

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Energie Renouvelable en
Electrotechnique

OPTION : Energie Renouvelable

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme
de Master Académique**

Par :

**TITRAOUI Bilal
BOUDISSA Fatima Zohra**

Intitulé

**Modélisation et simulation d'une batterie à usage solaire
photovoltaïque**

Soutenu devant le jury composé de :

DJRIOUI Salim	Université de M'sila	Président
DRIF Mahmoud	Université de M'sila	Encadrant
KOURIKER Mustapha	Université de M'sila	Co-Encadrant
OUGHNI Façal	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

*Nous remercions **dieu** de nous avoir fourni la volonté nécessaire pour mener à terme ce modeste travail.*

Ce mémoire de Master a été proposé et dirigé par Monsieur M. Drif, de l'université Mohammed Boudiaf de M'sila . Ce moment est pour nous l'occasion de vous témoigner notre plus grande estime, notre profond respect et notre immense reconnaissance.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à notre Co-encadrant Mr. Mustapha Koriker. On lui est extrêmement reconnaissantes pour sa confiance, sa disponibilité, et aussi pour son aide et ses conseils

On remercie aussi les membres de jury qui ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos amis.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail...

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail A la lumière de ma vie, ma mère.*

A mon très cher père...

*A mes A mes adorables sœurs Naziha ,Fahima, Baya ,Habiba ,Hada
,Nacera et Kheira.*

A mon binôme Bilal et toute sa famille.

*A mes copines Hanane Bouchra Ahlem Dalila et toutes les copines de
lachambre z18*

A mon chat qui est toujours à mon côté.

Fatima.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail...

A la mes coups de cœur ma mère et mon père sans vous sans vos sacrifices et efforts, je ne serai guerre là, à écrire ces mots qui décrivent et témoignent peu mes vrais sentiments pour vous, ma fierté de vous avoir à mes côtés durant toutes les étapes de ma modeste mais heureuse vie.

J'espère que je saurai à la hauteur des valeurs que vous avez semées en moi ...que vous serez fière de moi comme moi je le suis.

A toutes ma famille Titraoui sans exception.

A mon binôme Fatima et toutes les amis et camarades sans exceptions qui sont vraiment n'nombreux. A notre 2eme pays que son amour est inconditionnel Palestine.

Bilal

Résumé :

Les énergies renouvelables sont un impératif face à la pénurie d'énergies, notamment l'énergie solaire ce dernier a plusieurs avantages.

Quant à ses inconvénients, l'énergie lumineuse n'est pas stable et manque la nuit, on aura donc recours au système de stockage d'énergie, qui est des batteries

Dans notre étude, nous verrons leurs types et usages en fonction des besoins et des coûts Nous aborderons également l'étude appliquée et la simulation du type (plomb-acide) tout en notant son comportement.

Mots clés : Générateur photoélectrique, Batterie, SOC, Charge, Décharge.

Abstract:

Renewable energy is an absolute necessity in light of the shortage of energies, mentioning solar energy

The latter has advantages. As for its disadvantages, the light energy is not stable and non-existent at night, so we will resort to the energy storage system, which resembles ducks In our study, we will see their types and uses, as well as the need and cost Also, to the applied study and simulation of the type (lead acid), noting its behavior.

Key words: Photoelectric generator, Battery, SOC, Charge, Discharge.

Sommaire :

Sommaire :

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Sommaire.....	IV
Liste de figures.....	V
liste des tableaux.....	VI
Liste des symboles et des abréviations.....	VII
Introduction générale.....	VIII

CHAPITRE I : Energie solaire photovoltaïque.

I. Introduction.....	16
I.1. L'énergie solaire.....	16
I.2. La cellule solaire.....	17
I.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	17
I.2.2. L'effet photovoltaïque.....	18
I.2.3. Les différents types des cellules photovoltaïques.....	19
• Cellule solaire à base de Silicium monocristallin.....	19
• Cellule solaire à base de Silicium poly cristallin.....	19
• Cellule solaire à base de Silicium amorphe.....	19
• Nouvelle technologie.....	20
I.3. Regroupement des cellules.....	20
I.3.1. Association en série.....	20
I.3.2. Association en parallèle.....	21
I.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	22
I.4.1. Cellule photovoltaïque idéale.....	22
I.4.2. Cellule photovoltaïque réelle.....	23
I.5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	24
I.5.1. Le courant de court-circuit(I_{cc}).....	25
I.5.2. Tension du circuit ouvert (V_{co}).....	25
I.5.3. Le facteur de forme (FF).....	26
I.6. Influence de la température et de l'éclairement sur caractéristique du panneau solaire.....	26
I.6.1. Influence de la température.....	26
I.6.2. Influence de l'éclairement.....	28
I.7. Le module photovoltaïque.....	29

Sommaire :

I.7.1. Protections des cellules photovoltaïques	29
I.7.2. Nombre de cellules par module	30
I.7.3. Le panneau solaire	30
I.8. Définition d'un régulateur d'un système photovoltaïque	31
I.9. La régulation avec MPPT	31
I.9.1. Définition d'un régulateur MPPT	31
I.9.2. Etage d'adaptation DC/DC	31
I.9.3. Les convertisseurs DC/DC (hacheur)	32
I.9.4. Convertisseur DC/DC à découpage (Booste)	32
I.9-5. La commande MPPT des convertisseurs DC/DC	33
I.10. Représentation graphique du point maximum de puissance	34
I.11. Qu'entendons –nous par optimiser	34
Conclusion	35

CHAPITRE II : Etat de l'art sur les batteries.

Introduction	37
II.1. Les batteries ..	37
II.1.1 Le rôle d'une batterie	37
• Autonomie	37
• Courant de surcharge	37
• Stabilisation de la tension	38
II.1.2 les modèles des batteries.....	38
• La Batterie de voiture	38
• Les Batterie à décharge profondes	38
• La Batterie au Gel	38
II.1.3 Les différences causes de défaillances des batteries.....	38
• Surcharge des batteries	38
• Décharge profondes	39
• Sulfatations	39
• Court-circuit.....	39
• Le Câblage	39
II.2. L'ACCUMULATEUR AU PLOMB	40
II.2.1. Définition d'une batterie	40

Sommaire :

II.2.2. Les caractéristiques de la batterie	40
II.2.3. Elément, d'accumulateur et batterie	40
II.2.4. Les différents types de batteries	41
II.2.4.1. Accumulateur nickel cadmium	41
II.2.4.2. Accumulateur Lithium-ion	42
II.2.4.3. Accumulateur au plomb (PB)	42
II.2.4.4. Pourquoi on a choisi Accumulateur au plomb.....	43
II.2.4.5. Les avantages et inconvénients	44
II.3. Définition d'une batterie au plomb-acide	45
II.3.1. Définition de plomb	45
II.3.2. Constitution de la batterie au plomb	46
II.3.3. Réactions chimiques	48
II.3.4. Principe De Fonctionnement D'accumulateur Au Plomb	49
II.3.5. En décharge	50
II.3.6. En charge	51
II.3.7. Caractéristique électrique d'accumulateur du plomb (Pb)	51
II.3.8. Les différents domaines des batteries au plomb	53
II.3.9. Précautions d'exploitation	54
II.3.10. Différentes causes de la défaillance des batteries	54
• Surcharge des batteries	54
• Décharges profondes	54
• Sulfatation	54
• Court-circuit	55
• La température	55
• Autres causes de la diminution de la durée de vie des batteries	55
II.4. Performances	55
II.5. Choix de batteries d'accumulateurs	55
II.6. L'entretien de batteries d'accumulateurs	56
II.7. Mesures de sécurité	56
II.8. Aspects environnementaux et santé humaine	56
Conclusion	57

Sommaire :

CHAPITRE III : Modélisation et identification des paramètres de la batterie.

III. Introduction	59
III.1 Modélisation de la batterie	60
III.1.1 Modèle de Shepherd.....	60
III.1.2 Modèle de Manegon.....	60
III.1.3 Modèle de Coppetti.....	61
III.2. Simulation de la tension de la batterie	62
III.3. Analyse comparative des modèles	63
A. Fréquence cumulée.....	64
B. Indicateurs de test statistiques.....	67
III.4. Modélisation mathématique modèle de Coppetti	68
III.4.1. Mode de décharge.....	69
III.4.2. Mode de charge.....	69
III.4.3. Mode de surcharge.....	70
III.5. Simulation modèle de Coppetti	71
III.5.1. Mode de charge.....	71
III.5.2. Mode de surcharge.....	73
III.5.3. Mode de décharge.....	74
III.6. Effet de température dans charge et décharge de	77
III.6.1. Effet de température dans charge de batterie.....	77
III.6.2. Effet de température dans décharge de batterie.....	78
Conclusion	78
Conclusion Générale	80
Les Références	82

Liste de figures :

CHAPITRE I : Energie solaire photovoltaïque.

Figure (I.1). Spectre d'irradiance solaire.	17
Figure (I.2). Structure PN sous éclairement.	18
Figure (I.3). Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque	19
Figure (I.4). Schéma d'un regroupement de (Ns) cellule en série.	21
Figure (I.5). Caractéristique d'un regroupement de (Np) cellule en parallèle.	22
Figure (I.6). Modèle de cellule photovoltaïque idéal.	22
Figure (I.7). Modèle de cellule photovoltaïque réelle	13
Figure (I.8). Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule pv.....	25
Figure (I.9). La caractéristique de $I=f(v)$ en fonction de la température	27
Figure (I.10). La caractéristique de $P=f(v)$ en fonction de la température	27
Figure (I.11). Caractéristique de $I = f(v)$ en fonction de l'éclairement	28
Figure (I.12). Caractéristique de $P = f(v)$ en fonction de l'éclairement.....	28
Figure (I.13). Protection de panneau photovoltaïque avec diode anti retour.....	29
Figure (I.14). Composants d'un champ de module PV.....	30
Figure (I.15) Le convertisseur boost.....	32
Figure (I.16). Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.....	34
Figure (II.17). Graphe rendement puissance MPPT	34

CHAPITRE II : Etat de l'art sur les batteries.

Figure (II.1) Accumulateur nickel cadmium.	42
Figure (II.2) Accumulateur lithium ion.....	42
Figure (II.3) Accumulateur au plomb(PB).....	43
Figure (II.4). Batterie au plomb-acide.....	45
Figure (II.5). Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage) [14]	46
Figure (II.6). Vue éclatée d'une batterie de démarrage [14]	47
Figure (II.7) Principe de fonctionnement de l'accumulateur au Plomb [15]	50
Figure (II.8). Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb [15]	50
Figure (II.9). Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb [15].....	51
Figure (II.10). Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb [16]	53

Sommaire :

CHAPITRE III : Modélisation, et identification des paramètres de la batterie.

Figure (III.1). Simulation de la tension de la batterie selon les trois modèles avec leurs coefficients originaux durant la phase boost.....	62
Figure (III.2). Simulation de la tension de la batterie selon les trois modèles avec leurs coefficients originaux durant la phase floating.....	62
Figure (III.3). Simulation de la tension de la batterie selon les trois modèles avec leurs coefficients originaux durant le mode de décharge.....	63
Figure (III.4). Distribution de la fréquence cumulée en fonction de l'erreur relative.....	65
Figure (III.5). Distribution de la fréquence cumulée en fonction de l'erreur relative pour la phase floating.....	67
Figure (III.6). Distribution de la fréquence cumulée en fonction de l'erreur relative pour le mode de décharge.....	68
Figure (III.7). Diagrammes des trois mode de batterie (Matlab/Simulink).....	71
Figure (III.8). Le model de simulation en mode de charge.....	72
Figure (III.9). La courbe de tension charge de batterie $V_c=f(t)$ avec $R=15\Omega$	72
Figure (III.10). La courbe de tension charge de batterie $V=f(t)$ avec $R=100\Omega$	73
Figure (III.11). La courbe de tension surcharge de batterie $V_s=f(t)$	73
Figure (III.12). Le model de simulation en mode de décharge.....	75
Figure (III.13). La courbe de tension décharge de batterie $V=f(t)$ avec $R=2 \Omega$	75
Figure (III.14). La courbe de tension de décharge de batterie $V=f(t)$ avec $R=0.5 \Omega$	76
Figure (III.15). La tension de batterie dans les trois cas.....	76
Figure (III.16). La courbe de la tension charge de batterie $V=f(t)$ avec $T=10$	77
Figure (III.17). La courbe de la tension charge de batterie $V=f(t)$ avec $T=50$	78
Figure (III.18). La courbe de la tension décharge de batterie $V=f(t)$ avec $T=10$	78
Figure (III.19). La courbe de la tension décharge de batterie $V=f(t)$ avec $T=50$	79

Liste des tableaux :

Liste des tableaux :

Tableau (I.1). Les avantages et les inconvénients	20
Tableau (II .1). Caractéristiques techniques des batteries à Plomb	52
Tableau (III .1). Les coefficients originaux du modèle de Shepherd [29]	60
Tableau (III .2). Les coefficients originaux du modèle de Manegon [32]	61
Tableau (III .3). Les coefficients originaux du modèle de Coppetti [34]	61
Tableau (III .4). Résultats comparatifs de la distribution du nombre de données par rapport à l'erreur relative pendant la phase boost.....	65
Tableau (III .5). Résultats comparatifs de la distribution du nombre de données par rapport à l'erreur relative pendant la phase floating.....	66
Tableau (III .6). Résultats comparatifs de la distribution du nombre de données par rapport à l'erreur relative pendant la zone de décharge.....	67
Tableau (III .7). Comparaison entre les données mesurées et calculées pour les 03 modèles...	68

Liste des symboles et des abréviations :

Liste des symboles et des abréviations :

Ns :	nombre les cellules en série.
Np :	nombre les cellules en parallèle.
Vco :	tension circuit ouvert (v).
Isc :	courant de court-circuit (A).
Vmp :	La tension de puissance maximale (V).
Imp :	Le courant de puissance maximale (A).
MPP :	point de puissance maximum.
MPPT:	Maximum Power Point Tracking.PV
Li-ion	Lithium-ion
Pb	Plomb acide
kWh	kilo Watts heure
SOC	State Of Charge
Wp	Watt peak ou watt crête
CGB	Closed Gelled battery ou batterie à gel
PWM	Pulse Width Modulation ou modulation de largeur impulsionBG
TS-45A	Régulateur de charge Tri Star
MBE	Mean bias error ou erreur moyenne absolue
RMSE	Root Mean Square Error ou erreur quadratique moyenneER Erreur relative
Vmes	Tension mesurée
Vsim	Tension simulée
Vdis	Tension de décharge de la batterieIdis Courant de décharge
Vch	Tension de charge de la batterie
Ich	Courant de charge
T	Température interne de la batterie en °C

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques 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. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions 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 pour les générations futures.

Les énergies renouvelables, sont des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

L'électricité provenant des sources solaires photovoltaïque est intermittente et dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs PV sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie. La batterie est le principal élément dans un système PV autonome, par où transite l'énergie électrique fournie par le générateur. Toutefois, la batterie d'accumulateurs reste l'élément le plus fragile. Sa durée de vie est étroitement liée à la manière dont elle est chargée. Une longévité n'est atteinte que par une régulation et un contrôle rigoureux de l'état de charge et par une protection soignée contre les surcharges et les décharges profondes. Dans ce contexte, l'objet du présent PFE se veut une contribution la modélisation et la simulation du comportement d'une batterie au plomb la plus répandée dans les système photovoltaïque autonome.

Le présent mémoire de PFE est structurée comme suit :

En commençant dans le premier chapitre par des notions sur la chaîne de conversion photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre nous présenterons un état de l'art sur les batteries à

INTRODUCTION GENERALE

usage solaire photovoltaïque et dans le troisième chapitre, nous présenterons la partie de modélisation et simulation du comportement d'une batterie au Pb-acide, et enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur la chaîne de conversion photovoltaïque

I.1. Introduction

L'énergie peut être considérée comme une condition préalable au développement des pays et l'un des facteurs les plus importants pour augmenter le bien être des personnes. Partout dans le monde, la conjonction de l'instabilité des marchés des énergies fossiles et l'impératif de protection de l'environnement et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre imposent une révision des stratégies énergétiques assurant la sortie de l'hégémonie des hydrocarbures. C'est un grand défi à relever car compter sur les sources d'énergies fossiles seules peut s'avérer une stratégie qui peut mettre à mal la sécurité énergétique et non spécifique aujourd'hui. C'est pour cela qu'il va falloir en urgence, d'une part, revoir notre mode actuel de consommation énergétique et d'autre part, intégrer les énergies renouvelables dans un nouveau modèle énergétique à élaborer.

Dans ce chapitre, nous allons étudier le principe du fonctionnement et tout sur le générateur photovoltaïque et les différents composants d'un système photovoltaïque

I.1. L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000k/s [1], les rayons du soleil mettent donc environs 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur communément prise égale à 1367W/m².

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000W/m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où :

h : est la constant de Planck (= 6.63 x 10⁻³⁴ J.s)

c : est la vitesse de la lumière (= 3 x 10⁸ m/s)

E : est l'énergie lumière (en eV)

λ : est la longueur d'onde (en μ m)

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie de photon est plus grande [2].

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique (figure 1) compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 microns (μm) [3].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se répartit approximativement comme suit :

- ✓ 09% dans la bande ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- ✓ 47% dans la bande visible ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- ✓ 44% dans la bande de l'infrarouge ($>0.8\mu\text{m}$) .

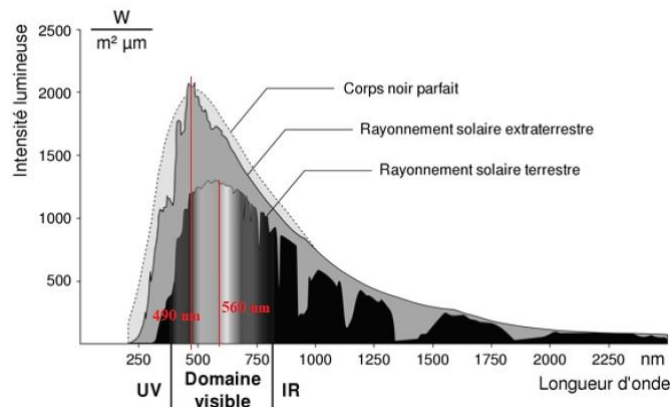


Figure (I- 1). Spectre d'irradiance solaire.

I.2. La cellule solaire

I.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en l'énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

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

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N et d'autres structures comme les hétérojonctions et les structures de Schottky sont également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure (I.2).

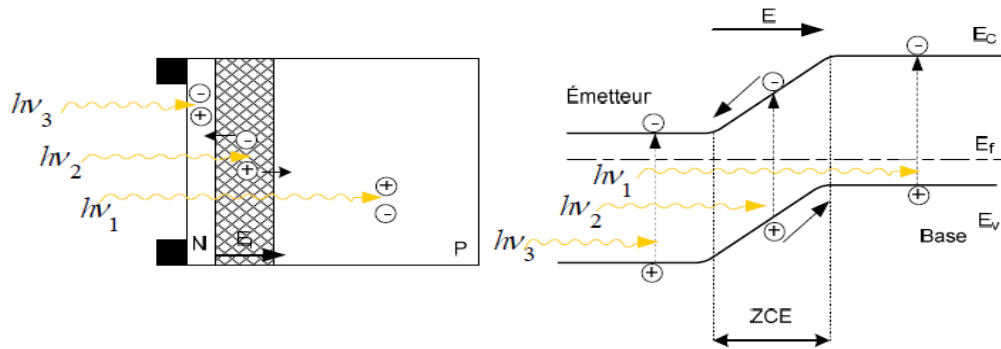


Figure (I.2). Structure PN sous éclairage.

- Si la paire (e^- , e^+) est créée dans la région P, les électrons qui y sont des porteurs minoritaires traversent la jonction et vont du côté N.
- Si la paire (e^- , e^+) est créée dans la région N, les trous qui y sont minoritaires traversent la jonction et vont du côté P.
- Si la paire (e^- , e^+) est créée dans la ZCE, elle va être dissociée sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans cette zone où l'électron est propulsé vers la zone N et le trou vers la zone P.

I.2.2. L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la celle-ci [4]. La figure (I.3) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin. 11 à 12% avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe et films minces [5]. La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [6].

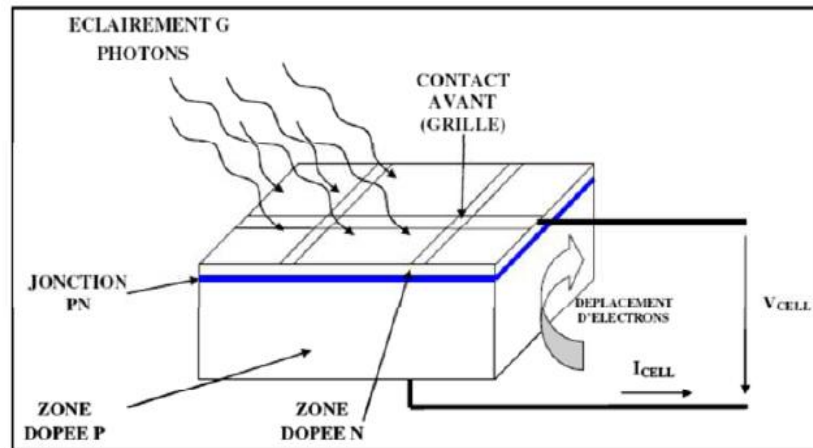


Figure (I. 3). Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.

I.2.3. Les différents types des cellules photovoltaïques

○ Cellule solaire à base de silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles.

Le terme (cristallin) veut dire que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple ou il n'y a aucune perturbation dans l'arrangement des atomes.

○ Cellule solaire à base de silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commerciale s'étend entre 10 et 14%.

○ Cellule solaire à base de Silicium amorphe

Le silicium est déposé en couches minces sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise conductivité. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique et recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire. Par exemple pour alimentations de montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles sont caractérisées par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre quelques microns. Par contre

leur rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et elles ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [7].

○ Nouvelle technologie

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voir moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diode électroluminescentes organique (OLED : organique light Eimitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine de photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avances technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [8].

Nous mentionnons dans le tableau ci-dessous les avantages et les inconvénients pour les technologies des cellules solaires les plus utilisées.

Type	Silicium monocristallin	Silicium poly cristallin	Silicium Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	10 ans
Avantages	-Bon rendement en soleil direct.	-Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe).	-Rendement faible -Bon rendement en diffus.
Inconvénients	- Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), - Prix élevé.	-Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé.	-Mauvais rendement en plein soleil.

I.3. Regroupement des cellules

I.3.1. Association en série

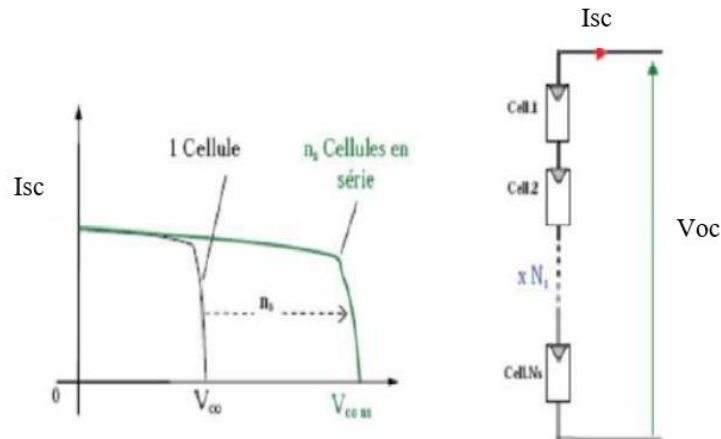
Une association de N_s cellules en série (Figure I.4) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du regroupement série est obtenue par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (II.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de cellule [8].

$$V_{oc} = N_s \times v_{oc} \quad (I.2)$$

$$I_{sc} = i_{sc} \quad (I.3)$$

- V_{oc} : est la somme des tensions des circuits ouverts de N_s en série.

- I_{sc} : est le courant de court-circuit de N_s cellules en série.
- v_{oc} : est la tension de circuit ouvert d'une cellule
- i_{sc} : est le courant de court-circuit d'une cellule.



• **Figure (I.4).** Schéma d'un regroupement de (N_s) cellule en série.

I.3.2. Association en parallèle

Une association parallèle de cellule Figure (I.5) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [7].

$$V_{oc} = v_{oc} \tag{I.4}$$

$$I_{sc} = N_p i_{sc} \tag{I.5}$$

Où

N_p : est le nombre de cellules en parallèle.

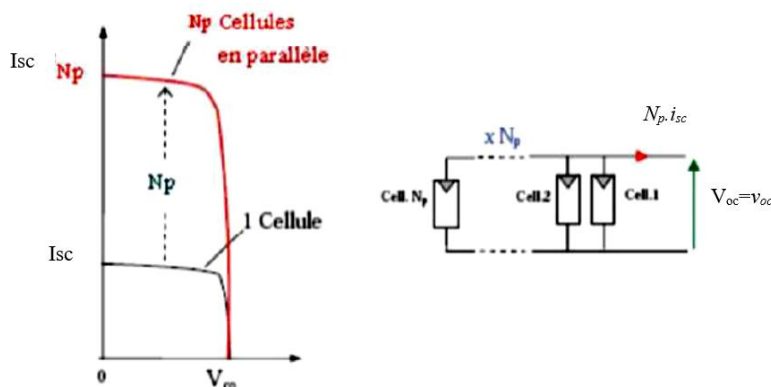


Figure (I.5). Caractéristique d'un regroupement de (N_p) cellule en parallèle.

I.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

I.4.1. Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode Figure (I.6) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Après la loi de nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \tag{I.6}$$

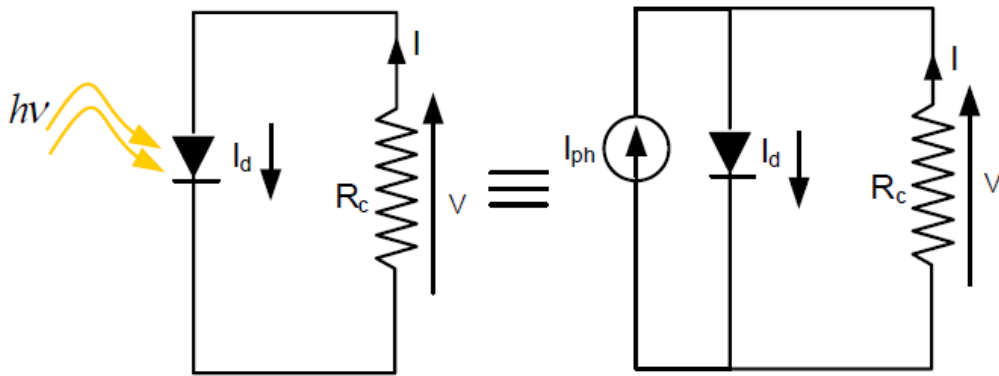


Figure (I.6). Modèle de cellule photovoltaïque idéale.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_d$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \tag{I.7}$$

Avec :

I_s : est le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : est la tension aux bornes de la diode.

$V_t = \frac{Kt}{q}$ est la tension thermique.

Alors, la relation (I.6) sera :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \tag{I.8}$$

I.4.2. Cellule photovoltaïque réelle

Le modèle photovoltaïque précédent ne prend pas en compte tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série (R_s) et les courants de fuite par une résistance en parallèle (R_{sh}) [8].

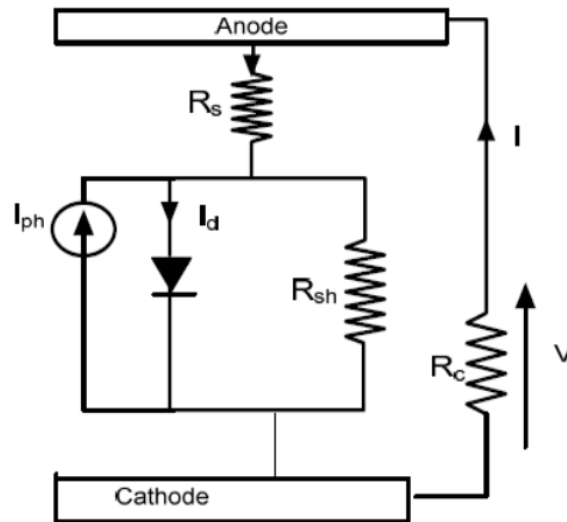


Figure (I.7). Modèle de cellule photovoltaïque réelle.

Dans le cas d'une cellule réelle, nous avons :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{I.9}$$

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \right) \tag{I.10}$$

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s \times I}{nkT/q} \right) - 1 \right) \tag{I.11}$$

Avec :

I : est le courant fournit par la cellule

I_{ph} : est le photo-courant

I_s : est le courant de saturation inverse

k : est la constante de Boltzmann ($=3,381 \cdot 10^{-23}$ Joule/K)

q : Charge d'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : Température de la diode en Kelvin.

Alors l'équation (I.9) devient :

$$I = I_{ph} - \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{\frac{n k T}{q}}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.12)$$

I.5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V). La figure (I.8) représente une caractéristique courant-tension I(V) dans le noir et sous éclairage typique d'une cellule photovoltaïque à jonction P-N. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule Photovoltaïque sont : le courant de court-circuit (I_{cc}) la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant.

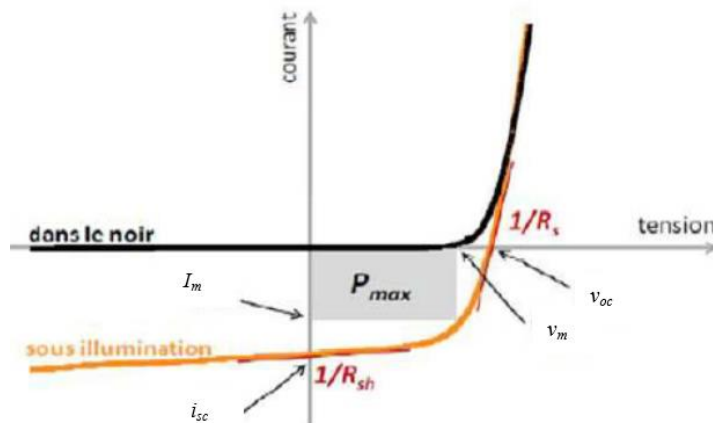


Figure (I.8). Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule photovoltaïque

I.5.1. Le courant de court-circuit

On définit par (ηQ) le rendement quantique ou réponse spectrale qui peut être exprimé par la relation suivante :

$$\eta Q = \frac{J_{ph}}{q F(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad (I.12)$$

J : est la densité du photo-courant fourni par la cellule.

F(λ) : est le flux de photons reçu par la cellule.

$F(\lambda) [1 - R(\lambda)]$: est le flux de photons qui participent à l'effet photovoltaïque

$R(\lambda)$: est le coefficient de réflexion de la surface

On appelle courant de court-circuit le courant qui circule dans une cellule solaire soumise à un flux de photons $F(\lambda)$ sans application de tension. Il est donné par la relation suivante :

$$J_{sc} = q \int_0^{\infty} F(\lambda) [1 - R(\lambda)] \eta Q \times d\lambda \quad (\text{I.13})$$

On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

I.5.2. Tension du circuit ouvert

Elle est obtenue en mesurant la tension aux bornes de la photopile placée sous une source lumineuse sans aucun récepteur. Elle est de l'ordre de 0.5 à 0.7 V pour une cellule élémentaire et elle dépend des matériaux, des structures et des technologies d'élaboration de la cellule et varie avec l'éclairement et la température. On obtient cette tension en annulant le courant I dans l'expression de la caractéristique soit :

$$I = 0 \Rightarrow I_d - I_{ph} = 0 \Rightarrow V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} - 1 \right) \quad (\text{I.14})$$

Pour $I_{ph} = I_{sc}$ (à fort éclairement)

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{I.15})$$

En dessinant la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairement, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique des cellules photovoltaïques.

La densité du courant de court-circuit J_{sc} , est obtenue sur la caractéristique pour une tension de 0V. Elle est proportionnelle à l'éclairement incident.

I.5.3. Le facteur de forme

Le facteur de remplissage, ou facteur de forme (FF) est le rapport des aires de ces deux rectangles

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{V_m J_m}{V_{oc} J_{sc}} \quad (\text{I.16})$$

Où :

J_m et V_m désignent les coordonnées du courant et de la tension qui maximisent la puissance délivrée par la cellule, soit $P_m = V_m J_m$. Plus cette zone rectangulaire est grande, plus la

caractéristique ressemble à un rectangle d'aire $V_{oc} \times I_{sc}$

Le rendement de conversion photovoltaïque η s'exprime par le rapport :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{sc} \times V_{oc}}{P_i} FF \tag{I.17}$$

Où P_i est la puissance lumineuse incidente (W/cm^2). Le rendement, souvent exprimé en pourcent, est un paramètre clef de productivité des cellules.

I.6. Influence de la température et de l'éclairement sur caractéristique d'un module PV

I.6.1. Influence de la température

Dans des conditions de température très froides, à titre d'exemple le module de 120 Watts est capable de produire une puissance de 130 Watts car plus la température est basse plus la puissance produite est élevée. D'un autre côté, dans des conditions de température très chaudes, plus la température augmente plus la puissance produite par le module diminue.

Par temps froid les modules PV délivrent plus de puissance, mais sans l'emploi d'un régulateur MPPT, la quantité de puissance perdue est supérieure à celle récupérée en plus. D'autre part, la tension de circuit-ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de température de la cellule.

Nous présenterons ci-dessous les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et à différentes températures.

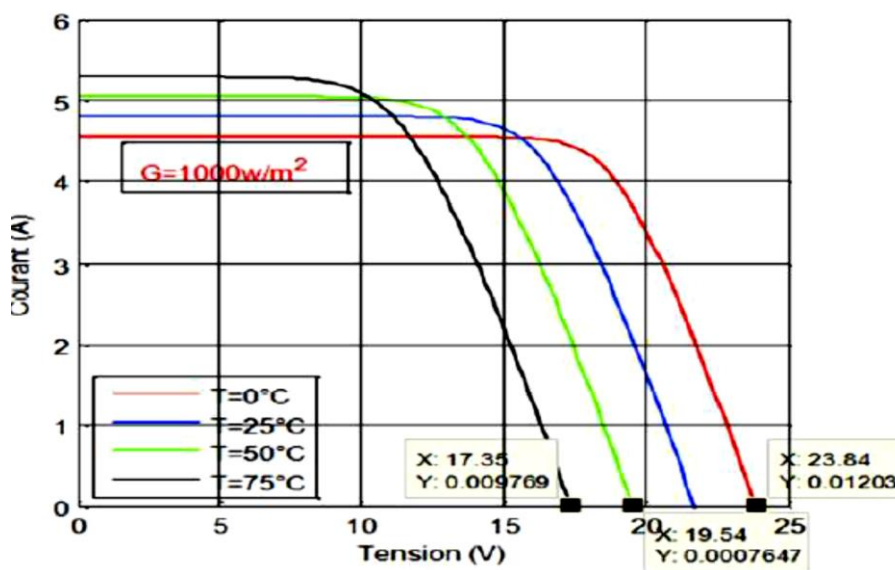


Figure (I.9). La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de la température.

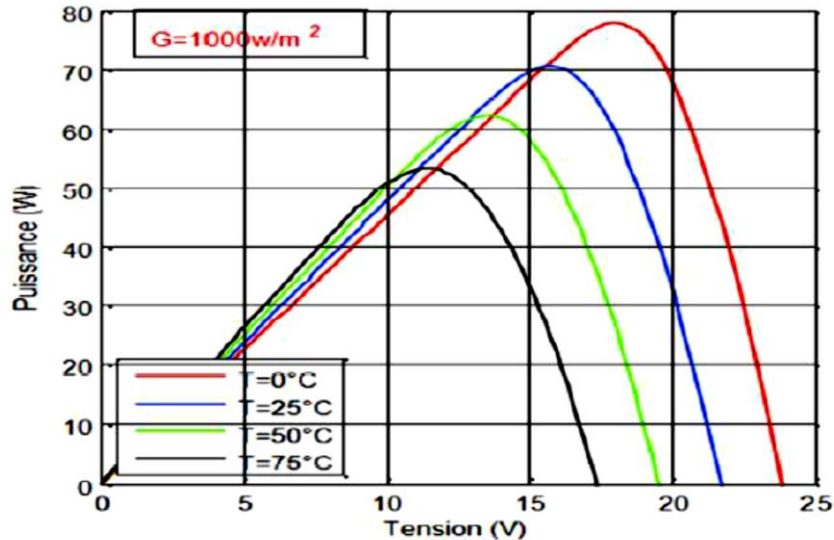


Figure (I.10). La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de la température

Nous remarquons que le courant dépend de la température, puisqu'il augmente légèrement à mesure que la température augmente. Nous constatons aussi que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit-ouvert diminue, et par contre la puissance maximale du module subit une diminution lorsque la température augmente.

I.6.2. Influence de l'éclairement

Après que nous avons fixé la température pour différents éclairements on remarque que pour l'éclairement de $G=1000 \text{ W/m}^2$, on peut voir que le courant subit une variation importante quand l'éclairement augmente ; le courant de court-circuit est augmenté mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance quand le courant augmente.

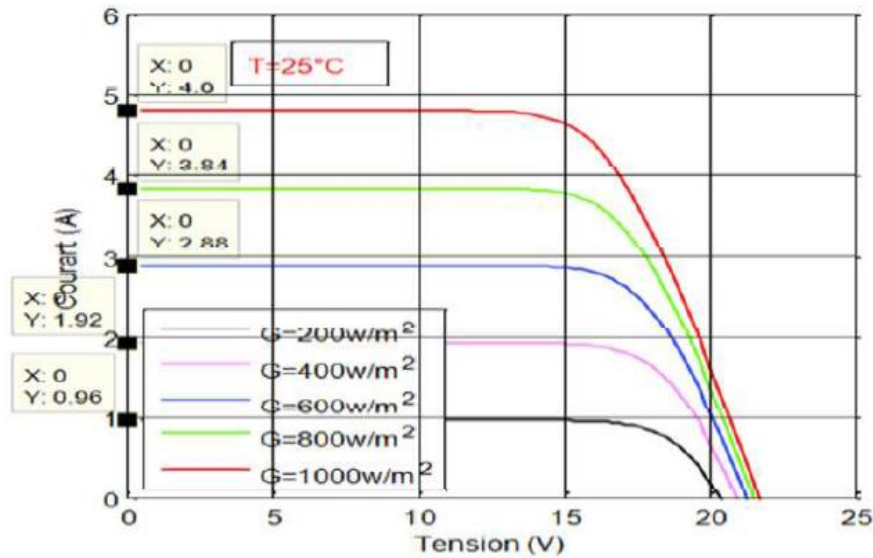


Figure (I.11). Caractéristique de $I = f(V)$ en fonction de l'éclairement.

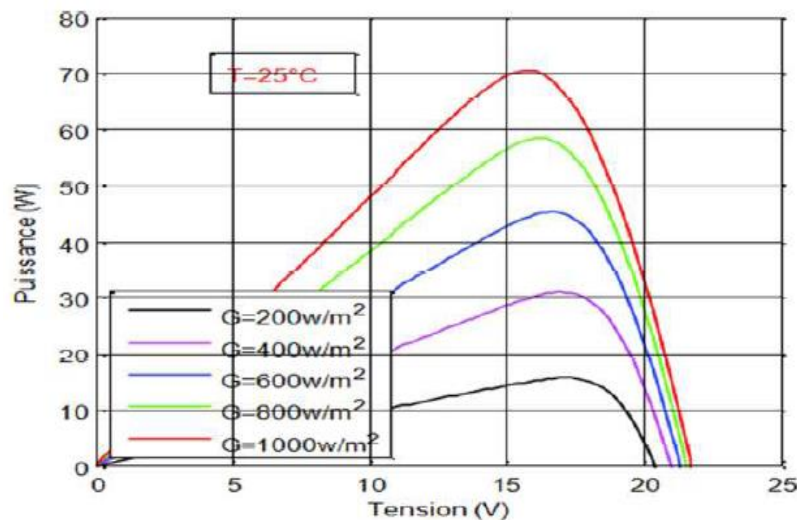


Figure (I.12). Caractéristique de $P = f(V)$ en fonction de l'éclairement.

I.7. Le module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergies lumineuse en l'électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir de rayonnement solaire.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. [9]

I.7.1. Protections des cellules photovoltaïques

Il arrive qu'un module au silicium cristallin ne soit pas exposé uniformément à la lumière, à cause des taches d'ombre. Puisque les cellules étant câblées en série, le courant total est nivelé

par le bas (la cellule la plus faible impose son courant aux autres).

Alors lorsqu'une cellule ne débite plus parce qu'elle n'est plus exposée au rayonnement, le courant de l'ensemble de la chaîne tend vers zéro. La cellule ainsi masquée devient réceptrice de toutes les autres de la série et reçoit en tension inverse la somme de toutes leurs tensions. Elle se met donc à chauffer d'où le nom bien connu de *hot-spot* ou point chaud. Il est indispensable de protéger le module contre ce phénomène en plaçant une diode *by-pass* en parallèle par groupe de cellule (par séries de 18 cellules, soit 2 par panneau 36 cellules). On maintient ainsi la tension inverse appliquée à la cellule ombrée à moins de 10V, ce qui engendre un échauffement limité en cas de hot-spot. Ces diodes sont généralement placées dans la boîte de jonction en sortie de panneau.

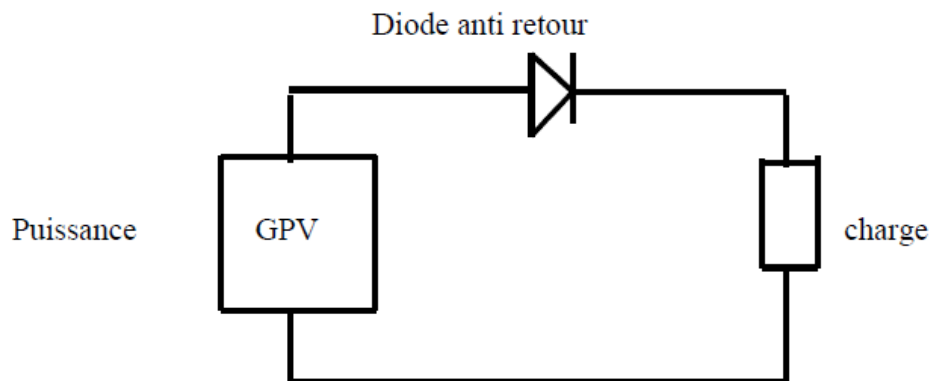


Figure (I.13). Protection de panneau photovoltaïque avec diode anti-retour.

I.7.2. Nombre de cellules par module

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58V à 0.60V et un point de puissance maximale situé 0.46 V et 0.47 V. Considérant que notre panneau doit charger une batterie de 12V jusqu'à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on perd 2 à 3 V en câblage et du fait des éleveurs de température, il faut disposer d'un panneau fournissant au minimum 16-17 V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouvera le nombre arrondi de 36, valeur courante comme nombre de cellules en série des panneaux usuels de marché.

Cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 rangées de 9. En pratique, les modules les plus courants de 12V comportent 32 à 44 cellules, suivant la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisateur.

Par exemple, dans le désert de certain pays chaud où la température ambiante monte jusqu'à 50 °C, on peut être amené à l'installer des panneaux 12 V à 40 cellules. A raison de - 2mV/°C,

chaque cellule perd 50mV entre 25 et 50 C°, et la tension de fonctionnement d'un 16 panneau 36 cellules de 1.8 V. il faut donc théoriquement 4 cellules supplémentaire pour y remédier ($\frac{1.8}{0.46} = 3.9$).

I.7.3. Le panneau solaire

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Le composant le plus crucial de toute installation photovoltaïque est le module, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champ) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme la montre. La Figure (I.14).

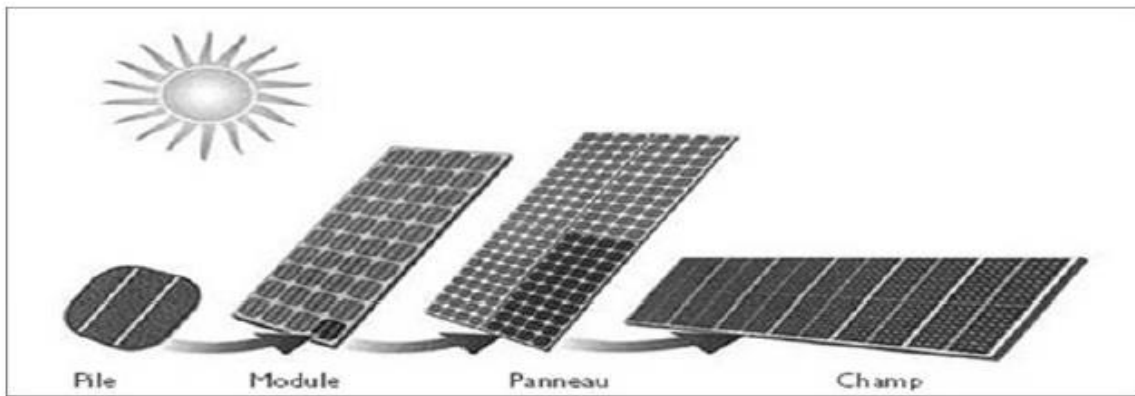


Figure (I.14). Composants d'un champ de module PV.

I.8. Définition d'un régulateur d'un système photovoltaïque

Le régulateur d'un système photovoltaïque est un dispositif électronique qui gère les échanges d'énergie entre les panneaux photovoltaïques et les accumulateurs, cette fonction est essentielle pour prévenir les dégradations des accumulateurs, en effet une décharge ou une surcharge trop importante ou répétée peut entraîner un vieillissement rapide de la batterie.

Les modes de régulations sont fondés sur une mesure de la tension ou de la quantité d'ampères heure injectés dans l'accumulateur.

I.9. La régulation avec MPPT :

I.9.1. Définition d'un régulateur MPPT

Un régulateur MPPT ou Maximum power point tracking (traduction Française « **recherche du point de puissance maximum** ») est un convertisseur électrique DC/DC, sans aucun dispositif ou système mécanique, qui optimise en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les 3 systèmes suivants :

- ✓ Le système photovoltaïque (constitué d'un ou plusieurs panneaux solaires) [10]
- ✓ Le dispositif batterie (composé d'une ou plusieurs batteries)
- ✓ Les applications utilisant l'énergie (moteur, pompe éclairage, etc.

Le contrôleur ou régulateur MPPT mesure et compare en permanence la tension délivrée par le panneau avec celle du dispositif batterie.

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

- 1) Le panneau peut délivrer à la batterie
- 2) La batterie est capable de recevoir

A partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension (voltage) la plus adaptée afin d'avoir le maximum d'ampères dans la batterie.

Les régulateurs MPPT modernes permettent d'obtenir des rendements entre 92% et 97%. Est son emploi permet d'obtenir généralement de 20% à 45% de puissance supplémentaire en hiver et de 10% à 15% en été par rapport un régulateur classique.

Les gains réelles peuvent varier largement en fonction de la météo, de la température, de l'état de charge de la batterie net d'autres facteurs.

I.9.2. Etage d'adaptation DC/DC

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaire ainsi que de la température. Elle peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant de l'ensoleillement et de la température et de charge. Pour qu'elle fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pour être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôle par un mécanisme de poursuite : MPPT (Maximum power point tracking) les régulateur MPPT sont plus efficaces sous certaines conditions.

I.9.3. Les convertisseurs DC/DC (hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type **continu-continu** permettant de contrôler.

La puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grands souplesse et un rendement élevée elles sont compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. La technique du découpage, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement

des alimentations séries. Dans une alimentation à découpage, la tension d'entrée est « hachée » à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir une tension continue. [11]

I.9.4. Convertisseur DC/DC à découpage (Booste)

Un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de << boost >> ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la Figure (I.15). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

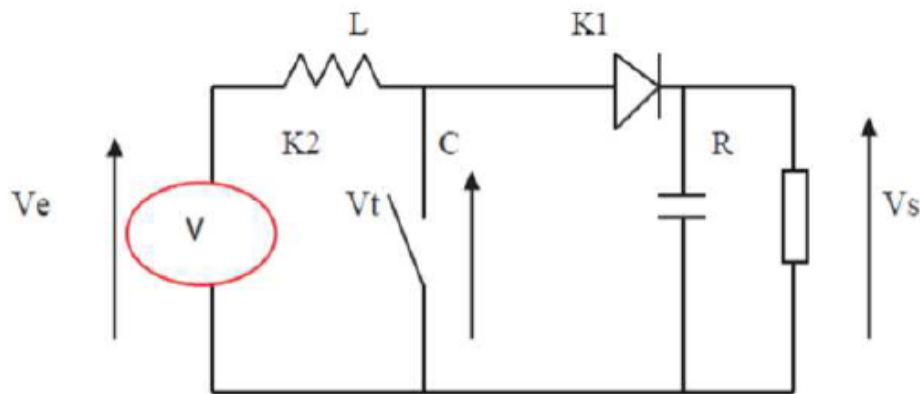


Figure (I.15) Le convertisseur boost

Les équations de fonctionnement d'hacheur survolteur :

$$V_i \times t_{on} + (V_i - V_o) \times t_{off} \tag{I.18}$$

$$\text{Avec : } \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}$$

○ **Modélisation d'hacheur survolteur**

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique $d(0 < d < 1)$

Les grandeurs électriques de sorties (V_s et I_s) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique D du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

Dans le système d'équations, on peut déduire la résistance à la sortie du panneau photovoltaïque R_{pv} en fonction de D et R_s .

Alors le rapport cyclique D s'écrit en fonction des résistances R_{pv} puisque le rapport D est vérifié l'inégalité $0 < D < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s

emplit la condition suivante : $R_s > R_{pv}$.

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du panneau $R_{pv} = R_{opt}$ et le rapport cyclique (D_{opt}) obéissent donc à l'équation :

$$R_{opt} = (1 - D_{opt})^2$$

La relation montre aussi que pour une puissance incidente P , la puissance optimale (point PPM) transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini (D_{opt}).

I.9.5. La commande MPPT des convertisseurs DC/DC

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixe. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT, (La **Figure (I.16)** montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

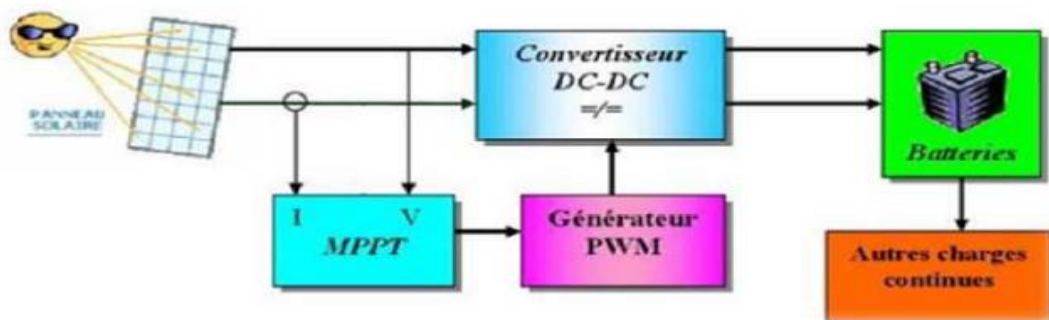


Figure (I.16). Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

I.10. Représentation graphique du point maximum de puissance

✓ La courbe verte (régulation MPPT) comporte une crête qui correspond au point maximum de puissance.

✓ La courbe rouge (sans régulation MPPT) comporte une crête classique.

Un régulateur MPPT recherche le point de puissance maximum, dont la valeur diffère de la

valeur STC (Standard Test Conditions) dans presque toutes les situations.

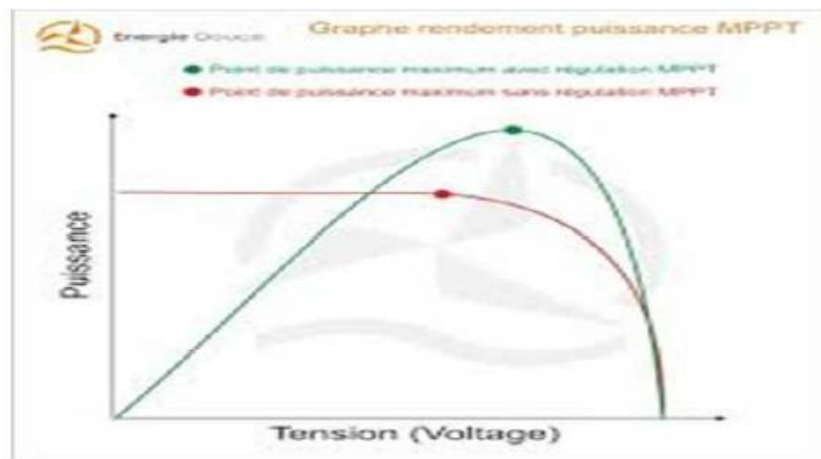


Figure (I.17). *Graphique rendement puissance MPPT*

I.11. Qu'entendons –nous par optimiser

Une cellule solaire, comme une batterie n'est pas par nature « intelligente ».

La majorité des panneaux solaire sont conçus pour produire, en théorie un courant ayant une tension nominale fixe ou bien un courant dont la tension variable.

Une batterie fonctionne généralement avec une tension nominale en fonction de son état de charge. Lorsqu'elle est en charge, a besoin d'une tension bien supérieure pour pouvoir se recharger complément.

Ces valeurs de tension sont sensiblement différentes des valeurs nominales produites par la plupart des panneaux solaire photovoltaïque. Pour ça on doit bien designer le régulateur pour avoir un rendement optimal.

CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu sur les énergies renouvelables notamment l'énergie solaire photovoltaïque. On donne des généralités sur les systèmes photovoltaïques (le rayonnement solaire et la conversion photovoltaïque) et les propriétés des Semi- conducteurs. Ainsi, on a vu les différentes technologies de la cellule PV existe dans la littérature, la modélisation d'une cellule PV enfin on a cité les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques, nous présentâmes les différentes méthodes de reconfiguration des modules PV afin d'optimiser la puissance fournie de la générateur PV.

Chapitre II

Etat de l'art sur les batteries de stockage

II.1. Introduction

Actuellement les batteries au plomb acides constituent la part principale du marché globale des batteries utilisées pour le stockage d'énergie à moyenne et à grande échelle, en particulier pour les applications PV. Ces dernières reçoivent une attention particulière du fait qu'elles fournissent plusieurs installations pour de nombreuses applications d'électricité modernes. De plus, elles sont considérées comme une technologie de premier choix en raison de leurs fiabilité et efficacité énergétique, leurs disponibilités et surtout leur attractivité économique. Néanmoins, malgré leur large utilisation dans l'industrie, leur comportement qui est influencé par l'environnement interne et externe est caractérisé par des réactions électrochimiques imprévisibles comme la variation de la température, ce qui entraîne une complexité de leur comportement d'où la nécessité de modéliser la batterie.

II.2. Batteries

II.2.1. Rôle d'une batterie

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques s'effectue exclusivement l'aide des batteries d'accumulateurs.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes (le rôle) :

a) Autonomie : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.

b) Courant de surcharge : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.

Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.

C) Stabilisation de la tension : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

II.1.2. Modèles de batteries

a) Batterie de voiture :

Ce type de batterie est peu coûteux et très répandue de par le monde. Mais elle nécessite un entretien régulier (la densité du mélange eau/acide doit être suivi et ajusté régulièrement car l'eau s'évapore). Utilisée pour une installation solaire, la durée de vie est d'1/2 an.

b) Batteries à décharge profonde :

Même composition qu'une batterie de voiture (ces batteries peuvent être utilisées sur un véhicule). La différence réside dans le taux de décharge de la capacité totale. Pour une batterie de voiture, il est conseillé de ne jamais dépasser une décharge de 20% de la capacité totale, sous peine d'endommager la batterie. Ces batteries à « décharge profonde » - comme leur nom l'indique – peuvent être utilisées jusqu'à 80% de la capacité totale, donc parfaitement adaptées pour une installation photovoltaïque. Cependant afin d'optimiser ces batteries, il est conseillé de ne pas dépasser 40 % de la capacité totale.

Ces batteries sont assez répandues et leur coût restent abordable. La durée de vie de ces batteries est de 4 à 5 ans.

c) Batterie au Gel :

Elles sont reconnaissables par l'absence complète d'ouverture sur le dessus. La fixation des câbles se fait non plus sur des bornes identiques à celles des batteries au plomb mais bien sur des tiges filetées de 8mm. C'est la meilleure batterie pour une installation solaire (durée de vie d'environ 10 ans), maintenant n'est **pas du tout adaptée pour des climats tropicaux** et son prix est exorbitant.

II.1.3. Différentes causes de la défaillance des batteries**a) Surcharge des batteries :**

Les surcharges des batteries engendrent non seulement la corrosion de ses plaques positives, mais aussi un dégagement excessif de gaz pouvant arracher des plaques, les matières actives qui se déposent aussi bien au fond du bac, qu'entre les séparateurs et les plaques. Les surcharges des batteries génèrent en outre une augmentation de la température de ces dernières, ce qui peut conduire à la destruction des plaques et des séparateurs.

b) Décharges profondes :

Les décharges profondes sont, à côté des surcharges, les premières causes de la détérioration d'une batterie. Les résultats des décharges profondes prolongées sont entre autres la diminution de la densité de l'électrolyte, le dépôt au fond du bac de sédiments fins de cristaux de sulfate de plomb et la décoloration des plaques, ainsi que leur sulfatation.

c) Sulfatation :

La sulfatation consiste en la formation sur les plaques de larges cristaux de sulfates de plomb, en lieu et place des fins cristaux qui y sont normalement présents. Les causes de la sulfatation sont :

- La non utilisation de la batterie durant une longue période, après sa charge complète ou

partielle,

- Le fonctionnement de la batterie durant des jours à un état de charge partielle, sans charge d'égalisation,
- La variation de la température dans la batterie.
- Les manifestations de la sulfatation sont l'augmentation de la résistance interne de la batterie, ce qui entraîne une diminution de la décharge et une augmentation de la tension de charge.

d) Court-circuit :

Les court-circuités des éléments sont générés par :

- La destruction des séparateurs,
- L'accumulation excessive des sédiments au fond du bac,
- La formation de structures arborescentes de plomb, de la plaque négative vers la plaque positive.
- Les manifestations du court-circuit des éléments sont les suivants :
- Une densité d'électrolyte faible, en dépit de la réception normale de charge,
- Une perte rapide de capacité après une pleine charge,
- Une tension à vide faible.

e) Câblage :

Il convient de ne pas les rallonger sous peine de forte atténuation de rendement : 1 mètre en plus peut faire chuter drastiquement la puissance de l'énergie fournie.

Les diamètres minimums à respecter pour les câblages entre :

Régulateur - Générateur PV : 10 m environ

Régulateur - Batterie : 1m environ

Régulateur - Boitier de distribution : 5m environ

II.2. Accumulateur au Plomb

II.2.1. Définition d'une batterie

La batterie est un ensemble d'accumulateurs électrochimiques placées en série capables de convertir l'énergie électrique en énergie chimique et réciproquement.

On appelle respectivement ces opérations ; charge et décharge. Lorsque l'on parle d'élément rechargeable on utilise le terme « accumulateur ».

Un accumulateur est un appareil accumulant de l'énergie électrique sous forme électrochimique pour la restituer ensuite suivant les besoins. Chaque accumulateur est constitué

d'éléments associés pour former des blocs (par **exemple**, un accumulateur au plomb est composé de 3 ou 6 éléments de 2 V, soit un bloc de 6 ou 12 V).

II.2.2. Caractéristiques de la batterie

Une batterie se caractérise par sa capacité en Ah (ampère par heure), sa tension et son courant de décharge. Pour une batterie au Plomb de 12V, 30A, 0.8Ah, peut débiter 12V sous 0.8A pendant une heure.

Les batteries préviennent les variations de tension dérivant de la source d'alimentations, pouvant être dommageable pour certains appareils, et fournissent une réserve disponible pour les grands courants, selon leur besoin. Lorsqu'elle n'est pas branchée à une charge ou un chargeur, la tension à circuit ouvert d'une batterie représente son taux de charge.

Quand elle sera complètement chargée, sa tension diffère dépendamment de type de batterie, par exemple : chaque élément d'une batterie acide plomb a une tension à circuit ouvert de 2.10V, alors qu'un Nickel cadmium a 1.25V par cellule à 25°C.

II.2.3. Élément d'accumulateur et batterie

Un élément est un couple électrochimique (i.e. 2 électrodes) plongé dans une solution. Selon les technologies, ce couple peut être le {NiOOH/Cd} pour les batteries Nickel Cadmium, le {Li/oxyde métallique} pour les batteries lithium-ion, le {PbO₂/Pb} pour les batteries au plomb, et présente une force électromotrice différente.

Le terme demi-élément désigne une électrode. Le terme "**accumulateur**" est employé pour un élément rechargeable, le distinguant ainsi de la pile (élément non rechargeable).

Un accumulateur est donc un générateur réversible: il peut stocker (accumuler) de l'énergie, en convertissant l'énergie électrique en forme chimique, puis la restituer à tout moment sur demande.

De tension nominale d'environ 2 Volts, un accumulateur au plomb est rarement utilisé seul: en général, une mise en série et/ou en parallèle est effectuée pour obtenir les tensions et capacités d'utilisation désirées, ce qui constitue une batterie d'accumulateurs.

II.2.4. Différents types de batteries

On distingue trois types de batteries d'accumulateurs :

II.2.4.1. Accumulateur Nickel Cadmium

Ces accumulateurs sont les plus employés parmi les autres modèles, il en existe de nombreux types, chacun ayant des caractéristiques différentes.

Ils sont constitués d'une électrode en cadmium et l'autre en nickel baignant dans un électrolyte alcalin. On rencontre des accumulateurs ayant une résistance interne plus élevée

destinée à des utilisations moins brutales comme l'alimentation des émetteurs et récepteurs.

Ce type de batterie possède un effet de mémoire, ce qui impose leur stockage dans un état décharge de 0,6V. Il peut supporter des pointes de courant en décharge plus importantes et sa décharge est très lente.

Un élément possède une f.é.m. nominale de 1.2V, alors 4 élément =4.8V.

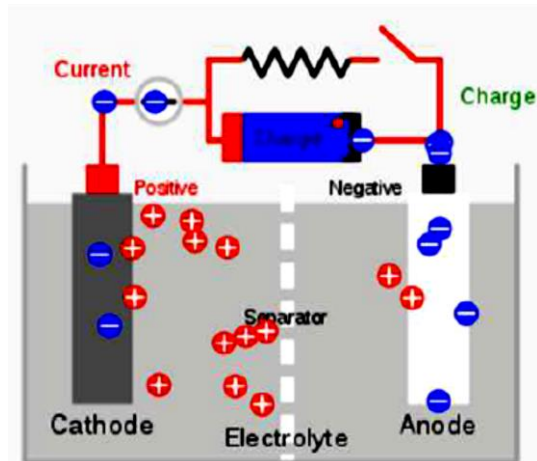


Figure (II.1) Accumulateur nickel cadmium

II.2.4.2. Accumulateur Lithium-ion

La batterie lithium-ion fonctionne sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithium, et une électrode négative en graphite. La tension d'un élément lithium-ion est de 3.6V.

Notons qu'il existe des accumulateurs lithium-ion industriels de grande puissance, ces éléments peuvent fonctionner jusqu'à 15 ans. Cependant l'utilisation de la technologie lithium-ion à ces échelles de puissance n'en est qu'à ses débuts.

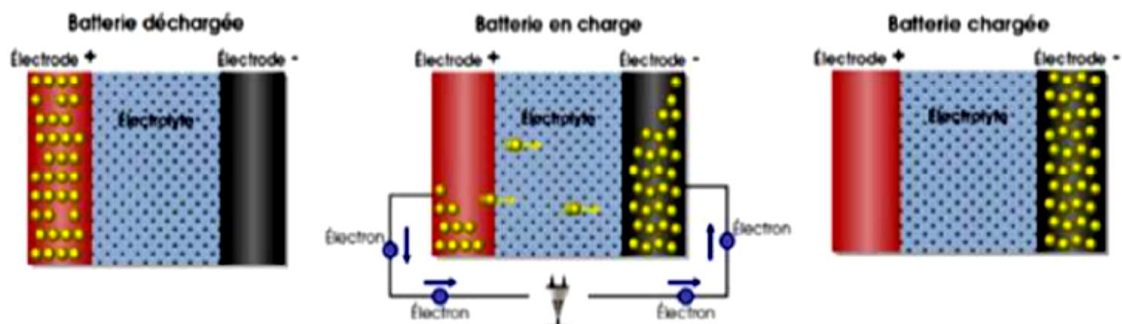


Figure (II.2) Accumulateur lithium ion.

II.2.4.3. Accumulateur au Plomb (Pb)

Ce sont des batteries à électrolyte liquide, qui se composent de deux électrodes, positive, baignant dans l'acide sulfurique dilué. Ce sont des batteries conçues pour délivrer une puissance instantanée (batteries de démarrage moteur pour automobile).

Une batterie au plomb est composée de plusieurs éléments d'accumulateurs montés en série.

La tension normale d'un élément au plomb de 2V environ, par exemple, la batterie d'un véhicule comporte six éléments, elle a donc une tension électrique de 12V. Mais atteint facilement 2,3V quand l'accumulateur est bien chargé. En réalité, une batterie 12V chargée affichera une tension de 12,8V à 13, 2V si la tension d'une batterie chargée est inférieure à 11,4V, elle sera en fin de vie.

Même non branchée, une batterie au plomb se décharge lentement du fait de diverses réactions chimiques qui peuvent conduire à la « sulfatation » de la borne positive (poudre blanche)

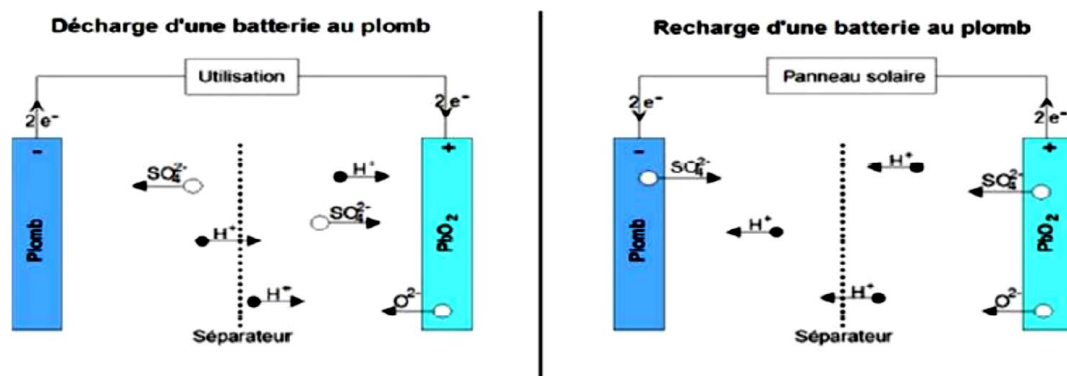


Figure (II.3) Accumulateur au plomb (Pb).

II.2.4.4. Pourquoi choisit-on un accumulateur au Plomb ?

➤ Avantages

- Le fonctionnement de ces batteries ne disperse pas de plomb
- Le plomb est plus économique
- Elles n'ont pas d'effet de mémoire, c'est-à-dire qu'on peut les recharger n'importe quand sans les abîmer.
- Elles ont de grosses capacités et solides.
- Auto- décharge faible 5% par mois.

- Nombre de cycles de charge/décharge variant de 600 à 900 sur un banc d'essai : cette valeur importante est réduite de moitié en condition d'utilisation réelle, ce qui donne par exemple, sur un véhicule, environ 300 cycles.
- Insensibilité aux traitements mécaniques et électriques.
- Éléments recyclables à 99,96 %.
- Coût à l'achat le plus faible, fiables et ne posant aucun problème de sécurité.
- Facilité à charger et à gérer énergétiquement, surtout en mode tampon (char permanente).
- Opérations de maintenance simplifiées.

II.2.4.5. Avantages et inconvénients des autres accumulateurs :

Accumulateur Nickel Cadmium

❖ **Avantage :**

- Charge simple et rapide même après une longue période de stockage.
- Se recharge facilement même à basse température.
- Grande durée de vie en nombre de cycles de charge et de décharge (nombre de recharge 1500 et le temps de charge 1heure).
- Résistance interne faible.
- Stockage et transport simple.
- Faible coût.

❖ **Inconvénients :**

- Faible densité énergétique.
- Auto- décharge assez rapide (20%/mois).
- Sensibilité à l'effet mémoire.
- Polluant.

Accumulateur lithium-ion:

❖ **Avantage :**

- Ne présente aucun effet mémoire, contrairement au l'accumulateur à base de Nickel.
- Auto- décharge faible (10%/mois).
- Possède une haute densité d'énergie pour un poids très faible.

❖ Inconvénients :

- Leur courant de charge et de décharge est faible qu'avec d'autre technologie.
- Il peut se produire un court-circuit les deux électrodes par croissance dendritique de lithium.
- Cette technologie mal utilisée présente des dangers potentiels Elles peuvent se décharger en chauffant au-delà de 80°C en une réaction brutale et dangereuse.

II.3. Définition d'une batterie au plomb-acide

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance.

Ces plaques sont recouvertes de matières actives-bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative. Ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

Le nombre de plaques de chaque polarité, leur surface, ainsi que la quantité d'acide disponible dans l'électrolyte (composé chimique liquide ou gélifié dont le rôle est de fournir les ions sulfates nécessaires aux réactions d'oxydoréduction produites lors des recharges et décharges d'une batterie) sont des paramètres qui définissent la capacité de l'élément (aptitude pour une batterie chargée de restituer un certain nombre d'ampères heure, en régime de courant de décharge constant, sous une tension d'arrêt et une température définies) [12]



Figure (II.4). Batterie au plomb-acide.

II.3.1. Définition du plomb

Le plomb est un métal de couleur bleu-gris, très malléable, qui peut être modelé et laminé en feuilles très minces.

Il existe dans la nature sous forme de sulfure PbS , la galène... Elle se rencontre également dans des sols pollués. [12]. [13].

II.3.2. Constitution de la batterie au plomb

Un accumulateur de 2V est l'unité de base d'une batterie au plomb. Il se compose notamment d'électrodes positives et négatives, d'un séparateur microporeux et d'un électrolyte.

Un élément de batterie de démarrage (technologie "plomb ouvert") comprend des plaques planes positives (2) et négatives (1) assemblées en alternance (**Figure (II.5)**).

Le nombre de plaques pour chaque polarité et leur surface sont des paramètres qui définissent la **capacité** de l'élément. Par exemple, l'électrode positive comporte ici 4 plaques en parallèle, reliées par un connecteur (4).

Pour éviter les courts-circuits entre les plaques de polarité différente, un séparateur microporeux isolant est placé entre ces plaques lors du montage (3).

Les plaques positives et négatives sont assemblées en faisceaux (6) et plongées dans une solution d'acide sulfurique et d'eau distillée. Chaque faisceau constitue ainsi un élément.

- 1 - Électrode négative, composée de 4 plaques en plomb spongieux (Pb).
- 2 - Électrode positive, composée de 4 plaques de dioxyde de plomb (PbO_2).
- 3 - Séparateur microporeux (pochette en Polyéthylène).
- 4 - Pontet de connexion en plomb.
- 5 - Borne terminale négative.
- 6 - Un élément Pb/ PbO_2 .

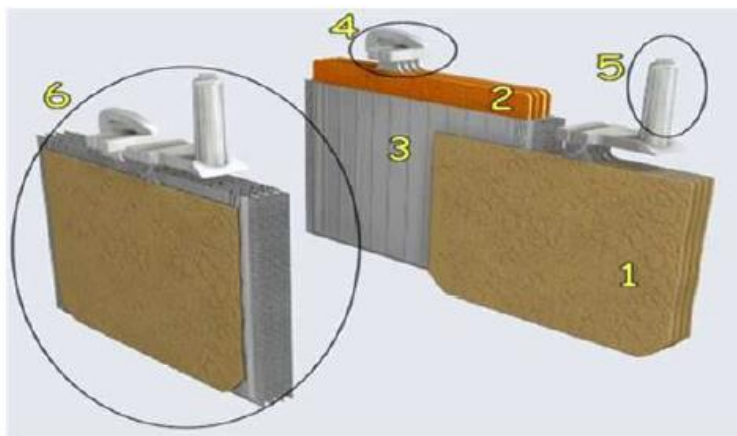


Figure (II.5). Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage) [13].

L'ensemble est contenu dans un bac (en polypropylène, PVC ou ABS) muni d'orifices en partie supérieure pour permettre le remplissage des éléments et les compléments en eau si nécessaire ainsi que pour l'évacuation des gaz produits **Figure (II.6)**.

Les deux bornes en plomb raccordées aux faisceaux de plaques de chaque polarité, permettent le raccordement de la batterie au circuit extérieur.

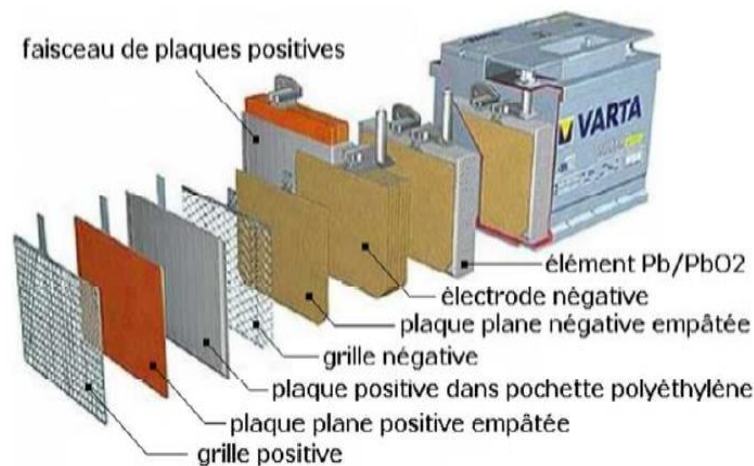


Figure (II.6). Vue éclatée d'une batterie de démarrage [13].

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la Batterie. [13] L'alliage en question est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge.

Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée dans non plus de 25%. D'autre part, les batteries de plomb- Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées. Les

séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes".

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie. Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir. Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conductions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%. (Pour plomb- Acide)

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie.

Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en l'astique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte. Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quel que soit le régime [13].

II.3.3. Réactions chimiques

Ce sont des réactions d'oxydo-réduction : il y a un transfert d'électrons. L'atome qui capte les électrons est appelé oxydant : l'oxydant subit une réduction (à la cathode).

L'atome qui cède les électrons est appelé réducteur : le réducteur subit une oxydation (à l'anode).

Les polarités de la batterie sont alternativement anode ou cathode, suivant le mode de fonctionnement (charge ou décharge) : la borne négative est anode pendant la décharge et cathode pendant la charge.

L'électrolyte est une solution d'eau pure et d'acide sulfurique H_2SO_4 ($2H^+$; SO_4^{2-}). L'électrode négative est formée de plomb Pb, l'électrode positive d'oxyde de plomb PbO_2 .

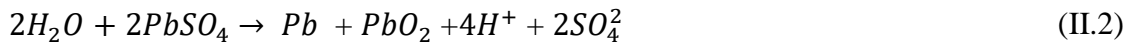
La décharge de l'accumulateur au plomb consomme les solides des électrodes et les ions H^+ de l'électrolyte (la concentration en acide diminue, le pH augmente), Il y a formation de sulfate de plomb $PbSO_4$ sur les électrodes.

- Oxydation à l'anode (borne -) : $Pb \rightarrow Pb^{+2} + 2e^-$
- Réduction à la cathode (borne +) : $PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Pb^{+2} + 2H_2O$
- Sulfatation des électrodes : $2Pb^{+2} + 2SO_4^{2-} \rightarrow 2PbSO_4$



La charge de l'accumulateur au plomb forme les solides des électrodes et les ions H⁺ de l'électrolyte (la concentration en acide augmente, le pH diminue). Le sulfate de plomb PbSO₄ disparaît des électrodes.

- Oxydation à l'anode (borne +) : $Pb^{+2} + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 4H^+ + 2e^-$
- Réduction à la cathode (borne -) : $Pb^{+2} + 2e^- \rightarrow Pb$
- Désulfuration des électrodes : $2PbSO_4 \rightarrow Pb^{+2} + 2SO_4^{2-}$



II.3.4. Principe de fonctionnement d'accumulateurs au Plomb

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge, on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes.

Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale [12]

- Electrode positive : $PbO_2 + 3H^+ + HSO_4^- + 2e^- \leftrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$.
- Electrode negative: $Pb + HSO_4^- \leftrightarrow PbSO_4 + H^+ + 2e^-$
- Reaction: $Pb + PbO_2 + 3H^+ + 2HSO_4^- \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$.

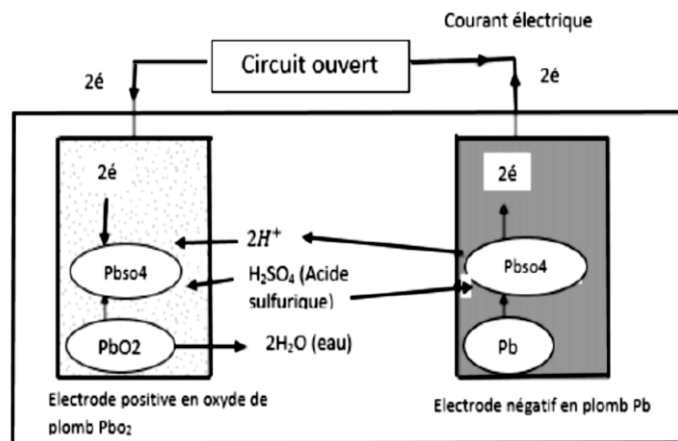
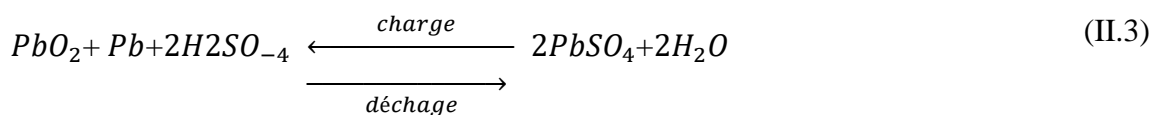


Figure (II.7) Principe de fonctionnement de l'accumulateur au Plomb [9].

II.3.5. En décharge

Au cours de la décharge. Il y a formation de cristaux (sulfate de plomb) sur chacune des électrodes :

- ✓ La densité devient faible et ceci en fonction de la quantité déchargée.
- ✓ La densité de l'électrolyte décroît en fonction de la quantité déchargée.
- ✓ La tension de fin de décharge est fortement liée au courant de décharge.

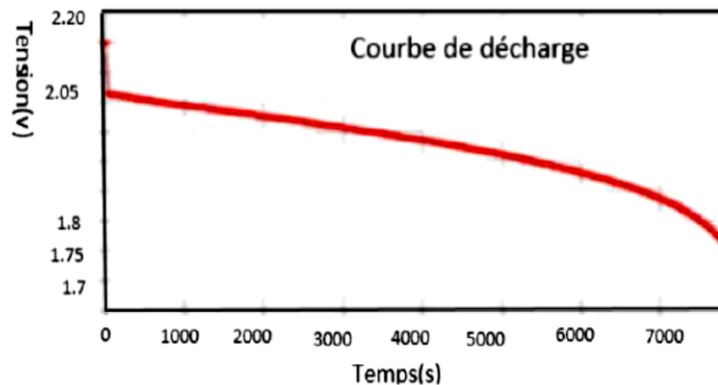


Figure (II.8). Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb [9]

II.3.6. En charge

Durant la charge, le sulfate de plomb est transformé au niveau des plaques, en plomb (Pb) pour l'électrode négative et en oxyde de plomb (PbO₂) pour l'électrode positive. Cette formation s'accompagne de la formation d'acide sulfurique. La densité augmente.

La charge d'une batterie dans un système photovoltaïque s'effectue généralement selon la caractéristique de charge IU **Figure (II.9)**. La première phase s'effectue à courant « quasiment » constant jusqu'à l'atteinte de la tension de fin de charge à partir de laquelle commence la deuxième phase de charge qui s'effectue à tension constante. Durant cette deuxième phase, le courant de charge sera réduit à niveau correspondant au maintien de la charge dans le but de conduire à une charge complète de la batterie.

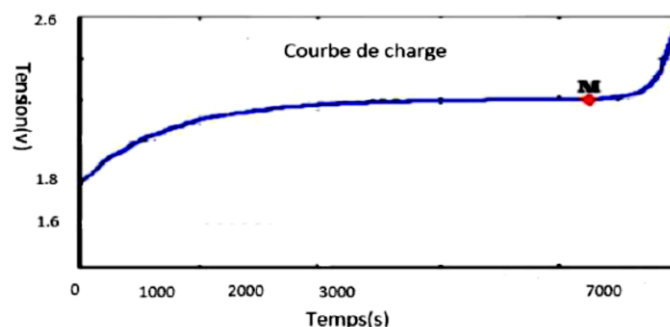


Figure (II.9). Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb [9].

Remarques :

- Que la densité croît lentement en début de charge pour remonter brusquement en fin de charge. Cette remontée brusque de la densité est le résultat de l'homogénéisation de l'électrolyse qui fait suite à son bouillonnement causé par l'apparition d'un dégagement gazeux.
- Que le phénomène de dégagement gazeux appelé «gassing» est lié à la tension de charge qui est-elle même quasiment dépendante de la température selon la formule :

$$Vg = Vgt_0 - 0.005xt \quad (\text{II.4})$$

- ✓ Vg : tension de gassing correspondant à la température.
- ✓ Vgt_0 : tension de gassing à $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ T : température actuelle en $^\circ\text{C}$.

II.3.7. Caractéristique électrique d'accumulateur du plomb (Pb)

Une batterie au plomb se caractérise essentiellement par :

La tension nominale, U qui dépend du nombre d'éléments n , égale au nombre d'éléments multiplié par 2,1 V. Généralement, on considère qu'un accumulateur au plomb est déchargé lorsqu'il atteint la tension de 1,8V par élément, donc une batterie de six éléments ou

- 12 V est déchargée lorsqu'elle atteint la tension de 10,8 V:

$$U = n \times 2.1 \quad \text{si } n = 6 \Rightarrow U = 12.6 \text{ V} \quad (\text{II.5})$$

Le courant maximal, I qu'elle peut fournir pendant quelques instants, ou courant de crête en ampères CCA (jusqu'à une température de $0\text{ }^\circ\text{F}$ soit $-17,78\text{ }^\circ\text{C}$). Les valeurs maximales sont données par le constructeur pour une batterie neuve et chargée à 100 %, elles varient sensiblement en fonction de l'état de charge, se dégradent en fonction du temps ainsi que de l'usage qui est fait de la batterie.

La capacité de stockage, notée C représente la quantité d'énergie disponible (ne pas confondre avec la capacité électrique). Elle s'exprime en ampère-heure

$$E = C \times U \quad (\text{II.6})$$

$$\text{pour } C = 50 \text{ Ah et } U = 12 \text{ V}$$

$$E = 6000 \text{ Wh.}$$

Exemple de caractéristiques techniques des batteries à Plomb :

Type	Tension	Capacité		Longueur	Largeur	Hauteur	Poids	Courant		Impédance
		Ah/20h	Ah/10h					(A)1 mn	(A) 1 s	
NPL78-12I	12	78	72,5	380	166	177,5	28,6	500	800	4
NPL100-12	12	100	93	407	172,5	240	39	600	800	4
NPL130-6I	6	130	120,3	350	166	174	24	500	800	2
NPL200-6	6	200	186	398	176	250	39	1200	1600	1,3

Tableau (II .1). Caractéristiques techniques des batteries à Plomb

NB : Pour le type **NPL100-12**, la capacité est :

- C20 = 100 Ah pour une décharge en 20 heures
- C10 = 93 Ah pour une décharge en 10 heure

Plus la rapidité de la décharge est importante, plus la capacité réelle de la batterie est faible. La batterie **NPL100-12** peut fournir 600 A pendant 1 minute et 800 A pendant seconde d'après la norme NF C 15-100, le courant de court-circuit d'une batterie est

$$I_{cc} = 10 \times C_n \quad (\text{II.7})$$

Ce qui donne pour la NPL100-12 :

$$I_{cc} = 10 \times 100A$$

II.3.8. Différents domaines d'application des batteries au Plomb

De nos jours, les batteries au plomb sont utilisées pour 3 grands types d'application :

1. Domaine du démarrage (démarrage des moteurs de véhicules).
2. Domaine de la traction (alimentation des chariots de manutention).
3. Domaine des applications stationnaires (énergie de secours, photovoltaïque).

A chacune de ses applications est adaptée une technologie d'accumulateurs au plomb, qui se distinguent notamment par l'épaisseur et les alliages des grilles, un électrolyte liquide ou Immobilisé, des concentrations d'électrolyte différentes, des plaques planes ou tubulaires, etc. Sur les installations photovoltaïques autonomes, on veillera donc à mettre en œuvre des batteries conçues pour les applications stationnaires photovoltaïques. Pour chacune des 3 familles les batteries pourront être soit de type "ouvertes", soit de type "étanches".

Le marché mondial des batteries au plomb est largement dominé par les batteries de démarrage, ainsi qu'illustré sur les diagrammes ci-dessous :

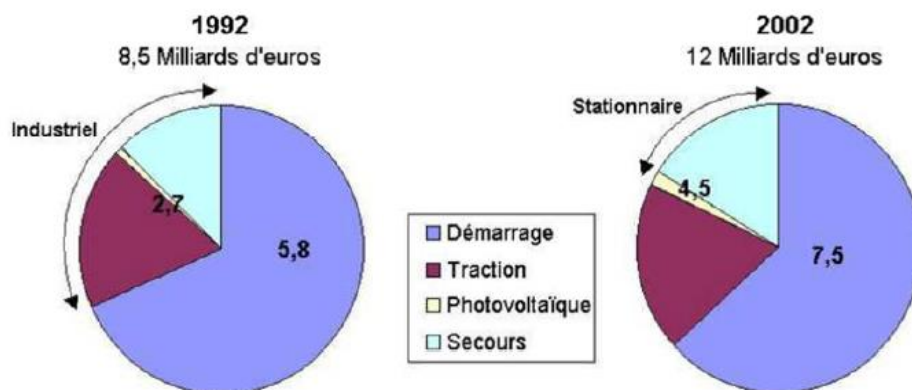


Figure (II.10). Marché mondial des batteries d'accumulateurs au Plomb [14].

II.3.9. Précautions d'exploitation

Des caractéristiques fonctionnelles des batteries au plomb présentées ci-dessus découlent certaines dispositions à prendre qui sont indispensables au bon fonctionnement de ces batteries [10].

- La tension de fin de charge doit être fixée en tenant compte de la température : Soit au niveau du régulateur qui doit être équipé d'un dispositif appelé compensateur de température qui fixe automatiquement la tension de fin de charge en fonction de la température mesurée. Soit en prévoyant une tension fixe calculée à partir de la formule (a) En utilisant une température maximale du site.
- Il faudra veiller à ce que la durée du gassing ne dépasse pas 10 heures par mois.
- La fixation du seuil de tension de fin de décharge doit tenir compte du courant moyen de décharge

➤ Des charges d'égalisation doivent être prévues au moins deux fois par an (si le Régulateur ne dispose pas d'une activation automatique de la charge d'égalisation) pour éviter la formation prolongée de sulfate sur les plaques des batteries.

II.3.10. Différentes causes de la défaillance des batteries

❖ Surcharge des batteries

Les surcharges des batteries engendrent non seulement la corrosion de ses plaques positives, mais aussi un dégagement excessif de gaz pouvant arracher des plaques, les matières actives qui se déposent aussi bien au fond du bac, qu'entre les séparateurs et les plaques. Les surcharges des batteries génèrent en outre une augmentation de la température de ces dernières, ce qui peut conduire à la destruction des plaques et des séparateurs.

❖ Décharges profondes

Les décharges profondes sont, à côté des surcharges, les premières causes de la détérioration d'une batterie. Les résultats des décharges profondes prolongées sont entre autre la diminution de la densité de l'électrolyte, le dépôt au fond du bac de sédiments fins de cristaux de sulfate de plomb et la décoloration des plaques, ainsi que leur sulfatation.

❖ Sulfatation

La sulfatation consiste en la formation sur les plaques de larges cristaux de sulfates de plomb, en lieu et place des fins cristaux qui y sont normalement présents. Les causes de la sulfatation sont :

- La non-utilisation de la batterie durant une longue période, après sa charge complète ou partielle,
- Le fonctionnement de la batterie durant des jours à un état de charge partielle, sans charge d'égalisation,
- La variation de la température dans la batterie. Les manifestations de la sulfatation sont l'augmentation de la résistance interne de la batterie, ce qui entraîne une diminution de la décharge et une augmentation de la tension de charge.

❖ Court-circuit

Les courts-circuits des éléments sont générés par :

- La destruction des séparateurs,
- L'accumulation excessive des sédiments au fond du bac,
- la formation de structures arborescentes de plomb, de la plaque négative vers la plaque positive.

Les manifestations du court-circuit des éléments sont les suivants :

- une densité d'électrolyte faible, en dépit de la réception normale de charge.
- une perte rapide de capacité après une pleine charge.
- une tension à vide faible.

❖ **La température**

La durée de vie d'une batterie est indiquée par le fabricant pour une température ambiante de 20°C, Cette durée de vie est réduite de moitié pour une élévation de température de 10°C.

❖ **Autres causes de la diminution de la durée de vie des batteries**

Outre les phénomènes décrits plus haut, d'autres causes que nous présentons Ci-dessous peuvent contribuer à la diminution de la durée de vie des batteries. Il s'agit :

- des phénomènes de vibrations.
- des salissures.

II.4. Performances

La batterie au plomb est celle qui a la plus faible énergie massique, 35 Wh/kg, après la batterie nickel-fer. Mais comme elle est capable de fournir un courant crête de grande intensité, utile pour le démarrage électrique des moteurs à combustion interne, elle est encore très utilisée en particulier dans les véhicules automobiles et dans la plupart des véhicules ferroviaires. Elle présente aussi l'avantage de ne pas être sensible à l'effet mémoire. [11].

II.5. Choix de batteries d'accumulateurs

Les choix d'une batterie d'accumulateur se fait suivant ces paramètres :

- Cycle de vie.
- Taux de décharge.
- Capacité Ah.
- Fiabilité.

II.6. Entretien de batteries d'accumulateurs

L'entretien des batteries est très simple, la plupart des modèles ne demande qu'à être chargée régulièrement surtout avant d'être stocké.

Pour entretenir une batterie, il faut prendre en considérations ces critères :

- Garder la batterie propre ; ne laisser pas la poussière s'accumule sous peine de risque de court-circuit.
- Il est généralement admis que le courant de charge ne doit pas dépasser 10% de capacité de la batterie.
- Ne pas les surcharger.

- Elle doit être stockée dans un endroit sec à l'abri du soleil.
- Elle doit être maintenue chargée par une charge d'entretien à intervalle régulier.

II.7. Mesures de sécurité

- Pour être en sécurité pendant la charge d'une batterie, suivez ses mesures :
- Pour toute manipulation portez des protections individuelles gants, lunettes, surtout avec des batteries à électrolyte.
- Il est nécessaire de bien ventiler le local où s'effectue cette charge.
- Il ne faut jamais brancher les câbles de chargeur au niveau de la batterie avant
- D'avoir éteint le chargeur.
- Ne mettez jamais en court-circuit la batterie.
- N'inversez pas la polarité.
- Ne surcharger pas et ne percez pas le boîtier.
- Ne pas faire de décharge profonde.

II.8. Aspects environnementaux et santé humaine

S'il est ingéré ou respiré, le plomb peut être la cause d'intoxications aiguës ou chroniques. Il peut être à l'origine de cas de saturnisme. Une bonne maîtrise des risques présentés par les batteries au plomb usagées est donc indispensable et dangereuse pour la santé et pour l'environnement, ces batteries doivent être collectées et retraitées par des sociétés spécialisées. Afin de prévenir les risques de pollution, les entreprises françaises ont l'obligation de mettre en place des procédés conformes aux meilleures techniques disponibles et font l'objet de contrôles stricts et réguliers. Elles doivent également garantir un niveau élevé de protection de leurs salariés. Cette protection passe par la formation aux risques liés au plomb et par l'utilisation systématique d'équipements de protection collective et individuelle. L'efficacité de ces mesures est régulièrement vérifiée par la mesure de la plombémie des salariés. Un démantèlement réalisé dans de mauvaises conditions peut engendrer des décès et une pollution durable.

II.9. Conclusion

Pour superviser l'installation PV/Batteries, on suppose que les batteries sont initialement à moitié chargées. Le système de gestion s'occupe principalement de l'alimentation de la charge et de la protection des batteries (on prend un état de charge minimum $EDC_{min} = 30\%$ et un état de charge maximum $EDC_{max} = 90\%$). Nous avons des différents modes qui régissent le fonctionnement du système proposé.

Chapitre III

Modélisation et simulation des batteries à usage solaire

III.1. Introduction

La modélisation mathématique des batteries est un aspect très important pour la simulation des systèmes d'énergies renouvelables car l'incertitude associée à la durée de vie prévue pour les batteries rend leurs comportements très complexes. Pour cette raison la modélisation est une tâche primordiale qui permet de caractériser le comportement du système afin d'établir une relation directe entre les différents composants du système et d'introduire un rapport entre l'énergie produite par l'installation et la demande énergétique.

La plupart des modèles de batterie se concentrent sur trois caractéristiques différentes. Le premier modèle porte sur la modélisation de l'état de charge, qui est la quantité la plus importante dans les évaluations des systèmes de stockage électrochimiques. Le deuxième type de modèle est le modèle de tension, qui est utilisé pour modéliser la tension de sortie aux bornes de la batterie il peut être utilisé dans la modélisation la plus détaillée du système de gestion et le calcul des pertes dans la batterie. Le troisième type est le modèle de durée de vie utilisé pour évaluer l'impact d'un système d'exploitation particulier sur la durée de vie prévue pour la batterie.

Sur la base de l'étude menée précédemment dans le chapitre 02, traitant l'état de l'art des différents modèles de batterie au plomb acide, nous allons dans ce chapitre modéliser la batterie en utilisant trois modèles électrochimiques les plus couramment utilisés dans les applications PV qui sont dans l'ordre suivant : modèle de Shepherd, modèle de Manegon et modèle de Coppetti respectivement. Il est à noter que notre travail se focalise sur la modélisation de la tension de sortie de la batterie, le but est de définir le modèle le plus approprié pour un système PV autonome.

Ce chapitre sera divisé en deux parties, la première partie traite une comparaison entre les trois modèles avec leurs coefficients originaux donnés par chaque modèle et dans la deuxième partie la simulation et modélisation modèle de Coppetti mais avec les nouveaux coefficients identifiés par un algorithme de régression qui sera discuté en détail.

L'approche considérée est organisée comme suit :

La comparaison entre les modèles est réalisée à l'aide d'une analyse détaillée basée sur des méthodes de tests statistiques tels que le calcul de la fréquence cumulée en fonction de l'erreur relative et aussi le calcul des indicateurs d'erreurs statistiques ; l'erreur moyenne quadratique et l'erreur absolue.

III.2. Modélisation de la batterie

L'objectif principal de la modélisation mathématique de la batterie est d'être en mesure de prédire son comportement sous des conditions de fonctionnement réelles. Dans cette partie, la modélisation de la batterie est présentée selon les trois modèles électrochimiques communément utilisés pour les applications PV qui sont : **le modèle de Shepherd, le modèle de Manegon et le modèle de Coppetti** respectivement. Ainsi, pour chaque modèle de batterie, l'expression de la tension de sortie analytique est mise en évidence pendant toutes les phases de charge et de décharge

Tout d'abord la simulation est faite en utilisant les paramètres originaux caractéristiques pour chaque modèle voir tableau (III .1), (III .2), (III .3). Il est à noter que pendant la phase boost et la phase floating la batterie n'est raccordée à aucune source de consommation et durant la zone de décharge la batterie est entièrement chargée et n'est pas connectée au champ PV.

III.1.1. Modèle de Shepherd

Les paramètres électriques originaux du modèle de Shepherd issus des équations de décharge et de charge eq (2.2) et eq (2.3) respectivement, discutés précédemment dans le chapitre (2) sont illustrés sur le tableau (III .1). suivant.

Tableau (III .1). Les coefficients originaux du modèle de Shepherd [15].

Coefficients du modèle	Paramètres
$E_s (V)$	02.0030
$K(\Omega)$	00.0189
$Q(Ah)$	58.3100
$N(\Omega)$	00.0150
A	00.0000
B	00.0000

III.1.2. Modèle de Manegon

Les paramètres électriques originaux du modèle de Manegon issus à partir des équations de décharge, de charge et de surcharge équation passé respectivement discutés précédemment sont illustrés sur le tableau (III .2) suivant :

Tableau (III .2). Les coefficients originaux du modèle de Manegon [16].

La phase boost		La phase de floating		La zone de décharge	
$a_2(V)$	02.094	$a_3(V)$	002.094	$a_1(V)$	02.094
$b_2(V)$	00.001	$b_3(V)$	000.001	$b_1(V)$	00.001
$c (^{\circ}C)$	25.000	$c (^{\circ}C)$	025.000	$c (^{\circ}C)$	25.000
d_2	00.189	d_3	000.189	d_1	00.189
$e_2(\Omega)$	01.142	$e_3(\Omega)$	001.142	$e_1(\Omega)$	00.150
k_2	00.150	k_3	000.150	k_1	00.020
m_2	00.020	m_3	000.020	m_1	25.000
h_2	25.00	h_3	025.000		
		r_3	000.900		
		s_3	300.000		
		t_3	001.000		

III.1.3. Modèle de Coppetti

Les paramètres électriques originaux du modèle de Coppetti issus des équations de décharge, de charge et de surcharge présentés par les équations nous le mentionnerons plus tard discutés précédemment dans le chapitre (2) sont illustrés sur le tableau (III .3) suivant :

Tableau (III .3). Les coefficients originaux du modèle de Coppetti [17]

La phase boost		La phase floating		La zone de décharge	
$V_{boc}(V)$	24,000	$A_{gas}(V)$	026,880	$V_{bode}(V)$	25,02
$K_{boc}(V)$	01,920	$B_{gas}(Vh)$	001,970	$K_{bode}(V)$	01,44
$P_{1c}(VAh)$	06,000	$\alpha_{gas} (^{\circ}C^{-1})$	000,002	$P_{1dc}(VAh)$	04,00
P_{2c}	00,860	$A_{Fonsc}(V)$	029,400	P_{2dc}	01,30
$P_{3c}(Vh)$	00,480	$B_{Fonsc}(Vh)$	002,011	$P_{3dc}(Vh)$	00,27
P_{4c}	01,200	$\alpha_{Fonsc} (^{\circ}C^{-1})$	000,002	P_{4dc}	01,50
$P_{5c}(Vh)$	00,036	$A_{\tau_{sc}}(h) B_{\tau_{sc}}(h)$	017,300	$P_{5dc}(Vh)$	00,02
		$C_{\tau_{sc}}$	852,000		
$\alpha_{Rc} (^{\circ}C^{-1})$	00,025		001,670	$\alpha_{dc} (^{\circ}C^{-1})$	$7 \cdot 10^{-3}$

III.2. Simulation de la tension de la batterie

La simulation de ces trois modèles avec les coefficients originaux nous mène à tirer les remarques suivantes : D’après la (III.11), nous constatons que pendant la phase boost le modèle établi par Coppetti affiche des valeurs plus proche des données l’expérimentales et suit fidèlement leur évolution comparativement aux modèles de Manegon et Shepherd.

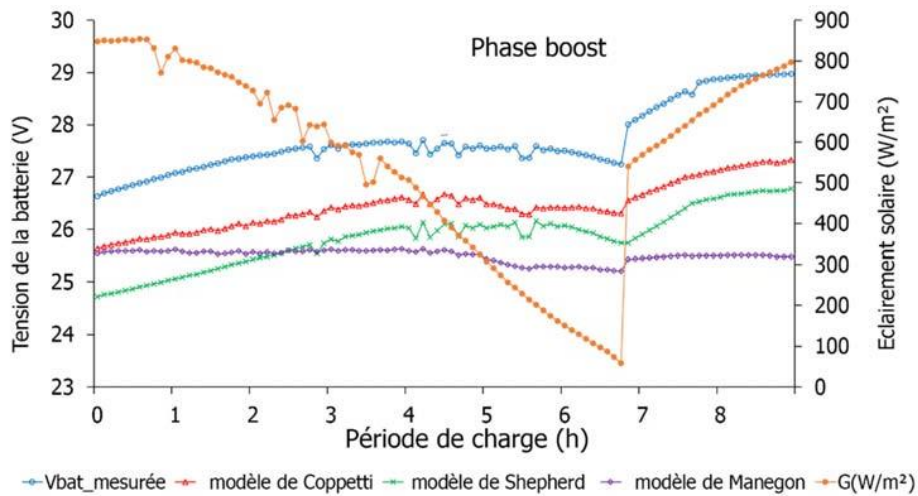


Figure (III.1). Simulation de la tension de la batterie selon les trois modèles avec leurs coefficients originaux durant la phase boost.

Durant la phase floating comme le montre la Fig. (III.2), le modèle de Coppetti suit la courbe de la tension réelle malgré les faibles déviations affichées au début de cette phase et donne globalement les meilleures performances comparées aux modèles de Manegon et de Shepherd.

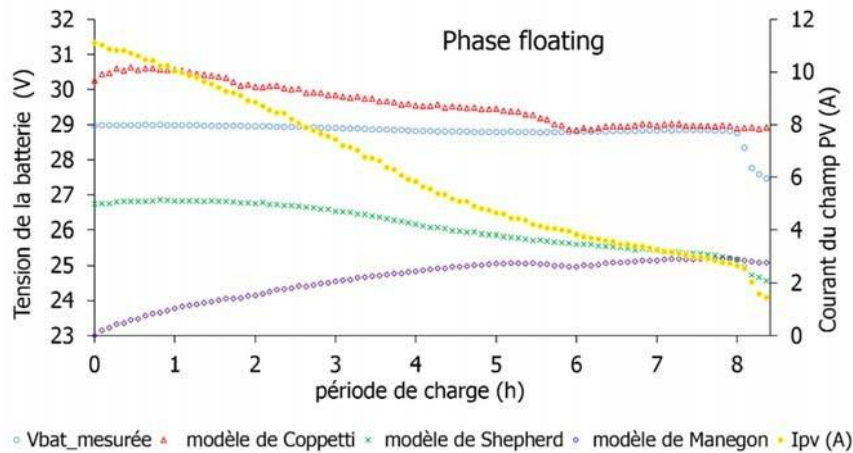


Figure (III.2). Simulation de la tension de la batterie selon les trois modèles avec leurs coefficients originaux durant la phase floating

La Fig.(III.3). montre la variation de la tension de décharge de la batterie pendant la période où la source PV était absente c'est la batterie qui assure la demande énergétique d'une puissance de 220W.

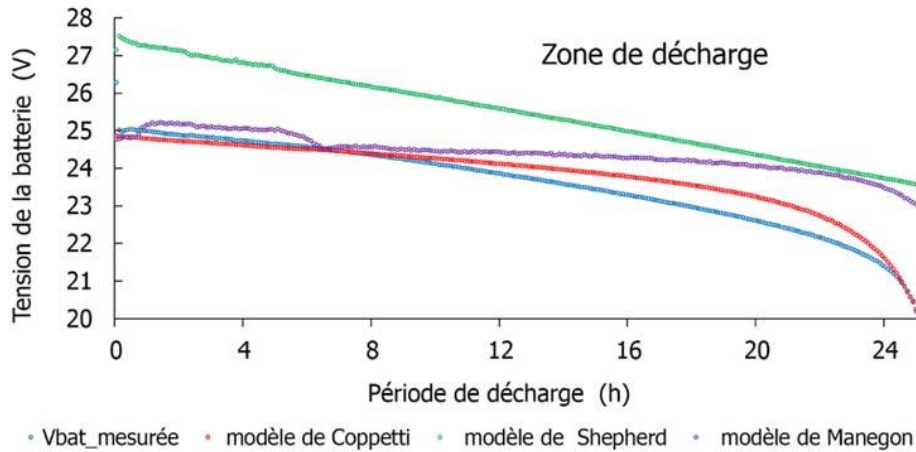


Figure (III.3). Simulation de la tension de la batterie selon les trois modèles avec leurs coefficients originaux durant le mode de décharge.

Par un simple contrôle visuel, nous constatons que le modèle de Coppetti s'aligne beaucoup mieux avec la variation de la tension mesurée. Par contre le modèle décrit par Manegon s'adapte au début de la zone de décharge et enregistre une divergence notable en fin de décharge. Le modèle de Shepherd est loin d'être considéré pour cette phase de décharge.

III.3. Analyse comparative des modèles

Pour une analyse plus fine dont l'objectif est de déterminer parmi les 03 modèles utilisés, qui se rapproche le mieux des valeurs expérimentales.

Il nous a semblé judicieux de procéder à des méthodes de tests statistiques basées ,en première étape sur : l'évaluation de la distribution des fréquences cumulées en fonction du pourcentage des erreurs relatives entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues des 03 modèles, d'une deuxième étape l'analyse comparative des 03 modèles se poursuit en faisant intervenir d'autres tests statistiques fréquemment utilisés dans le domaine de la modélisation tels que ; l'erreur moyenne absolue (MBE) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE) en considérant toutes les phases de fonctionnement de la batterie.

A. Fréquence cumulée

Cette section traite l'analyse comparative des trois modèles proposés précédemment en fonction des données enregistrées et la capacité de chaque modèle à prédire avec précision le comportement de la batterie pour différentes conditions de fonctionnement réelles. Pour ce faire nous avons utilisé des indicateurs statistiques tels que la distribution de la fréquence cumulée en fonction du pourcentage de l'erreur relative donné par l'équation suivante :

$$ER (\%) = \frac{V_{mes} \cdot V_{sim}}{V_{mes}} \times 100 \quad (III,1)$$

Où :

V_{mes} et V_{sim} sont la tension de batterie mesurée et simulée respectivement.

L'objectif de cette analyse est de s'assurer que le modèle sélectionné décrit correctement le comportement de la batterie.

En outre, une analyse comparative des trois modèles est effectuée en utilisant la MBE et la RMSE définies par les équations suivant correspondant aux phases de charge et de décharge.

$$MBE (V) = \frac{1}{N} \sum_1^N V_{mes} - V_{sim} \quad (III.2)$$

$$RMSE (V) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (V_{mes} - V_{sim})^2} \quad (III.3)$$

N est le nombre de données réelles.

Les tableaux (III.4), (III.5), (III.6) affichent les valeurs des fréquences de données cumulées via le pourcentage de l'erreur relative c'est-à-dire le nombre de données utilisés pendant les tests expérimentaux pour chaque modèle par rapport à l'erreur relative durant le processus de charge et de décharge.

Les figure (zone de charge) affichent l'évolution de la fréquence cumulée via le pourcentage de l'erreur relative ER (%). Les tableaux (III.4) et (III.5) illustrent numériquement les valeurs de ces fréquences cumulées atteintes pour les ER (%) sur une plage de 0 - ±20%.

Nous observons sur la Fig. (III.4). et le tableau que plus de 31% des données observées pour le modèle de Coppetti présentent une erreur relative ER inférieur à ±3%, par contre

aucune valeur n'est enregistrée pour des ER inférieurs à $\pm 3\%$ pour les deux autres modèles (Manegon et Shepherd).

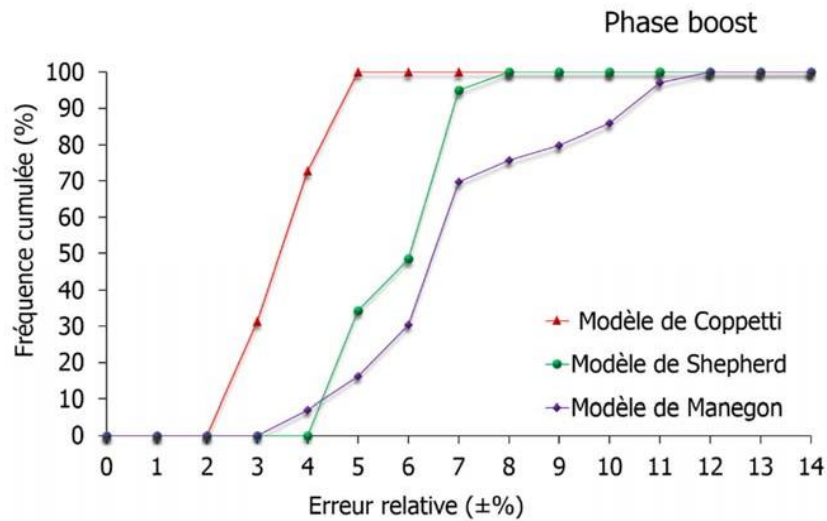


Figure (III.4). Distribution de la fréquence cumulée en fonction de l'erreur relative pour la phase boost.

Il est a remarqué également que 100% des valeurs données par le modèle de Coppetti ont été atteintes pour des erreurs relatives inférieures à $\pm 5\%$, pour des ER inférieures à $\pm 5\%$, alors que le modèle de Manegon affiche un taux de 30% et celui de Shepherd un taux de 48% est obtenu.

Tableau (III .4). Résultats comparatifs de la distribution du nombre de données par rapport à l'erreur relative pendant la phase boost.

RE (± %)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
modèle de Shepherd	0	0	0	0	0	34	14	46	5	0	0	0	0	0	0
modèle de Manegon	0	0	0	0	7	9	14	39	64	6	11	12	0	0	0
modèle de Coppetti	1	0	0	33	41	20	4	0	00	0	0	0	0	0	0

La Fig. (III.4) et le tableau (III .4) correspondant à la phase floating, affichent pour le modèle de Coppetti un taux de 100% pour des ER inférieures à $\pm 5\%$ pour le modèle de Shepherd, ce taux de 100% n'est atteint que pour des ER inférieures à $\pm 12\%$, le modèle de Manegon vient en dernière position avec un taux de 100% atteint pour des ER égales à $\pm 20\%$

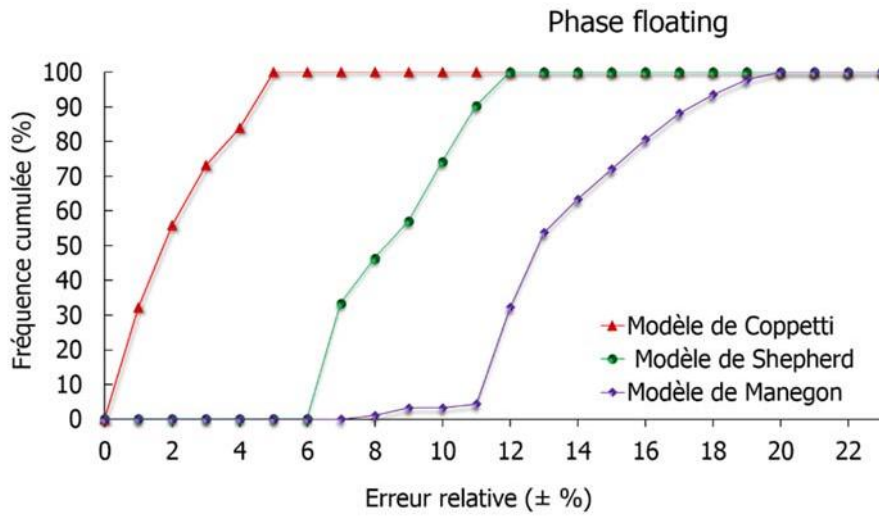


Figure (III.5). Distribution de la fréquence cumulée en fonction de l'erreur relative pour la phase floating

Tableau (III .5). Résultats comparatifs de la distribution du nombre de données par rapport à l'erreur relative pendant la phase floating.

RE (±%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
modèle de Shepherd	0	0	0	0	0	0	0	31	12	10	16	15	9	0	0	0	0	0	0	0	0
modèle de Manegon	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	26	20	9	8	8	7	5	42	
modèle de Coppetti	26	4	22	16	10	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Pendant la décharge (voir Fig. III.6, tableau III .6) le modèle de Coppetti affiche un taux de plus de 99% de ses valeurs pour des ER inférieurs à ±2% alors que le modèle de Manegon enregistre un taux de 53% pour cette même valeur de ER. Aucune valeur n'est enregistrée dans cet intervalle d'erreur relative (ER inférieur à ±2%) correspondante au modèle de Shepherd.

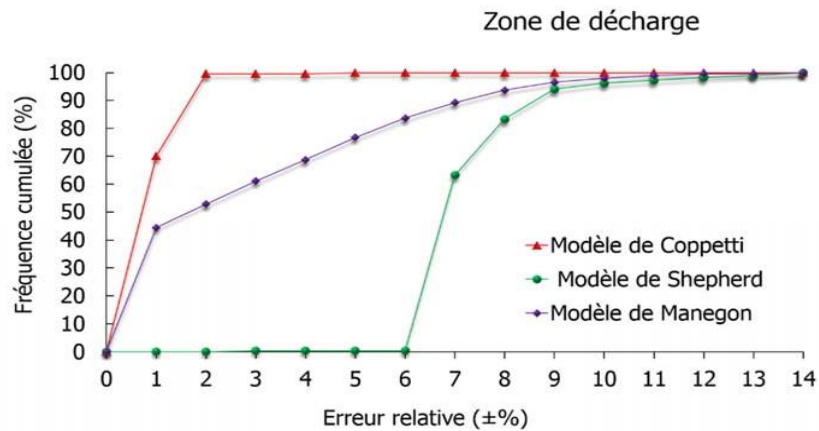


Figure (III.6). Distribution de la fréquence cumulée en fonction de l'erreur relative pour le mode de

Tableau (III .6). Résultats comparatifs de la distribution du nombre de données par rapport à l'erreur relative pendant la zone de décharge.

RE (± %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
modèle Shepherd de 0	0	0	1	0	0	0	0	18	15	8	3	3	2	1	1	1	1
modèle Manegon de 47	81	24	24	22	23	20	16	13	8	4	3	2	0	1	0	0	0
modèle Coppetti de 144	58	85	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

B. Indicateurs de tests statistiques

Pour quantifier les dérivations entre les 03 modèles et les valeurs expérimentales des tests statistiques tels que MBE et RMSE définis précédemment contribuent d'une manière significative quant au choix du modèle le plus approprié et le plus performant.

Le tableau 4.7 indique clairement que le modèle établi par Coppetti s'avère le plus performant avec un MBE et un RMSE de 0,01 en phase de boost, 0,017 de MBE et 0,033 de

RMSE observés au niveau de la phase d'absorption et maintien et en Phase de décharge, le modèle affiche une erreur moyenne MBE de 0,002 et un RMSE très faible d'ordre de 0,05.

Tableau (III .7). Comparaison entre les données mesurées et calculées pour les 03 modèles

	Boost	Floating	Décharge
MBE	RMSEMBE	RMSE	MBE RMSE
Modèle de Shepherd	0,03600,1915	0,05300,231	0,00600,082
Modèle de Manegon	0,01200,1095	0,38200,618	0,00720,088
Modèle de Coppetti	0,01000,0105	0,01700,033	0,00200,051

Il est à conclure pour cette partie que le modèle de Coppetti offre de bonnes performances quant au nombre de points observés pour des ER inférieurs à $\pm 5\%$ et des erreurs statistiques les plus faibles comparées à celles estimées par les modèles établis de Manegon et Shepherd. Bien que le modèle de Coppetti s'avère le plus approprié pour la simulation du système, il présente toutefois quelques déviations qui ne peuvent être tolérables, notamment pendant la phase de floating ; (la phase du maintien) en mode de charge et présente également une incohérence en fin de la phase de décharge ; où la tension évolue d'une manière non linéaire ceci était dû à la dégradation de la capacité de la batterie d'une façon vertigineuse comme le montre le partie passé respectivement.

Le modèle de Coppetti avec des coefficients originaux a affiché quelques disparités qui sont dues certainement à l'utilisation des batteries fabriquées avec une technologie ou par un constructeur différent de celui utilisé par Coppetti durant son étude [17-18].

III.4. Modélisation mathématique modèle de Coppetti

Coppetti et al. [17] ont élaboré un modèle très détaillé pour les batteries au plomb-acide, qui peut prendre en considération toutes les conditions de fonctionnement existantes. La forme normalisée des équations par rapport à la capacité de la batterie permet de généraliser son utilisation pour tout type et toute taille de batterie au plomb acide,

Ce modèle permet de représenter l'évolution de la tension de la batterie en mode de charge, surcharge et durant le processus de décharge. Ci-après, sont décrites, les zones de fonctionnement.

Notez : que les résultats Coppetti modaux sont les plus proches des coefficients originaux

III.4.1. Mode de décharge

L'évolution de la tension de sortie de la batterie en mode de décharge est donnée par l'expression suivante :

$$V_d = [2.85 - 0.12(1 - \text{SOC})] - \frac{I_d}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I^{1.3}} + \frac{0.27}{\text{SOC}^{1.5}} + 0.02 \right) \cdot (1 - 0.007\Delta T) \quad (\text{III.4})$$

$$\Delta T = T - 25 \quad (\text{III.5})$$

T est la température interne de la batterie en °C (2.13) Le premier terme de l'équation (III.5) définit la variation de la tension de la batterie en fonction du SOC et aussi la variation de la concentration de l'électrolyte. Le deuxième terme décrit la variation de cette tension due à sa résistance interne [19]. Le comportement de la Batterie était considéré comme une séquence d'états stationnaires, sans tenir compte les effets transitoires.

Dans l'équation (III.12), la résistance interne est représentée par la somme des résistances en série qui correspondent à des phénomènes différents.

L'expression du SOC pour ce modèle est pratiquement similaire à celle donnée par le modèle de Manegon. Le SOC, dans le modèle de Coppetti, est exprimé comme suit :

$$\text{SOC} = \left(1 - \frac{Q}{C} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$Q = \int_0^t I_d \cdot dt \quad (\text{III.7})$$

Où Q représente la quantité d'énergie de la batterie donnée en Ah.

III.4.2. Mode de charge

En raison du comportement dynamique de la batterie pendant la période de charge, Coppetti a subdivisé le mode de charge en deux phases principales ; la phase boost et la phase de surcharge.

. Phase boost

Dans cette phase, la tension de sortie de la batterie est exprimée par l'équation suivante :

$$V_c = [2 - 0.16\text{SOC}] - \frac{I_c}{C_{10}} \cdot \left(\frac{6}{1 + I^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - \text{SOC})^{1.2}} + 0.036 \right) \cdot (1 - 0.025\Delta T) \quad (\text{III.8})$$

$$SOC = SOC_0 + \frac{nc \int_{t_0}^t I_{ch}.dt}{C} \quad (III.9)$$

$$n_c = 1 - \exp \left[\frac{a}{\frac{I}{I_{10}} + b} \cdot (SOC - 1) \right] \quad (III.10)$$

Telle que : $a = 20.73$; $b = 0.55$

III.4.3. Mode de surcharge

Le processus de surcharge est considéré comme une période très importante dans le mode de charge, qui prend en compte le mode de gazéification. La relation suivante exprime la tension de

gazéification (V_g) pour la phase de surcharge :

$$V_g = [2.24 + 1.97 \ln(1 + I_{ch}/C_{10})] (1 - 0.002 \Delta T) \quad (III.11)$$

$$V_{ec} = [2.45 + 1.97 \ln(1 + I_{ch}/C_{10})] (1 - 0.002 \Delta T) \quad (III.12)$$

Le phénomène de surcharge (phénomène de gazéification) peut être représenté par la fonction non-linéaire suivante :

$$V_c = V_g + (V_{ec} - V_g) \left(1 - \exp\left(\frac{Ah_{restored} - 0.95C}{I_t}\right) \right) \quad (III.13)$$

Ou La constante de temps du phénomène de gazéification τ est inversement proportionnel à l'intensité du courant de charge, son expression est définie comme suit

$$\tau = \frac{17.3}{1 + 852 \left(\frac{I}{C_{10}}\right)^{1.67}} \quad (III.14)$$

τ est la constante de temps de la zone de surcharge.

Dans ce modèle, il est supposé que 95% de la capacité avait déjà été restaurée dans la batterie au début de cette zone de surcharge par conséquent, l'évolution de la tension pendant le processus de charge est représentée par l'équation (2.16), jusqu'au début de la phase de gazéification ($V_c < V_g$) et par l'équation (2.19) durant la phase de surcharge ($V_c > V_g$) jusqu'à ce que la tension finale constante (V_{ec}) soit atteinte.

Le SOC augmente d'abord linéairement avec le courant de charge jusqu'à ce qu'il atteigne 70% de la capacité nominale de la batterie. Au-dessus de là cette valeur, son évolution reste très difficile à établir [18].

Cela peut être causé par le comportement dynamique de la batterie, qui n'a pas été identifié jusqu'à présent

Le modèle de Coppetti est normalisé pour être utilisé de manière satisfaisante dans les

programmes de simulation des systèmes PV pour représenter le fonctionnement de la batterie en considérant la phase de surcharge et les phénomènes chimiques durant le processus de charge ainsi que les variations de courant de charge et de la température.

➤ III.5. Simulation modèle de Coppetti

Afin de valider les résultats de l'algorithme, nous avons simulé le modèle de Coppetti décrit précédemment avec de nouveaux coefficients estimés en charge, décharge et surcharge. Nous comparons d'abord le modèle de Coppetti avec les nouveaux paramètres et le même modèle en utilisant les paramètres d'origine pendant tous les cycles de batterie.

Dans la première étape de simulation, nous connectons la batterie à un générateur photovoltaïque et à une charge en même temps, augmentons la charge à chaque étape et notons la tension de la batterie lors de la charge, notant son comportement également en cas de surcharge, dans la deuxième étape en cas de décharge, le générateur photovoltaïque est déconnecté du circuit, cela rend la batterie connectée à la résistance uniquement.

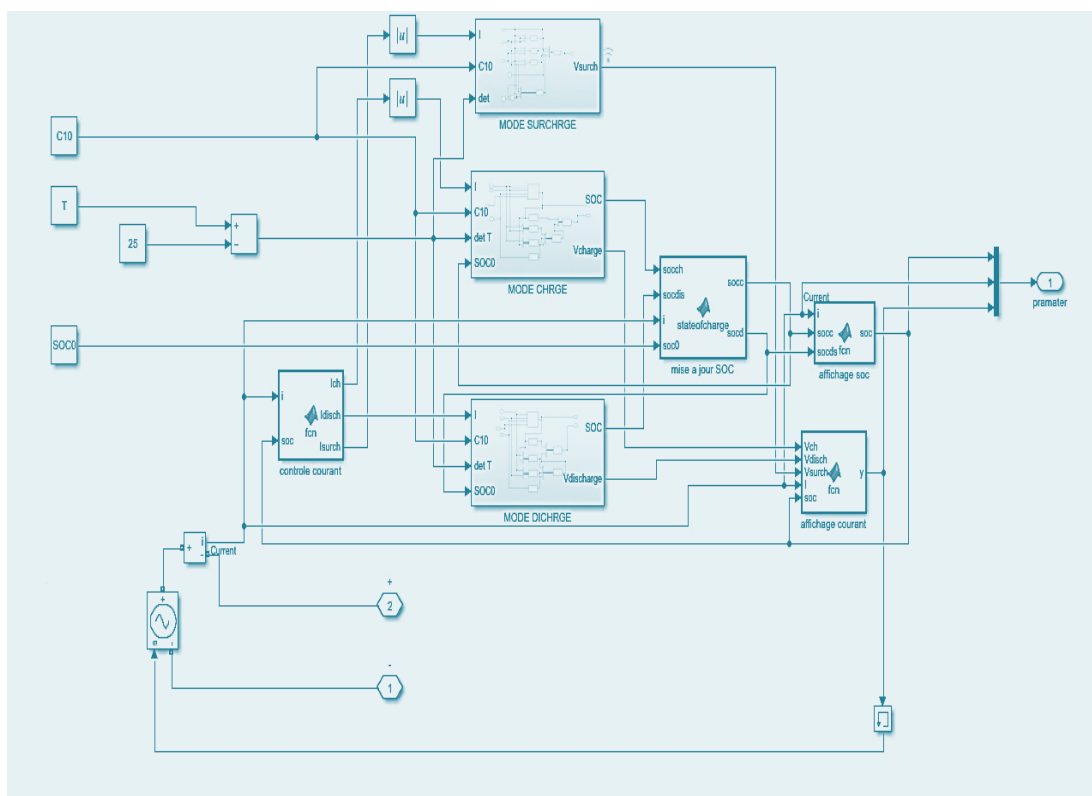


Figure (III.7) : Diagrammes des trois mode de batterie (Matlab/Simulink)

III.5.1 Mode de charge

En cas de charge, nous branché le générateur photovoltaïque de circuit et observons le comportement de la tension dans chaque cas de changement de charge ou de changement de

température.

Les figures **Figure (III.9)** ; **Figure (III.10)** est présenté la tension de la charge batterie en fonction de temps v avec variation de résistance ($R=15\Omega$), ($R=100\Omega$).

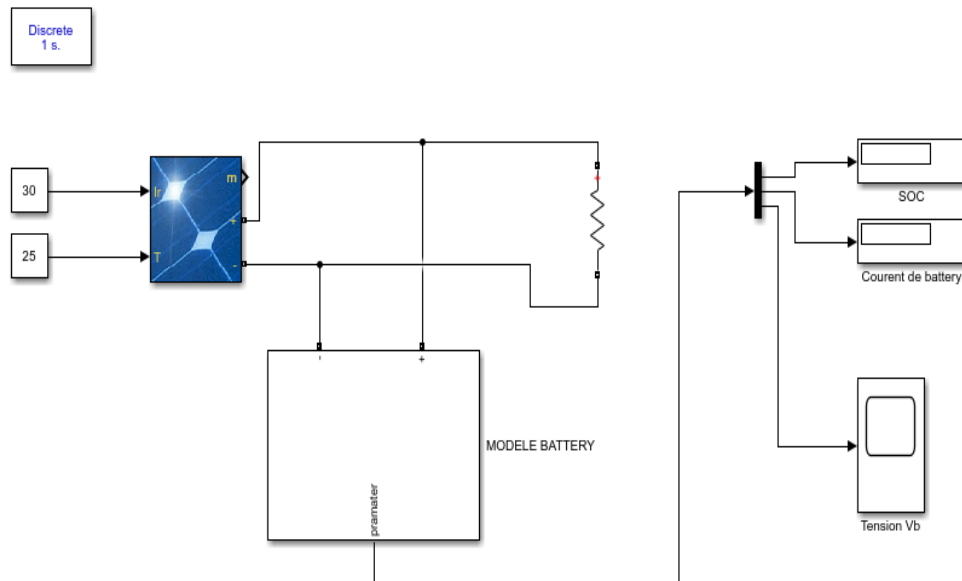


Figure (III.8). Le model de simulation en mode de charge

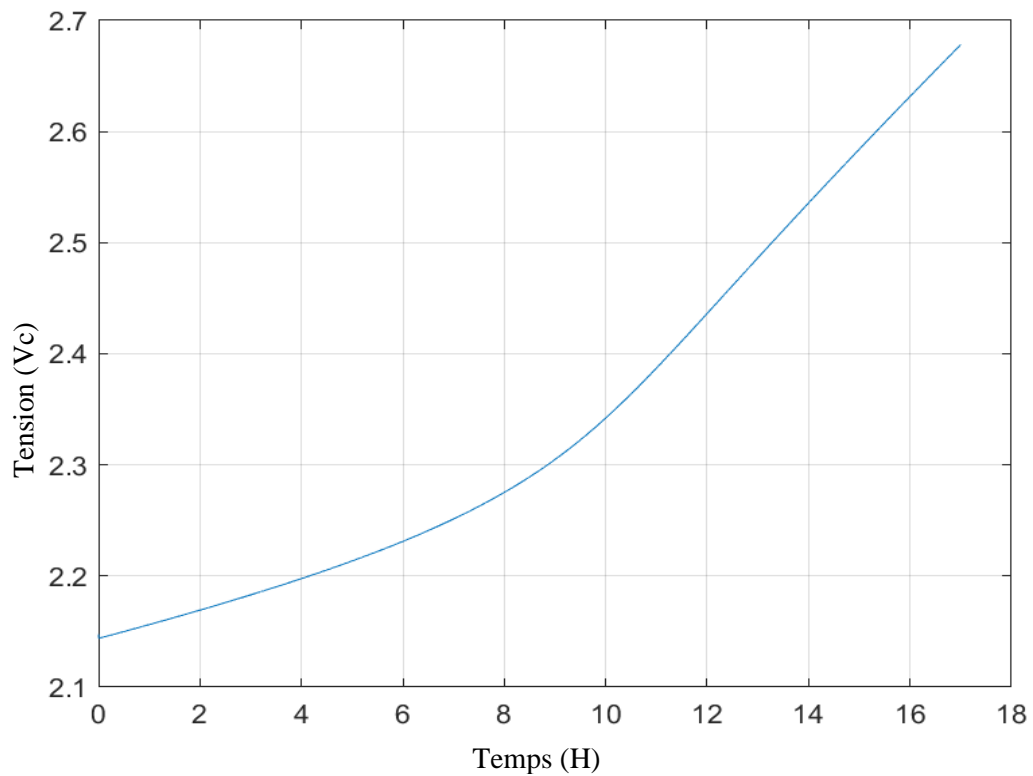


Figure (III.9). La courbe de tension charge de batterie $V_c=f(t)$ avec $R=15\Omega$

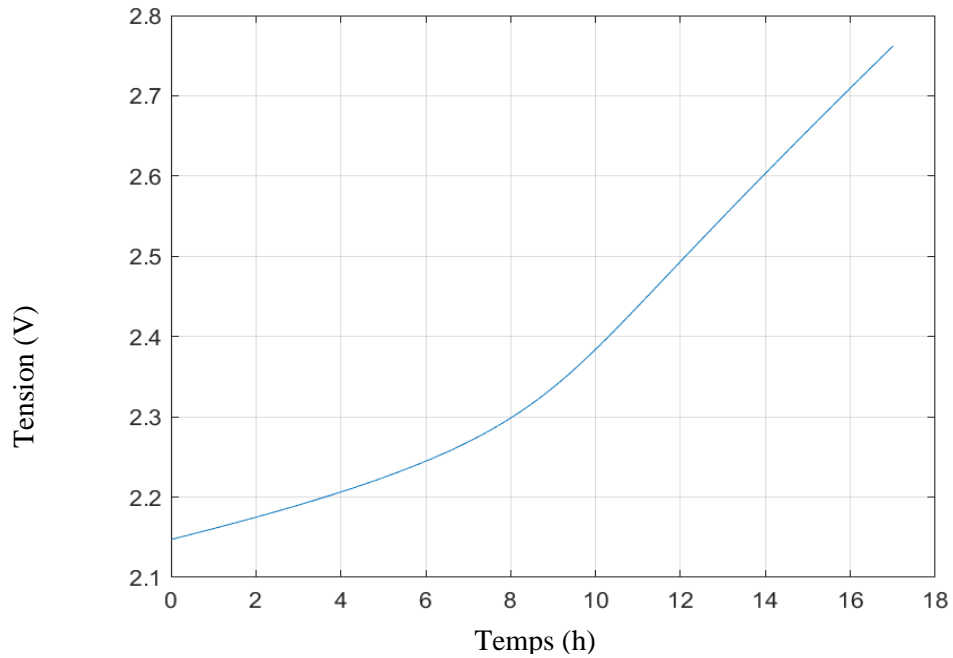


Figure (III.10). La courbe de tension charge de batterie $V_c=f(t)$ avec $R=100\Omega$
 - La charge de la batterie quand $R=100\Omega$ plus vite que quand $R=15\Omega$

III.5.2. Mode de surcharge

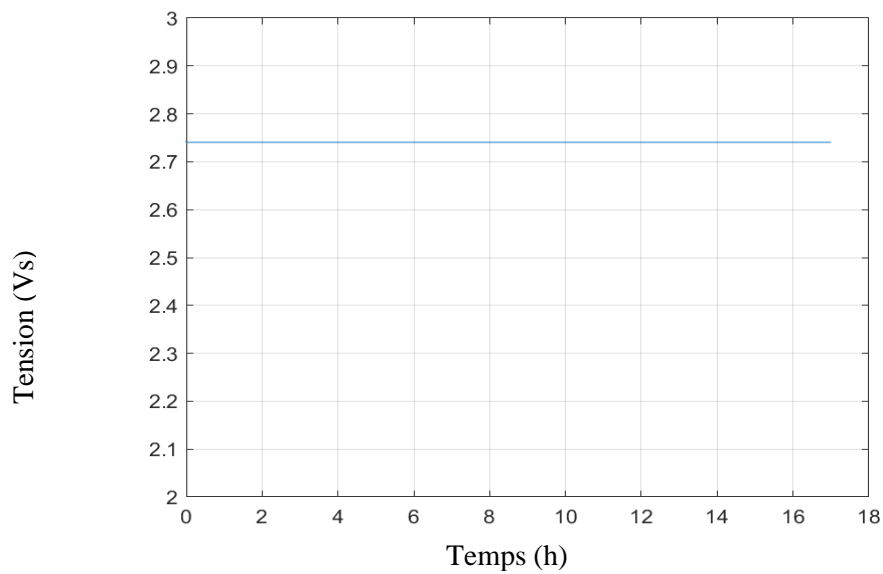


Figure (III.11). La courbe de tension surcharge de batterie $V_s=f(t)$

- La tension de la batterie pendant la surcharge n'a pas de comportement réel

III.5.3. Mode de décharge

En cas de décharge, nous débranché le générateur photovoltaïque de circuit et observons le comportement de la tension dans chaque cas de changement de charge ou de changement de température.

Les figures **Figure (III.13)** **Figure (III.14)** est présenté la tension de la décharge batterie en fonction de temps avec variation de résistance ($R=2\Omega$), ($R=0.5\Omega$).

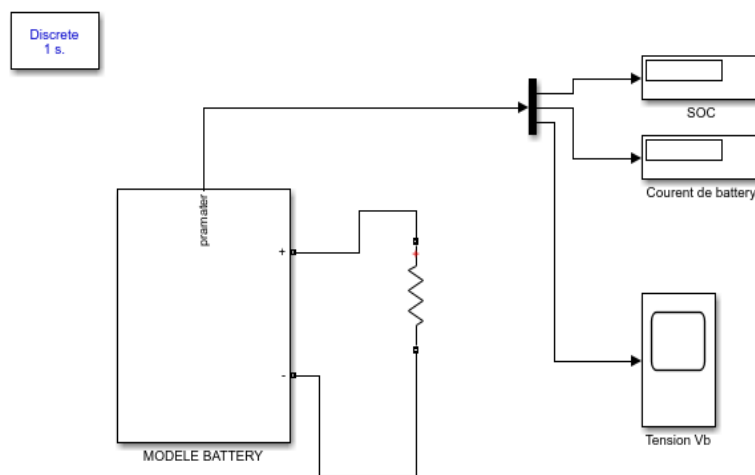


Figure (III.12). Le model de simulation en mode de décharge

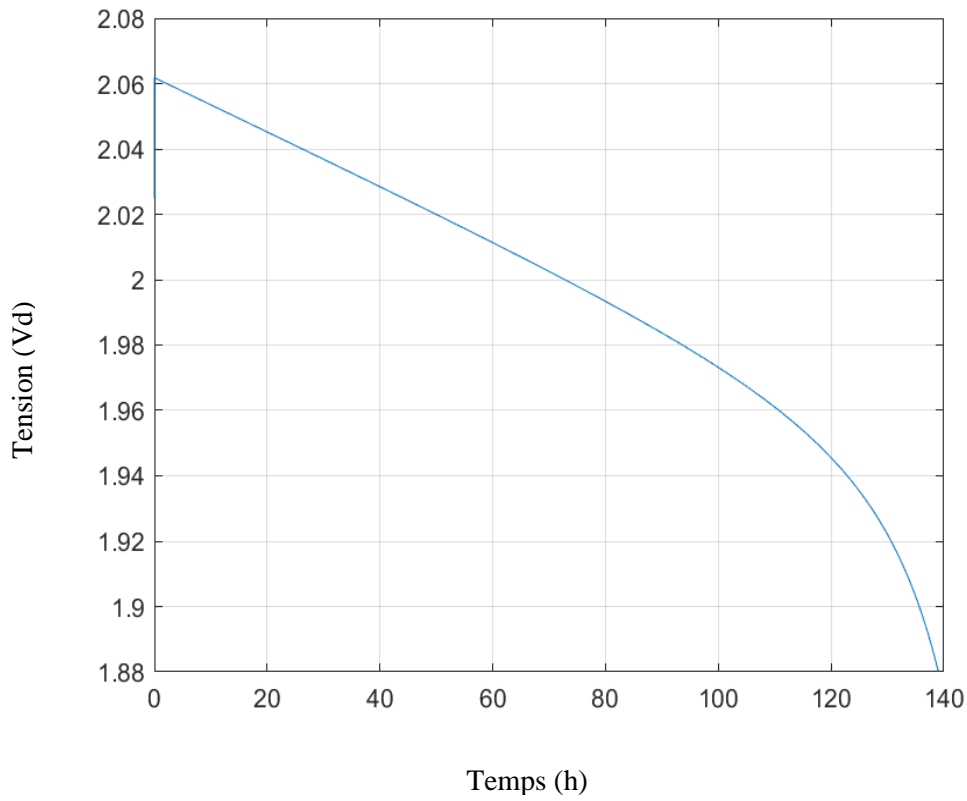


Figure (III.13). La courbe de tension décharge de batterie $V_d=f(t)$ avec $R=2\ \Omega$

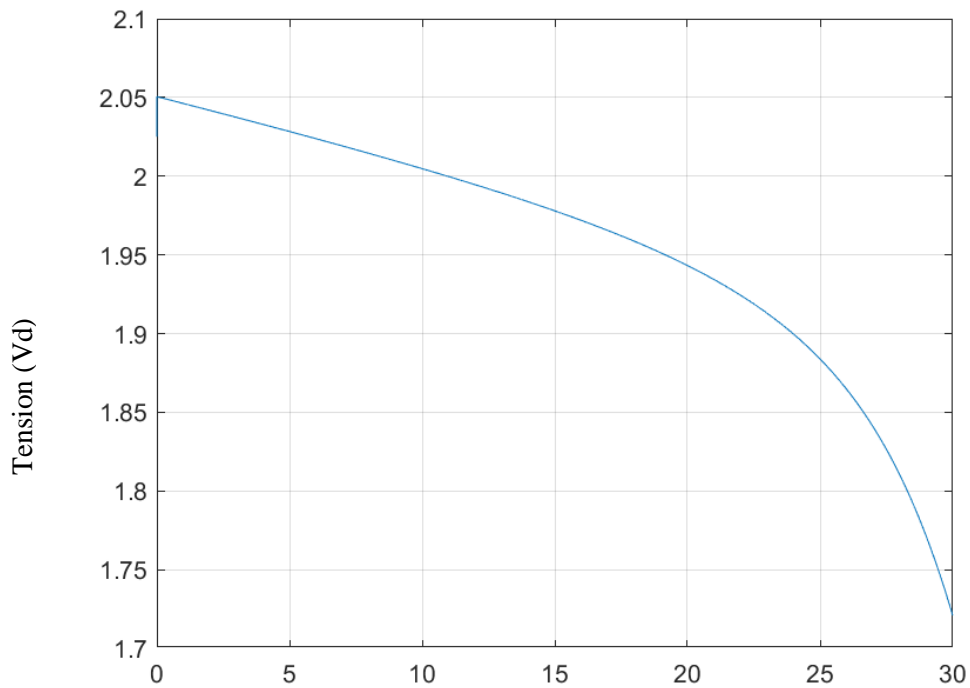


Figure (III.14). La courbe de tension décharge de batterie $V_d=f(t)$ avec $R=0.5\ \Omega$

- La décharge de la batterie quand $R=0.5\ \Omega$ plus vite que quand $R=2\ \Omega$

Commentaire

L'augmentation de la charge a un effet clair sur la tension de la batterie, car elle avait un chemin continu à la charge faible dans les deux cas : charge, décharge.

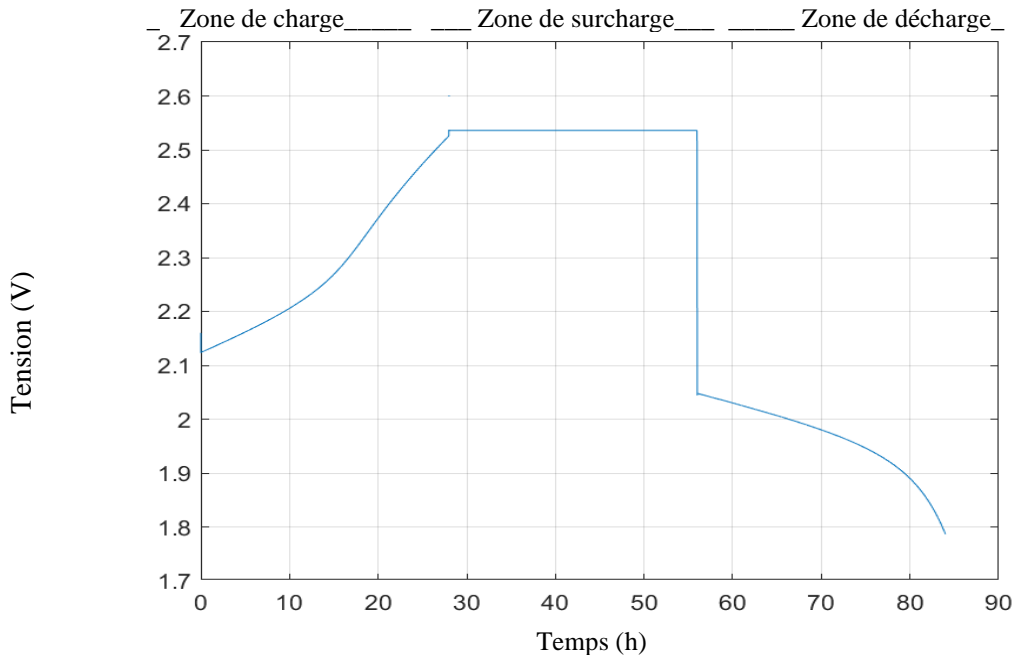


Figure (III.15). La tension de batterie dans les trois cas

III.6. Effet de température dans charge et décharge de batterie

Cette partie présente le modèle mathématique et l'expérience de l'effet de la température sur la charge et la décharge des performances de la batterie plomb-acide dans l'alimentation du système PV. Pour tester l'effet de la température sur les cycles de décharge de la batterie, une plage de température de la zone tropicale de 10 à 50 degrés Celsius dans un simulateur est configurée pour les tests. Cette plage de température est normalement pratique pour l'utilisation de la batterie. Cela permet à la batterie de déterminer les paramètres de la batterie rapidement et avec une grande précision. Un modèle mathématique avec le programme MATLAB est écrit et construit sous forme de diagramme en utilisant les équations de la batterie des paramètres. En exécutant le programme, les effets de divers paramètres sont étudiés. Les résultats ont montré que le temps de décharge de la batterie est plus long.

III.6.1. Effet de température dans charge de batterie

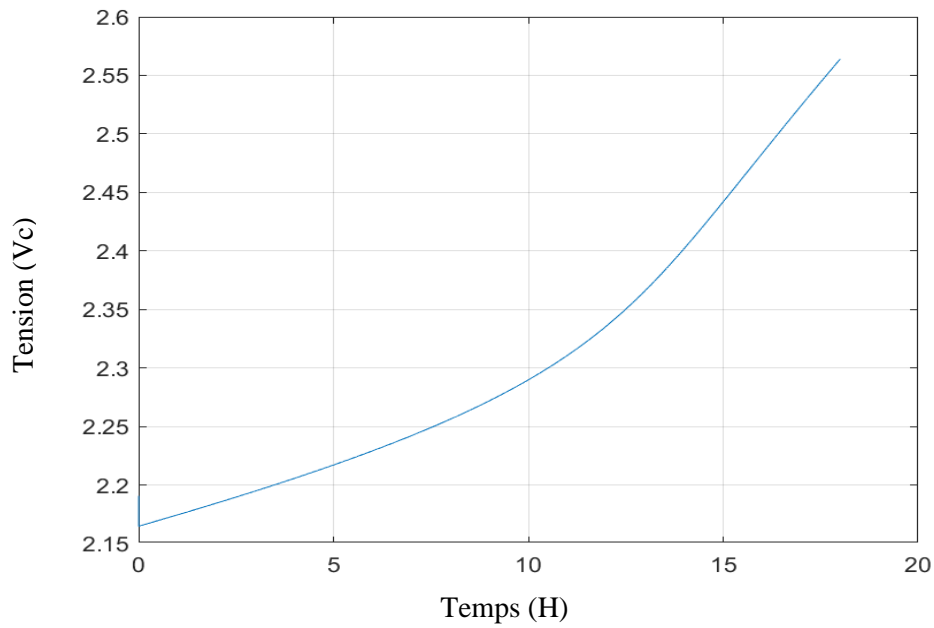


Figure (III.16). La courbe de la tension charge de batterie $V_c=f(t)$ avec $T=10^\circ$

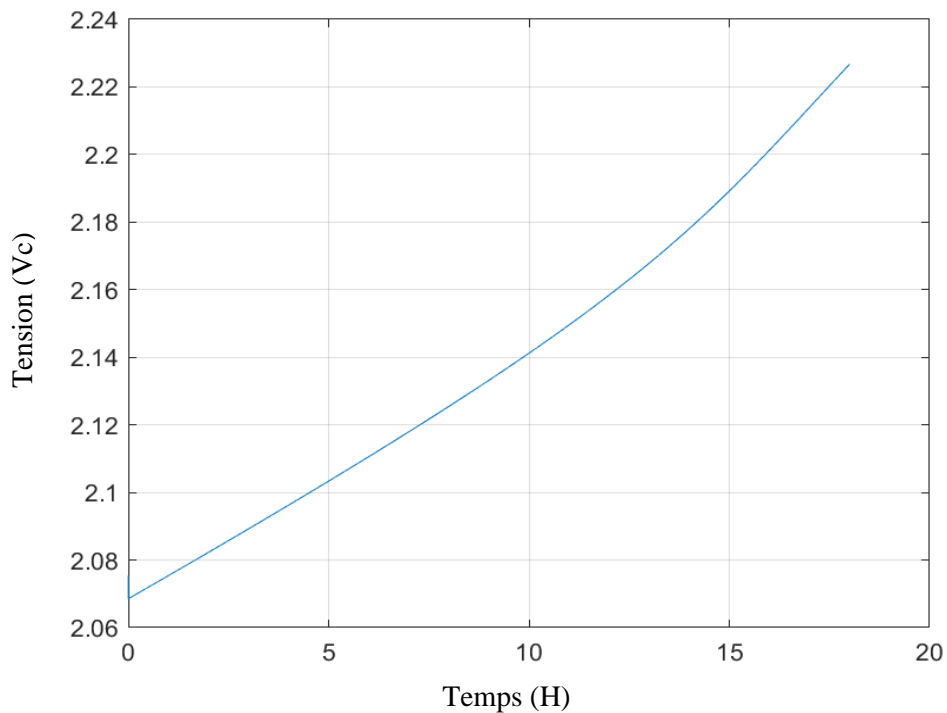


Figure (III.17). La courbe de la tension charge de batterie $V_c=f(t)$ avec $T=50^\circ$

- L'état de la tension pendant la charge est meilleur dans le cas $T=10^\circ$ par rapport à $T=50^\circ$

III.6.2. Effet de température dans décharge de batterie

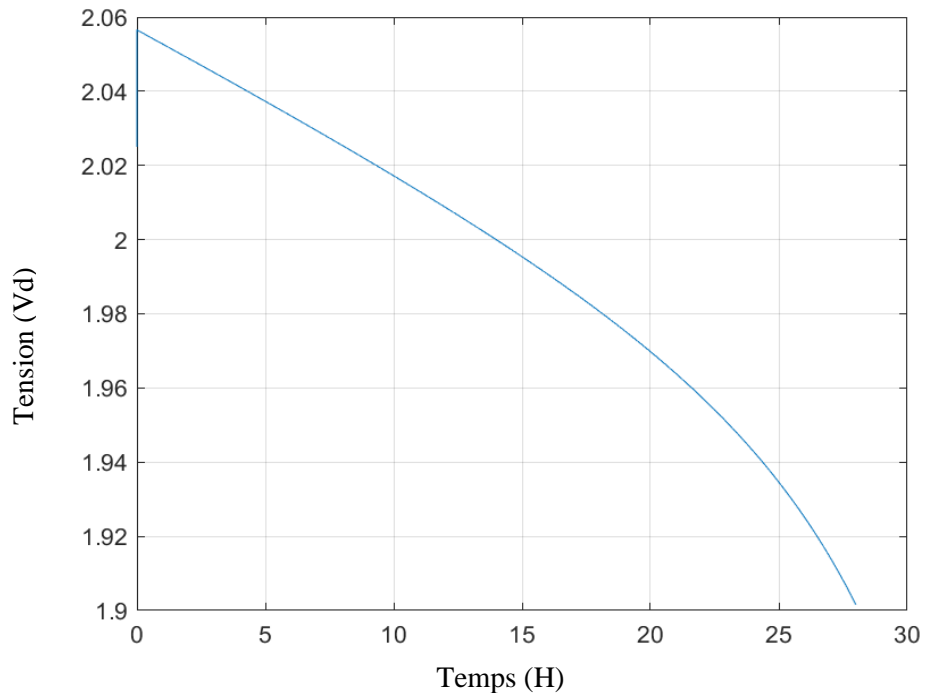


Figure (III.18). La courbe de la tension décharge de batterie $V_d=f(t)$ avec $T=10^\circ$

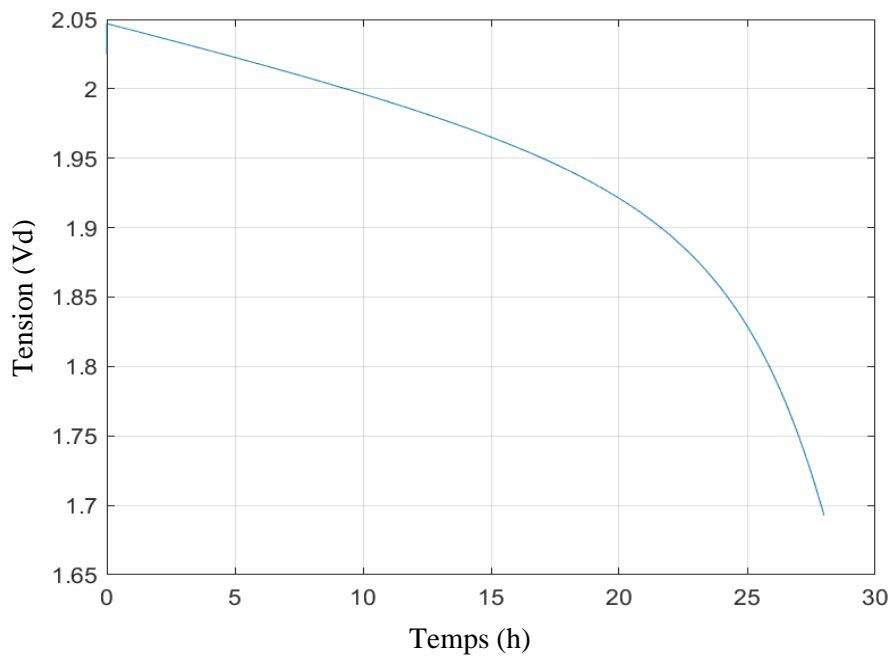


Figure (III.19). La courbe de la tension décharge de batterie $V_d=f(t)$ avec $T=50^\circ$

- Perte de décharge de la batterie dans le cas $T=50^\circ$ plus grande que celle à $T=10^\circ\text{C}$

Commentaire

Le changement croissant de la température interne de la batterie affecte la stabilité de la tension de la batterie, et à partir de là, il s'éloigne des valeurs réelles requises

Conclusion générale

Le présent travail du PFE nous a permis d'une part de faire un tour d'horizon théorique sur la chaîne de conversion photovoltaïque, ses différents composants et plus particulièrement le système de stockage électrochimique et d'autre part d'étudier par modélisation mathématique le comportement de la batterie d'accumulateurs pendant les processus de charge, surcharge et décharge.

Dans ce sens, nous avons exposé la précision et la qualité des différents modèles usuels, à l'image du modèle de Sheferd, modèle du Mangon,, modèle de Macomber et enfin le modèle le plus performant proposé par J. Copetti.

Il est à signaler que les différents modèles cités dans littérature se différencient principalement par le grand nombre de paramètres (ou coefficients) à identifier pour chaque type de batterie. Tandis que le modèle développé par J. Copetti intègre des paramètres rendant ainsi le modèle universel, i.e. il peut couvrir une grande variété d'accumulateurs au Pb-acide quelques soient leurs capacités.

Il est à mentionner également, que nous avons réalisé une étude de modélisation et simulation du modèle cité ci-avant moyennant le logiciel de simulation dynamique Matlab-Simulink. Les résultats des différents processus (charge, surcharge et décharge) ont été étudiés sous différents régimes ont été présentés.

Enfin, guidés par ces résultats, nous avons relevé le pont suivant : Le modèle proposé par J. Copetti est le plus performant, surtout d pur des batterie de faible et moyenne capacités. Et de ce travail, nous préconisons ce qui suit :

- L'étude d'autre type de technologie de batterie d'accumulateurs,
- L'étude du comportement d'une batterie intégrée dans système photovoltaïque.

Annexe

1-Fonction contrôle courant :

```
function [Ich,Idisch,Isurch] = fcn(i,soc)
if(i>=0)
    if(soc>=0.2)
        Ich=0;
        Idisch=i;
        Isurch=0;
    else
        Ich=0;
        Idisch=0;
        Isurch=0;
    end
end
else
    if(soc<=0.95)
        Ich=i;
        Idisch=0;
        Isurch=0;
    else
        Ich=0;
        Idisch=0;
        Isurch=i;
    end
end
end
end
```

2-fonction mise a jour soc :

```
function [socc,socd]=stateofcharge(socch,socdis,i,soc0)
if(i>0)
    socc=socdis;
    socd=soc0;
elseif(i<0)
    socd=socch;
    socc=soc0;
else
    socc=soc0/2;
    socd=soc0/2;
end
end
```

3-fonction affichage soc :

```
function soc = fcn(i,socc,socds)
if(i>=0)
    t=1;
    f=0;
else
    t=0;
    f=1;
end
soc=socc*t+socds*f;
end
```

4-fonction affichage courant :

```
function y = fcn(Vch,Vdisch,Vsurch,I,soc)
if(I>=0)
    y=Vdisch;
else
    if(soc<=0.95)
        y=Vch;
    else
        y=Vsurch;
    end
end
end
```

Annexe

end

Références

- [1] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ‘ Le pompage photovoltaïque’, université d'Ottawa, 1998.
- [2] S.ABADA ‘ Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic’, Mémoire Maître es Sciences, Université laval, 2011.
- [3] M. G. Villalva and J. R. Gazoli, and E. R. Filho ‘Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays’, *Jornal of power electronics*, May 2009.
- [4] A. labouret et M. villosz préface de jean louis bal ‘Energie solaire Photovoltaïque’, livrer 4 éditions, 2008.
- [5] B. Flèche - D. Delagnes ‘Energie solaire photovoltaïque.doc’, juin 2007, <http://www.scribd.com>.
- [6] M.belhad ‘Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome’, Mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [7] S. PETIBON ‘Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques’, université de Toulouse, 2009.
- [8] O.BENSEDDIK, F.DJALOUUD ‘étude et optimisation du fonctionnement d’un système photovoltaïque’, université de KASDI MERBAH- OUARGLA, 2012.
- [9] D.Thévenard, and M.Ross «validation and Verification of Component Models and System Models for the PV», CETC-internal report 2003-035, Canada, (2003)..
- [10] Julien Labbé, « hydrogène : L’électrolytique comme moyen de stockage D’électricité pour systèmes photovoltaïques isoles», thèse de doctorat à l’école des mines de paris (2006).
- [11] Bendjamâa Ibrahim., «Modélisation et commande d’un système de stockage Photovoltaïque» / Magister Université Abou-Bakr Belkaid–Tlemcen.
- [12] W. Merrouche, H. Tebibel et A. Malek, «Développement sous Proteus® d’un

Références

régulateur basé sur un algorithme de charge efficace et sécurisée pour batteries au plomb dans un système photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa (2012) 175–186.

[13] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyoucef «Optimisation du rendement d'une cellule Solaire NP au silicium monocristallin» Rev .Energ. Ren: physique Energétique (1998pp.95-100).

[14] Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, (2004).

[15] C.M. Shepherd, J. Electrochem. Soc. 112 (1965) 657–664.

[16] H.L. Manegon. Engineering design handbook for stand-alone PV systems, 1981 Report no. M108, Manegon Ltd., Gaithersburg, MD pp. 28–39.

[17] J.B Coppetti, A general battery model for PV system simulation, progress in photovoltaic: research and Applications. 1993, Vol I, 283-292.

[18] J.B Coppetti, Lead/acid batteries for photovoltaic applications. Test results and modelling, Journal of Power Sources (47), 1994, 109-118.

[19] J.B Coppetti, A general battery model for PV system simulation, progress in photovoltaic: research and Applications. 1993, Vol I, 283-292.