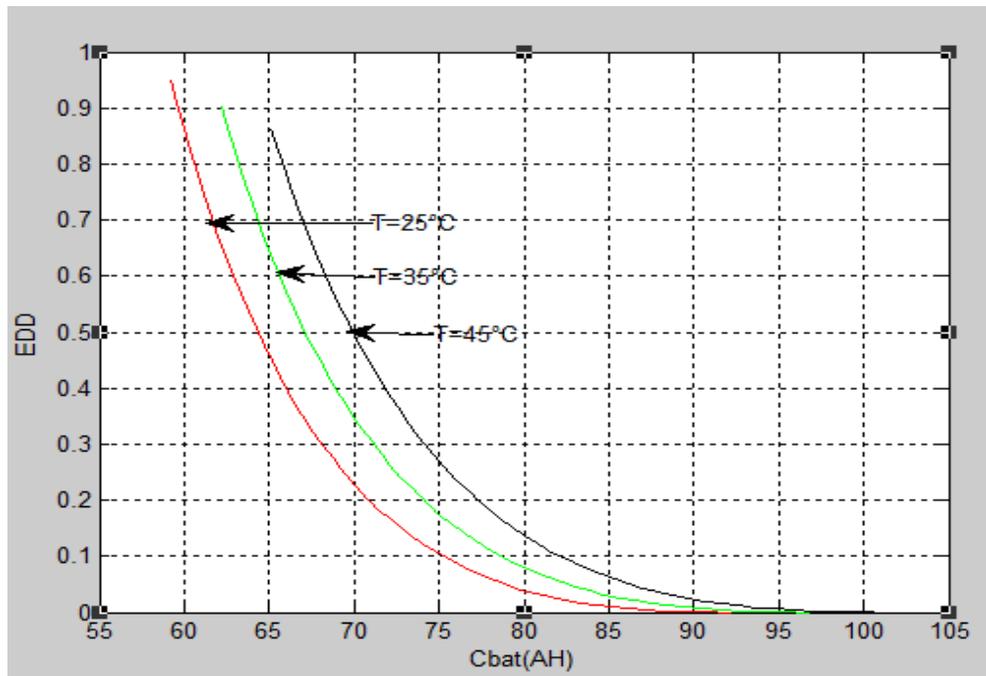
#### III.4.1.b. Sur l'état de charge



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

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 différents 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.

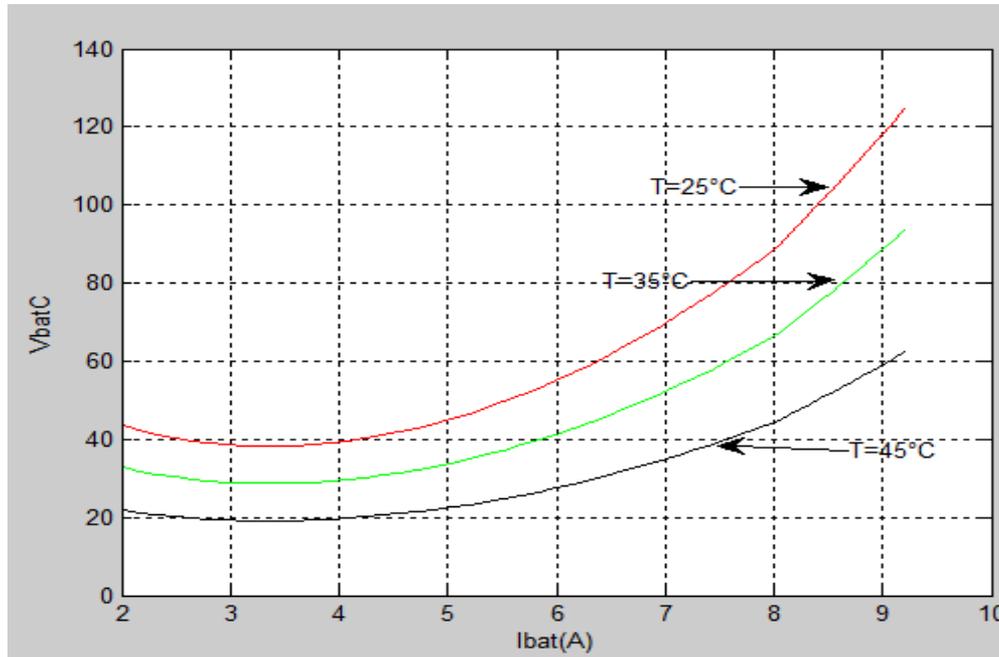
## III.4.1.c. Sur l'état de décharge



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

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 inverse 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 augmente et la capacité augmente aussi.

## III.4.1.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.

## III.4.1.e. La résistance

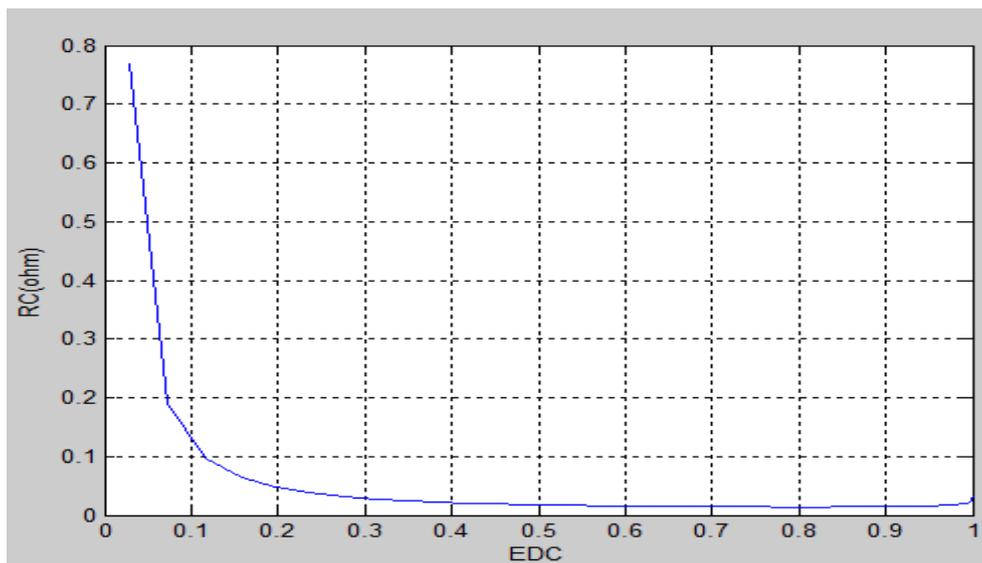


Figure (III-6) : Résistance de la batterie en charge.

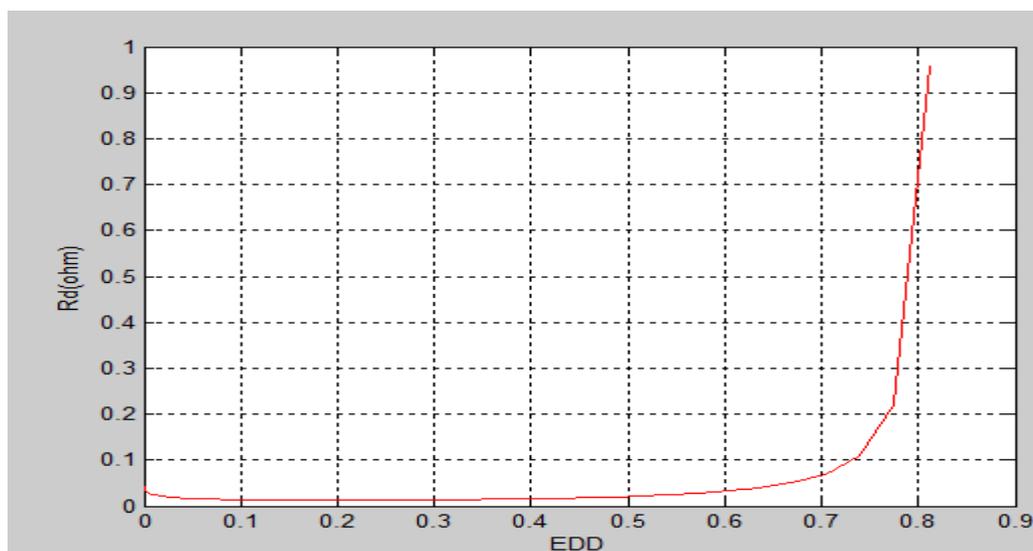


Figure (III-7) : Résistance de batterie en décharge.

Ces deux figures III.6 et III.7 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.

### **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 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**

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituants.

Le générateur photovoltaïque (GPV) est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique et offre la possibilité de produire de l'électricité, directement à partir d'une ressource renouvelable et, largement disponible.

Pour étudier le fonctionnement d'un système Photovoltaïque avec stockage nous nous utilisons logiciel de calcul scientifique Matlab-Simulink.

Le chapitre est divisé en deux parties, la première partie, dans laquelle nous présentons le modèle de panneau que nous avons choisis, et dans la deuxième partie, nous faisant un petit dimensionnement du système que nous modélisons et nous terminons le chapitre par simulation globale du système.

### **IV.2. Modélisation et simulation du générateur Photovoltaïque**

La puissance d'une cellule photovoltaïque simple et, relativement, petite (approximativement de 0.5 [Watts/cellule]). Pour produire la tension et la puissance exigées, les cellules sont reliées en série et en parallèle, elles sont groupées dans des modules (le module étant le plus petite ensemble conçu pour produire la puissance).

Des modules sont combinés dans des panneaux qui sont reliés ensemble pour former d'une manière générale, un champ photovoltaïque. Cette méthode nous permet d'atteindre la puissance désirée. [56]

### IV.2.1. Association en série

Permet d'augmenter la tension de sortie, dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résulte de groupement en série par l'addition des tensions à courant donné. [57]

### IV.2.2. Association en parallèle

On associe couramment les panneaux solaires photovoltaïques en parallèle pour augmenter le courant solaire. Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. [58]

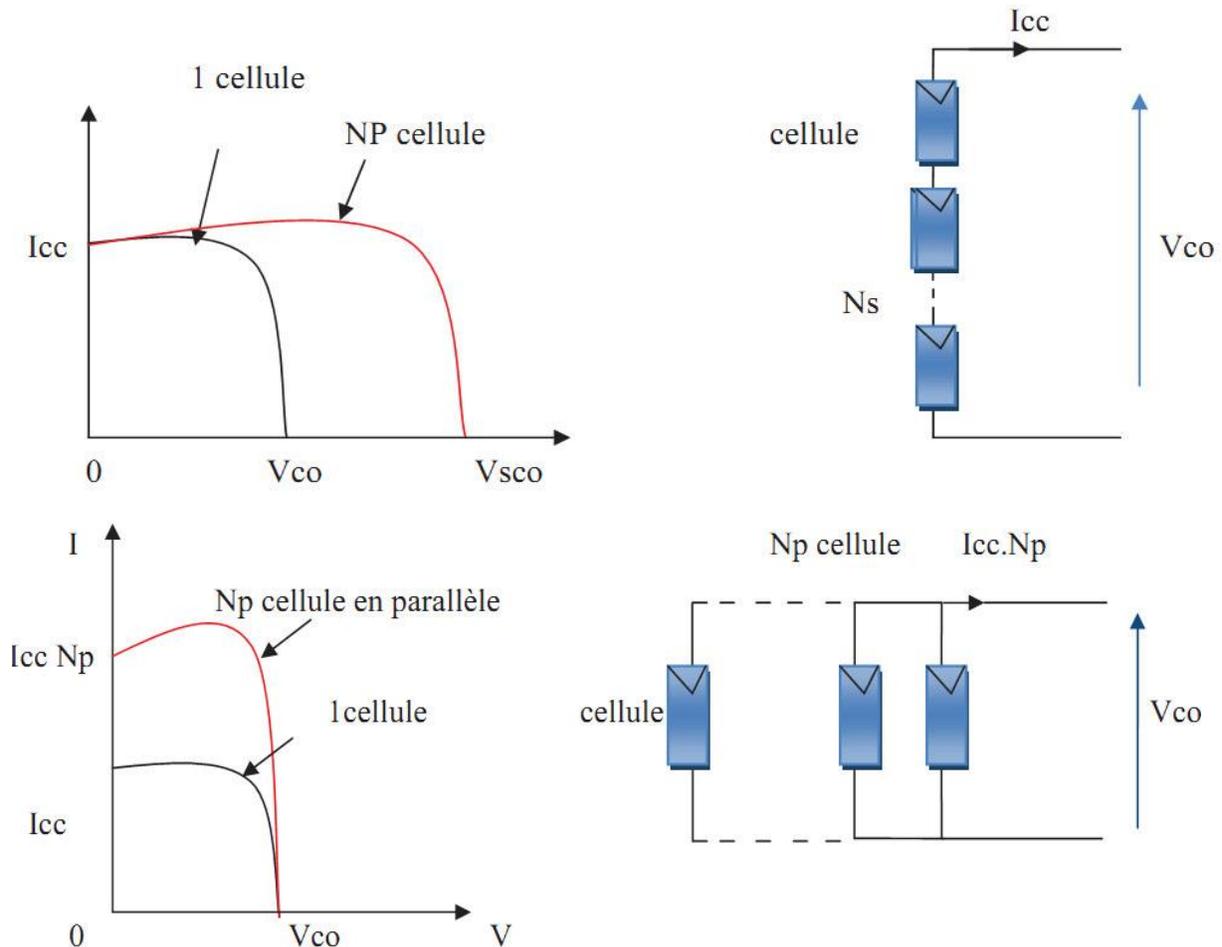


Figure (IV-1) : Association des modules photovoltaïques. [59]

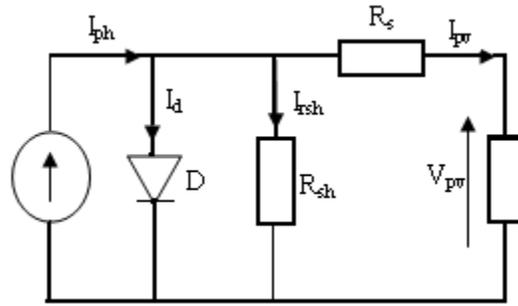


Figure (IV-2) : Schéma équivalent du générateur photovoltaïque. [38]

A partir de schéma électrique équivalent de la figure (IV.2) on déduit l'expression du courant de module  $I_{pv}$  :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (\text{IV. 1})$$

$I_{pv}$  : Courant de module.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$  : Courant de la diode.

$I_{rsh}$  : Courant de la résistance shunt.

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

Le courant photovoltaïque est donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{sc} \left\{ 1 - K_1 \exp(K_2 V_{pv}^m) - 1 \right\} \quad (\text{IV. 2})$$

Les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $m$  sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K^4}{V_{oc}^m} \quad (\text{IV. 3})$$

$$K^3 = \ln \left[ \frac{I_{sc}(1 + K^1) - I_{mpp}}{K^{1I_{sc}}} \right] \quad (\text{IV. 4})$$

$$K^4 = \ln \left[ \frac{(1 + K^1)}{K^1} \right] \quad (\text{IV. 5})$$

$$m = \frac{\ln \left[ \frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad (\text{IV. 6})$$

Avec :

$I_{mpp}$ : Courant au point de puissance maximale.

$V_{mpp}$  : Tension au point de puissance maximale.

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

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

Lorsque la température et l'insolation changent, le courant et la tension changent selon les équations suivant :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{IV. 7})$$

$$\Delta I = \alpha_{sc} \left( \frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left( \frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc, stc} \quad (\text{IV. 8})$$

$$\Delta V = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I \quad (\text{IV. 9})$$

$G$  Et  $T_c$  : Représente respectivement, le niveau d'insolation et la température dans des conditions quelconque.

$G_{stc}$  Et  $T_{stc}$  : Représentent respectivement, le niveau d'insolation et la température dans les conditions STC.

$\Delta t_c$  : Variation de la température.

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

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

$\alpha_{sc}$  : Coefficient d'incrémentation du courant  $I_{sc}$  (sous les conditions de fonctionnement standard).

$\beta_{oc}$  : Coefficient d'incrémentation de la tension  $V_{oc}$  (sous les conditions de fonctionnement standard).

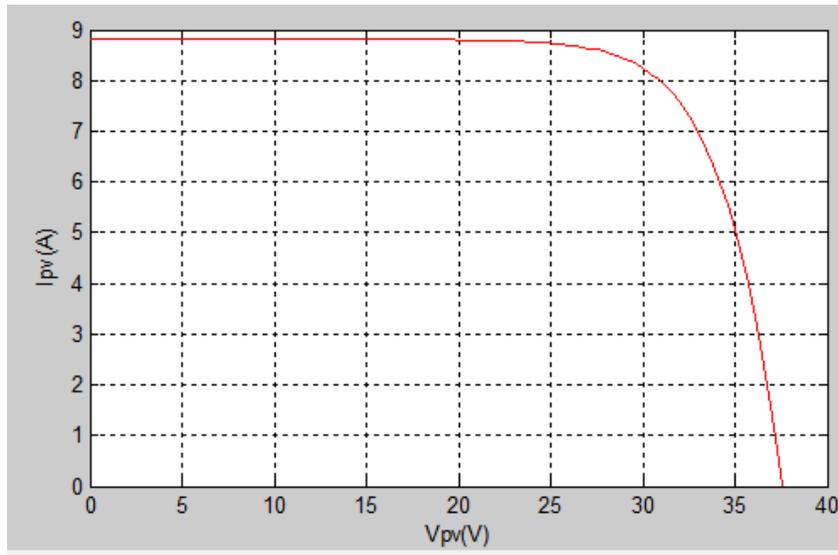
Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque est donne par :

$$V_{nouv} = V_{stc} + \Delta V \quad (\text{IV. 10})$$

$$I_{nouv} = I_{stc} + \Delta I \quad (\text{IV. 11})$$

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

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



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

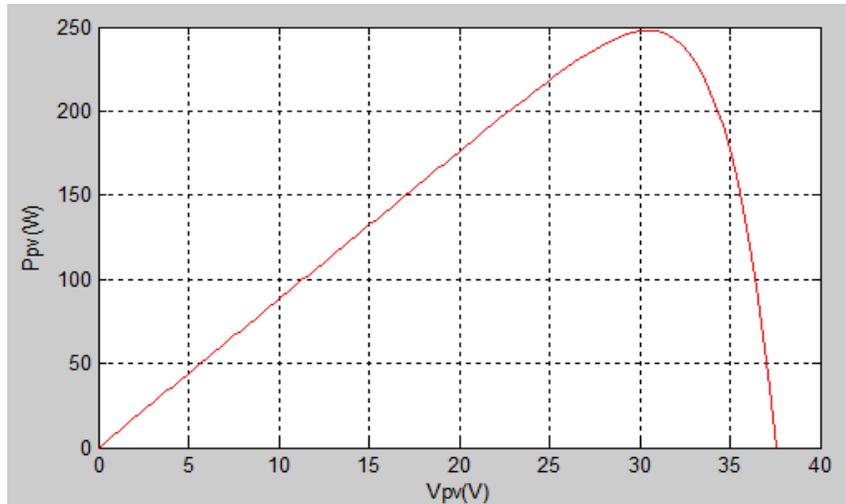


Figure (IV-4) : caractéristique puissance – tension du générateur photovoltaïque pour  $G=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$ .

#### IV.3.1.a. Influence de la variation des conditions météorologique sur les paramètres du panneau photovoltaïque

#### IV.3.1.b. Influence de l'irradiation

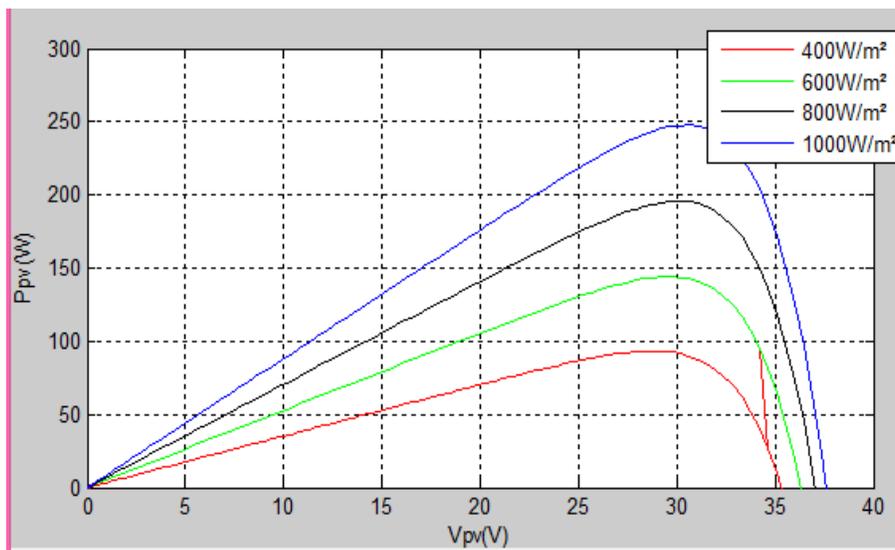
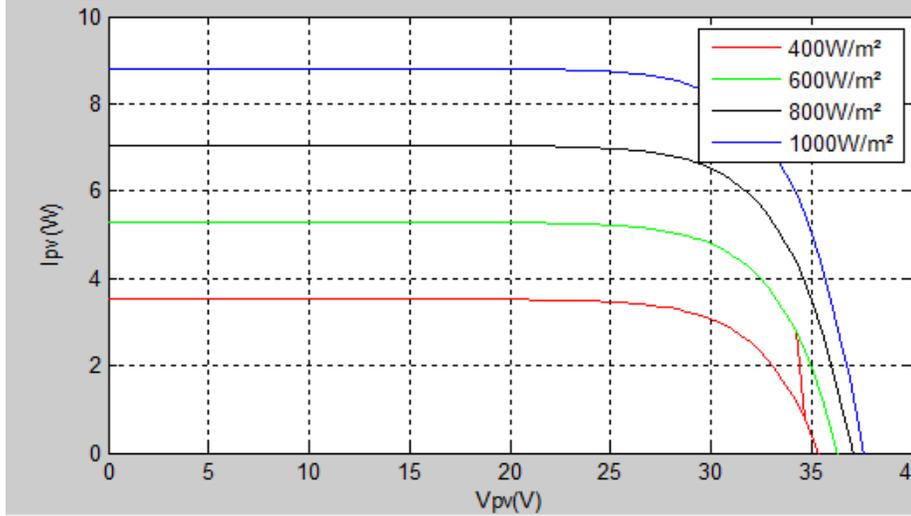


Figure (IV-5) : caractéristique puissance tension du générateur pour différent niveau d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000 W/m^2$ ) et  $T=25^{\circ}C$ .

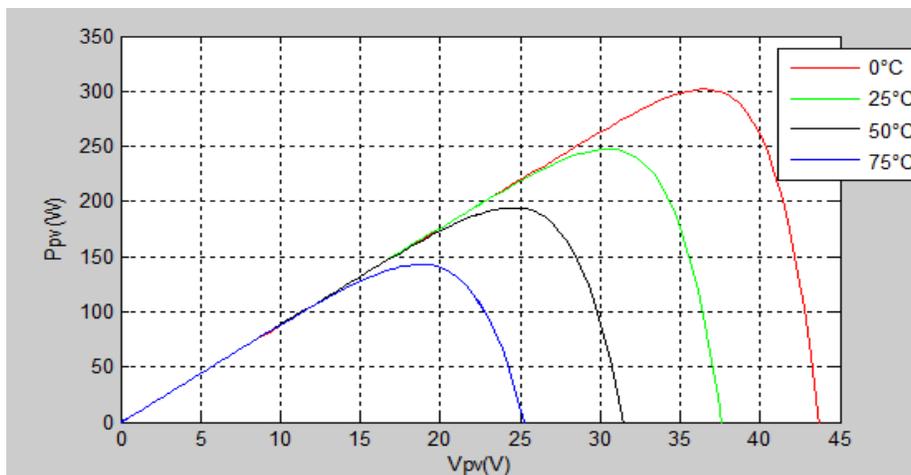


**Figure (IV-6) :** caractéristique puissance tension du générateur pour différents niveaux d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) et  $T=25^\circ\text{C}$ .

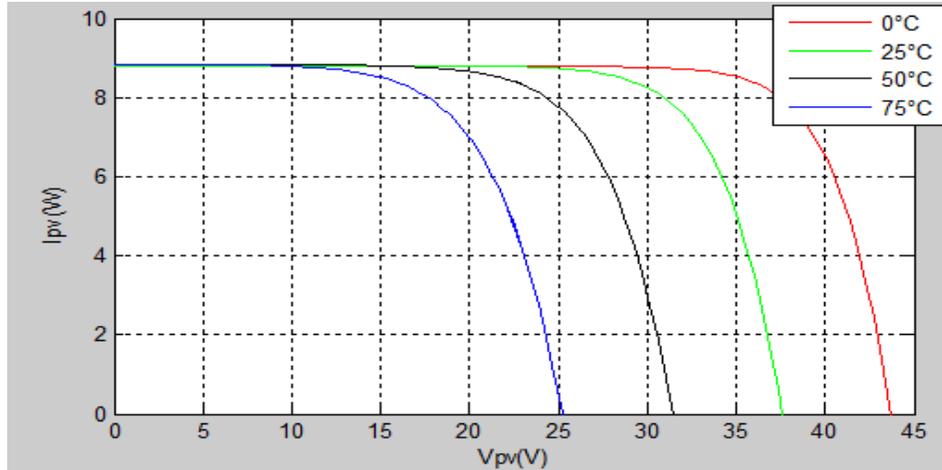
Nous avons tracé les caractéristiques  $I-f(V)$  et  $P-f(V)$  pour différentes valeurs d'ensoleillement mais à une température constante  $T=25^\circ\text{C}$  et c'est pour voir l'influence de l'ensoleillement.

L'augmentation de courant est causée par l'augmentation de l'ensoleillement, mais on note qu'il y a une légère augmentation pour la tension en circuit ouvert.

#### IV.3.1.c. Influence de la température



**Figure (IV-7) :** caractéristique puissance tension du panneau PV pour une variation de température ( $T=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) et  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .



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

La figure (IV.7) représente la caractéristique puissance tension du panneau PV pour une variation de température, nous avons remarqué une diminution de la puissance quand la température augmente.

La figure (IV.8) représente caractéristique courant tension ces résultats montrant que cette caractéristique est influencé par la température, l'augmentation de la température fait augmenter le courant diminue la tension.

### IV.3.2. Groupement des panneaux photovoltaïques

#### IV.3.2.a. Association en série

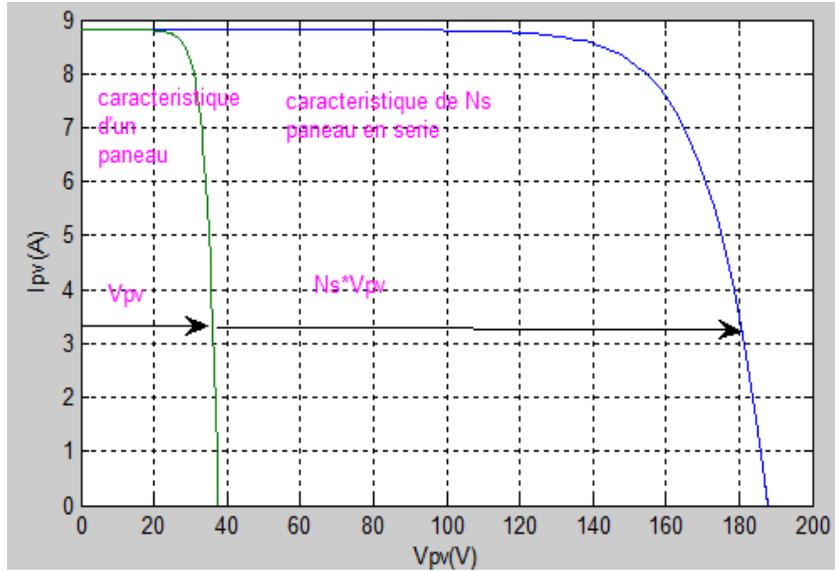


Figure (IV-9) : caractéristique courant tension de  $n_s$  panneau en série.

#### IV.3.2.b. Association en parallèle

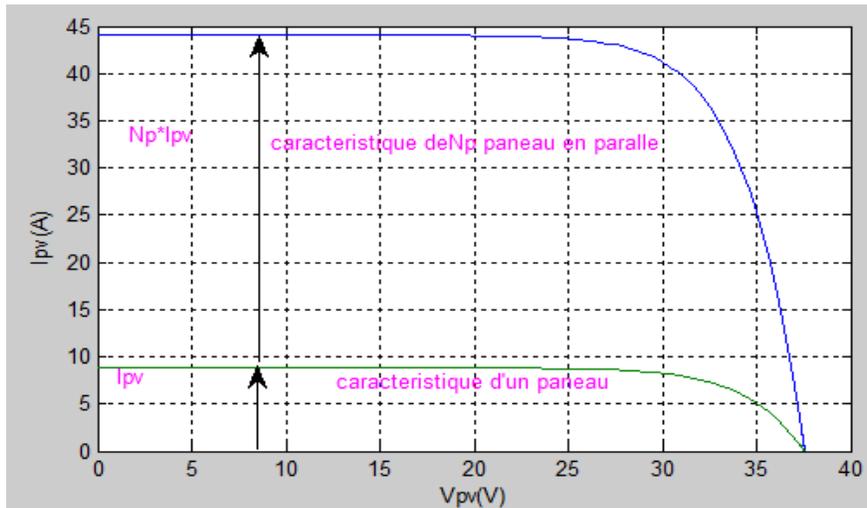


Figure (IV-10) : caractéristique courant tension de  $n_p$  panneau en parallèle.

La figure (IV.9) montre la caractéristique résultante obtenue en association en série  $N_s=5$  panneau identique nous avons remarqué que le groupement de panneau en série est obtenue par addition des tensions a courant donne, alors que dans un groupement des panneaux en parallèle, les panneaux sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants a tensions donne. La figure(IV.10) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèle  $N_p=5$  panneau identique.

#### **IV.4. Dimensionnement du système PV avec stockage**

La chaine de conversion étudiée est composée des éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation »
- Moyen de stockage électrochimique batterie modélisé avec modèle de CIEMAT
- Un convertisseur DC-DC de type Boost composé essentiellement d'un interrupteur  $K$  (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$  l'interrupteur  $K$  et de rapport cyclique variable  $a$ .
- La charge

Le modèle est simulé sous l'environnement Matlab /Simulink, la batterie choisie est du type plomb-acide (Lead-Acid) de tension nominale 24V, de capacité nominale de 100 Ah et d'état de charge initial (EDC) de 100%.

Le contrôleur de charge est conditionnée par le modèle de CIEMAT permet de contrôler l'état de charge de la batterie et sa tension suivant nature de courant. Suivant la valeur du seuil, le contrôleur agit pour basculer le dispositif de stockage en charge ou en décharge dans une résistance que nous avons choisie comme charge dans notre exemple.

Les figures IV.11 et IV.12 montrent les résultats de simulation pour le cas d'une charge résistive de valeur  $100\Omega$ , sous un ensoleillement constant de  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$ .

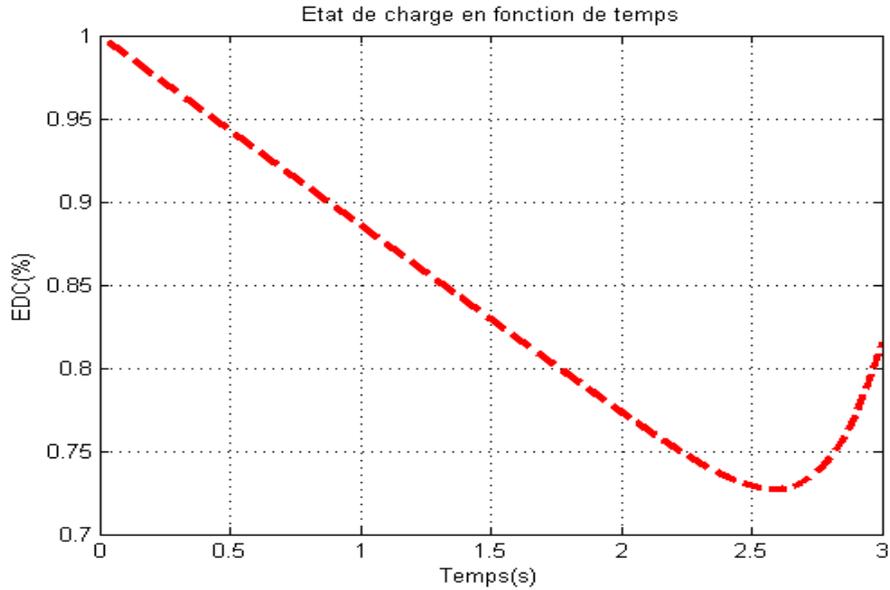


Figure (IV-11) : état de charge de batterie en fonction de temps.

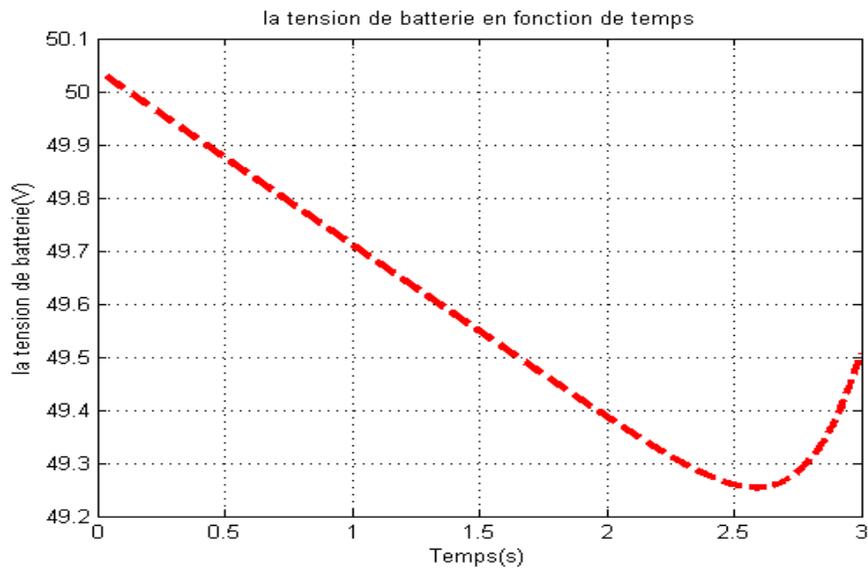


Figure (IV-12) : la tension de batterie en fonction de temps.

Les résultats de simulation montrent bien l'influence de la charge sur le comportement de la batterie pendant la décharge. La batterie se décharge jusqu' la puissance de panneaux prendre ou égale la puissance de la charge donc la batterie basculer en état de charge a t 2.5s.

## **IV.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons parlé du modèle du panneau PV appelé modèle à une diode, que nous avons simulé en utilisant MATLAB/SIMULINK.

Nous avons étudié la variation d'ensoleillement en plus de la température pour vérifier son exactitude.

Et dans la deuxième partie du chapitre, nous avons déterminé les dimensionnements du système PV parent qui se connecte avec MPPT au parent qui stocke l'énergie à travers la batterie, qui à son tour économise l'énergie pour des usages externes, car le dispositif de contrôle contrôler l'état de charge et de tension de la batterie en fonction du type de courant.

Les résultats de la simulation montrent l'effet de la charge sur le comportement de la batterie lors de la décharge.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce mémoire, nous avons étudié un système photovoltaïque énergétiquement indépendant couplé à des batteries de stockage pour assurer la continuité énergétique. Ce système fonctionne à l'aide d'un onduleur DC / DC contrôlé par MPPT

Où dans le premier chapitre nous avons parlé de généralité des systèmes photovoltaïques et quelques informations sur le gisement solaire et le corps noir (le soleil)

Et le deuxième chapitre consacre sur les différents systèmes de stockage d'énergie électrique et en particulier les batteries et leur principe de fonctionnement, la caractéristique des batteries ainsi que les différents modèles de batteries existant dans la littérature

Et dans le troisième chapitre on a choisi le modèle CIEMAT de simuler le comportement de la batterie ou nous avons montré ses équations et quelque résultat de simulations

Dans le dernier chapitre basé sur la présentation du modèle du GPV (générateur photovoltaïque) et on a déterminé ses différentes caractéristiques et ensuite nous faisant un petit dimensionnement du système PV commande par MPPT avec batterie de stockage

Et au final, nous concluons que le contrôleur d'état de charge a pour but d'assurer la flexibilité et une meilleure gestion des flux d'énergie au sein du système et d'assurer une longue durée de vie du système de stockage.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] : MAZOUZ.K (2011.2012), Etude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque, Mémoire de fin d'étude Université ABDERRAHMANE MIRA .Bejaia
- [2] : BRAHIMI.M (janvier 2019), Système de conversion de l'énergie photovoltaïque, institut des sciences et technologie, Centre universitaire SALHI AHMED .NAAMA
- [3] : (BONDHOUCHE, M et OUENNOUGHI, M ,2016), Gestion d'un système Photovoltaïque avec stockage, Diplôme master en électrotechnique, Université ABDERRAHMANE MIRA .Bejaia
- [4] : BOUKHLIF, H (juin2017), Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque de 300KW, mémoire de master Université M4HAMED BOUGAR, BOUMERDES
- [5] : MOHAMMED, A (15/12/2014), étude et optimisation d'un système hybride eolien-photovoltaïque, diplôme de magister, université FERHAT ABBAS .SETIF
- [6] : SINGO, AT (3 février 2010), système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybrides pour l'habitat énergétique autonome, thèse de doctorat, école doctorale IAEM LORRAINE, université HENRI POINCARRE
- [7] : AZZEDINE, H, modélisation et commande d'un système photovoltaïque, mémoire en magister en automatique, université BADJA MOKHTAR, ANNABA
- [8] : SLAM FATEH, M, modélisation d'un système multi générateur, photovoltaïque interconnectés au réseau électrique, mémoire de master, université FARHAT ABBAS, SETIF
- [9] : GHENISSA, H (2013.2014), étude comparative de l'alimentation en électricité d'un site isole par voie classique et système PV cas de Wilaya de BISCRA, LABRECH-TOLGA-, mémoire de master, université MOHAMMED KHIDER, BISKRA
- [10] : BELCOUT, A (28.10.2014), étude de diagnostic des défauts fréquents aux systèmes PV par emploi de la caractéristique curant-tension, mémoire de magister, université de BECHER
- [11] : BENDJELLOULI, Z (28/06/2009), contribution à la modélisation d'une cellule solaire, mémoire de magister, université de BECHER

[12] : RAHMANI, N (06/05/2012), modélisation des panneaux solaire en vue de leur implémentation dans le circuit FPGA, mémoire de magister, université FERHAT ABBAS, SETIF

[13] : MAOUEDJ, R (decembre2005) application de l'énergie PV au pompage hydraulique sur les sites de TLEMCEN et de BOUZAREAH, mémoire de magister, université ABOU BEKR BELKAID, TLEMCEN

[14] : (DEGLA, M et BEN AHMED, B, 24/05/2017), dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, mémoire master professionnel, université KASDI MERBAH, OURGLA

[15] : ZAROOUR,L(10/07/2010), étude technique d'un système d'énergie hybride PV-éolien-hors réseau , thèse de doctorat, université MENTOURI, CONSTANTINE

[16] : BOUZERIA, H (30 avril 2016), modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque, université HADJ LAKHDER, BATNA

[17] : FRANCOIS, RJ (4 janvier 2011), recherche d'optimum d'énergie pour charge/ décharge d'une batterie a technologie avancées dédiées a des applications photovoltaïque, thèse de doctorat, université TOULOUSE3

[18] : FALK, A et all(27 janvier 2010, photovoltaïque pour tous conception et réalisation d'installation, livre

[19] : A. Méfit, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie, Revu. Energy. Ren. Vol. 2 (1999) 69-85

[20] : MOUHOUS, S-CHAOUCHI, MEMOIRE DE MAGISTER Spécialité : Energies Renouvelables Option : Photo thermique Thème Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné Présenté

[21] : HALOUANE, A(2016,2017), modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque, mémoire de fin d'étude, université M'hamed BOUGARA, BOUMERDAS

[22] : ALAIN, R (jan 2011), gisement solaire et transferts énergétique, master énergie renouvelable , université de CERGY PONTOISE

[23] : [studylibfr.com/doc/4289205/diffraction---site-gerald-vincent](http://studylibfr.com/doc/4289205/diffraction---site-gerald-vincent)

- [24] : Edmond Bauer, Marcel Moulin. La constante de la loi de Stefan. J. Phys. Theor. Appl., 1910, 9 (1), pp.468-490.
- [25] : Brouche, M(2010,2011), travaux pratique Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth, LIBAN
- [26] : HAI, A et HAMMADOU, Etude de corrélation entre l'irradiation solaire et facteur météorologique, diplôme de master2 en électrotechnique (énergie renouvelable)
- [27] : [https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/resources/fr02/Chap\\_2\\_FR.pdf](https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/resources/fr02/Chap_2_FR.pdf)
- [28] : KALED, A (mai-juin 2008), dispositif d'étalonnage du pyranometre, rapport de stage, master1 physique et ingénierie, université de REUNION
- [29] : Le soleil et son rayonnement Petros Axaopoulos TEI d'Athènes Grèce
- [30] : <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM08/S08P16.HTM>
- [31] : AZIB, T (14 decembre2010), contribution à l'étude d'electro-generateur à pile à combustible, thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-SUD XI Faculté des Sciences d'Orsay
- [32] : BOULOU, ch. (04/2015), le stockage d'énergie : conversion d'énergie en gaz combustible, livre, Transvalor - Presses des mines (4 mai 2015)
- [33] : CECILE PERA, M et all, (26juin 2013), composants électrochimique « électrolyseur, pile à combustible, supercondansateur, accumulateur, ouvrage,
- [34] : GUILLO, R (21 juillet 2014), stockage d'énergie par volant d'inertie, article
- [35] : KAUR BONAL, J et PIERE ODRU, (10 mai 2012), stockage inertiel de l'énergie, Réf : D4030 v2
- [36] : ABDELHAFID, CH (2018/2019), conception et réalisation d'un chargeur de batterie plomb-acide dans un micro- réseau DC, thèse, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [37] : NUGUES, S (09 octobre 1996), mesure de l'état de charge d'une batterie pat oculomotrice corrige par impedancemetrie, thèse de doctorat
- [38] : (IDIR, I et all, octobre, 2014), modélisation et simulation d'un système de stockage dédiée aux centrales photovoltaïques [1-2]
- [39] : (S, Hakim et all ; 4jul2017), comparaison de deux modèle de batterie dans les systèmes PV, revue N°17-026-01,1033-1041, morocco

- [40] : (Robyns, B et all ; 20.15), gestion et valorisation du stockage de l'énergie dans les réseaux électrique, ISTE édition LTD 27-37George Road London
- [41] : Karoui, F (26octobre2007), optimisation de stratégies de gestion des batteries au plomb utilisés dans les systèmes photovoltaïque, thèse de doctorat, Institut nationale polytechnique de Grenoble, France
- [42] : Coupon, F (26janvier2017), stockage pour les énergies renouvelable : évaluation et modélisation de la batterie Plomb-Acide, thèse de doctorat, Université de Guyane, Amazone
- [43] : Devillers, N (26jun2013), caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique, thèse de doctorat, Université de France –Comete
- [44] : AnLi (4fevrier 2013), Analyse expérimentale et modélisation d'élément de batterie et de leur assemblage –application aux véhicules électrique et hybrides, Diplôme de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon1
- [45] : Benamrouche, (2010/2011), système photovoltaïque autonome, diplôme de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
- [46] : Patin, N (2015), électronique de puissance pour l'industrie et les transport5, ISTE édition LTD LONDON
- [47] : <https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>
- [48] : [Moussane, S][Belaid, S] (2013,2014), Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec batteries, Mémoire de fin de cycle Master2en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira, BEJAIA
- [49] : Boutte, A(2014,2015), identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïque, thèse de doctorat, Université des Science et de la technologie, Mohammed Boudiaf, ORAN
- [50] : JVAU DELIN(2016), la productivité contribution de la modelisation, lycee PoPe clement, Passac

- [51] : Dekkiche, A(2008), modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge, mémoire présente, Ecole de technologie supérieur, Université de QUEBEC
- [52] : (Ait chikh M, S et all, 15/16/17 octobre 2012), simulation et réalisation d'un contrôleur de batterie solaire a base PIC 16F876, similaire internationale, Ghardaïa
- [53] :( Houssein, I et all, 24/28octobre2010), investigation des divers options de stockage d'énergie face à l'intégration des parcs éolien, dans les réseaux, conférence France syrienne sur les énergies renouvelable, damas
- [54] : Montaru, M (06/07/2009), contribution à l'évolution du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leur usage, thèse de doctorat, institut polytechnique de Grenoble, France
- [55] : (Wakaru, CH et all, 1 decembre 2005), charge-descharge characteristics of nickel/ zinc battery with polymer hydrogyl electrolyte pp- 291-294
- [56] : Aboud, S (2015), contribution à la commande des systèmes PV application aux systèmes de pompage, thèse de doctorat, université de Riens champagne Ardenne et de l'université de sfux
- [57] : (chikh, M et Belkaid, MS, 20/10/2011), étude de l'influence du profil de charge sur les performances d'un système photovoltaïque, mémoire de fin d'étude du diplôme d'ingénieur, université mouloud Mammeri, Tizi Ouzou
- [58] : Azzoug, Y (février 2008), commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque, thèse, université du QUEBEC
- [59] : Ait chek Dhidh, N, étude de système générateur photovoltaïque – batterie : application au véhicule électrique, mémoire de fin d'étude ingénieur d'état, université MOULOU MAMMERI, TIZI OUZOU
- [60] : (Tansaout, M et K Hemmar, S, 2015/2016), modélisation et simulation d'un panneau PV sous Matlab- Simulink, mémoire de master, université MOULOU MAMMERI, TIZI OUZOU
- [61] : Camara, M (4 juillet 2011), modélisation du stockage de l'énergie PV par supercondansateur, thèse de doctorat, institut polytechnique de CANAKARY, Université Gammel Abdel Nasser- GUINNE

---

**ANNEXE**

**Paramètre de modèle CIEMAT utilisé :**

nb	24
C10	92
I10	9.2

**Paramètres de panneau solaire utilisé :**

Paramètres	Value(SW250)
Maximum power(Pmax)	250Wp
Voltage et maximum power(Vmpp)	30.5V
Current et maximum power(Impp)	8.27A
Open circuit voltage(Voc)	37.6V
Short circuit current(Isc)	8.81V
Cells par module	60
Area	1.676 m <sup>2</sup>

---

## **Résumé**

Le but de ce travail est d'étudier les comportements de les batteries a plomb –acide à l'aide le modèle de CIEMAT et nous avons montré ses équations et Nous avons présenté le modèle du GPV (générateur photovoltaïque) et on a déterminé ses différentes caractéristique, nous avons déterminé les dimensionnements du système PV avec batterie de stockage que nous avons simulé en utilisant MATLAB/SIMULINK.

### **Mots clé :**

GPV, batterie, recherche de point de puissance maximale, CIEMAT

### **Abstract**

The aim of this work is to study the behavior of lead-acid batteries using the CIEMAT model and we have shown its equations and we will present the model of the GPV (photovoltaic generator) and we have determined its different Characteristically, we determined the sizing of the PV system with storage battery that we simulated using MATLAB / SIMULINK.

### **Key words:**

GPV, battery, maximum power point search, CIEMAT

### **الملخص**

الهدف من هذا العمل هو دراسة سلوك بطاريات الرصاص الحمضية باستخدام نموذج CIEMAT وقد أظهرنا معادلاتها وقدمنا نموذج GPV (المولد الكهروضوئي) وقد حددنا اختلافه بشكل مميز، حددنا الحجم لنظام PV مع بطارية تخزين قمنا بمحاكاته باستخدام MATLAB / SIMULINK .

### **:الكلمات الدالة**

CIEMAT، البطارية، أقصى بحث عن نقطة الطاقة، GPV