RÉPUBLIQUE ALGÉRIÈNNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° : . . . . . .

DOMAINE : Science et technologie

FILIERE : Electronique

OPTION : Micro-Electronique

Mémoire présenté en vue de l'obtention

du diplôme de Master Académique

Présenté par :

SEGHIRI Mohamed Nazim

GUELMINE Abdelbari

Intitulé

Modélisation et implémentation en simulateurs orientés-circuits d'une batterie de stockage solaire

Soutenu devant le jury composé de :

BOUCHELAGHEM Ahmed	Université de M'Sila	Président
DRIF Mahmoud	Université de M'Sila	Rapporteur
BENHAMADOUCHE Abdelouahab	Université de M'Sila	Examinateur

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2022 / 2021

Dédicaces

Je dédie mon travail

À mes chers parents, mon adorable petit frère et ma sœur, ainsi que mes amis et mon binôme Abdel Bari

…

…

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, Maitre de conférences à 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. Drif 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.

Résumé

L’énergie solaire est l'une des formes les plus prometteuses d'énergie renouvelable mais elle a ses défis notamment le problème de l'inadéquation de la source de lumière comme le manque de lumière la nuit ou pendant une journée nuageuse parmi d'autres conditions météorologiques pour cela le stockage de l'électricité des cellules dans des batterie pour se préparer à tout problème ou manque de production d'énergie est très important.

Dans cette mémoire, nous découvrirons leurs types et leurs utilisations en fonction de la demande et du coût Nous aborderons également la recherche appliquée et la simulation de type (plomb acide), tandis que remarquer son comportement en utilisant une simulateur circuit orienté.

Mots clés : Batterie, SOC, Charge, Décharge.

GLOSSAIRE **7**

ABREVIATIONS **8**

LISTE DES FIGURES **8**

LISTE DES TABLEAUX **10**

INTRODUCTION GENERALE **12**

CHAPITRE I: SYSTEME PHOTOVOTAIQUE ET STOCKAGE D'ENERGIE ELECTRIQUE **14**

I.1 Introduction **15**

I.2 Energie solaire **15**

I.2.1 Utilités 15

I.2.2 Répartition spectrale du rayonnement solaire 16

I.2.3 Effet photovoltaïque 17

I.2.4 Historique de l'énergie photovoltaïque 17

I.3 Constitution d'un système photovoltaïque **18**

I.3.1 Cellules photovoltaïques 19

I.3.1.1 Principe de fonctionnement 19

I.3.1.2 Différentes types de Cellules photovoltaïques 21

I.3.1.2.1 Le silicium amorphe 21

I.3.1.2.2 Le silicium monocristallin 22

I.3.1.2.3 Le silicium polycristallin 22

I.3.1.3 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque 23

I.3.1.4 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque 24

I.3.1.4.1 Association en série 25

I.3.1.4.2 Association en parallèle 26

I.3.1.4.3 Puissance crêt 26

I.3.1.5 Les avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques 27

I.3.1.5.1 Avantages des panneaux photovoltaïque [005] 27

I.3.1.5.2 Inconvenients des panneaux photovoltaïque [005] 27
I.3.2 Convertisseurs DC-DC 28
I.3.2.1 Hacheurs 28

I.4 Batterie 29
I.4.1.1 Les types de batteries 29
I.4.1.1.1 Batteries plomb (pb / sla) 30
a) Batterie de type à cellule inondée 30
b) Batterie scellée / de type gel 31
c) Batteries gélifiées 31
d) Batteries AGM (Absorbed GAS MAT) 31
I.4.1.1.2 Batteries nickel-cadmium (ni-cd) 33
I.4.1.1.3 Batteries nickel-metal hydrure (ni-mh) 34
I.4.1.1.4 Batteries lithium-ion 35
I.4.1.2 Paramètre de batterie 36
I.4.1.2.1 Capacité de la batterie 36
I.4.1.2.2 Tension de la batterie 37
I.4.1.2.3 Profondeur de décharge (DOD) 37
I.4.1.2.4 L'état de charge (SoC) 37
I.4.1.2.5 Cycle de vie d'une batterie 38
I.4.1.2.6 Taux de décharge/charge ou taux C 39
I.4.1.3 Autodécharge 39
I.4.1.4 Les trois étapes de charge de la batterie 39

I.5 Conclusion 40

CHAPITRE II: MODELISATION DES SYSTEMES STOCKAGE PHOTOVOLTAÏQUE 41

II.1 Introduction 42

II.2 Modélisation de batterie 42
II.2.1 Les modèles de batterie 43
II.2.1.1 Modèle de Shepherd 43
II.2.1.2 Mode Décharge 44
II.2.1.3 Mode charge 44
II.2.2 Modèle de Manegon 44
II.2.2.1 Mode décharge 44

II.2.2.2 Mode de charge 45
II.2.2.3 Modèle de Coppetti 46
II.2.3 Paramètre identification 46
II.2.3.1 Modèle choisi 46
II.2.4 Modélisation mathématique modèle de Coppetti 47
II.2.4.1 Mode de décharge 47
II.2.4.2 Mode de charge 48
II.2.4.3 Mode de surcharge 48

II.3 Conclusion 50

CHAPITRE III: LA SIMULATION D'UNE BATTERIE DE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE EN SIMULATEUR PSPICE 51

III.1 Introduction 52

III.2 À propos du programme Pspice 52

III.3 À Propos de ABM 53
III.3.1 Exemple d'application numérique ABM sur pspice 53

III.4 Simulation de systeme modèle Coppetti 54

III.5 Mode de charge 56
III.5.1 Variation courant de charge 57
III.5.2 Variation de température 60

III.6 Mode de décharge 62
III.6.1 Variation courant de décharge : 63
III.6.2 Variation de température 65

III.7 Conclusion 69

CONCLUSION GENERALE 70

REFERENCES 71

Glossaire

P	Puissance
Icc	Courant de court-circuit
Vco	Tension en circuit ouvert
Rs	Résistance série
Em	D'électricité emmagasinée kWh
Ah	Capacité en Ampères heures
Iph	Courant de la cellule PV (Photo-Courant).
I0	Le courant de saturation inverse de la diode
RP	Résistance shunt de la cellule PV
RS	Résistance série de la cellule PV
Tn	Température de référence des cellules PV [°K]. B ou A :
Eg	Énergie de Gap du matériel de la cellule PV en [ev
Id	Le courant circulant dans la diode
Vpv	La tension de sortie d'un panneau photovoltaïque
I	Le courant circulant dans la résistance RP
T	Température de la jonction des cellules PV [°K].
Ipv	Courant généré par la cellule photovoltaïque
E	L'éclairement absorbé par la cellule
ISC	Courant de court circuit
N	Le facteur d'idéalité de la photopile

Abréviations

MPPT	Maximum Power Point Tracker
PV	Photovoltaïque
SMS	Système multi-sources
RES	Sources d'Energie Renouvelables

Liste de figures

FIGURE I.1 EXPLOITATION DE L'ENERGIE SOLAIRE[1] 16
FIGURE I.2 SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE PAR ET HORS ATMOSPHERE [001/10] 17
FIGURE I.3 STRUCTURE PN SOUS ECLAIREMENT 20
FIGURE I.4 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE[27/001] 24
FIGURE I.5 CHARACTERISTIQUE DE I F(V) 25
FIGURE I.6 CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE PAR ASSOCIATION EN SERIE [001] 25
FIGURE I.7 CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE PAR ASSOCIATION EN PARALLELE [001] 26
FIGURE I.8 CONVERTISSEURS DC-DC 28
FIGURE I.9 BATTERIES PLOMB (PB / SLA) 30
FIGURE I.10 BATTERIES AGM 33
FIGURE I.11 EFFET MEMOIRE DE LA BATTERIE NI-CD 34
FIGURE I.12 BATTERIES NICKEL-METAL HYDRURE 35
FIGURE I.13 BATTERIES LITHIUM-ION 36
FIGURE III.1 TENSION DE BATTRIE EN CONDITION STANDARD MODE CHARGE-SURCHARGE 55
FIGURE III.2 TENSION DE BATTRIE EN CONDITION STANDARD MODE DECHARGE 55
FIGURE III.3 SCHEMA DE SYSTEM CIRCUIT A MODE DE CHARGE-SURCHARGE SUR PSPICE 56
FIGURE III.4 LA COURBE DE LA TENSION CHARGE DE BATTERIE T=25° AVEC I=5 57

FIGURE III.5 LA COURBE DE LA TENSION CHARGE DE BATTERIE T=25 AVEC I=15..... 58
FIGURE III.6 LA COURBE DE LA TENSION CHARGE DE BATTERIE T=25° AVEC I=20..... 59
FIGURE III.7 LA COURBE DE LA TENSION CHARGE DE BATTERIE I=10 AVEC T=10°..... 60
FIGURE III.8 LA COURBE DE LA TENSION CHARGE DE BATTERIE I=10 AVEC T=15°..... 61
FIGURE III.9 LA COURBE DE LA TENSION CHARGE DE BATTERIE I=10 AVEC T=50°..... 61
FIGURE III.10 SCHEMA DE SYSTEM CIRCUIT A MODE DE DECHARGE 62
FIGURE III.11 LA COURBE DE LA TENSION DECHARGE DE BATTERIE I=5 AVEC T=25°..... 63
FIGURE III.12 LA COURBE DE LA TENSION DECHARGE DE BATTERIE I=10 AVEC T=25°..... 64
FIGURE III.13 LA COURBE DE LA TENSION DECHARGE DE BATTERIE I=20 AVEC T=25°..... 65
FIGURE III.14 LA COURBE DE LA TENSION DECHARGE DE BATTERIE I=10 AVEC T=10°..... 66
FIGURE III.15 LA COURBE DE LA TENSION DECHARGE DE BATTERIE I=10 AVEC T=15°..... 67
FIGURE III.16 LA COURBE DE LA TENSION DECHARGE DE BATTERIE I=10 AVEC T=50°..... 68

Liste des tableaux

TABLE II-1 LES COEFFICIENTS ORIGINAUX DU MODELE DE SHEPHERD [12/15] **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

TABLE II-2 LES COEFFICIENTS ORIGINAUX DU MODELE DE MANEGON [12/16].**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

TABLE II-3 LES COEFFICIENTS ORIGINAUX DU MODELE DE COPPETTI [12/17]..**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

TABLE II-4 RESULTATS COMPARATIFS DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE DONNEES PAR RAPPORT A L'ERREUR RELATIVE PENDANT LA PHASE BOOST..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

TABLE II-5 RESULTATS COMPARATIFS DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE DONNEES PAR RAPPORT A L'ERREUR RELATIVE PENDANT LA PHASE FLOATING. . **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

TABLE II-6 RESULTATS COMPARATIFS DE LA DISTRIBUTION DU NOMBRE DE DONNEES PAR RAPPORT A L'ERREUR RELATIVE PENDANT LA ZONE DE DECHARGE. .....**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

LE TABLE II-7 INDIQUE CLAIREMENT QUE LE MODELE ETABLI PAR COPPETTI S'AVERE LE PLUS EFFICACE AVEC MBE ET RMSE 0,01 EN PHASE DE RENFORCEMENT, ET 0,017 DE MBE ET 0,033 DE RMSE OBSERVES AU NIVEAU DE LA PHASE D'ABSORPTION ET DE MAINTIEN. EN PHASE DE DECHARGEMENT, LE MODELE AFFICHE UNE ERREUR MOYENNE DE MBE 0,002 ET UN RMSE TRES FAIBLE DE L'ORDRE DE 0,05. .....**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

Introduction Générale

Compte tenu des prix élevés du pétrole et du charbon et des risques que ces sources d'énergie font peser sur l'environnement, il est devenu nécessaire de rechercher une source d'énergie alternative afin de soutenir les besoins croissants de la production industrielle mondiale.

Afin de trouver l'énergie verte comme alternative aux sources d'énergie traditionnelles, certains se sont tournés vers l'énergie nucléaire qui est très populaire, surtout en période de prix élevés du pétrole, en raison de ses avantages tels que le faible coût, le rendement élevé et l'absence d'énergie nucléaire. . De tout gaz qui pollue l'environnement, notre cheval peut être considéré comme le plus gros consommateur d'énergie nucléaire car plus de 90% de ses besoins énergétiques proviennent de l'énergie nucléaire, mais l'accident de Fukushima en 2012 au Japon a rappelé au monde le grand terrorisme nucléaire. Aléas Bien que la probabilité qu'une erreur se produise soit faible, les conséquences d'un seul événement sont catastrophiques et peuvent conduire à une crise mondiale.

À l'exception de l'énergie nucléaire, il est courant de trouver une alternative aux sources d'énergie conventionnelles et parmi les alternatives potentielles figurent l'énergie solaire et électrique.

L'énergie solaire est une source inépuisable d'énergie renouvelable car elle ne disparaît pas tant que les rayons du soleil sont présents.

L'exploitation de l'énergie solaire nécessite de grandes surfaces de panneaux solaires, car la capacité de production d'électricité ne peut pas être complètement contrôlée car la capacité de production d'énergie solaire dépend principalement du soleil, ce qui entraîne des fluctuations de la capacité de production et cela est dû aux fluctuations incontrôlables du temps comme les nuages La pluie, les ouragans et le brouillard, tous ces facteurs affaiblissent les rayons du soleil, ce qui entraîne une baisse de la capacité à produire de l'électricité, tandis que les centrales

solaires sont complètement fermées la nuit en raison de la disparition complète de la lumière du soleil.

Tous ces facteurs naturels échappant au contrôle humain conduisent à la fluctuation et à la stabilité de la capacité de production des centrales solaires, et pour cette raison, le désert est considéré comme le meilleur endroit pour construire des centrales solaires, en raison de l'absence de fluctuations météorologiques et de la clarté de Le ciel. . De l'air la plupart du temps et du soleil radieux la plupart du temps, mais un autre problème se pose qui est le problème du vent recouvrant les panneaux solaires. Avec la poussière, le problème de fluctuation des capacités de production ne disparaît pas.

Pour résoudre ce problème, des centres doivent être disponibles pour stocker l'énergie excédentaire aux heures de pointe ou de faible consommation électrique afin de l'exploiter pour maintenir un flux électrique constant pendant la nuit ou lors des fluctuations naturelles de la météo.

Dans ce point , dans le premier chapitre, nous allons introduire les éléments de base d'un système d'énergie photovoltaïque avec une mention des différents types d'éléments et la différence entre eux

Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser le système énergétique photovoltaïque, en nous concentrant sur trois modèles de base de batterie, et les comparer pour choisir le meilleur modèle qui fournit les résultats les plus proches de la réalité afin d'étudier le système énergétique photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, nous utiliserons le logiciel PSpice pour simuler l'application d'un système d'alimentation photovoltaïque et comparer les différents résultats entre les modes de charge et de décharge.

CHAPITRE I : Système photovoltaïque et stockage d'énergie électrique

I.1 Introduction

Compte tenu de la diminution des réserves mondiales de combustibles fossiles et du menace du réchauffement climatique et de la pollution de l'environnement, il est nécessaire de rechercher une source d'énergie propre qui remplace les sources traditionnelles et elle répond en même temps à la demande croissante d'énergie.

L'énergie solaire est la ressource d'énergie renouvelable naturelle la plus abondante sur Terre, et son exploitation est facile vu aux vastes étendues du désert en Algérie, qui peuvent supporter la consommation d'énergie locale et plus déplacée. Un système efficace de stockage de l'énergie électrique comme source d'énergie alternative pendant les périodes de disparition du soleil

I.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et se manifeste sous forme d'énergie thermique ou de photons. L'énergie solaire peut être utilisée pour produire de l'électricité directement ou indirectement.

I.2.1 Utilités

Il existe trois grands domaines d'exploitation de l'énergie solaire :

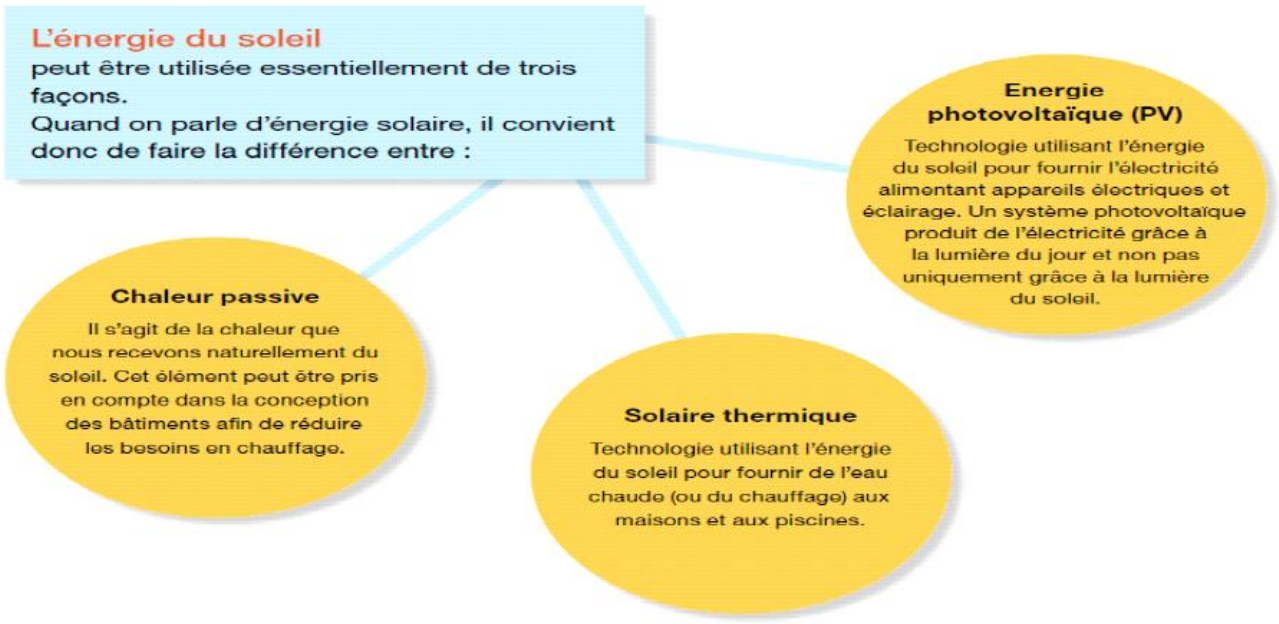


Figure 0.1 Exploitation de l'énergie solaire[1]

I.2.2 Répartition spectrale du rayonnement solaire

Les rayons solaires arrivent en permanence sur Terre et chauffent la surface de notre planète, sans cet apport d'énergie, la terre serait glaciale.

Le soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s [9].

Le rayonnement solaire est composé de plusieurs types de rayons, certains sont filtrés ou arrêtés par l'atmosphère et les nuages, alors que d'autres ne le soient pas. Les rayons solaires sont aussi appelés les radiations [001/10]

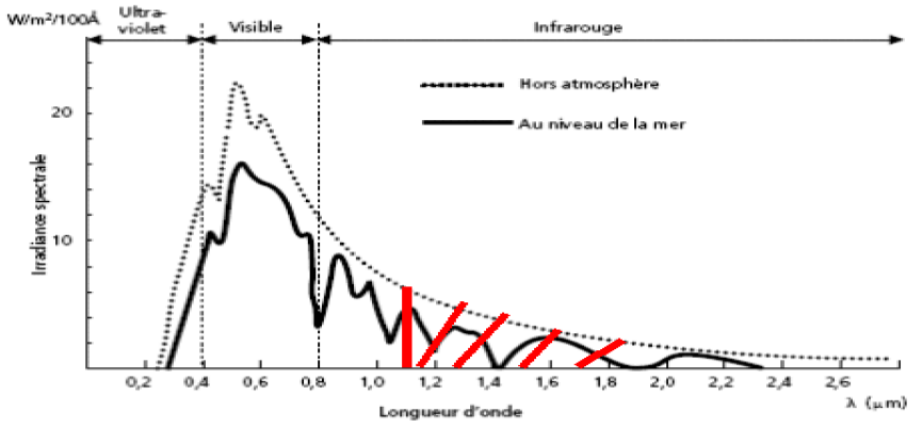


Figure 0.2 Spectre électromagnétique par et hors atmosphère [001/10]

I.2.3 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux semi-conducteurs" qui, exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans la fabrication des panneaux solaires [003]

I.2.4 Historique de l'énergie photovoltaïque

1839: Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1905 : Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

1912 : Albert Einstein sera le premier à expliquer le phénomène d'effet photovoltaïque, et reçoit le prix Nobel de physique en 1921 pour cette explication.

1954: Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

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

1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1995: Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

Actuellement la production mondiale de l'électricité à base d'énergie solaire est d'environ : 185.9 TWh

I.3 Constitution d'un système photovoltaïque

Le système photovoltaïque se compose de trois composants de base, les panneaux photovoltaïques, l'onduleur CC et l'unité de stockage représentée par la batterie.

I.3.1 Cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est l'élément de base qui permet la conversion directe de l'énergie solaire (rayon lumineux), à une énergie électrique. Ce mode de conversion repose sur un principe très connu qui est l'effet photovoltaïque. Et pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux semi-conducteurs qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe, soit l'absorption de la lumière incidente et la collection des électrons en surface.

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin, un semi-conducteur. Une des faces de la cellule est dopée n (par exemple du phosphore). L'autre est dopée p (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique. La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion, et d'autre couche en verre pour l'étanchéité et la protection de la cellule. En fin les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons. [001]

I.3.1.1 Principe de fonctionnement

Une cellule solaire est un appareil qui convertit l'énergie solaire en énergie. Électricité. Cette transformation repose sur trois mécanismes :

Absorption des photons (énergie supérieure à l'intervalle) Le matériau à partir duquel l'appareil est fabriqué.

Convertir l'énergie des photons en énergie électrique Génération de paires électron-trou dans les matériaux semi-conducteurs.

Collecte des particules générées par l'appareil. Par conséquent, les matériaux qui composent la cellule photovoltaïque doivent avoir deux niveaux d'énergie. Ils sont suffisamment conducteurs pour transporter le courant, ce qui augmente l'intérêt pour les semi-conducteurs dans l'industrie solaire. Pour collecter les champs de particules générés L'électricité est nécessaire pour séparer les paires électron/trou générées. Pour cela nous Les jonctions PN d'autres structures, telles que les hétérojonctions, sont le plus souvent utilisées structures Schottky sont également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïque, est illustré sur la Figure (I.3)

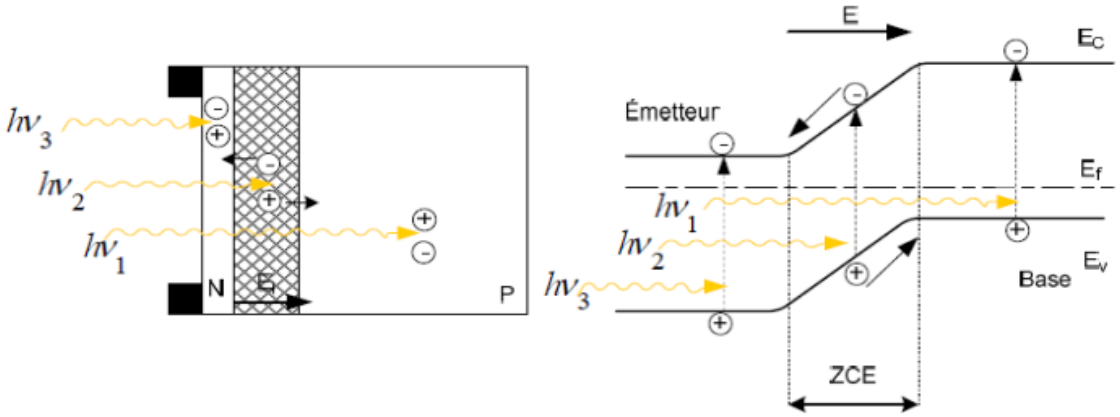


Figure 0.3 Structure PN sous éclairement

a) Si la paire (e-, t) est créée dans la région P, les électrons qui y sont des porteurs minoritaires traversant la jonction et vont du coté N.

b) Si la paire (e-, t) est créée dans la région N, les trous qui y sont minoritaires traversent la jonction et vont du coté P.

c) Si la paire (e-, t) 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.3.1.2 Différentes types de Cellules photovoltaïques

Il existe de nombreuses technologies utilisées dans les panneaux photovoltaïques, dont les plus importantes sont[004] [003] :

I.3.1.2.1 Le silicium amorphe

Le silicium amorphe est obtenu à partir de gaz de silicium. Ce gaz est vaporisé sur un support, en verre, en plastique souple ou en métal, grâce à un procédé de projection sous vide. Ces cellules photovoltaïques sont gris foncé.

- Rendement faible : 5 à 9%.

- Durée de vie : assez importante (20 ans)

- Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies

- Puissance : 50 Wh/m2. 16 m-/kWh.

- Fonctionnement correct avec un éclairement faible.

- Peu sensible aux températures élevées.

- Utilisables en panneaux souples.

- Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.

- Rendement faible en plein sol

- Performances diminuant avec le temps.

- Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide

I.3.1.2.2 Le silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est le résultat du refroidissement du silicium fondu. Une fois solidifié, il se transforme en un cristal uniforme qui est découpé en tranches fines afin de former la cellule photovoltaïque. La couleur de ce matériau est bleue, sans trace de cristaux ou autres.

-Très bon rendement : 14 à 20%

-Durée de vie : Importante (30 ans)

-Coût de fabrication :

Élevé.

-Puissance : 100 à 150 Wh/m27 m2/kWh.

-Rendement faible Sous un faible éclairement

Perte de rendement avec l'élévation de la température.

-Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal

-Couleur bleue uniforme.

I.3.1.2.3 Le silicium polycristallin

Pour obtenir du silicium polycristallin, on fait fondre le silicium dans un moule métallique carré et allongé, appelé lingotière. Le coloris de ce type de cellule est bleu et parsemé de motifs laissés par les cristaux. Cette particularité nous permet de reconnaître facilement cette cellule photovoltaïque.

-Bon rendement : 11 à 15 %.

-Durée de vie :

Importante (30 ans)

-Coût de fabrication meilleur marché que les panneaux monocristallins

-Puissance : 100 Wh/m2. 8 m-/kWh.

Rendement faible sous un faible éclairement.

Perte de rendement avec l'élévation de la température.

-Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.

-Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés car les différents cristaux.

I.3.1.3 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (Figure 1.9) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [101] :

Sa tension à vide : **Vco** : cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant de court-circuit : **Icc** : cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal :**MPP** (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : Vopt, Iopt (parfois appelés aussi Vmpp, Impp).Voltage at maximum power (Vmp) Current at maximum power (Imp)

Module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthyléne- vynil- acétate) (voir figure 1.10) et protégées sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique et sur la surface arrière de polyéthylène [27/001]

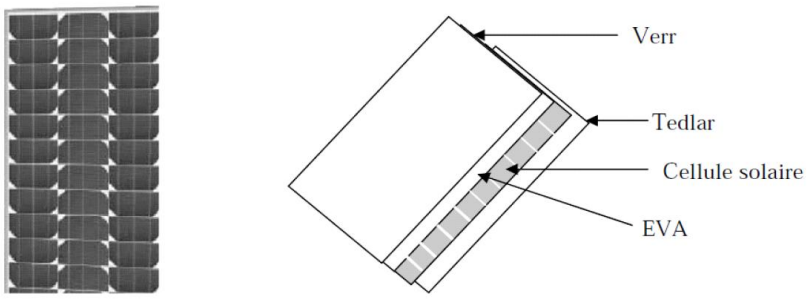


Figure 0.4Module photovoltaïque[27/001]

I.3.1.4 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour les applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés [28/001].

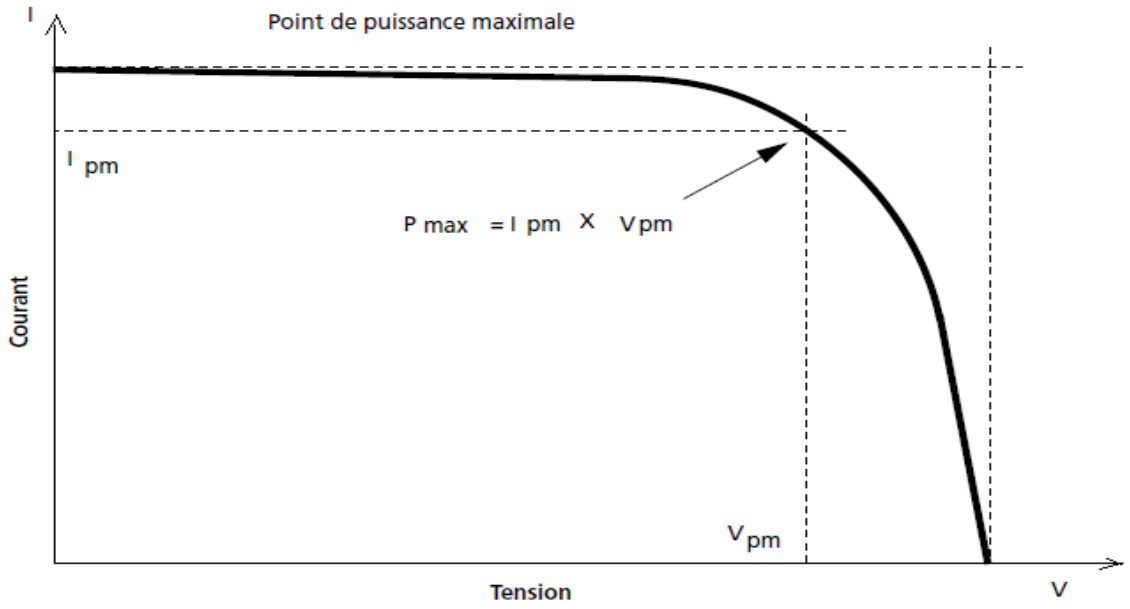


Figure 0.5 characteristique de I f(V)

I.3.1.4.1 Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

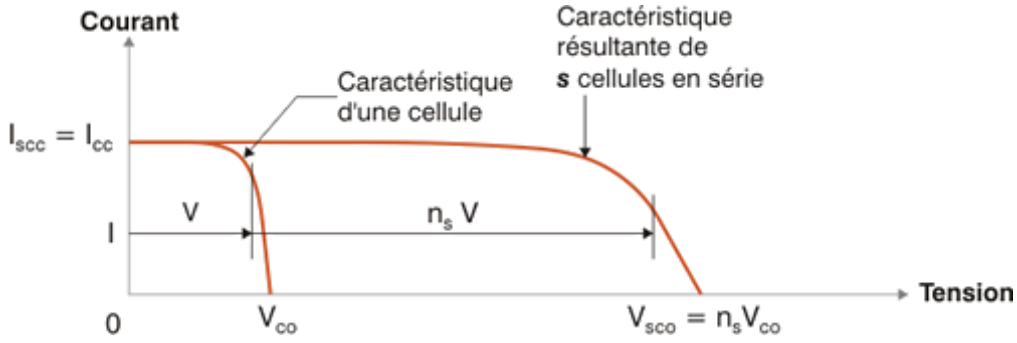


Figure 0.6 Caractéristique électrique par association en série [001]

I.3.1.4.2 Association en parallèle

Lors de la connexion de cellules en parallèle, toutes les cellules sont soumises à la même tension tandis que le courant résultant est la somme des courants qui traversent chaque cellule.

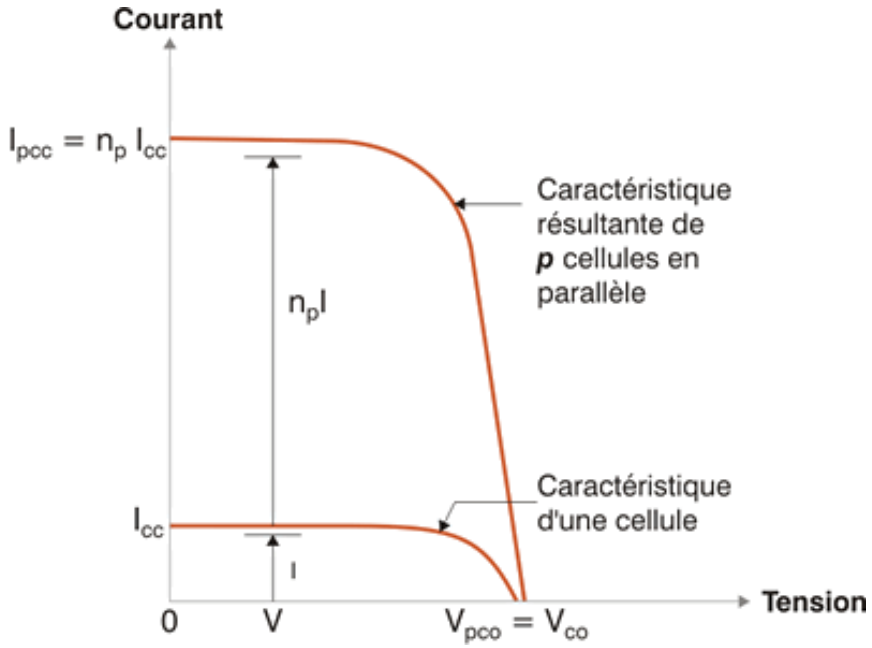


Figure 0.7 Caractéristique électrique par association en parallèle [001]

I.3.1.4.3 Puissance crêt

Les constructeurs spécifient toujours la puissance crête d'un panneau photovoltaïque. Elle représente la puissance maximum fournie par le panneau lorsque l'éclairement est 1 000 W/m², la température est 25 °C et le spectre solaire Air Mass (AM) 1,5.

Cependant, cette puissance est rarement atteinte car l'éclairement est souvent inférieur à 1000 W/m² et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les 25 °C [30/101].

I.3.1.5 Les avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques

I.3.1.5.1 Avantages des panneaux photovoltaïque [005]

- Les panneaux photovoltaïques vous permettent d'avoir une consommation d'électricité écoresponsable qui provient d'énergies 100 % renouvelables. Ils vous permettent aussi de réduire considérablement votre empreinte carbone car 95 % des composants des panneaux photovoltaïques sont recyclables ou réutilisables.
- Que vous soyez un particulier, un exploitant agricole, une collectivité, une entreprise industrielle, l'installation des panneaux photovoltaïques chez vous vous apportera une grande autonomie face aux fournisseurs d'électricité et l'augmentation annuelle des tarifs de l'électricité.
- L'avantage majeur de cette solution est le choix que vous aurez de disposer de votre électricité comme bon vous semble selon vos besoins. Les panneaux photovoltaïques captent de l'électricité qui aura pour but d'être autoconsommée ou vendue. En autoconsommation d'électricité photovoltaïque, vous pourrez alors réaliser des économies considérables sur votre facture d'électricité et réduire votre budget global. Vous pouvez également revendre la totalité ou le surplus d'électricité produite par vos panneaux photovoltaïques, ce qui vous apportera un revenu complémentaire.

I.3.1.5.2 Inconvénients des panneaux photovoltaïque [005]

Comme pour toutes les solutions énergétiques, il existe quelques inconvénients. Le principal inconvénient étant que la production d'énergie photovoltaïque peut être périodiquement insuffisant pour alimenter un foyer en totalité :

- Votre taux d'autoconsommation et votre taux de production étant rarement exactement les mêmes vous avez besoin de vous approvisionner en électricité pour combler vos besoins.

- Par mauvais temps ou en hiver, vos panneaux photovoltaïques produisent moins d'électricité. Avoir une autre source d'électricité est donc indispensable pour continuer à alimenter votre foyer.

Pour que cet inconvénient ne vienne pas desservir votre démarche écoresponsable, vous pouvez opter pour une installation multi-énergies combinant plusieurs énergies renouvelables afin d'alimenter votre foyer en électricité verte en continue : photovoltaïque, éolien, géothermie. Vous pouvez aussi souscrire un contrat d'électricité verte auprès de votre fournisseur d'électricité.

I.3.2 Convertisseurs DC-DC

Un convertisseur DC/DC a pour vocation d'assurer la fluence d'énergie entre une

Source de tension continue et une source de courant continu (PV) Pour que nous puissions le stocker

I.3.2.1 Hacheurs

Les UN hacheur permettent de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il est utilisé dans les alimentations et pour le pilotage des moteurs. [006]

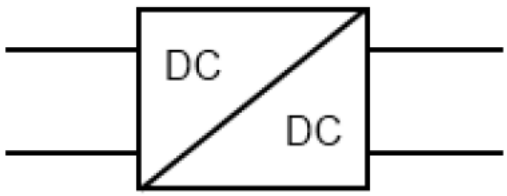


Figure 0.8 Convertisseurs DC-DC

Type des hacheurs

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [006] :

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck),
- hacheur élévateur (ou boost),
- hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

I.4 Batterie

Une batterie est un faisceau d'énergie chimique qui peut produire une quantité limitée d'énergie électrique lorsque vous en avez besoin, contrairement à l'électricité ordinaire qui traverse votre maison via les fils des centrales électriques. La batterie convertit les produits chimiques qu'elle contient en énergie électrique et est utilisée pendant des jours, des semaines, des mois ou même des années, selon le type, la taille et les utilisations de la batterie.

I.4.1.1 Les types de batteries

Il y a plusieurs types de batterie solaire Chacune de ces technologies d'alimentation de secours par batterie possède son propre ensemble de caractéristiques uniques. Examinons de plus près ce que chaque type de batterie solaire a à offrir notamment:

I.4.1.1.1 Batteries plomb (pb / sla)

Les batteries au plomb sont les dispositifs de stockage d'énergie les plus courants pour les systèmes PV. Les batteries plomb-acide peuvent être de type 6V ou 12V dans un conteneur en plastique résistant. Les batteries peuvent être du type à cellules noyées ou du type scellé/gel. [007]

Figure 0.9 Batteries plomb (pb / sla)

a) Batterie de type à cellule inondée

C'est le type de batterie le plus couramment utilisé aujourd'hui pour les systèmes d'énergie renouvelable. Le type plat et le type à plaques tubulaires sont les versions des batteries inondées. Dans les batteries inondées, les électrodes sont complètement immergées dans l'électrolyte. Pendant la charge des batteries inondées jusqu'au niveau de charge maximal, les gaz d'hydrogène et d'oxygène produits à partir de l'eau par la réaction chimique au niveau des plaques négatives et positives s'échappent par les évents de la batterie. Il est donc nécessaire d'ajouter périodiquement de l'eau à la batterie. [007]

b) Batterie scellée / de type gel

Ces batteries ont une forme immobilisée d'électrolyte. Les batteries plomb-acide scellées sans entretien sont également appelées batteries plomb-acide à régulation par soupape (VRLA) ou batteries plomb-acide à électrolyte captif. Les batteries scellées sont de deux types, à savoir le type à électrolyte gélifié et le type à mat de verre absorbé. Les batteries à électrolyte immobilisé auront moins de problèmes de libération de l'électrolyte que les batteries à électrolyte noyé. Pendant le processus de charge, des gaz d'hydrogène et d'oxygène sont produits à partir de l'eau en raison de réactions chimiques au niveau des plaques négative et positive. Ces gaz se recombinent pour former de l'eau, ce qui élimine la nécessité d'ajouter de l'eau. Ce type de batteries au plomb est adapté aux applications photovoltaïques pour les raisons suivantes : 1. Transport facile. 2. Convient aux applications éloignées car elles nécessitent moins d'entretien. 3. 3. Pas besoin d'ajouter de l'eau. [007]

c) Batteries gélifiées

L'ajout de dioxyde de silicium à l'électrolyte forme un liquide chaud qui est ajouté à la batterie et devient un gel après refroidissement. L'hydrogène et l'oxygène produits pendant le processus de charge sont transportés entre les plaques positives et négatives à travers les fissures et les vides de l'électrolyte gélifié pendant le processus de charge et de décharge[007]

d) Batteries AGM (Absorbed GAS MAT)

Dans les batteries AGM, les tapis de verre sont pris en sandwich entre les plaques. Ces plaques de verre absorbent l'électrolyte. Les molécules d'oxygène de la plaque positive se déplacent à travers l'électrolyte dans les mats de verre et recombinent l'hydrogène sur la plaque négative pour former de l'eau. Les batteries gel et AGM nécessitent une charge contrôlée. Dans ces batteries, on utilise généralement des électrodes en plomb-calcium pour minimiser le dégagement gazeux et la perte d'eau. La tension et le courant doivent être contrôlés en dessous du

taux de C/20. Caractéristiques des batteries plomb-acide : Énergie spécifique : 25 - 35Wh/kg Durée de vie : 250 -750 cycles Avantages : faible coût, haute efficacité, fonctionnement simple Inconvénients : durée de vie relativement faible 6.2 Batteries au nickel-cadmium (Ni - Cd) Dans les batteries au nickel-cadmium, l'électrode positive est constituée de cadmium et l'électrode négative d'hydroxyde de nickel, séparées par des séparateurs en nylon immergés dans un électrolyte d'hydroxyde de potassium placé dans un boîtier en acier inoxydable. Elle a une durée de vie plus longue

plus longue et tolère mieux les températures que les batteries au plomb. Le cadmium est remplacé par des hydrures métalliques en raison des règles de réglementation environnementale. L'effet mémoire dégrade la capacité de la batterie lorsque celle-ci est inutilisée pendant une longue période. L'effet mémoire est le processus qui consiste à se souvenir de la profondeur de la décharge dans le passé. Si la batterie est déchargée à 25 % de façon répétée, elle s'en souviendra, et si la décharge est supérieure à 25 %, la tension de la cellule chutera comme le montre la figure 4. Pour retrouver la pleine capacité de la batterie, il faut la reconditionner en la déchargeant complètement puis en la chargeant complètement tous les quelques mois. Figure 4. Effet mémoire de la batterie Ni-Cd 6.3 Batteries Nickel - Métal hydride (Ni MH) Il s'agit d'une extension des batteries NiCd à haute densité d'énergie. L'anode est composée d'hydrure métallique au lieu de NiCd. Elles ont moins d'effets mémoire et elle fournissent une puissance de pointe élevée. Elle est plus chère que les batteries NiCd et la surcharge endommage facilement la batterie. Caractéristiques des batteries nickel-métal-hydrure : Énergie spécifique : 65 - 75Wh/kg Durée de vie : 700 cycles Avantages : énergie spécifique élevée, bonne décharge profonde, respectueuse de l'environnement Inconvénients : coût élevé, autodécharge élevée et faible efficacité.

Figure 0.10Batteries AGM

I.4.1.1.2 Batteries nickel-cadmium (ni-cd)

Dans une batterie Ni-Cd, l'électrode positive est constituée de cadmium et l'électrode négative d'hydroxyde de nickel, séparées par des séparateurs en nylon immergés dans un électrolyte d'hydroxyde de potassium placé dans un boîtier en acier inoxydable. Elle a une plus longue durée de vie en cycle profond et tolère mieux la température que la batterie plomb-acide. Le cadmium est remplacé par des hydrures métalliques en raison des règles de réglementation environnementale. L'effet mémoire dégrade la capacité de la batterie lorsque celle-ci est inutilisée pendant une longue période. L'effet mémoire est le processus qui consiste à se souvenir de la profondeur de la décharge dans le passé. Si la batterie est déchargée à 25 % de façon répétée, elle s'en souviendra, et si la décharge est supérieure à 25 %, la tension de la cellule chutera comme le montre la figure 4. Pour retrouver la pleine capacité de la batterie, il faut la reconditionner en la déchargeant complètement puis en la chargeant complètement tous les quelques mois.

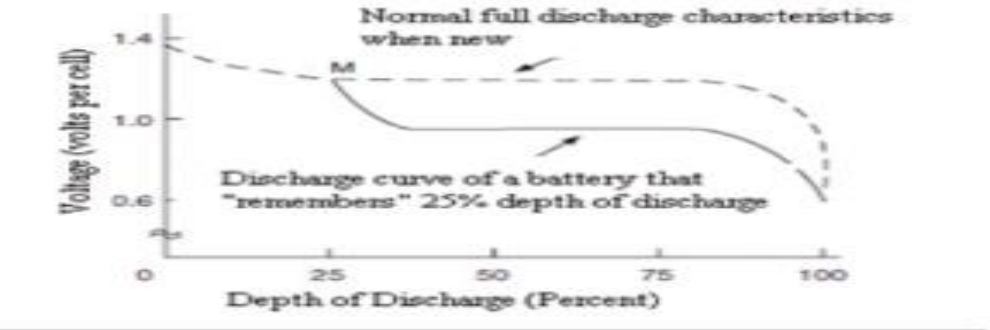


Figure 0.11 Effet mémoire de la batterie Ni-Cd

I.4.1.1.3 Batteries nickel-metal hydrure (ni-mh)

Il s'agit d'une extension des batteries NiCd à haute densité énergétique. L'anode est constituée d'hydrure métallique au lieu de NiCd. Elles ont moins d'effet mémoire et fournissent une puissance de pointe élevée. Elle est plus chère que les batteries NiCd et la surcharge endommage facilement la batterie. Caractéristiques des batteries nickel-métal-hydrure : Énergie spécifique : 65 - 75Wh/kg

Durée de vie : 700 cycles

Avantages : énergie spécifique élevée, bonne décharge profonde, respect de l'environnement.

Inconvénients : Coût élevé, autodécharge importante et faible rendement

Figure 0.12 Batteries nickel-metal hydrure

I.4.1.1.4 Batteries lithium-ion

La densité énergétique des batteries Li-ion est 3 fois supérieure à celle des batteries Pb-acide. La tension des cellules sera de 3,5 V, et quelques cellules en série donneront la tension de batterie requise. L'électrode de lithium réagit avec l'électrolyte et il crée un film de passivation lors de chaque opération de décharge et de charge. Ceci est compensé par l'utilisation d'électrodes épaisses. Pour cette raison, le coût des batteries Li-ion est plus élevé que celui des batteries NiCd. Une surcharge supplémentaire endommage la batterie. 6.5 Batteries au lithium polymère Dans cette batterie, l'électrolyte polymère solide agit à la fois comme électrolyte et comme séparateur et la réaction de l'électrode de lithium avec l'électrolyte est moindre. Caractéristiques des batteries au lithium :

Énergie spécifique : 100-150Wh/kg

Durée de vie : 1000 cycles

Avantages : énergie spécifique élevée, longue durée de vie.

Inconvénients : Coût élevé, faible sécurité

Figure 0.13 Batteries lithium-ion

I.4.1.2 Paramètre de batterie

I.4.1.2.1 Capacité de la batterie

La capacité de stockage de la batterie est représentée en Ampère heure ou Ah. Si V est la tension de la batterie, la capacité de stockage de la batterie est de la batterie peut être Ah x V = Wattheure. En général, la capacité de la batterie est spécifiée pour une décharge/charge donnée de décharge/charge donnée ou indice C. La capacité réelle dépend des conditions de fonctionnement La capacité réelle dépend des conditions de fonctionnement telles que la charge, la température, etc. [007]

I.4.1.2.2 Tension de la batterie

La tension aux bornes en condition de fonctionnement est connue sous le nom de tension nominale ou tension de fonctionnement. Cette tension est spécifiée par les fabricants. Elle peut être de 3V, 6V, 12V, 24Vetc.

I.4.1.2.3 Profondeur de décharge (DOD)

Il s'agit d'une mesure de l'énergie retirée d'une batterie en pourcentage de sa pleine capacité. Pourcentage de sa pleine capacité. L'état de charge d'une batterie est la différence entre la pleine charge et la profondeur de décharge de la batterie en pourcentage. Décharge de la batterie en pourcentage. Si la profondeur de décharge est de 25 %, alors l'état de charge est de (100 - 25) = 75%.

I.4.1.2.4 L'état de charge (SoC)

L'état de charge (State of Charge) d'une batterie indique la capacité restante à l'intérieur de la batterie. Le SoC est généralement exprimé en pourcentage. Si l'état de charge est de 100 %, cela signifie que la batterie est entièrement chargée. Si l'état de charge est de 0 %, cela signifie que la batterie est vide. L'état de charge d'une batterie est simplement calculé comme suit,

$$\mathbf{SOC = 1 - DOD} \qquad \textbf{(0-1)}$$

Où :

DOD = Profondeur de décharge

L'amplitude du courant est considérée comme positive pour le processus de décharge et négative pour le processus de charge. La détermination du SoC est une question de plus en plus importante dans la technologie des batteries. Une connaissance précise du SoC permet un

contrôle supplémentaire des processus de charge et de décharge, qui peut être utilisé pour une meilleure utilisation de l'énergie stockée. La détermination précise du SoC pour les applications alimentées par batterie est également importante pour le confort de l'utilisateur. Une bonne estimation du SoC permet d'augmenter la durée de vie de la batterie, de mieux utiliser l'énergie stockée et d'améliorer la fiabilité du pack batterie. Le SoC dépend fortement de la température et de l'âge de la batterie. Les tensions aux bornes, les courants de fonctionnement et les températures de surface sont les paramètres directement mesurables d'une batterie. Mais l'interrelation complexe entre ces paramètres fait de l'estimation du SoC une tâche complexe. De nombreuses tentatives ont été faites dans la littérature pour estimer le SoC La méthode de mesure directe est basée sur une relation reproductible et prononcée entre une variable mesurée de la batterie et le SoC. Cette variable de la batterie doit être mesurable électriquement dans l'installation pratique. Des exemples de telles variables de batterie sont la tension aux bornes de la batterie "V" et l'impédance de la batterie "Z". La plupart des relations entre les variables de la batterie dépendent de la température "T". Par conséquent, outre la tension (ou) l'impédance, la température de la batterie doit également être mesurée. La relation "fT d " entre la variable de la batterie mesurée et le SoC, peut être stockée dans le système. Le principe de base iple pour l'estimation du SoC basée sur une mesure directe[008]

I.4.1.2.5 Cycle de vie d'une batterie

Il s'agit du nombre de cycles complets de charge et de décharge qu'une batterie peut effectuer avant que sa capacité nominale ne diminue. Batterie peut fonctionner avant que sa capacité nominale ne diminue de moins de 80 % de sa capacité initiale nominale. Moins de 80% de sa capacité nominale initiale. Après le cycle de vie spécifié cycle de vie spécifié, la batterie fonctionnera avec une capacité réduite. Elle peut être Elle peut être utilisée mais sa capacité sera plus faible.

I.4.1.2.6 Taux de décharge/charge ou taux C

Le taux C'est la valeur obtenue en donnant le rapport entre la capacité de la batterie et le nombre d'heures de charge complète. Capacité de la batterie par rapport au nombre d'heures de charge ou de décharge ou la décharge complète, représenté par C/X, où X est le temps en heures pour la charge ou la décharge complète. Si X = 10 h, l'indice C est C/10 ou 0,1C. Le courant de charge ou de décharge pour une classification C- peut être C- peut être calculé en divisant la capacité en Ah par le nombre total d'heures de charge et de décharge. Pour une batterie d'une capacité de 50Ah, si l'indice C est de 0,1 C, le courant de charge ou de décharge sera de 50/10 = 5A.

I.4.1.3 Autodécharge

C'est la capacité électrique perdue lorsqu'une batterie n'est pas utilisée. Elle est due à un processus électrochimique interne à la batterie. L'autodécharge augmente avec l'augmentation de la température. Les batteries Les batteries peuvent être stockées à des températures plus basses afin de réduire l'autodécharge. Décharge.

I.4.1.4 Les trois étapes de charge de batterie

Etape 1 – La charge rapide fournit une tension de charge maximale qui sert à « Réveiller » les batteries de 12 volts pour permettre un démarrage rapide. Lorsque la tension de la batterie atteint le point de consigne, le chargeur passe automatiquement à l'étape 2 du processus de charge. [26]

Etape 2 – Durant la charge lente, la tension est maintenue au point de Consigne pour offrir une charge sécuritaire et constante. La tension est constante Alors que l'intensité réelle diminue pour permettre le transfert optimal de l'énergie Chimique à l'interne. À la fin de l'étape 2, le chargeur passe automatiquement à L'étape 3 du processus de charge. [26]

Etape 3 – Charge de maintien (float) – La tension est maintenue et diminuée Automatiquement jusqu'au point de consigne alors que l'intensité est ajustée pour Charger la

batterie de façon sécuritaire et efficace. Le mode de charge de maintien automatique est idéal pour maintenir la charge d'une Batterie

I.5 Conclusion

Le système photovoltaïque est constitué de panneaux photovoltaïques qui convertissent l'énergie solaire directement en courant électrique afin d'être stockée dans l'unité de stockage représentée par la batterie à travers un convertisseur DC vers DC afin d'alimenter la batterie avec le courant approprié. Dans ce chapitre, nous avons fourni une définition de ces trois éléments, en indiquant leurs types et leurs caractéristiques.

CHAPITRE II :

Modélisation des systèmes de stockage photovoltaïque

I.6 Introduction

L'objectif principal de la modélisation mathématique d'un système stockage est de prédire son comportement dans les conditions de fonctionnement actuelles afin de corriger toute défaillance ou dysfonctionnement du système avant sa mise en œuvre.

Il convient de noter qu'il existe de nombreux modèles utilisés dans ce processus, et nous en mentionnerons trois modèles qui sont un des modèle les plus utilisé dans le domaine de stockage dans ce chapitre on va voir la modélisation mathématique de ces trois modèle et nous décidons le quelle dès les est le plus optimal pour notre simulation.

I.7 Modélisation de batterie

Pour le processus de modélisation, nous avons choisi une batterie au plomb pour les raisons suivantes :

- 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 ban 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.

Équations des réactions de batterie au plomb :

Electrode positive :

$$\mathbf{PbO_2 + 3H^+ + HSO^{-4} + 2e - \leftrightarrow PbSO^4 + 2H_2O} \quad \textbf{(0-1)}$$

Electrode negative :

$$\mathbf{Pb + HSO^{-4} \leftrightarrow PbSO_4 + H^+ + 2e} \quad \textbf{(0-2)}$$

Reaction :

$$\mathbf{Pb + PbO_2 + 3H^+ + 2HSO_{-4} \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O} \quad \textbf{(0-3)}$$

$$\mathbf{PbO_2 + Pb + 2HZSO_{-4} \overset{\text{charge}}{\underset{\text{décharge}}{\leftrightarrow}} 2PbSO_4 + 2H_2O} \quad \textbf{(0-4)}$$

[009]

I.7.1 Les modèles de batterie

Afin d'étudier le comportement des batteries, il faut d'abord les modéliser. Il existe de nombreux modèles pour étudier le comportement des batteries dont les quelle sont le modèle Shepherd, le modèle Manegon et le modèle Coppetti.

I.7.1.1 Modèle de Shepherd

Le modèle de Shepherd [10] décrit la variation de la tension de sortie de la batterie en fonction du courant de charge/décharge.

De sortie de la batterie en fonction du courant de charge/décharge. Il peut être utilisé pour tous les types de batteries avec un minimum de données expérimentales.

Données expérimentales. L'équation de la tension de sortie de la batterie est donnée pour

Modes de décharge et de charge par (II.5) et (II.6), donnés ci-dessous.

I.7.1.2 Mode Décharge

$$V_{\text{dis}} = 2.0030 - 0.0189 \cdot \left(\frac{58.31}{58.31 - I_{\text{dis}} \cdot t}\right) I_{\text{dis}} - 0.015 \cdot I_{\text{dis}} \quad \textbf{(0-5)}$$

Idis est le courant de décharge ,il représente le temps. L'équation est caractérisée par trois termes distincts. Le premier terme représente la tension en circuit ouvert ; le deuxième est associé à la tension de polarisation ohmique, tandis que le troisième terme est lié à la perte ohmique due à la résistance interne [10].

I.7.1.3 Mode charge

$$V_{ch} = 2.0030 + 0.0189 \cdot \left(\frac{58.31}{58.31 - I_{ch} \cdot t}\right) I_{ch} + 0.015 \cdot I_{ch} \quad \textbf{(0-6)}$$

Ich est le courant de charge ; on peut noter que (II.6) est identique au mode de décharge avec polarité inverse. Dans ce modèle, il est supposé que tous les paramètres du modèle sont constants et la température n'est pas prise en compte.

I.7.2 Modèle de Manegon

Dans ce modèle de batterie, la tension en circuit ouvert et la tension interne

Sont considérées comme une fonction de la température. De plus, les paramètres du mode de décharge sont identiques à ceux utilisés pour le mode de charge [11]. Ci-après, les équations décrivant le mode de chargement et de déchargement dans le modèle Manegon est mis en évidence.

I.7.2.1 Mode de décharge

Pendant le mode de décharge, le courant et la tension sont décrits en fonction du SOC, qui varie entre zéro et un. La tension de décharge pour ce modèle est donnée par l'équation suivante :

$$V_{\text{dis}} = 2.094 \cdot \left(1 - 0.001 \cdot (T - T_{\text{a}})\right) - \frac{I_{\text{dis}}}{C} \cdot \left(\frac{0.189}{\text{SOC}} - 0.15 \cdot \left(1 - 0.02 \cdot (T - T_{\text{a}})\right)\right) \quad \textbf{(0-7)}$$

où T est la température interne de la batterie en °C, Ta la température ambiante en °C, et C représente la capacité nominale de la batterie en Ah, respectivement.

Dans cette équation, le premier terme représente la tension de repos (circuit ouvert). Le second est la variation de la chute de tension en termes de résistance interne et de SOC en fonction du courant de décharge et de la capacité de la batterie. Pendant le mode de décharge, le SOC est une fonction linéaire, qui commence à diminuer lorsque la batterie fournit l'électricité au fil du temps

$$\mathbf{SOC} = \mathbf{SOC_0} - \frac{I_{\mathbf{dis}} \cdot \boldsymbol{\Delta t}}{C} \quad \textbf{(0-8)}$$

Où SOC0 désigne la valeur initiale du SOC et Δt est un intervalle de temps, en heures

I.7.2.2 Mode de charge

En mode de charge, le modèle Manegon divise l'évolution de la tension en deux conditions de charge : la charge pendant la phase de suralimentation et la charge pendant la phase de surcharge, respectivement.

i. Mode de charge d'appoint : L'évolution de la tension de sortie ainsi que le SOC pendant le mode de charge d'appoint sont donnés par (II.9) et (II.10)., respectivement

$$\boldsymbol{V_{\mathbf{ch}} = 2.094 \cdot \left(1 - 0.001 \cdot (T - T_{\mathbf{a}})\right) + \frac{I_{\mathbf{ch}}}{C} \cdot \left(\frac{0.189}{1.142 - \mathbf{SOC}} + 0.15 \cdot \left(1 - 0.02 \cdot (T - T_{\mathbf{a}})\right)\right)} \quad \textbf{(0-9)}$$

Le SOC deviant:

$$\mathbf{SOC} = \mathbf{SOC_0} + \frac{I_{\mathbf{ch}} \cdot \boldsymbol{\Delta t}}{C} \quad \textbf{(0-10)}$$

ii. Mode de surcharge : Cependant, lorsque la tension de charge

dépasse 2,28 V, un terme supplémentaire est ajouté à (9). Ainsi, l'équation de surcharge sera la suivante [11] : (voir (II.11))

Pendant le mode de surcharge, la progression du SOC est non linéaire dans le temps et son expression dans le modèle de Manegon est donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{SOC} = \mathbf{SOC_0} \cdot \exp(-K \cdot t) \quad \textbf{(0-11)}$$

Le terme K dans (11) est donné par :

$$K = 300 \cdot \exp\left(-\frac{4400}{T_k}\right) \quad \textbf{(0-12)}$$

où Tk est la température interne de la batterie en Kelvin (°K).

I.7.2.3 Modèle de Coppetti

Coppetti et al. [12] ont élaboré l'un des modèles de batterie au plomb les plus détaillés, qui peuvent prendre en compte toutes les conditions de fonctionnement existantes. Ci-après, les zones de fonctionnement d'une batterie au plomb sont décrites.

I.7.3 Paramètre identification

Afin d'améliorer la précision du modèle de Coppetti, une amélioration des paramètres empiriques en utilisant l'extraction automatique des paramètres est présentée dans les prochaines sections. En fait, le modèle contient 25 paramètres ; 8 paramètres liés au mode de décharge (II.14), 9 paramètres résultant du mode flottant (II.18)-(II.24), et 8 paramètres restants concernant le mode de charge d'appoint

Mode de décharge :

I.7.3.1 Modèle choisi

Nous concluons dans cette partie que le modèle de Coppetti est performant plus mieux par rapport à celles estimées par les modèles établis de Manegon et Shepherd. Bien que le modèle de Coppetti se révèle le mieux adapté à la simulation du système, il introduit des déviations non soutenables, notamment lors de la phase de flottabilité ; (phase de maintenance) est en mode charge et présente également une incohérence en fin de phase de décharge ; Lorsque la tension se développe de manière non linéaire, cela est dû à la capacité de la batterie qui se détériore de manière étonnante, comme indiqué dans la partie précédente respectivement.

I.7.4 Modélisation mathématique modèle de Coppetti

L'objectif principal de la modélisation mathématique des batteries est de pouvoir prédire le comportement de la batterie dans des conditions de travail spécifiques. Dans cette section, la modélisation de la batterie est présentée selon le modèle Coppetti électrochimiques est le plus couramment utilisés pour les applications PV

I.7.4.1 Mode de décharge

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

$$V_d = \overbrace{[2.85 - 0.12(1 - SOC)]}^{V_{dd}} - Id.\underbrace{\frac{1}{C10}\left(\frac{4}{1+I\text{^}1.3} + \frac{0.27}{SOC\text{^}1.5} + 0.02\right)\cdot(1 - 0.007\Delta T)}_{Rdd} \quad \textbf{(0-13)}$$

$$\Delta T = T - 25 \quad \textbf{(0-14)}$$

T est la température interne de la batterie en **C°**, Le premier terme de l'équation (II.9) 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 [10-12]. Le comportement de la Batterie était considéré comme une séquence d'états stationnaires, sans tenir compte les effets transitoires

Dans l'équation (II.13), 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 :

$$SOC = \left(1 - \frac{Q}{C}\right) \quad \textbf{(0-15)}$$

$$Q = \int_0^t \mathbf{I.\,dt.} \quad \textbf{(0-16)}$$

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

I.7.4.2 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 :

$$\boldsymbol{V_c = [2 - 0.16 \cdot SOC] - \frac{Ic}{C10} \cdot \left(\frac{6}{1+I\text{^}0.86} + \frac{0.48}{(1-SOC)\text{^}1.2} + 0.036\right) \cdot (1 - 0.025\Delta T)} \quad \textbf{(0-17)}$$

$$\boldsymbol{SOC = SOC_0 + \frac{\eta c \int_t^0 \text{Ich.dt}}{c}} \quad \textbf{(0-18)}$$

$$\boldsymbol{\eta_c = 1 - exp\left[\frac{a}{\frac{I}{I10}+b} \cdot (SOC - 1)\right]} \quad \textbf{(0-19)}$$

Telle que : a= 20.73 et b= 0.55

Et ηc représente l'efficacité de la charge

ηc variation avec l'état de charge (SoC) et le taux de courant (τ)

I.7.4.3 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 (Vg) pour la phase de surcharge :

$$\boldsymbol{V_g = [2.24 + 1.97ln(1 + I_{ch}/C_{10})](1 - 0.002\Delta T)} \quad \textbf{(0-20)}$$

$$\boldsymbol{V_{ec} = [2.45 + 1.97ln(1 + I_{ch}/C_{10})](1 - 0.002\Delta T)} \quad \textbf{(0-21)}$$

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

$$V_{OC} = V_g + (V_{ec} - V_g) \cdot \left(1 - exp\left(\frac{\text{Ahrestored-095.C}}{\text{I}\tau}\right)\right) \quad \textbf{(0-22)}$$

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

$$\tau = \frac{17.3}{1+852\left(\frac{I}{C10}\right)^{1.67}} \quad \textbf{(0-23)}$$

□□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 (II.13), jusqu'au début de la phase de gazéification (Vc <Vg) et par l'équation (II.17) durant la phase de surcharge (Vc> Vg) 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 [12].

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 batterieen 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.

I.8 Conclusion

Grâce aux modélisation mathématique effectués dans ce chapitre, nous avons pu identifier les paramètres du modèle de Coppetti attachés aux paramètres d'origine, et obtenir de meilleurs résultats de performance par rapport aux deux autres modèles, Manegon et Shepherd, qui montrent des différences significatives concernant la processus de charge et de décharge.

Cependant, le modèle de Coppetti a montré les paramètres d'origine bien qu'il y ait quelques incohérences entre les valeurs du modèle et les courbes, en particulier au début du mode de surcharge et à la fin du processus de déchargement.

Pour ces raisons, de nouveaux paramètres du modèle de Coppetti sont proposés en utilisant des méthodes d'optimisation.

Cette conception s'est grandement améliorée au niveau de la gouverne de direction en réduisant considérablement les écarts entre les valeurs estimées par les simulations et les données mesurées.

CHAPITRE III: La Simulation d'une batterie de système photovoltaïque en simulateur Pspice

I.9 Introduction

Après avoir défini le système énergétique photovoltaïque, et évoqué ses différents composants et les trois type de modélisation de stockage, maintenant dans ce chapitre nous allons réaliser des simulations du système stockage photovoltaïque, sur la base du modèle précédent piétiné dans le deuxième chapitre afin de faire une comparaison entre les résultats obtenus pour chacun des les modes de charge et de décharge dans le cas d'un courant constant à température variable Et dans le cas d'une stabilisation de la température avec un courant variable.

I.10 À propos du programme Pspice

Pspice est un programme de simulation logique pour les circuits analogiques et numériques pour Microsoft Windows. Ce nom est un acronyme de l'anglais pour programme de simulation de centre de circuit intégré (Programme de simulation avec accent sur les circuits intégrés).

La technologie de simulation Pspice SPICE combine des moteurs analogiques et de signaux mixtes natifs de pointe pour offrir une solution complète de simulation et de vérification de circuits. Elle répond à l'évolution des besoins de simulation des concepteurs tout au long du cycle de conception, de l'exploration du circuit au développement et à la vérification de la conception. Conçu pour être utilisé en conjonction avec « PSpice A/D », « Capture Cis » aide les concepteurs à améliorer le rendement et la fiabilité.[013]

Pspice a été initialement développé par MicroSim et a été utilisé pour automatiser la conception électronique. La société a été acquise par OrCAD, qui a également été vendue à Cadence Design Systems. La première version du programme (UC Berkeley SPICE) de l'Université de Californie à Berkeley était disponible sur les ordinateurs personnels après sa sortie en janvier 1984 pour fonctionner sur le programme IBM PC. La première version fonctionnait à partir de deux disquettes de 360 kilo-octets, qui comprenaient plus tard un programme d'affichage et d'analyse des ondes appelé Probe. Les versions ultérieures ont amélioré leurs performances et ont migré vers Microcomputer DEC/VAX, SunWorkstation, Apple Macintosh et Microsoft

Windows. Une version 3.06 est sortie en 1988, issue de deux disquettes 5.25, et était une version étudiante qui permettait jusqu'à 10 transistors de fonctionner.

Au cours du développement, Pspice est devenu un simulateur de signaux mixtes. Le logiciel est développé pour répondre aux exigences complexes de l'industrie. Elle produit maintenant des conceptions clés en main dans OrCAD ou Cadence Allegro. Il comprend des fonctionnalités d'analyse de circuit avec optimisation automatique, codage, éditeur de modèle, prise en charge des modèles de paramètres, redémarrage automatique du point de convergence, plusieurs solutions internes, ajustement de segment magnétique et prise en charge du modèle de relation non linéaire.[013]

I.11 À Propos de ABM

La modélisation comportement aleou « Analog Behavioral Modeling » est le processus de développement d'un modèle pour un dispositif ou un composant de système représentant le comportement plutôt que de partir d'une description microscopique. Nous pouvons utiliser la modélisation comportementale dans le domaine de la simulation analogique pour modéliser de nouveaux types de dispositifs et pour la modélisation en boîte noire de systèmes complexes. [014]

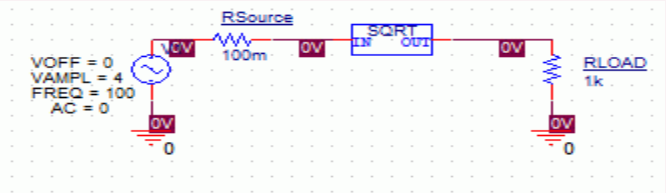
Comme notre système de stockage photovoltaïque de modèle Coppetti.

I.11.1 Exemple d'application numérique ABM sur pspice

Calcul des racines carrées :

Supposons que vous deviez créer un signal dont la tension est la racine carrée de la tension d'un autre signal. Une solution simple consiste à utiliser un circuit de rétroaction pour calculer les racines carrées. Mais cette technique échoue si le signal de référence devient négatif. La solution consiste alors à utiliser la forme fonctionnelle de la modélisation comportementale analogique :

Esqrt out_hi out_lo value= {sqrt (abs (v (input)))}



Sous-circuit racine carrée

Ce modèle prend la valeur absolue de l'entrée du signal référencé au sol avant d'évaluer la fonction racine carrée. La fonction de valeur absolue est une fonction non linéaire.

Remarque : vous pouvez également utiliser une paire de signaux flottants dans le modèle ; par exemple, remplacez v(input) par v(in_hi)-v(in_lo) ou v(in_hi,in_lo).[014]

I.12 Simulation de system modèle Coppetti

En utilisant le simulateur circuit-orienté pspice « cis capture » nous avons simulé le modèle de Coppetti décrit précédemment avec de nouveaux coefficients estimés, ou en a deux mode charge-surcharge et décharge nous notons sans comportement

Les paramètres de modelé de batterie est donne par :

- 1 cas : charge et surcharge C10=100 ; et SOC0=0.3. I10=15 ;

- 2 cas : décharge C10=100 ; et SOC0=1 .I10=10 ;

Schéma de charge et de décharge aux conditions standard :

I=10A, T=25°

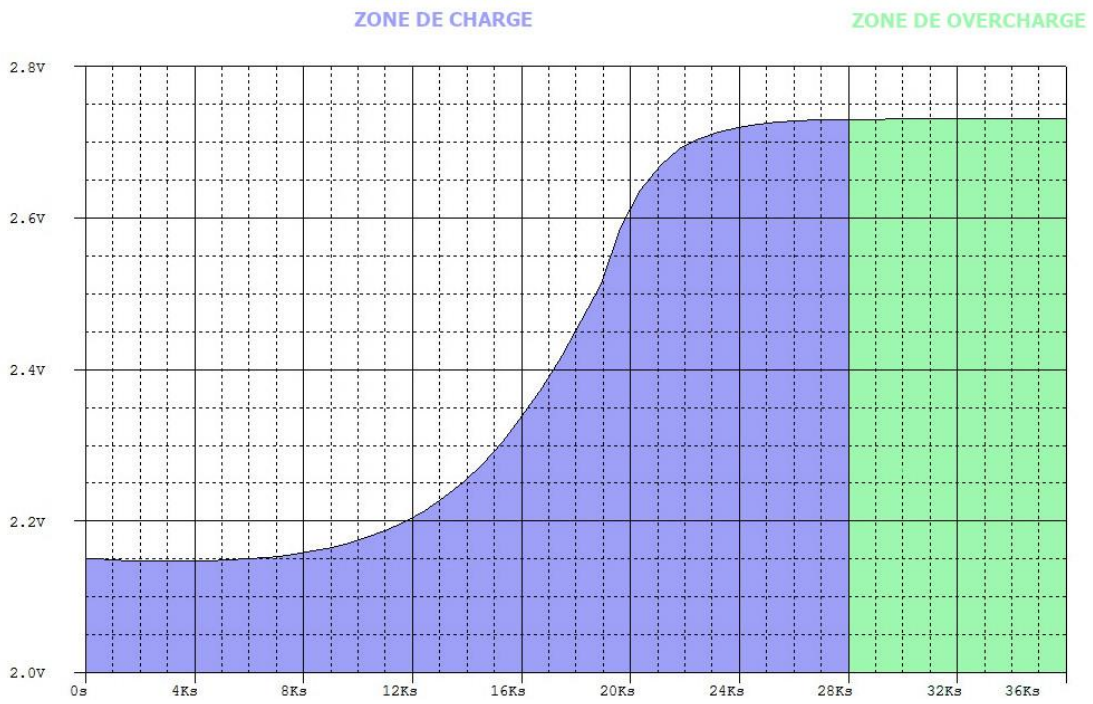


Figure 0.1 tension de battrie en condition standard mode charge-surcharge

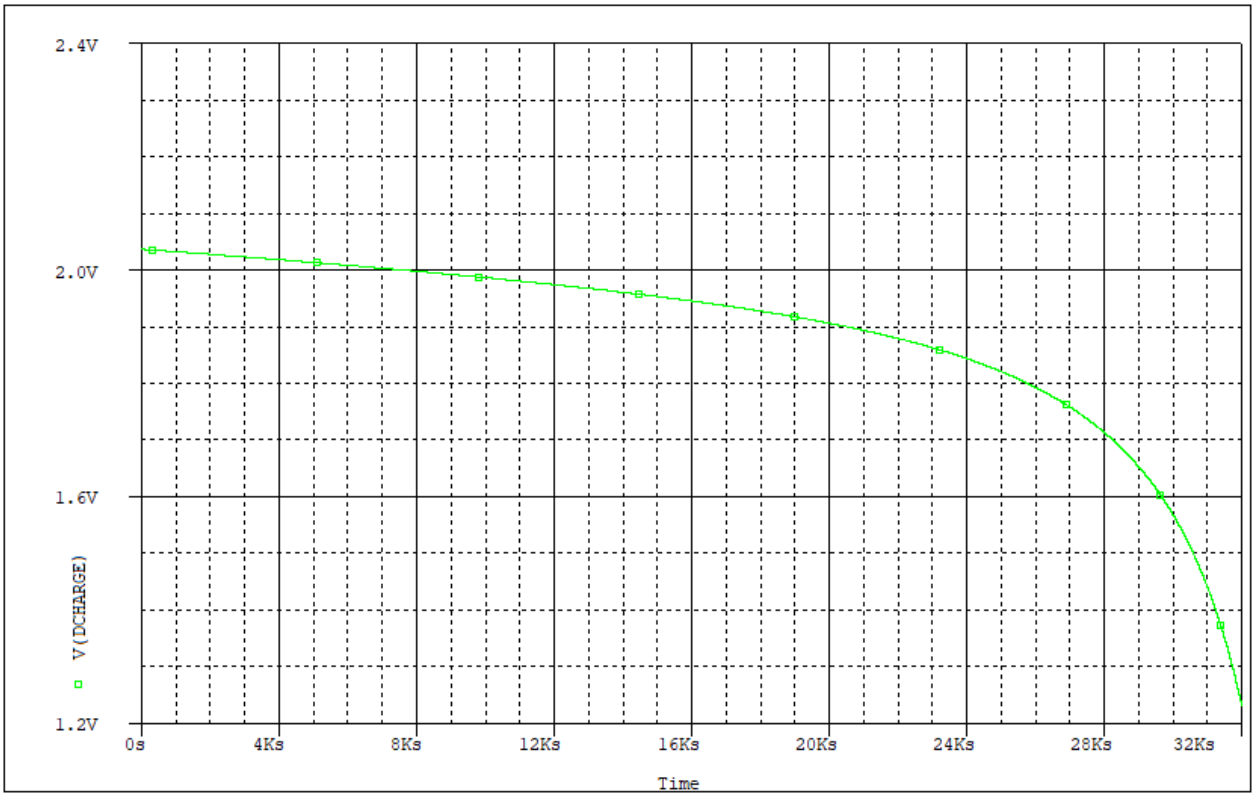


Figure 0.2tension de battrie en condition standard mode décharge

I.13 Mode de charge

En cas de charge, nous avons branché le générateur photovoltaïque de circuit et observons le

Comportement de la tension dans chaque cas de changement de charge ou changement de température

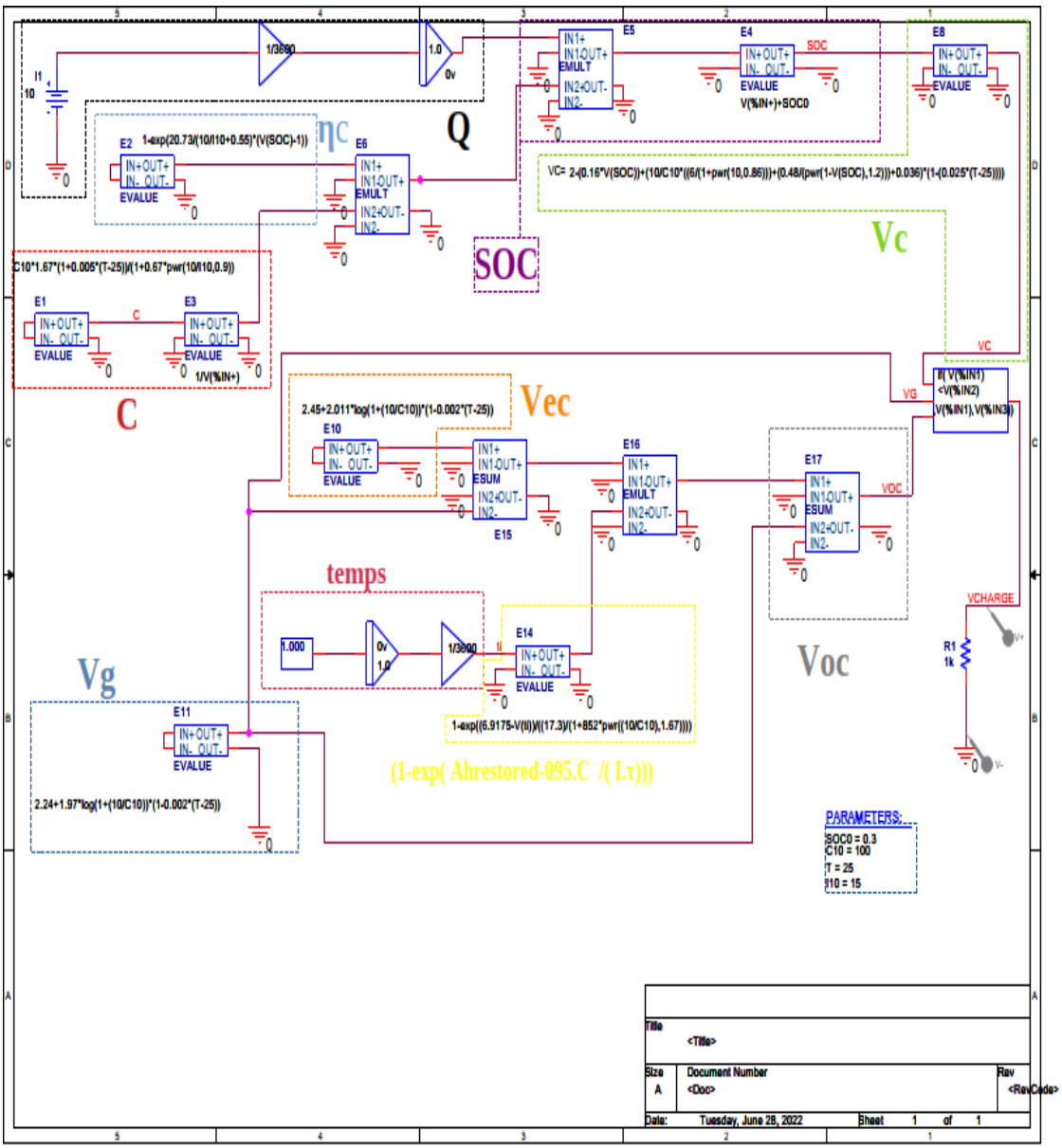


Figure 0.3 Schéma de system circuit a Mode de charge-surcharge sur pspice

I.13.1 Variation courant de charge

En change le courant décharge de simulation pour voir s'en effet sur le circuit

Les figures **Figure (III. 4); Figure (III.5) ; Figure (III.6)** est présenté la tension de la charge batterie en fonction de temps v avec variation de charge

T= 25°, I= variable {(I=5A), (I=15A), (I=20A).}

Figure 0.4 La courbe de la tension charge de batterie T=25° avec I=5

Nous notons que le temps de charge complet de la batterie a atteint 100Kssecondes (27.77h), ce qui est considéré comme une longue période pour une application pratique

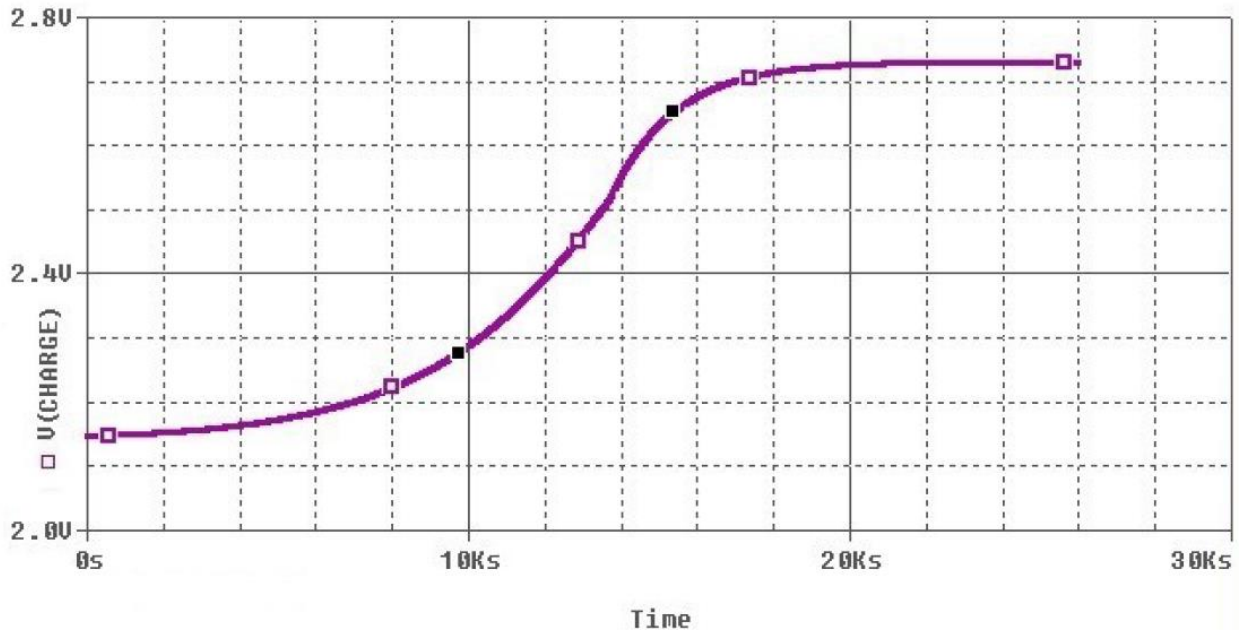


Figure 0.5 La courbe de la tension charge de batterie T=25 avec I=15

Nous notons que le temps de charge de la batterie a diminué à 20Ks (5.55h) secondes, ce qui est toujours considéré comme une période relativement longue par rapport à la condition standard

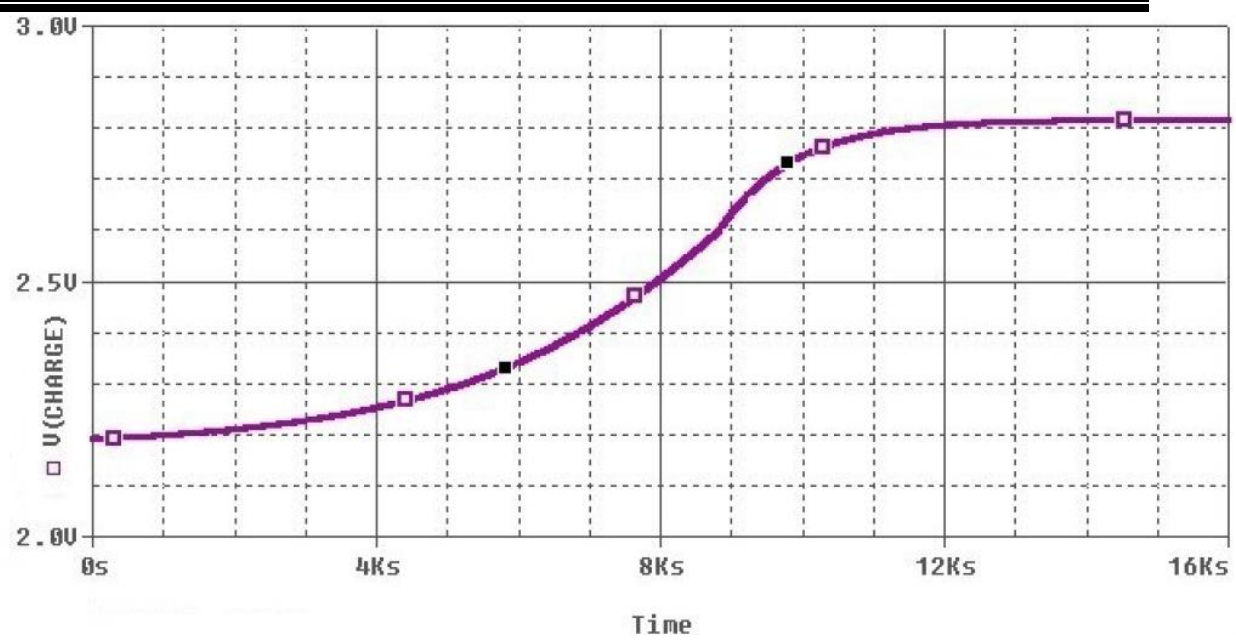


Figure 0.6 La courbe de la tension charge de batterie T=25° avec I=20

Le temps de charge de la batterie est entièrement réduit à 12Ks (3.33h) secondes

Commentaire :

Nous notons que le temps de charge est plus court quand nous augmentent la tension et très long quand la charge faible alors la valeur de charge a un effet signifient sur la tension de la batterie.

I.13.2 Variation de température

En changeant la température de simulation pour voir son effet sur le circuit de charge

Les figures **Figure (III. 7); Figure (III.8) ; Figure (III.9)** présentent la tension de la charge batterie en fonction de temps v avec variation de température= variable, I= 10 {(T=10°), (T=15°), (T=50°).}

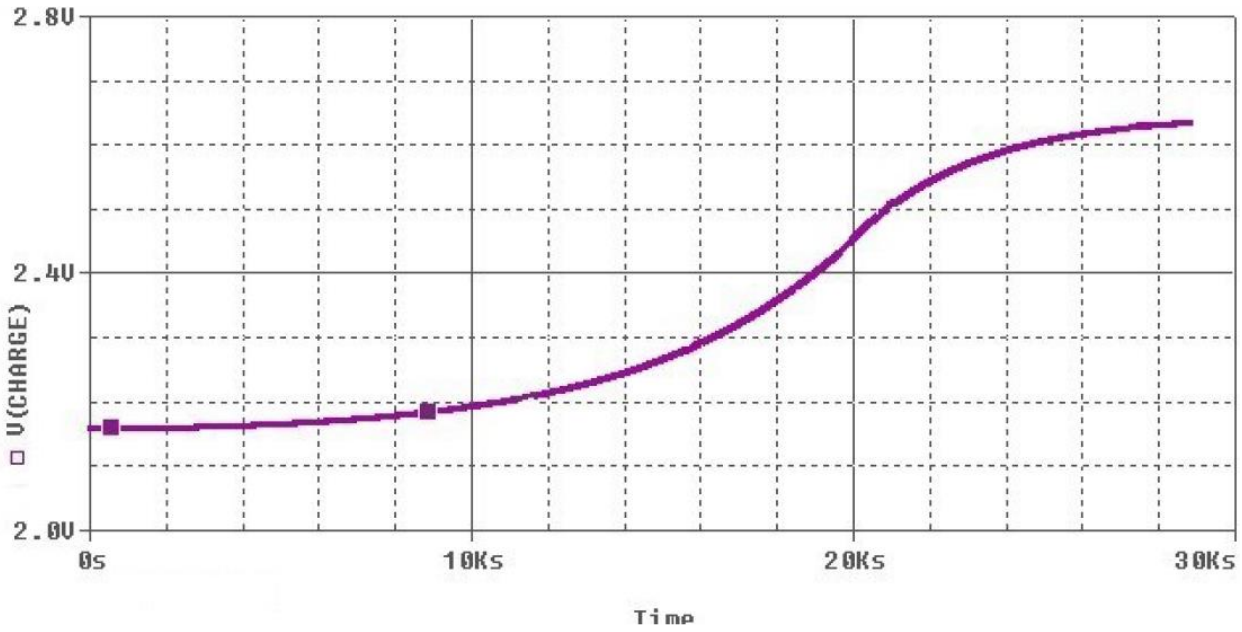


Figure 0.7 La courbe de la tension charge de batterie I=10 avec T=10°

On note que le temps de charge complète de la batterie a atteint 28Ks(7.77h), ce qui est très long par rapport aux conditions standards

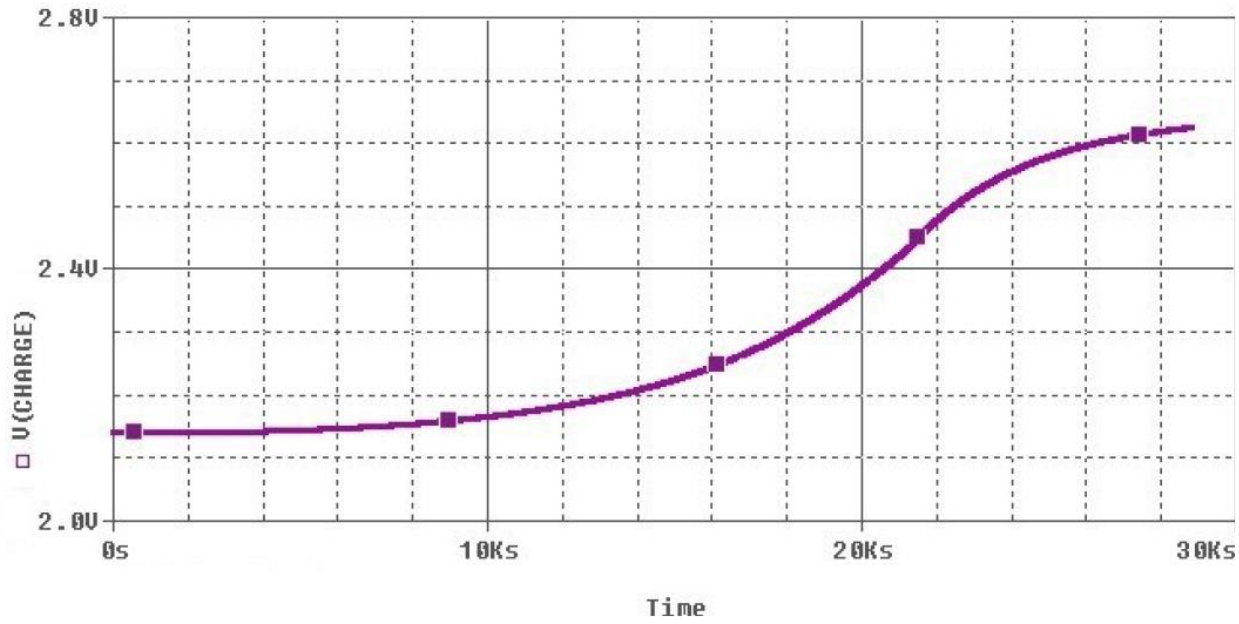


Figure 0.8 La courbe de la tension charge de batterie I=10 avec T=15°

On remarque une légère augmentation du temps de charge complète de la batterie, atteignant 30Ks(8.33h)

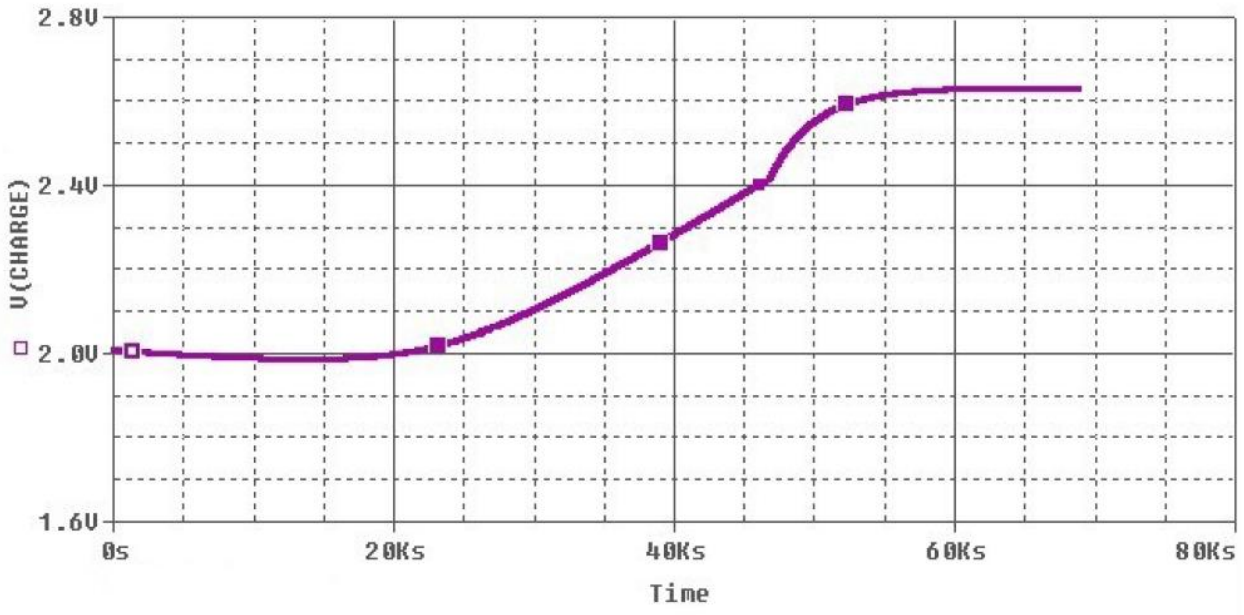


Figure 0.9 La courbe de la tension charge de batterie I=10 avec T=50°

Nous remarquons une augmentation significative du temps de charge complète de la batterie, atteignant 60Ks (16.66h)

Commentaire

- Nous notons que le temps de charge de la batterie diminue lorsque l'intensité du courant augmente et qu'il augmente lorsque la température augmente, et de là on peut dire que les réglages optimaux font la présence d'une forte intensité de courant électrique et d'une basse température

I.14 Mode de décharge

Dans ce mode notre batterie comporte comme un générateur avec une charge dans cette étape, le générateur photovoltaïque est déconnecté du circuit, cela rend la batterie connectée à la résistance uniquement

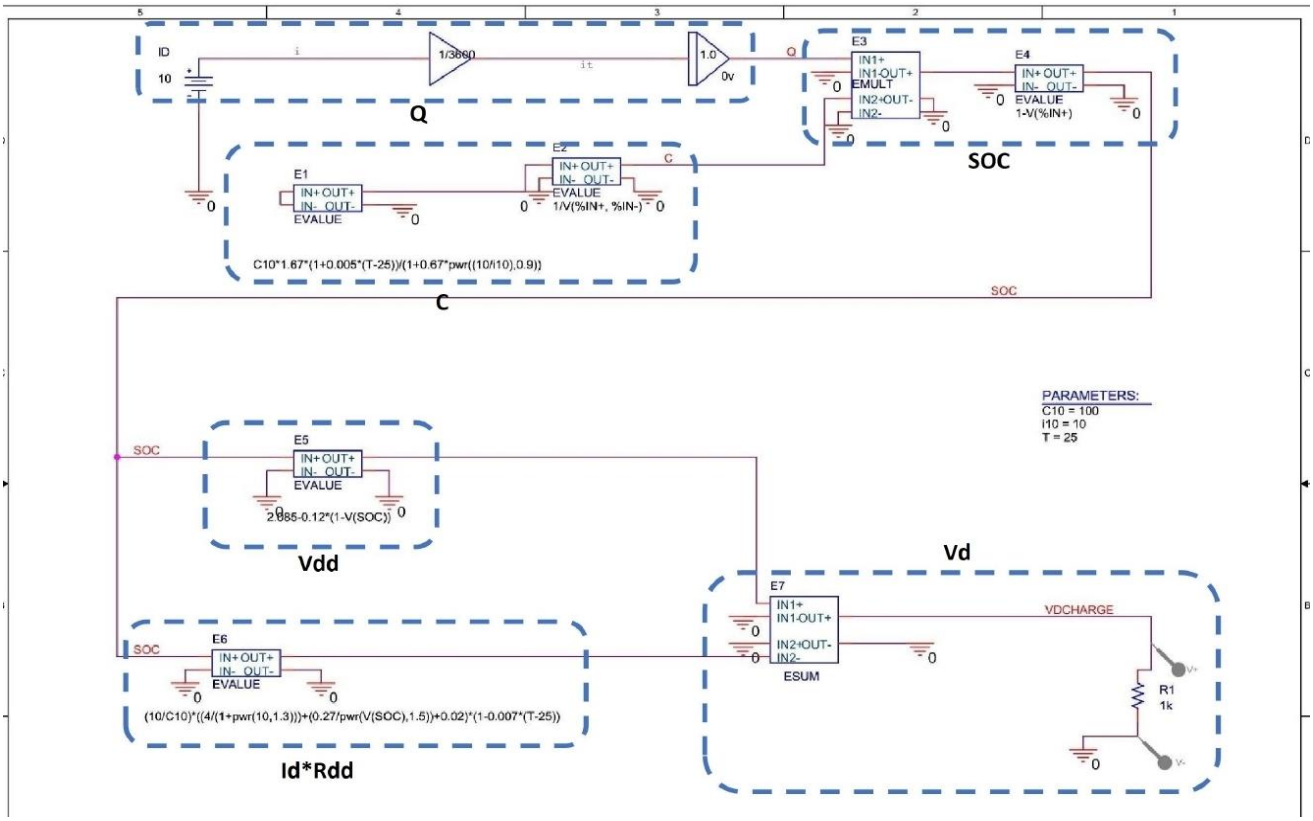


Figure 0.10 Schéma desystem circuit a Mode de décharge

I.14.1 Variation courant de décharge :

En change le courant décharge de simulation pour voir son effet sur le circuit

Les figures **Figure (III. 11); Figure (III.12) ; Figure (III.13)** manifestent la tension de la charge de batterie en fonction de temps avec la variation de charge I= variable, T= 25°{(I=5A), (I=15A), (I=20A).}

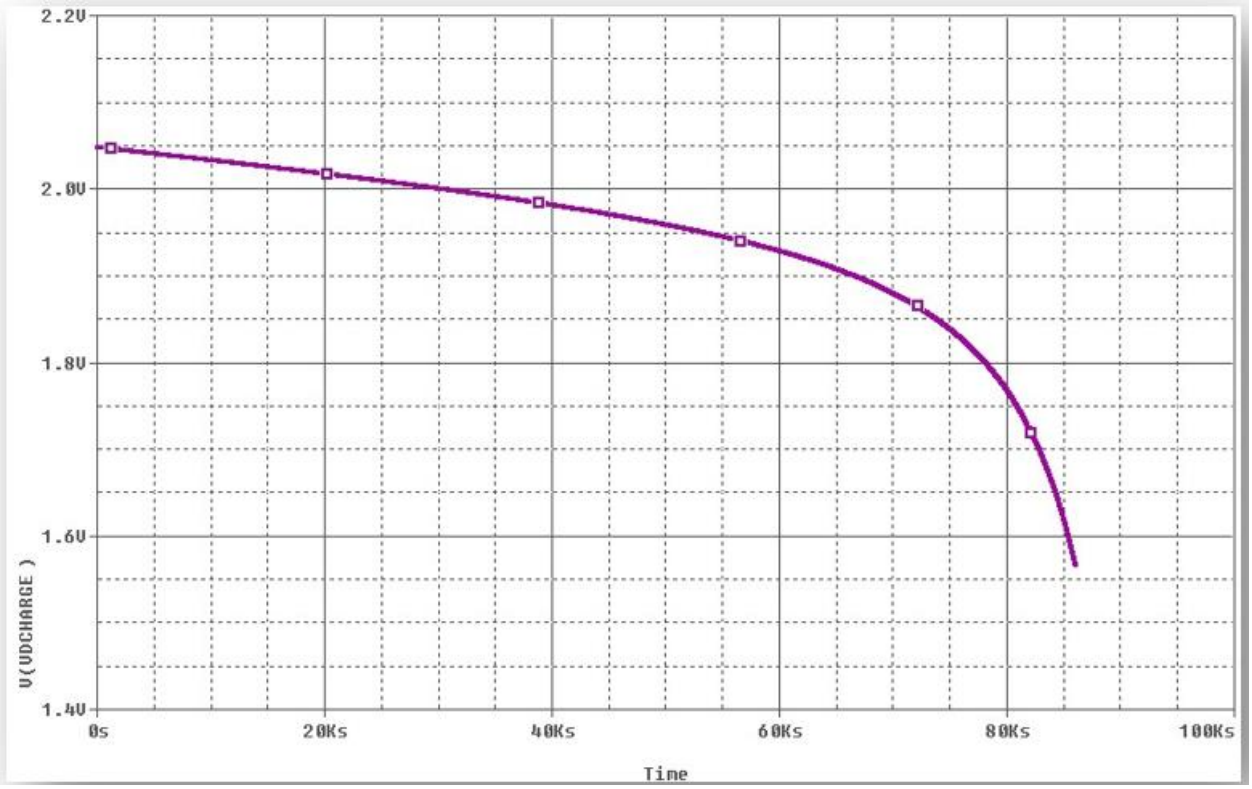


Figure 0.11 La courbe de la tension décharge de batterie I=5 avec T=25°

On note que le temps de décharge de la batterie a atteint 85Ks (23.61h), ce qui est long

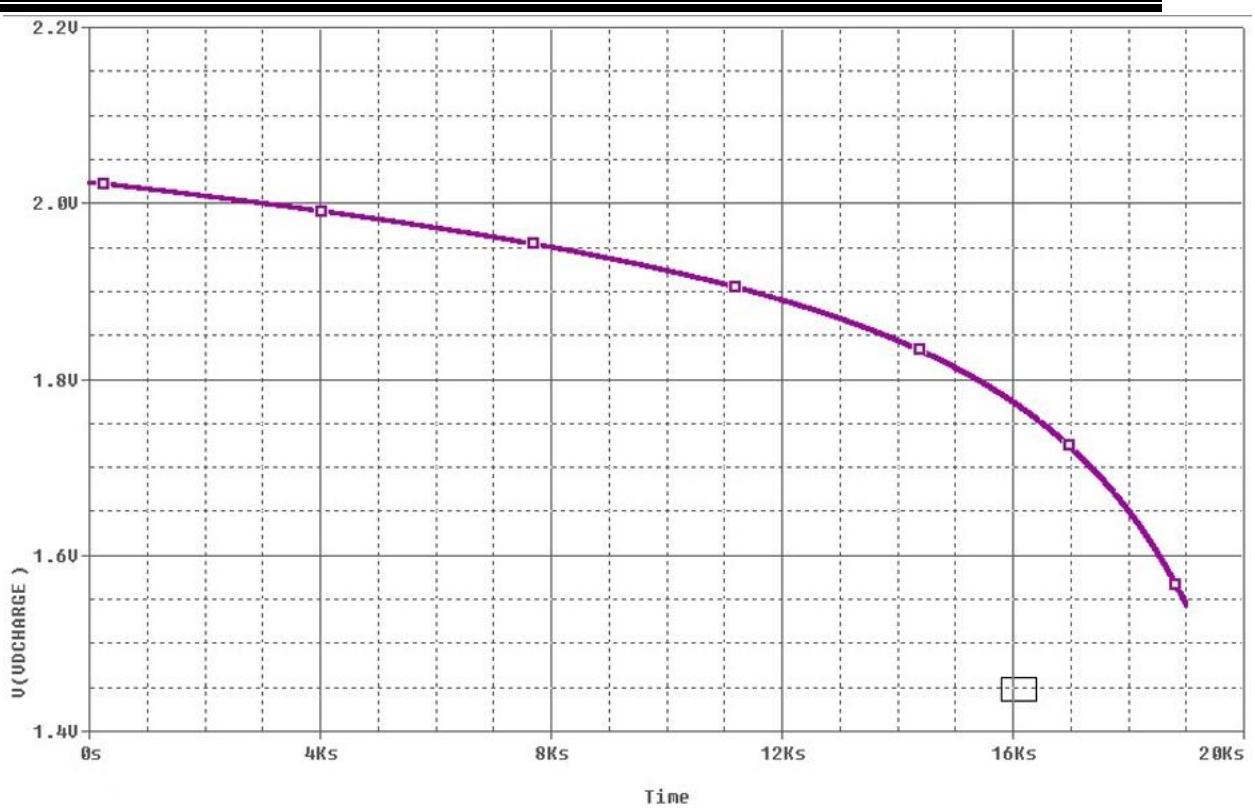


Figure 0.12 La courbe de la tension décharge de batterie I=10 avec T=25°

Nous remarquons une diminution significative du temps de décharge complète de la batterie, car il a fallu environ 18.5Ks (5.13h),

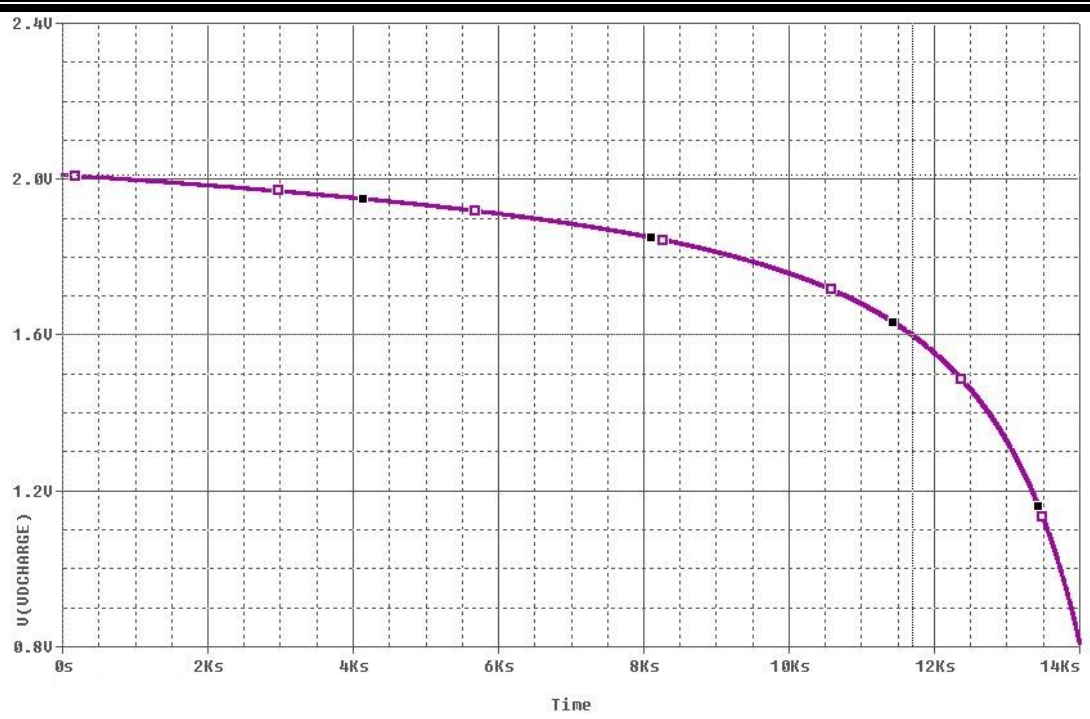


Figure 0.13La courbe de la tension décharge de batterie I=20 avec T=25°

On note une autre diminution significative du temps de décharge de la batterie, atteignant 11.6Ks secondes (3.19h)

I.14.2 Variation de température

En change la température de simulation pour voir son effet sur le circuit de décharge

Les figures **Figure (III. 14); Figure (III.15) ; Figure (III.16)** représentent la tension de la charge batterie en fonction de temps v avec variation de température T= variable, I= 10 {(T=10°), (T=15°), (T=50°).}

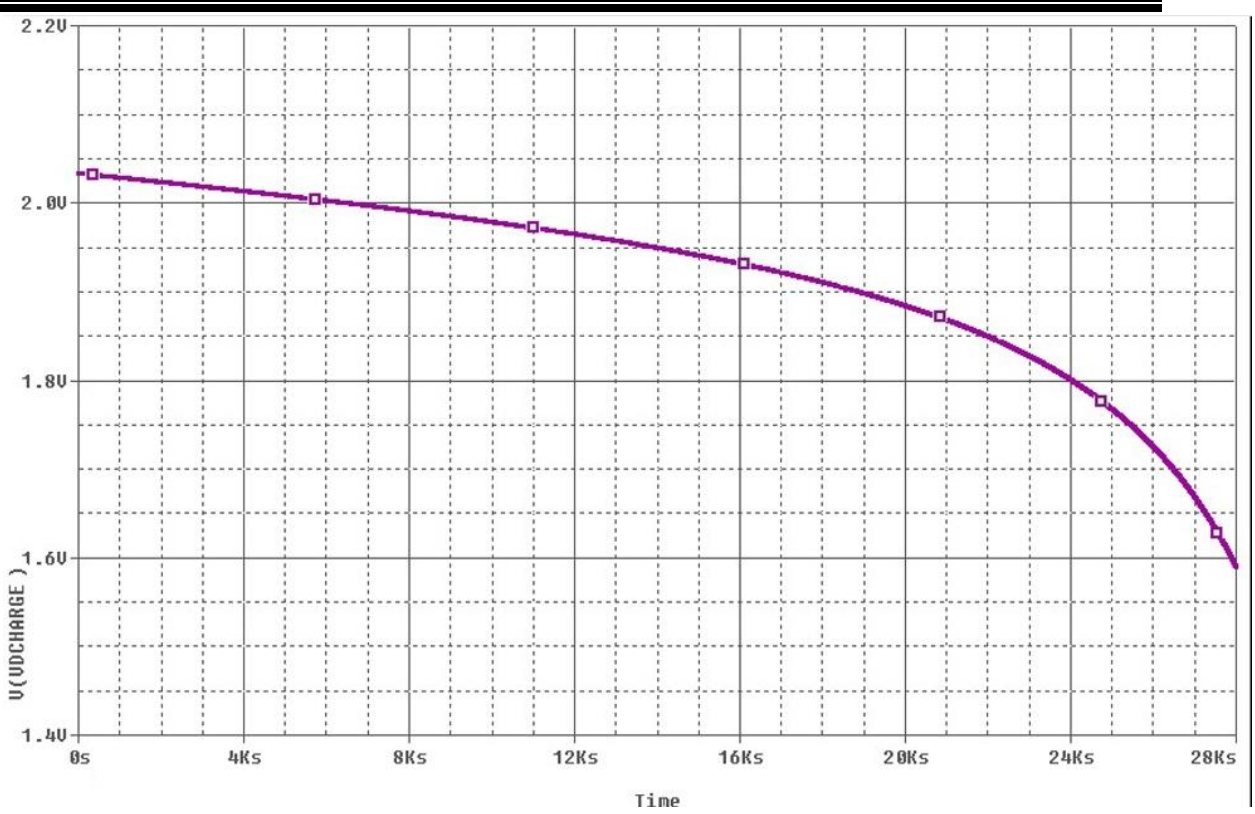


Figure 0.14 La courbe de la tension décharge de batterie I=10 avec T=10°

On note que le temps de décharge de la batterie est important, atteignant 28Ks(7.77h)

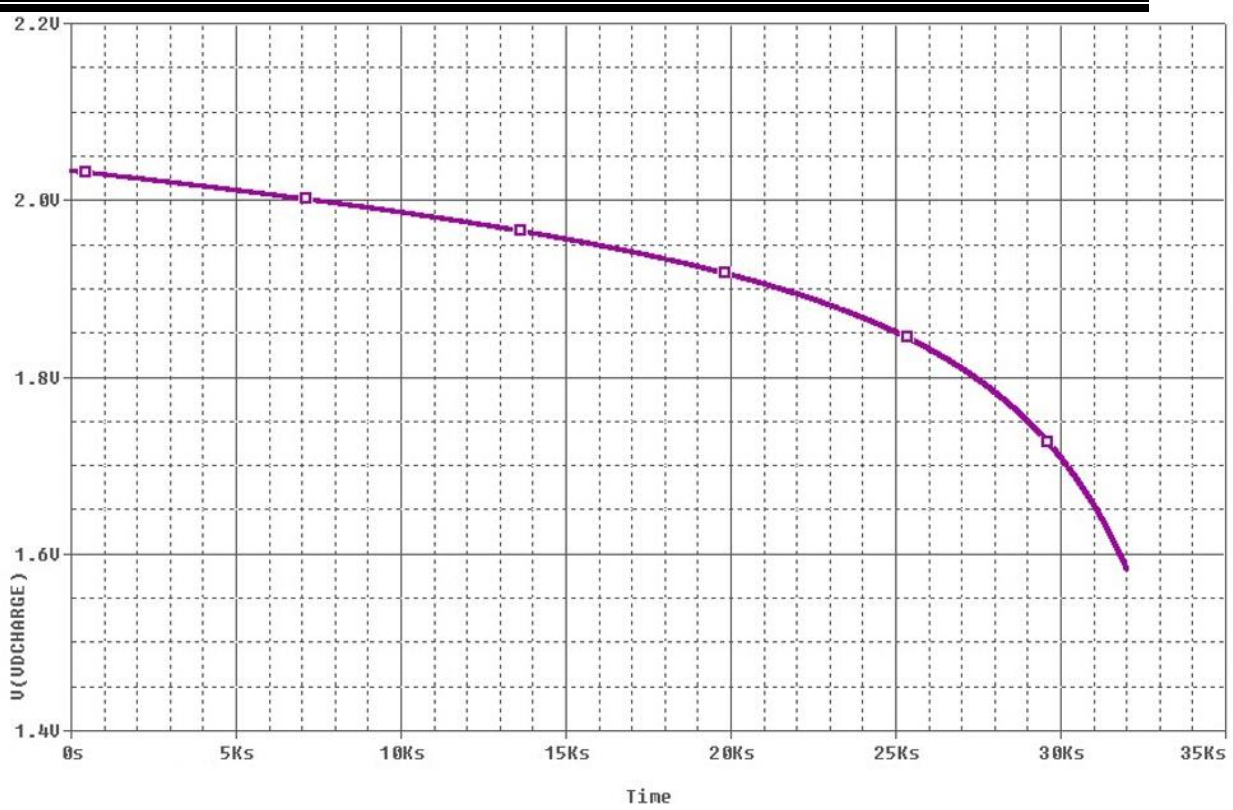


Figure 0.15 La courbe de la tension décharge de batterie I=10 avec T=15°

On remarque une légère augmentation du temps de décharge de la batterie, atteignant 34Ks (9.44h)

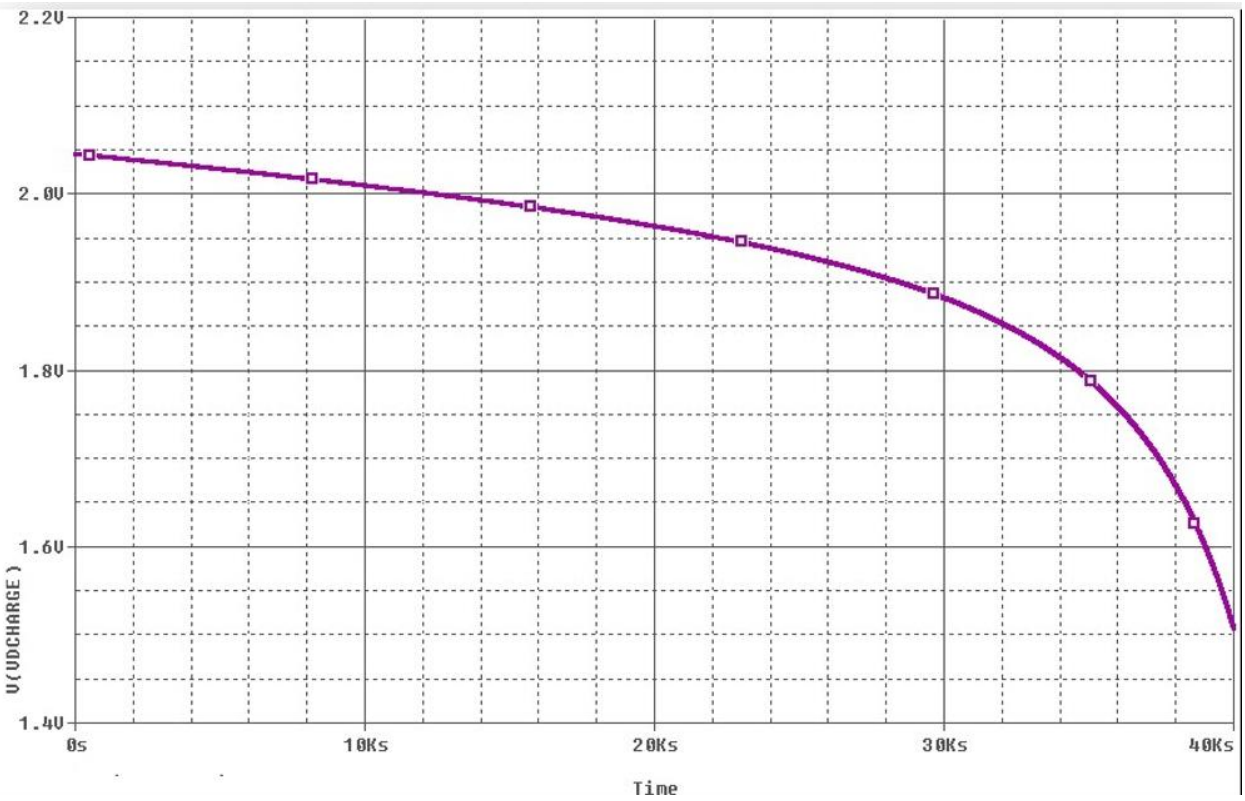


Figure 0.16 La courbe de la tension décharge de batterie I=10 avec T=50°

On remarque une légère augmentation plus faible que la précédente du temps de décharge de la batterie, atteignant 39Ks (10.83h)

Commentaire :

- Nous notons que la modification de la température n'affecte guère la période de décharge de la batterie, sauf dans une petite mesure contrairement à la modification du courant, où la période de décharge de la batterie diminue considérablement lorsque l'intensité du courant augmente.

I.15 Conclusion

Des tests expérimentaux réalisés au cours de ce travail nous ont permis de définir de Nouveaux coefficients du modèle de Coppetti afin de représenter plus précisément le Comportement de la batterie en charge et en décharge. L'analyse montre que l'application du modèle de Coppetti avec les coefficients d'origine montre de meilleures performances et voir L’effet de la température et la charge sur la tension de batterie et sa performance Générale Cette détermination a grandement amélioré la précision du modèle en réduisant Considérablement les écarts entre les valeurs estimées par le modèle et les données mesurées.

Conclusion générale

Grâce à ce travail, nous avons pu simuler le fonctionnement d'un modèle de cellule batterie « modèle Coppetti », qui est considéré comme le plus efficace parmi les nombreux modèles dont nous discutons dans ce mémoire «le modèle Shepherd, le modèle Manegon et le modèle Coppetti. » Après avoir défini le système énergétique photovoltaïque et évoqué ses différents composants et ces trois types de modélisation de stockage.

À l'aide de programme de simulation pspice, on a fait les courbes de charge de batterie pour chaque cas (cas de température constante et charge variable et vice versa) sont données séparément et combinées avec l'interprétation de ces dernières, et les résultats de chaque cas dans le mode de la charge- surcharge et de la décharge, ces différentes conditions sont étudiés ,pour savoir l’effet de température et charge sur la tension de batterie et la durée du temps de charge, et également sur la durée de vie de batterie.

Références

[001] BENSAOUDI Mohamed Samir et ARAR Salah Eddine - Mémoire de fin d'étude - Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque 2019/2020

[002] LADOUALI Khalil - Mémoire de fin d'étude - Système de pompage photovoltaïque domestique : Etude et simulation - 2020

[003] Samiha BELHOUT et Malika BOUCHAREB, Optimisation énergétique de chaine de conversion d'énergie photovoltaïque, Master 2020/2021

[004] website: totalenergie - Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque? Rôle et composition

[005] website:GROUP ROY ENERGIE - AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

[006] MECHALIKH Med Nadjib et HAMADA Charaf Eddine, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau, Master 2012/2013

[007] website: ijcaonline - An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems

[008] website: ijcaonline -Estimation of SOC and SOH of Li-Ion Batteries

[009] W. Merrouche, H. Tebibel et A. Malek, «Développement sous Proteus® d'un.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

[010] Shepherd, C.M.: 'Design of primary and secondary cells', J. Electrochem.,

1965, (112), pp. 657–664,

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

[12]Coppetti, J.B., Lorenzo, E., Chenlo, F.: 'A general battery model for PV system simulation', Prog. Photovolt., Res. Appl., 1993, (I), pp. 283–292,.

[013] PSPICE -About Pspice

[014] PSPICE -Analog Behavioral Modeling