

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LARECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE DE DJILALI BOUNAAMA \_ KHEMIS-MILIANA**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de la Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
En Vue de l'Obtention du Diplôme

**MASTER**

En

**ELECTROTECHNIQUE**

Option

**ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

THEME

***Etude des Scénarios Charge et Décharge d'une  
Batterie***

Réalisé par :

***OURADJ Mohamed Elhadi***

***OUADAH Abderrahmane***

Encadré par :

***Dr.LAYATE Zakaria***

***Année universitaire : 2019/2020***

# *Dédicace*

*Louange à dieu le puissant, prière et salut le*

*Prophète Mohamed que le salut sur lui.*

*Nous remercions dieu et grâce à lui que je vous arrivée à*

*Ce niveau.*

*Nous dédions ce modeste travail à:*

*Nos parents qui ont nous soutenir tout au long de nos études.*

*A nos frères et nos sœurs.*

*A toutes nos familles.*

*A Tous nos fidèles amis.*

*A tous nos professeurs depuis l'enfance à l'université*

*A toute la promotion 2019.*

*Notre dédicace va également à ceux qui ont participé de près ou de loin  
a l'aboutissement de nos efforts.*

# *Remerciements*

*Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à  
Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience,*

*Le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération*

*Particulière que nous remercions notre promoteur*

*Mr LAYATE pour la sollicitude avec laquelle*

*Il a suivi et guidé ce travail.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous font*

*L'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Nos sincères remerciements à tous les enseignants du*

*Université de Khemis-Miliana pour leurs soutiens et leurs*

*Aides.*

*Toute notre gratitude va à tous les enseignants*

*Qui ont contribué à notre formation.*

## ملخص:

قمنا في هذا العمل بدراسة سلوك البطارية عند تشغيلها من مصادر الطاقة المتجددة ، و ناقشنا في دراستنا أيضاً الخصائص المختلفة للبطاريات بالإضافة إلى الأنواع المختلفة للبطاريات, وأخيرا قدمنا المحاكاة باستخدام بطارية متصلة بلوحة شمسية مدعومة بوحدة تحكم و تتبع لنقطة التشغيل عند الطاقة القصوى المولدة .

## Résumé :

Dans ce travail nous avons étudié le comportement de la batterie lorsqu'elle est alimentée à partir de ces sources d'énergie renouvelables, et nous avons aussi évoqué dans notre étude les différentes caractéristiques des batteries en plus des différents types et modèles des batteries, et enfin nous avons introduit la simulation en utilisant Matlab/Simulink pour un modèle de batterie connecté à un panneau photovoltaïque alimenté par un contrôleur MPPT.

## Summary:

In this work we have studied the battery's behavior when it is powered by renewable energy sources, we have also mentioned in our study the different characteristics of batteries in addition to the different types and models of batteries, and finally we have introduced the simulation using MATLAB/Simulink for a battery model connected to a photovoltaic solar panel powered by MPPT controller.

## Liste des figures

### ***CHAPITRE I : Structure de fonctionnement de la batterie***

<b>Figure I.1.</b> Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle.....	5
<b>Figure I. 2.</b> Vue éclatée d'une batterie nickel-hydrure métallique .....	6
<b>Figure I. 3.</b> Vue éclatée d'une batterie lithium-ion.....	7
<b>Figure I.4.</b> Vue éclatée d'une batterie au plomb .....	8
<b>Figure I.5.</b> La meilleure zone d'utilisation de différentes technologies d'accumulateurs.....	8
<b>Figure I.6.</b> Description de l'intérieur d'une batterie. ....	10
<b>Figure I.7.</b> Principe d'un accumulateur électrochimique .....	11
<b>Figure I.8.</b> La batterie lors de déchargement.....	12
<b>Figure I.9.</b> La batterie lors de chargement.....	12

### ***CHAPITRE II : Modélisation de la batterie***

<b>Figure II.1.</b> Modèle électrique d'une batterie .....	16
<b>Figure II.2.</b> Modèle Matlab/Simulink de batterie .....	18
<b>Figure II.3.</b> Paramètres caractéristiques de la batterie dans les deux régimes (charge & décharge) .....	19

### ***CHAPITRE III : Critère de choix de la batterie***

<b>Figure III.1.</b> Les paramètres importants de la batterie .....	21
<b>Figure III.2.</b> Valeur minimale et maximale de chaque batterie.....	22
<b>Figure III.3.</b> L'influence de température sur le déchargement.....	23
<b>Figure III.4.</b> La capacité de la batterie selon leur type .....	24
<b>Figure III.5.</b> La profondeur de décharge d'une batterie solaire .....	27
<b>Figure III.6</b> Exemple d'efficacité aller-retour .....	28

### ***CHAPITRE IV : Stockage appliqué aux énergies renouvelables qui nécessitent batterie***

<b>Figure IV.1.</b> Cellule photovoltaïque.....	31
<b>Figure IV.2.</b> Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium.....	33
<b>Figure IV.3.</b> Stockage de l'énergie solaire .....	34
<b>Figure IV.4.</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT ....	34
<b>Figure IV.5.</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	35

<b>Figure IV.6.</b> Modèle de cellule créé par Matlab/Simulink.....	36
<b>Figure IV.7.</b> Caractéristique de courant en fonction de voltage .....	37
<b>Figure IV.8.</b> Caractéristique de puissance en fonction de voltage.....	37
<b>Figure IV.9.</b> Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	39
<b>Figure IV.10.</b> Schéma électrique d'un hacheur boost.....	38
<b>Figure IV.11.</b> Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost .....	39
<b>Figure IV.12.</b> Modèle de cellule créé par Matlab/Simulink.....	39
<b>Figure IV.13.</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT ..	40
<b>Figure IV.14.</b> Principe de la commande MPPT .....	41
<b>Figure IV.15.</b> Modèle de la Commande MPPT .....	41
<b>Figure IV.16.</b> Hacheur contrôlé par MPPT.....	42
<b>Figure IV.17.</b> Système PV et régulateur .....	43
<b>Figure IV.18.</b> Modèle PID construit par Matlab/Simulink .....	44
<b>Figure IV.19.</b> Modèle de batterie crée par Matlab/Simulink.....	45
<b>Figure IV.20.</b> Modèle complet de batterie chargé par un panneau solaire .....	45
<b>Figure IV.21.</b> Les valeurs d'irradiations utilisées.....	46
<b>Figure IV.22</b> La tension de panneau solaire (VPV) .....	46
<b>Figure IV.23</b> Le courant de panneau solaire (iPV) .....	47
<b>Figure IV.24</b> Puissance de panneau solaire (PPV).....	47
<b>Figure IV.25</b> Tension de l'hacheur (V_BUs) .....	48
<b>Figure IV.26</b> Courant de l'hacheur iBoost.....	48
<b>Figure IV.27</b> Tension de l'hacheur (V Bus et réf) .....	49
<b>Figure IV.28</b> L'état de charge de batterie (SOC) .....	50
<b>Figure IV.29</b> Le courant de batterie (iB) .....	50
<b>Figure IV.30</b> La tension de la batterie (VB) .....	51
<b>Figure IV.31</b> La puissance de panneau solaire (PPv).....	51

## *Liste des tableaux*

### ***CHAPITRE I : structure de fonctionnement de la batterie***

**Tableau I.1.** Caractéristiques des différents types de batteries ..... 9

### ***CHAPITRE IV : Chapitre IV : stockage appliqué aux énergies renouvelables qui nécessitent batterie***

**Tableau IV.1.** Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques..... 32

**Tableau IV.2.** Caractéristique électrique du module photovoltaïque 1Slotch 1STHP-215-P..36

**Tableau IV.3.** Caractéristique de la batterie..... 42

**Tableau IV.4.** Les paramètres du contrôleur  $K_P$ ,  $K_i$  et  $K_d$  sur un système en boucle fermée..44

## Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### **CHAPITRE I : structure de fonctionnement de la batterie**

<b>I.1.</b> Introduction.....	3
<b>I.2.</b> Classification des batteries.....	3
<b>I.2.1.</b> Batteries primaires.....	3
<b>I.2.2.</b> Batteries secondaires .....	3
<b>I.2.2.1.</b> Batteries Nickel-Cadmium.....	4
<b>I.2.2.2.</b> Batteries nickel-hydrure métallique .....	5
<b>I.2.2.3.</b> Batteries lithium-ion .....	6
<b>I.2.2.4.</b> Batteries plomb-acide .....	7
<b>I.3</b> Description d'une Batterie .....	9
<b>I.4.</b> Principe de fonctionnement d'une batterie.....	10
<b>I.5.</b> Mécanisme de charge et décharge .....	11
<b>I.5.1.</b> Mécanisme de décharge .....	11
<b>I.5.2.</b> Mécanisme de charge .....	12
<b>I.6.</b> Grandeurs caractéristiques des Batteries .....	12
<b>1.6.1.</b> Rendement faradique .....	12
<b>1.6.2.</b> Etat de charge (Soc) et profondeur de décharge (DOD) .....	13
<b>1.6.3</b> Autodécharge des batteries .....	13
<b>I.7.</b> Les phénomènes de vieillissement.....	13
<b>I.7.1.</b> La sulfatation de l'électrode négative .....	14
<b>I.7.2.</b> La corrosion de l'électrode positive .....	14
<b>I.8.</b> Conclusion .....	14

### **CHAPITRE II : Modélisation de la batterie**

<b>II.1.</b> Introduction .....	15
<b>II.2.</b> Aspects théoriques de la modélisation .....	15



II.3 Modélisation d'une batterie par un circuit électrique équivalent .....	15
II.4 Modèles mathématiques des batteries .....	16
II.4.1. Modèle de la batterie nickel-cadmium (NiCd) et batterie nickel-hydrure métallique (NiMH)16	
II.4.2. Le modèle mathématique de la batterie lithium-ion (Li-Ion) .....	17
II.4.3. Le modèle mathématique des batteries acide-plomb .....	17
II.5 Simulation .....	18
II.6. Résultats et discussion .....	18
II.7. Conclusion .....	19

### **CHAPITRE III : Critère de choix de la batterie**

III.1. Introduction .....	20
III.2. Facteurs à considérer lors du choix d'une batterie .....	20
III.2.1. Batteries rechargeables / non rechargeables .....	21
III.2.2. Disponibilité de l'espace.....	21
III.2.3. Tension de fonctionnement du système.....	22
III.2.4. Température de fonctionnement .....	23
III.2.5. Capacité de la batterie - Puissance et énergie .....	24
III.2.6. Chimie de la Batterie .....	25
III.2.7. Coût de la batterie .....	25
III.2.8. Durée de vie de la batterie .....	25
III.3. Critères de choix d'une batterie pour un système de production d'énergie renouvelable .....	25
III.3.1. Critères de choix d'une batterie solaire .....	26
III.3.1.1. La tension de batterie .....	26
III.3.1.2. Capacité et puissance.....	26
III.3.1.3. Profondeur de décharge (DOD) .....	27
III.3.1.4. Nombre de cycle .....	27
III.3.1.5. Autonomie nécessaire.....	28
III.3.1.6. Efficacité aller-retour .....	28
III.3.2. Avantage d'utiliser la batterie lithium-ion comme batterie solaire.....	29

III.3.2.1. Profondeur de décharge plus élevée ( <i>DOD</i> ) .....	29
III.3.2.2. Longue durée de vie.....	29
III.3.2.3. Densité d'énergie plus élevée .....	29
III.3.2.4. Haute efficacité .....	30
III.3.2.5. Moins d'entretien.....	30
III.4. Conclusion.....	30

**CHAPITRE IV : Chapitre IV : stockage appliqué aux énergies renouvelables qui nécessitent batterie**

IV.1. Introduction .....	31
IV.2. Définition de l'énergie solaire.....	31
IV.3. Différents types de cellules photovoltaïques .....	32
IV.4. Principe de fonctionnement .....	33
IV.5. Stockage de l'énergie solaire .....	33
IV.6. Modélisation des composants du système.....	34
IV.6.1. Modélisation de cellule photovoltaïque .....	35
IV.6.1.1. Circuit équivalent et modèle mathématique.....	35
IV.6.1.2. Modèle cellule photovoltaïque de Matlab/Simulink .....	36
IV.6.1.3. Caractéristique de puissance et courant en fonction de voltage .....	37
IV.6.2. Modélisation d'hacheur .....	37
IV.6.2.1. Hacheur boost.....	38
IV.6.2.2. Modèle Hacheur créé de MATLAB SIMULINK.....	39
IV.6.3. Association PV- hacheur .....	40
IV.6.3.1. Principe de La Commande MPPT .....	40
IV.6.3.2. Modèle de La Commande MPPT crée par Matlab/Simulink.....	41
IV.6.3.3. Modèle d'association PV-hacheur contrôlé par la méthode MMPT .....	42
IV.6.4. Modélisation de stockage .....	42

<b>IV.6.4.1.</b> Contrôle de batterie .....	43
<b>IV.6.4.2.</b> Importance du régulateur.....	43
<b>IV.6.4.3.</b> Le régulateur PID .....	43
<b>IV.6.4.4.</b> Modèle PID construire par Matlab/Simulink .....	44
<b>IV.6.4.5.</b> Modèle de batterie crée par MATLAB SIMULINK .....	45
<b>IV.7.</b> Modèle complet de simulation .....	45
<b>IV.8.</b> Résultats et discussion .....	46
<b>IV.9.</b> Conclusion.....	52
Conclusion Générale.....	53

# **INRODUCTION GENERALE**

---

### 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 paysans 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 [1].

L'énergie renouvelable est l'énergie qui est collectée à partir de ressources renouvelables comme la lumière du soleil, le vent, la pluie, les marées, les vagues et la chaleur géothermique. 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.[26]

Les sources d'énergie renouvelables peuvent être utilisées pour produire de l'électricité avec moins d'impacts environnementaux. Il est possible de produire de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables sans produire de CO<sub>2</sub>, la principale cause du changement climatique.[33]

Bien évidemment, l'énergie verte présente des avantages non négligeables, notamment environnementaux et économiques. Cependant, elle n'est pas parfaite. A son problème d'intermittence s'ajoute celle de la météo, surtout pour le photovoltaïque et l'éolienne. Par conséquent, à cause de cette intermittence on a besoin de stocker l'énergie lorsque sa disponibilité, généralement on utilise des batteries Lithium-ion qui est devenu le partenaire privilégié des centrales photovoltaïques, éoliennes et hybrides.[34]

A notre époque, les batteries sont le meilleur moyen d'avoir une énergie meilleure et durable, car le stockage d'énergie peut aider à remédier à l'intermittence de l'énergie solaire et éolienne ; il peut également, dans de nombreux cas, répondre rapidement à de fortes fluctuations de la demande, rendant le réseau plus réactif et réduisant la nécessité de construire des centrales électriques de secours.

L'efficacité d'une installation de stockage d'énergie est déterminée par la rapidité avec laquelle elle peut réagir aux changements de la demande, le taux d'énergie perdue dans le processus de

stockage, sa capacité globale de stockage d'énergie et la rapidité avec laquelle elle peut être rechargée.[27]

Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire est de chercher les modèles mathématiques les plus précis pour modéliser une batterie et d'étudier les différents scénarios de charge et de décharge d'une batterie

Au premier chapitre, nous faisons une description générale des batteries. Les différents types de batteries ainsi que leur principe de fonctionnement.

Le second chapitre présente la modélisation d'une batterie pour prédire son comportement dans certaines conditions de fonctionnement.

Le troisième chapitre est de donner les critères que nous prenons comme base pour choisir la batterie parfaite pour un projet.

Le quatrième chapitre est consacré à observer le comportement de charge et de décharge d'une batterie accrochée à un panneau solaire.

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

# **CHAPITRE I**

## **Structure de fonctionnement de la batterie**

---

### I.1. Introduction

Une batterie est un dispositif de stockage d'énergie constitué d'au moins deux cellules électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique stockée en énergie électrique et sont utilisées comme source d'énergie.

Ce sont des appareils importants et largement utilisés dans notre vie quotidienne, en général, presque tous les appareils fonctionnant à l'électricité utilisent des piles comme principal dispositif de stockage. Donc, dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu général des batteries et de leurs fonctionnalités.

### I.2. Classification des batteries

Les batteries peuvent généralement être classées en différentes catégories et types, allant de la composition chimique, la taille, le facteur de forme et les cas d'utilisation, mais sous tous ces deux types principaux de batteries [2]:

1. Batteries primaires
2. Batteries secondaires

#### I.2.1. Batteries primaires

Elles sont dans l'incapacité d'être chargées électriquement. On les utilise qu'une seule fois, après on doit les changer car les réactions chimiques qui les gouvernent sont irréversibles, sans oublier leur prix relativement élevé ; tout de même les batteries primaires sont très commodes pour certaines applications : lampe à torche, appareillage d'instrumentation, jouets et lanceurs dans le domaine spatial.

Les avantages principaux d'une batterie primaire sont : une énergie spécifique très élevée, durée de vie appréciable, aucune maintenance à prévoir, et une facilité d'utilisation [3]:

#### I.2.2. Batteries secondaires

Les batteries secondaires sont des batteries à cellules électrochimiques dont les réactions chimiques peuvent être inversées en appliquant une certaine tension à la batterie dans le sens inverse. Aussi appelées batteries rechargeables, les batteries secondaires, contrairement aux piles primaires, peuvent être rechargées après épuisement de l'énergie de la pile.

Ils sont généralement utilisés dans des applications à forte consommation et dans d'autres scénarios où cela sera soit trop cher, soit impossible d'utiliser des batteries à charge unique.



Les batteries secondaires de petite capacité sont utilisées pour alimenter les appareils électroniques portables comme les téléphones portables et autres gadgets et appareils tandis que les batteries robustes sont utilisées pour alimenter divers véhicules électriques et d'autres applications à forte consommation comme le nivellement de la charge dans la production d'électricité.

Les batteries secondaires peuvent être classées en plusieurs autres types en fonction de leur chimie.

Il existe essentiellement quatre principales compositions chimiques pour les batteries rechargeables [2]:

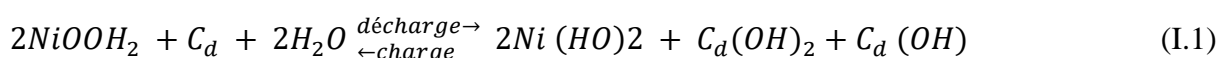
1. Lithium-ion (Li-ion)
2. Nickel Cadmium (Ni-Cd)
3. Hydrure de nickel-métal (Ni-MH)
4. Plomb-acide

### I.2.2.1. Batteries Nickel-Cadmium

Cette batterie utilise de l'oxyde de nickel dans son électrode positive (cathode), un composé de cadmium dans son électrode négative (anode) et une solution d'hydroxyde de potassium comme électrolyte.

La batterie au nickel-cadmium est rechargeable, elle peut donc fonctionner à plusieurs reprises. Une batterie au nickel-cadmium convertit l'énergie chimique en énergie électrique lors de la décharge et reconvertit l'énergie électrique en énergie chimique lors de la recharge.

Dans une batterie *NiCd* complètement déchargée, la cathode contient de l'hydroxyde de nickel  $[Ni(OH)_2]$  et de l'hydroxyde de cadmium  $[Cd(OH)_2]$  dans l'anode. Lorsque la batterie est chargée, la composition chimique de la cathode est transformée et l'hydroxyde de nickel se transforme en Oxhydroxyde de nickel  $[NiOOH]$ . Dans l'anode, l'hydroxyde de cadmium est transformé en cadmium. Lorsque la batterie est déchargée, le processus est inversé, comme indiqué dans la formule suivante [4]:



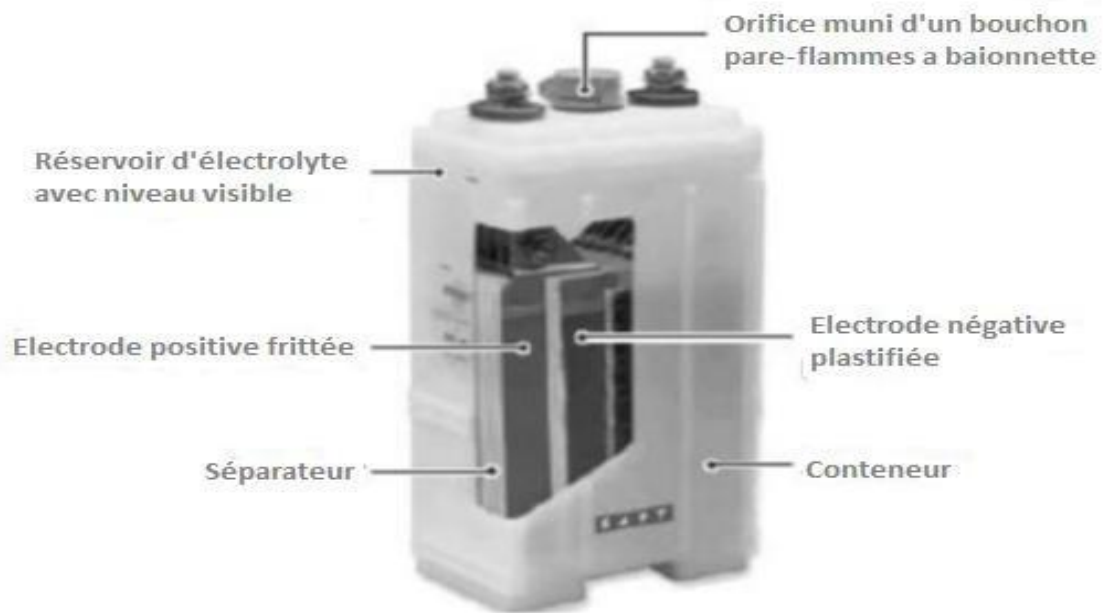


Figure I. 1. Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle

### I.2.2.2. Batteries nickel-hydrure métallique

L'hydrure de nickel-métal (Ni-MH) est un autre type de configuration chimique utilisé pour les batteries rechargeables. La réaction chimique à l'électrode positive des batteries est similaire à celle de la cellule nickel-cadmium (*NiCd*), les deux types de batteries utilisant le même hydroxyde de nickel (*NiOOH*). Cependant, les électrodes négatives en nickel-hydrure métallique utilisent un alliage absorbant l'hydrogène au lieu du cadmium qui est utilisé dans les batteries *NiCd*.



Les batteries NiMH trouvent leur application dans les appareils à forte consommation en raison de leur capacité élevée et de leur densité d'énergie. Une batterie NiMH peut posséder deux à trois fois la capacité d'une batterie NiCd de même taille, et sa densité d'énergie peut approcher celle d'une batterie lithium-ion [2].

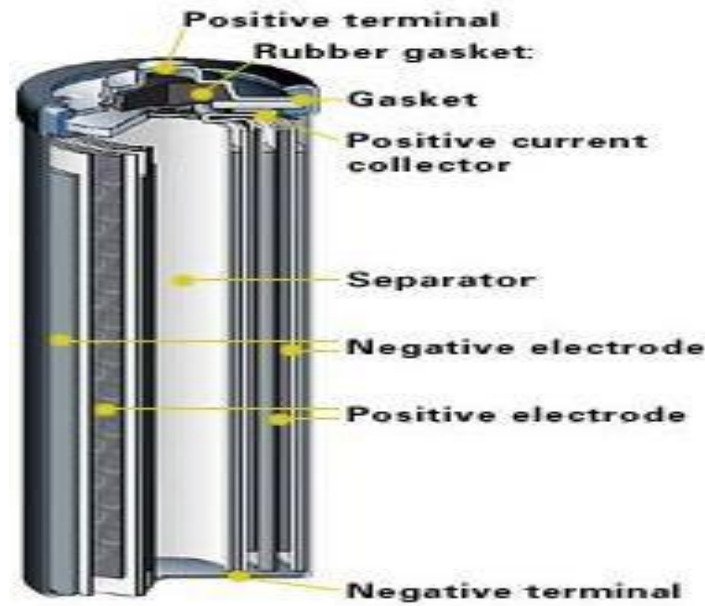


Figure I. 2. Vue éclatée d'une batterie nickel-hydrure métallique

### I.2.2.3. Batteries lithium-ion

Les batteries lithium-ion sont extrêmement populaires ces jours-ci. Vous pouvez les trouver sur les ordinateurs portables, les PDA, les téléphones portables et les iPods. Ils sont si courants parce qu'ils font partie des batteries rechargeables les plus énergétiques disponibles.

Dans une batterie lithium-ion, l'électrode positive est en oxyde de lithium-cobalt ou  $LiCoO_2$ . L'électrode négative est en carbone. Lorsque la batterie se charge, les ions de lithium se déplacent à travers l'électrolyte de l'électrode positive à l'électrode négative et l'attachent au carbone. Pendant la décharge, les ions lithium retournent au  $LiCoO_2$  à partir du carbone [5].



Les batteries au lithium-ion possèdent généralement une densité d'énergie élevée, peu ou pas d'effet mémoire et une faible autodécharge par rapport aux autres types de batteries.

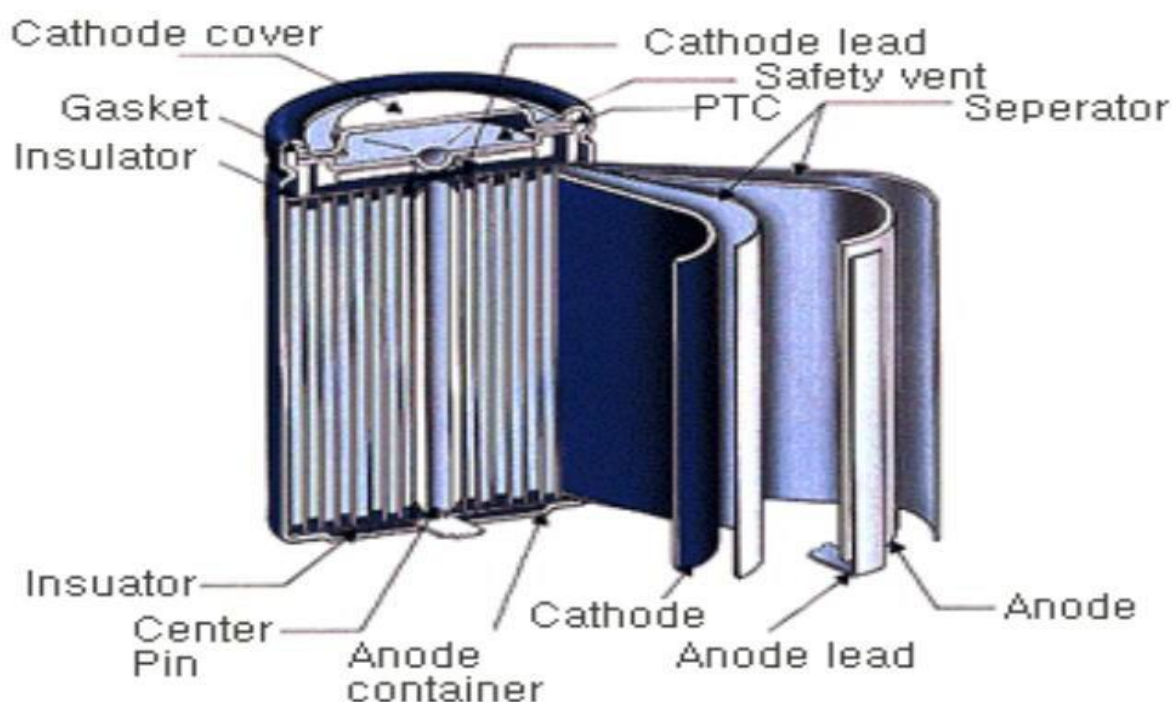
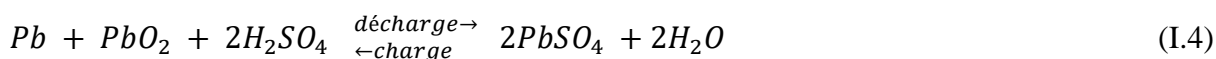


Figure I. 3.Vue éclatée d'une batterie lithium-ion

### I.2.2.4. Batteries plomb-acide

Une batterie plomb-acide consiste en une électrode négative en plomb spongieux ou poreux. Le plomb est poreux pour faciliter la formation et la dissolution du plomb. L'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb. Les deux électrodes sont immergées dans une solution électrolytique d'acide sulfurique et d'eau. Dans le cas où les électrodes entrent en contact l'une avec l'autre par le mouvement physique de la batterie ou par des changements d'épaisseur des électrodes, une membrane électriquement isolante mais chimiquement perméable sépare les deux électrodes. Cette membrane empêche également les courts-circuits électriques à travers l'électrolyte. Les batteries au plomb stockent de l'énergie par la réaction chimique réversible illustrée ci-dessous.

La réaction chimique globale est:



Les batteries au plomb sont le type de batterie le plus couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Bien que les batteries au plomb aient une faible densité d'énergie, une efficacité modérée et des exigences de maintenance élevées, elles ont également une longue durée de vie et des coûts faibles par rapport aux autres types de batteries. L'un des avantages singuliers des batteries au plomb-acide est qu'elles sont la forme de batterie la plus

singuliers des batteries au plomb-acide est qu'elles sont la forme de batterie la plus couramment utilisée pour la plupart des applications de batteries rechargeables (par exemple, pour démarrer des moteurs de voiture) et qu'elles disposent donc d'une base technologique bien établie et mature [6].

Si ce type d'accumulateur n'est pas correctement recyclé, il pose le problème de rejet de métaux lourds dans l'environnement (rejet autorisé de  $[Pb+2] \ll 1ppm$ ).

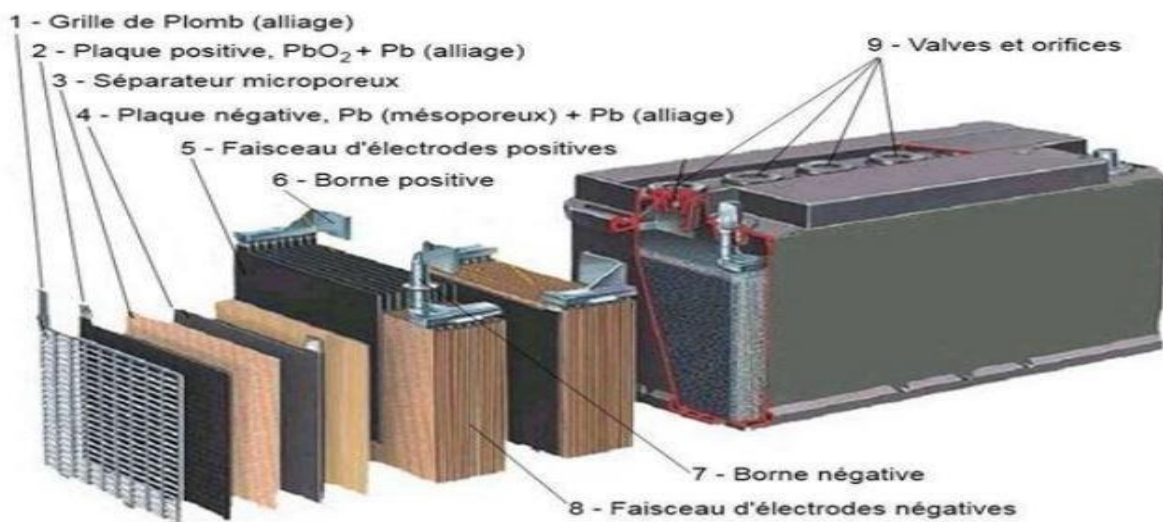


Figure I. 4. Vue éclatée d'une batterie au plomb

Chacune de ces batteries à sa zone de meilleur ajustement et l'image ci-dessous est pour aider à choisir entre elles.

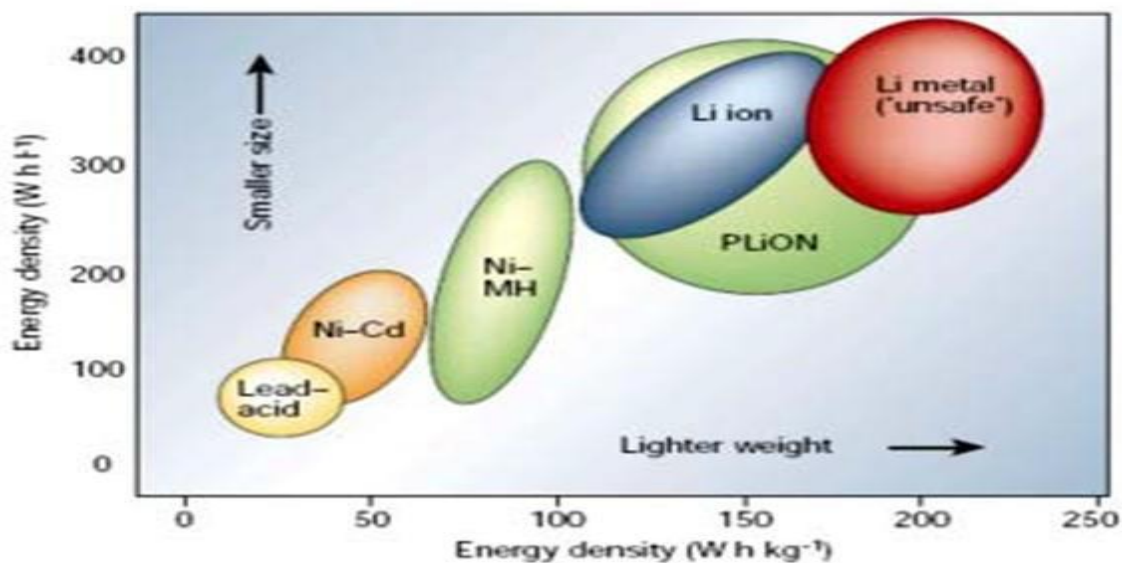


Figure I. 5. La meilleure zone d'utilisation de différentes technologies d'accumulateurs

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

	<i>Plomb-acide</i>	<i>NiCd</i>	<i>NiMH</i>	<i>Li-ion</i>
<i>Tension</i>	2 V	1.25 V	1.25 V	3.6 V
<i>Cycle de vie</i>	>1000	1500	500	500 à 1000
<i>Temps de charge</i>	8 à 16 h	2 à 4 h	2 à 4 h	2 à 4 h
<i>Autodécharge</i>	5%	20%	20%	10%
<i>Température d'utilisation</i>	-35 à 60 °C	-20 à 60 °C	-20 à 60 °C	-20 à 60 °C
<i>Energie spécifique</i>	30 à 50 Wh/kg	45 à 80 Wh/kg	60 à 120 Wh/kg	110 à 190 Wh/kg
<i>Energie volumique</i>	60-100 Wh/L	80-150 Wh/L	220-330 Wh/L	190-330 Wh/L
<i>Rendement</i>	70-90%	80%	70%	90%
<i>Coûts €/kWh</i>	50-150	250-400	300-700	900-2000

**Tableau I.1. 1.Caractéristiques des différents types de batteries**

La batterie *Li-ion* présentent l'énergie spécifique le plus élevée (jusqu'à 190 Wh/kg) avec une tension nominale supérieure à 3V contre 1,2V pour les batteries Ni-Cd et *Ni-MH*. Ces dernières rivalisent cependant avec les batteries *Li-ion* en termes de densité d'énergie volumique. Les batteries *Ni-MH* ont l'inconvénient de s'auto-décharger rapidement, mais sont très peu toxiques et ne posent pas de problème de sécurité majeur.

En revanche, l'utilisation des batteries *Li-ion*, avec cathodes à base d'oxydes de cobalt, imposent des contraintes de sécurité importantes liées à une faible stabilité thermique. Le coût des batteries *Li-ion* est par ailleurs plus élevé que les autres technologies [1].

### **I.3 Description d'une Batterie**

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

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

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

En règle générale, une technologie de batterie est définie par le couple des matériaux d'électrodes. Au besoin, le type d'électrolyte peut également être précisé [7].

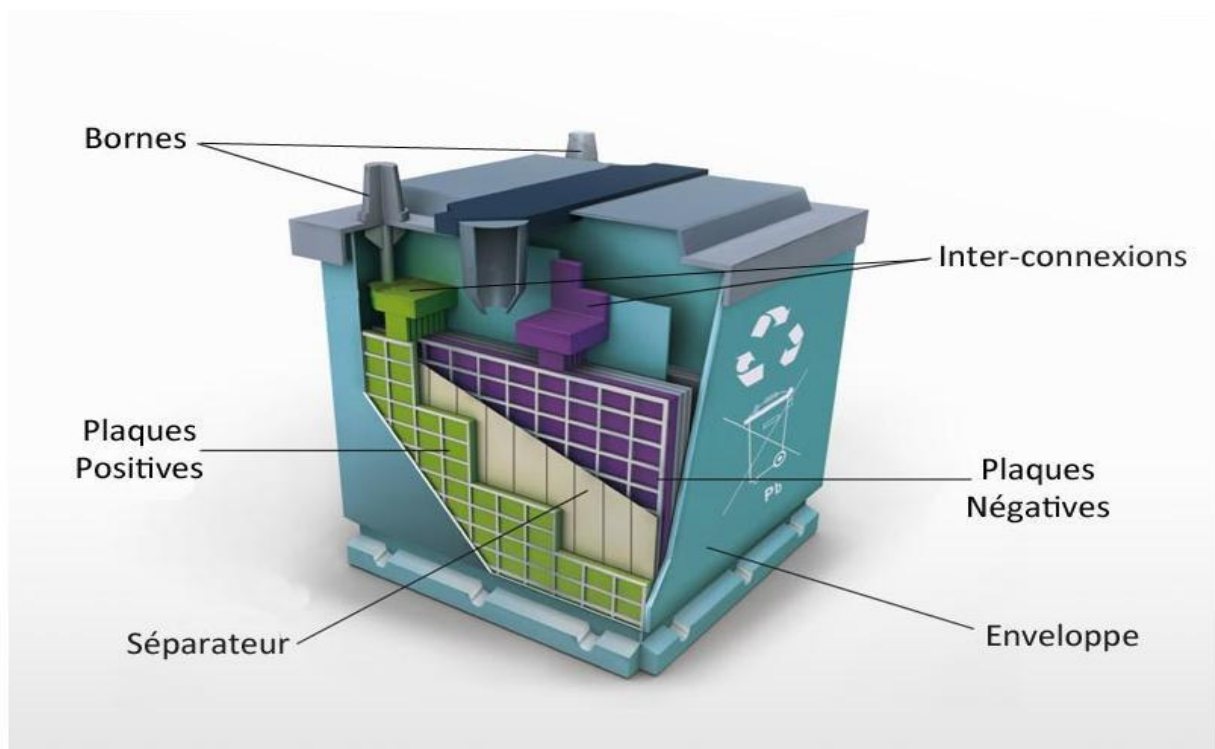


Figure I. 6. Description de l'intérieur d'une batterie.

### I.4. Principe de fonctionnement d'une batterie

Les accumulateurs sont constitués de deux électrodes, l'une positive (la cathode) et l'autre négative (l'anode) séparée par un électrolyte (figure I.7). Aux deux interfaces interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes. On désigne par cellule deux électrodes plongées dans un électrolyte.

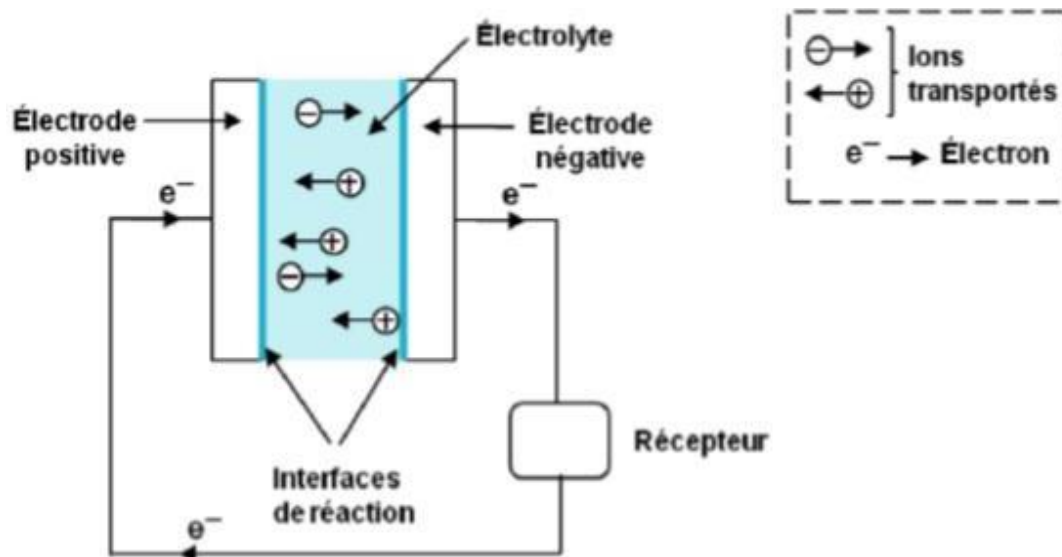


Figure I. 7. Principe d'un accumulateur électrochimique.

À l'anode, électrode négative en décharge, s'opère une réaction d'oxydation selon la Relation  $M1 \rightarrow M1n^+ + ne^-$  de potentiel redox  $E1$ ,  $M1$  étant l'espèce active de l'anode. Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction  $M2n^+ + 2e^- \rightarrow M2$ , de potentiel redox  $E2$ ,  $M2$  étant l'espèce active de la cathode. L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit  $M1 + M2n^+ \rightarrow M2 + M1n^+$ . Le transport engendre une force électromotrice  $E = E2 - E1$  [8].

## I.5. Mécanisme de charge et décharge

### I.5.1. Mécanisme de décharge

Lors de la décharge l'électrode négative émet des électrons par la réaction d'oxydation provoquée par la liaison avec l'oxygène. D'un autre côté, une réaction de réduction se produit en absorbant les électrons à l'électrode positive. En d'autres termes, les électrons excédentaires générés à l'électrode négative se déplacent pour compenser les électrons manquants par la réaction de réduction qui se produit à l'électrode positive.



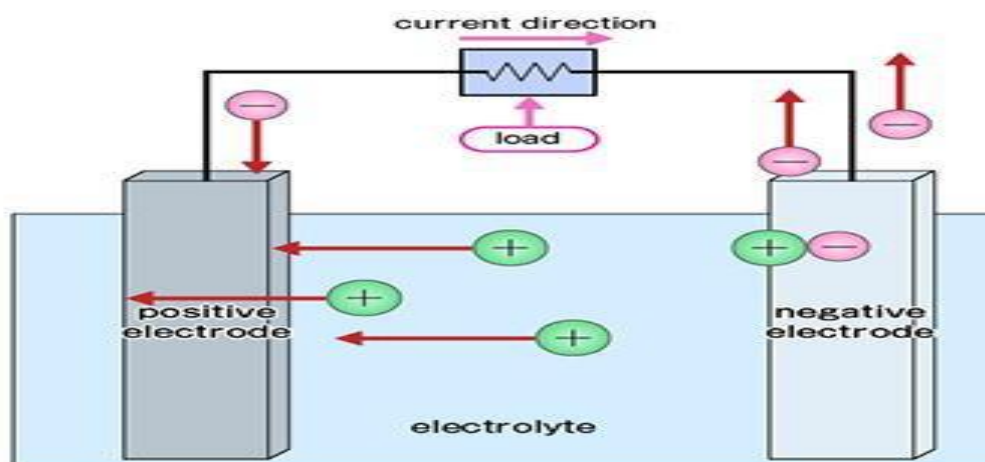


Figure I. 8. La batterie lors de déchargement

### I.5.2. Mécanisme de charge

D'autre part, la charge envoie de l'électricité aux batteries de stockage pour réutilisation. Une réaction d'oxydation se produit à l'électrode positive et une réaction de réduction se produit à l'électrode négative par décharge. Les électrons envoyés par l'alimentation externe provoquent une réaction électrochimique inverse dans la batterie rechargeable.

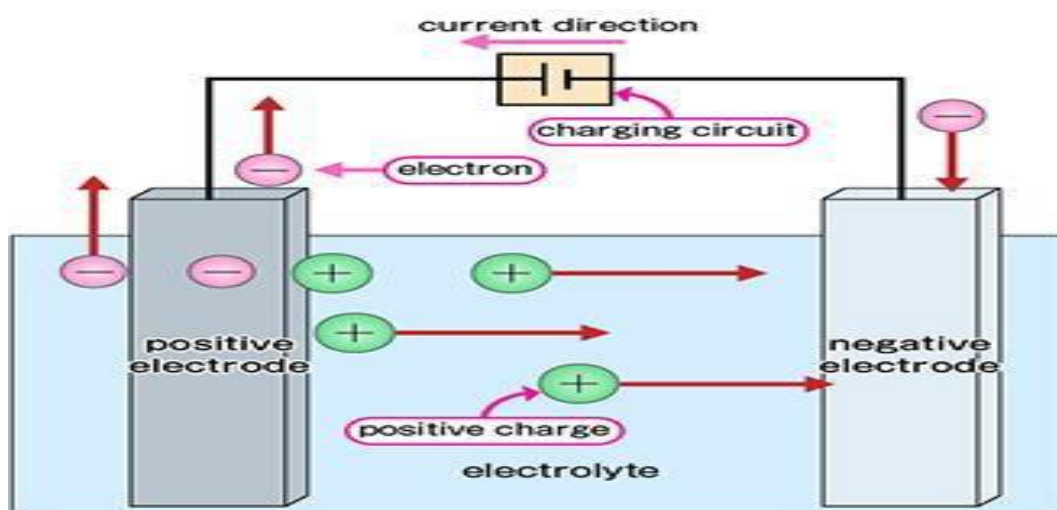


Figure I. 9. La batterie lors de chargement

## I.6. Grandeurs caractéristiques des Batteries

### 1.6.1. Rendement faradique

Le rendement faradique représente l'efficacité de la charge d'une batterie. Il est le rapport de la capacité de la batterie sur la quantité de charge fournie à la batterie lors de la charge complète. A cause des réactions secondaires à l'intérieur de la batterie, la quantité décharge

fournie à la batterie n'est pas entièrement récupérable. Ainsi, le rendement faradique peut être inférieur à 100% et varie en fonction de la technologie de la batterie. Par exemple, le rendement faradique est proche de 100% pour les batteries Li-ion et autour de 80~90% pour les batteries *NiMH*[9].

### 1.6.2. Etat de charge (Soc) et profondeur de décharge (DOD)

L'état de charge (State of Charge en anglais "*Soc*") est le rapport de la charge disponible en Ampère-heure (*Ah*) sur la capacité de la batterie. Par exemple, quand la batterie est pleinement chargée, l'état de charge (*Soc*) vaut 100% et quand la batterie est complètement déchargée, le *Soc* vaut 0%. La définition du *Soc* n'est pas unique, parce que la capacité réelle ou la capacité nominale peuvent être utilisées au dénominateur dans la formule du *Soc* [10].

$$SOC = \frac{\text{charge disponible}}{\text{capacité de la batterie}} \text{ en (Ah)} \quad (I.5)$$

La profondeur de décharge (Depth of Discharge en anglais "*DOD*") est aussi un indicateur de niveau de charge de la batterie. Son expression est donnée par [10]:

$$DOD = 1 - SOC \quad (I.6)$$

### 1.6.3. Autodécharge des batteries

L'autodécharge se produit toujours, même si la batterie n'est connectée à rien. Le taux d'autodécharge dépend de la température ambiante et du type de batterie. À des températures supérieures à 55°C, l'autodécharge est encore plus rapide. Ces températures peuvent être atteintes si la batterie est stockée dans un garage ou une remise lorsqu'il fait chaud. Une des idées reçues concernant le stockage des batteries est que, si on laisse une batterie sur un sol en béton, elle se déchargera rapidement. Cela était vrai il y a plus de trente-cinq ans, lorsque les boîtiers de batterie étaient en cascadeur. En raison de l'humidité du béton, ce type de batterie se déchargeait directement dans le sol en béton. Toutefois, les boîtiers des batteries modernes sont en plastique de polypropylène et peuvent être stockés sur du béton sans crainte d'autodécharge excessive [9].

## I.7. Les phénomènes de vieillissement

La durée de vie d'un accumulateur est atteinte lorsque sa capacité potentielle est tombée à 80% de sa capacité nominale. La raison de cette perte de capacité est la lente altération des divers éléments composant l'accumulateur et plus particulièrement les électrodes et l'électrolyte.

La diminution de la surface des électrodes par modification de la répartition de la matière active (déformation, apparition de précipité) qui affaiblit également la porosité de l'électrode. L'inaccessibilité des matériaux actifs et aggravée par la sulfatation de l'électrode [11].

### I.7.1. La sulfatation de l'électrode négative

Ce phénomène, qui apparaît principalement sur l'électrode négative, traduit l'apparition de sulfate de plomb résiduel qui n'est plus consommé lors des réactions chimiques [12]. Son origine peut être la stratification de l'électrolyte conduisant à une augmentation de la densité d'acide, le déplacement de la matière active, la faible tension de la grille négative consécutive du cycle de l'oxygène. Ses conséquences sont la création d'une couche isolante électrique et moins poreuse aux ions qui freine la diffusion de l'acide. La matière active devient moins accessible et la capacité récupérable diminue.

La sulfatation peut être fortement augmentée par une élévation de température à la plaque négative (oxydation de la surface par le cycle de l'oxygène qui dégage de la chaleur).

### I.7.2. La corrosion de l'électrode positive

Toutes les batteries plomb ont une durée de vie finie à cause de la corrosion des grilles positives, particulièrement dans les applications où elles sont en flottant. La grille positive et la zone conductrice est le support pour la matière positive. Sa corrosion augmente la résistance électrique de la grille (de 5 à 30%) et une augmentation de son volume, qui associées à une modification de la distribution de matière active, conduit à une perte du contact électrique avec le gel. L'augmentation de la masse de la grille positive ou la diminution de sa corrosion augmente la durée de vie de la batterie. La grille négative n'est pas sujette à la corrosion [1].

## I.8. Conclusion

De ce premier chapitre on peut conclure que:

- Une batterie c'est un Dispositif contenant une cellule électrique ou une série de cellules électriques stockant de l'énergie qui peut être converti en énergie électrique.
- On désigne deux types de batterie, primaire qui est n'est rechargeable et secondaire qui on peut recharger et utilise plusieurs fois.
- L'énergie que nous obtenons des batteries résulte de réactions électrochimiques principalement l'oxydation et la réduction.

# **CHAPITRE II**

## **Modélisation de la batterie**

---

### II.1. Introduction

La modélisation consiste à traduire les phénomènes qui se produisent dans des systèmes physiques par une représentation souvent mathématique. La modélisation des sources électrochimiques est intéressante pour plusieurs raisons. En effet, un modèle complet de la batterie permet de prédire son comportement dans certaines conditions de fonctionnement, d'adapter le type de batterie à l'application pour une utilisation optimale de l'énergie, de comprendre les dégradations dues à des conditions particulières de fonctionnement, d'interpréter l'influence de certains paramètres ou profils de charge ou décharge sur les performances de la batterie [13].

Dans ce chapitre, nous regarderons une modélisation des différents types de batteries mentionnés dans le chapitre 1 puis nous ferons une simulation de la batterie lithium-ion à l'aide de Matlab/Simulink

### II.2. Aspects théoriques de la modélisation

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur du système de batterie. Il permet aussi de résoudre le choix de la taille du système à installer. L'étude de la modélisation du système de stockage électrique est considérée par plusieurs auteurs très complexes [13].

### II.3. Modélisation d'une batterie par un circuit électrique équivalent

La cellule électrochimique se comporte globalement comme une impédance sous une excitation donnée. On représente alors son fonctionnement par un circuit électrique formé de sources de tension, de résistances, de capacités et éventuellement d'inductances qui laissent passer le courant avec la même amplitude et la même phase que la vraie cellule sous cette excitation [9].

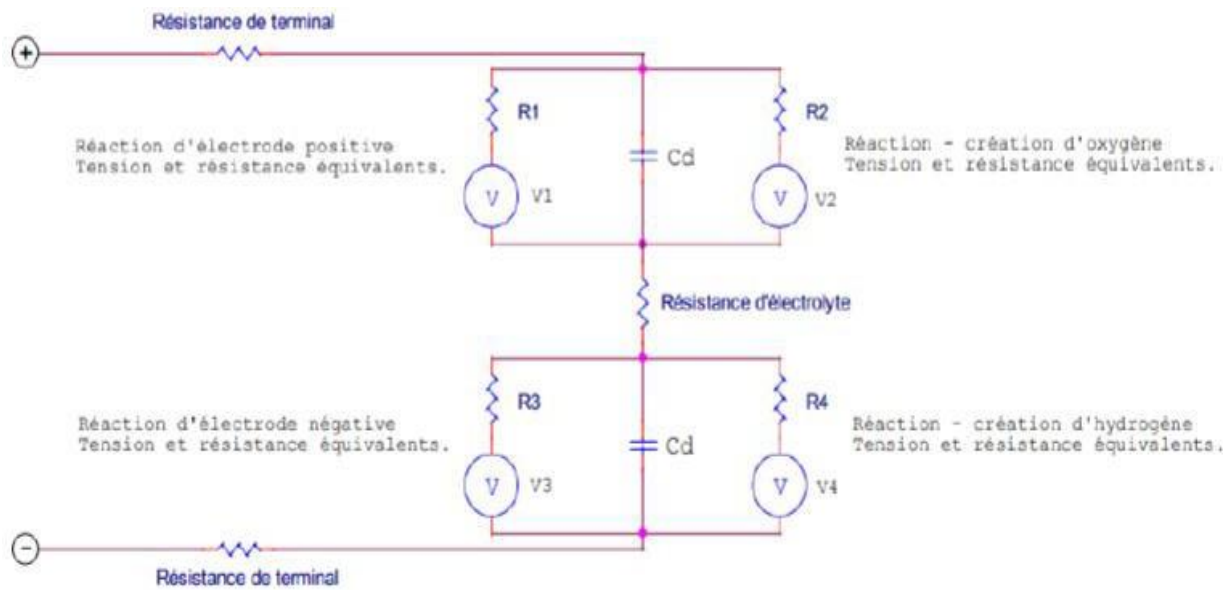


Figure II. 1. Modèle électrique d'une batterie [9]

## II.4. Modèles mathématiques des batteries

On peut généraliser tous les modèles mathématiques des batteries de décharge et charge dans ces deux équations [9]:

$$f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f(s) \quad (II.1)$$

$$f_c(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1-Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f(s) \quad (II.2)$$

Avec :

$f_d$  : Equation de décharge

$f_c$  : Equation de charge

$f(s)$  : Equation caractéristique pour chaque type de batterie

### II.4.1. Modèle de la batterie nickel-cadmium (NiCd) et batterie nickel-hydrure métallique (NiMH)

- Model de charge ( $i^* > 0$ )

$$f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (II.3)$$

- **Model de décharge ( $i^* < 0$ )**

$$fc(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1-Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (II.4)$$

#### II.4.2. Le modèle mathématique de la batterie lithium-ion (Li-Ion)

- **Model de décharge ( $i^* > 0$ )**

$$fd(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (II.5)$$

- **Model de charge ( $i^* < 0$ )**

$$fc(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1-Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (II.6)$$

#### II.4.3. Le modèle mathématique des batteries acide-plomb :

- **Model de décharge ( $i^* > 0$ )**

$$fd(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (II.7)$$

- **Model de charge ( $i^* < 0$ )**

$$fc(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1-Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (II.8)$$

Avec :

- $E_{batt}$ : Voltage non-linéaire de la batterie en  $V$ .
- $E_0$ : constant de voltage de la batterie en  $V$ .
- $Exp(s)$ : Zone exponentielle dynamique en  $V$ .
- $Sel(s)$ : Représente le mode de la batterie  $Sel(s) = 0$  la batterie en mode décharge et  $Sel(s)=1$  la batterie en mode charge
- $K$ : Constante de polarisation en  $Ah^{-1}$
- $i^*$ : Courant à basse fréquence en  $A$
- $i$ : Courant de batterie en  $A$
- $it$ : Capacité extraite en  $Ah$
- $Q$ : Capacité maximale de la batterie en  $Ah$
- $A$ : Tension exponentielle en  $V$
- $B$ : Capacité exponentielle en  $Ah^{-1}$

## II.5 Simulation

Nous avons présenté les équations et les caractéristiques de charge et de décharge de tous les types de batterie et maintenant pour une meilleure compréhension du comportement de la batterie lors de la charge et de la décharge nous allons faire une simulation à l'aide d'une batterie lithium-ion.

Le modèle de batterie construit avec MATLAB SIMULINK a les paramètres suivants :

Type : *Lithium-Ion*

Voltage Nominal : 100 V

Capacité nominale : 10 Ah

Etat de charge initial: 100 %

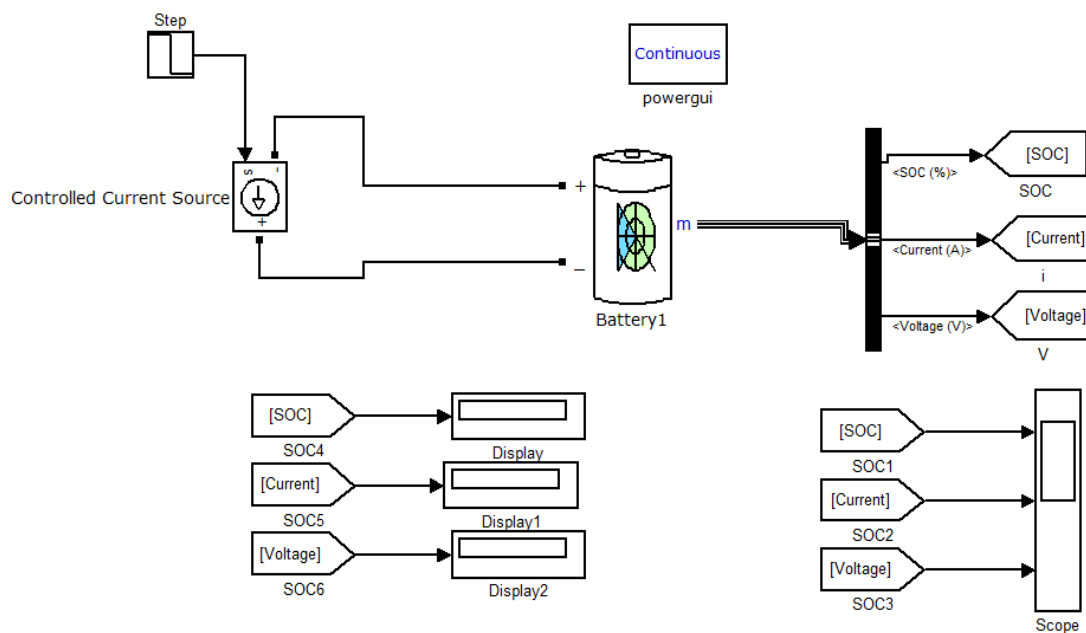


Figure II. 2. Modèle Matlab/Simulink de batterie

## II.5. Résultats et discussion

Après la simulation du modèle ci-dessus, nous obtenons les chiffres suivants:



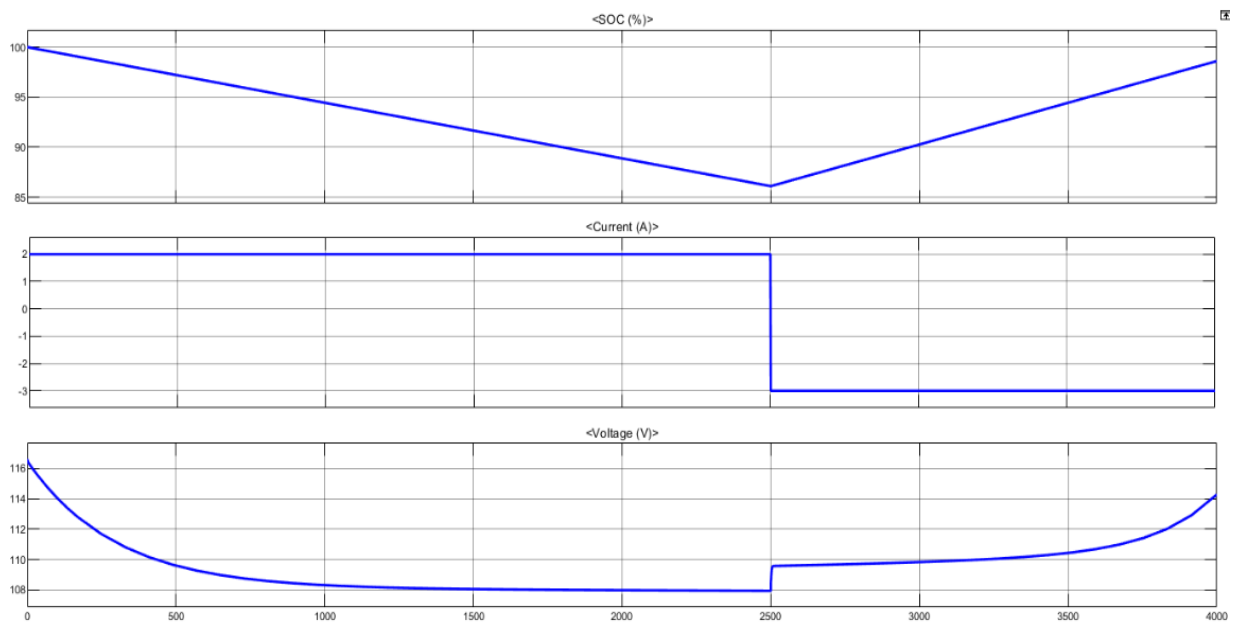


Figure II. 3. Paramètres caractéristiques de la batterie dans les deux régimes (charge & décharge)

A partir des résultats de la simulation de la figure (II.7). On peut observer un cycle de charge et décharge.

Pour l'état de charge (*SOC*) on peut voir que dans la première période qui est la décharge, la *SOC* diminue parce que la batterie est complètement chargée, la deuxième période qui est la charge, la *SOC* augmente à nouveau indiquant que la source de courant est entrain de recharger la batterie

Le courant reste stable dans la première période et sa diminution indique le début de la phase de charge signifiant que la source de tension est en train d'approvisionnement la batterie.

Pour la tension, on remarque qu'au début, la tension diminue car la résistance interne de la batterie est faible après cela, une zone où la tension est constante et cette phase dure plus longtemps que la première. Dans cette phase l'influence de la résistance interne reste constante.

Finalement, une chute de tension. Au début de la charge après cela, la tension augmente à nouveau.

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une modélisation pour les types de batteries que nous avons déjà mentionnés dans le premier chapitre, puis nous avons fait une simulation en utilisant une batterie lithium-ion pour comprendre son comportement pendant la charge et la décharge.

## **CHAPITRE III**

### ***Critère de choix de la batterie***

---

### III.1. Introduction

Les batteries sont les unités de stockage d'énergie de nombreux appareils que nous rencontrons chaque jour ; ils sont disponibles sous différentes formes, tailles, paramètres et formes. Nous pouvons généralement les trouver utilisés dans l'automobile, les alimentations de secours, les appareils mobiles, les ordinateurs portables, et de nombreux autres appareils. Mais tous les appareils ne peuvent pas utiliser le même type de batterie ; chaque appareil a ses propres spécifications et exigences d'alimentation et nous aurons besoin d'un guide de sélection pour choisir la bonne batterie pour notre application.

Dans ce chapitre;

- Nous examinons donc les facteurs à prendre en compte lors du choix d'une batterie.
- Nous donnerons également un exemple pour le choix d'une batterie pour les applications d'énergie renouvelable.

### III.2. Facteurs à considérer lors du choix d'une batterie

En choisissant une batterie pour notre application, nous devons connaître les paramètres importants impliqués dans son fonctionnement. La réalité à propos de la batterie est qu'il n'y a pas de type de batterie commun pour toutes les applications car aucune batterie n'est parfaite. Si nous voulons utiliser un paramètre de la batterie, nous devrions être en mesure de gérer l'épuisement des autres paramètres. Par exemple, si nous voulons que notre batterie fournisse beaucoup d'énergie pour notre application, la résistance interne de la cellule doit être minimisée, ce qui n'est possible qu'en augmentant la surface de l'électrode. Cela augmente également les composants inactifs tels que les collecteurs de courant et les aides conductrices, de sorte que la densité d'énergie est échangée pour gagner en puissance. Afin de fournir exactement ce que l'on veut dans notre application, il faut renoncer à quelque chose pour gagner l'autre dans une batterie. Les paramètres importants de la batterie sont indiqués dans l'image suivante [14].

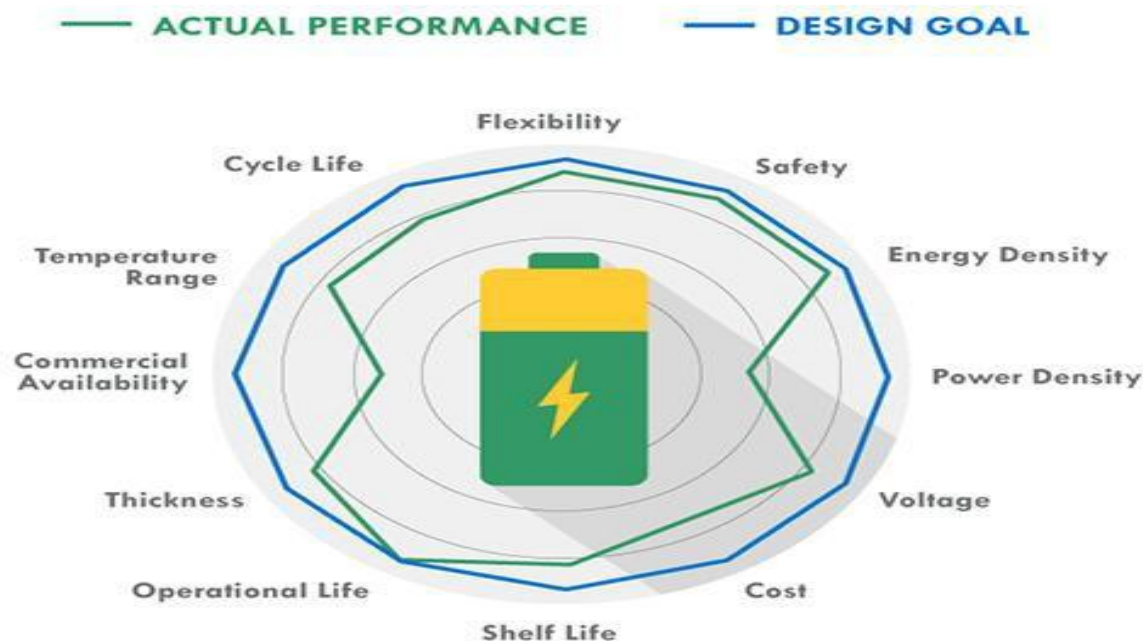


Figure III. 1. Les paramètres importants de la batterie

### III.2.1. Batteries rechargeables / non rechargeables

L'un des premiers choix dans la sélection des batteries est de décider si l'application nécessite des batteries primaires (à usage unique) ou secondaires (rechargeables). Pour la plupart, c'est une décision facile pour le concepteur. Les applications avec une utilisation intermittente occasionnelle (comme un avertisseur de fumée, un jouet ou une lampe de poche) et les applications jetables dans lesquelles la charge devient impossible justifient l'utilisation d'une batterie principale. Les appareils auditifs, les montres (les smart watches étant une exception), les cartes de vœux et les stimulateurs cardiaques en sont de bons exemples. Si la batterie doit être utilisée en continu et pendant de longues périodes, comme dans un ordinateur portable, un téléphone portable ou une montre intelligente, une batterie rechargeable est plus appropriée [15].

### III.2.2. Disponibilité de l'espace

Les batteries sont disponibles en différentes formes et tailles telles que les batteries bouton, les batteries cylindriques, les batteries de poche et les batteries prismatiques. La taille de la batterie compte vraiment pour rendre un appareil facilement portable. Les tailles standard disponibles sont des piles AA, AAA et 9V adaptées aux appareils portables. Les batteries au lithium (de type pochette) sont généralement préférées dans les applications où il y a moins d'espace mais plus de puissance requise. Si la puissance requise est inférieure, les piles bouton

peuvent également être envisagées car elles sont très compactes et les plus petites des types de batteries [14].

### III.2.3. Tension de fonctionnement du système

La tension de fonctionnement de la batterie est une autre considération importante et est dictée par les matériaux d'électrode utilisés. Une classification utile des batteries ici consiste à considérer les batteries aqueuses ou à base d'eau par rapport aux produits chimiques à base de lithium. Le plomb-acide, le carbone de zinc et l'hydrure de nickel-métal utilisent tous des électrolytes à base d'eau et ont des tensions nominales allant de 1,2 à 2V. Les batteries au lithium, en revanche, utilisent des électrolytes organiques et ont des tensions nominales de 3,2 à 4V (à la fois primaire et secondaire).

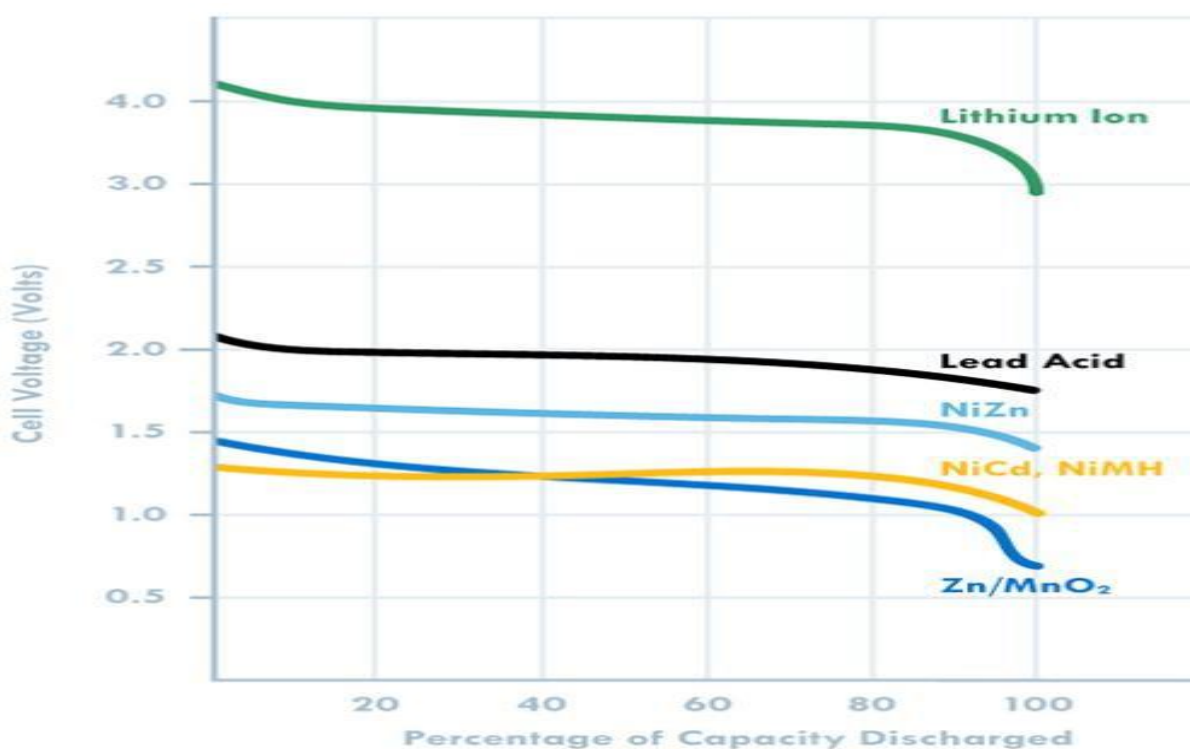


Figure III. 2. Valeur minimale et maximale de chaque batterie

De nombreux composants électroniques fonctionnent à une tension minimale de 3V. La tension de fonctionnement plus élevée des chimies à base de lithium permet d'utiliser une seule cellule plutôt que deux ou trois cellules à base aqueuse en série pour constituer la tension souhaitée.

Une autre chose à noter est que certaines chimies de batterie telles que Zinc  $MnO_2$  ont une courbe de décharge en pente, tandis que d'autres ont un profil plat. Cela influence la tension de coupure (Figure III.2) [15].

### III.2.4. Température de fonctionnement

La performance de la batterie peut être considérablement modifiée par la température, par exemple, la batterie qui fonctionne avec des électrolytes aqueux ne peut pas être utilisée dans des conditions de température inférieures à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  car l'électrolyte aqueux peut se congeler sous  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de la même manière, les batteries au lithium peuvent fonctionner jusqu'à  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  mais les performances peuvent être diminuées.

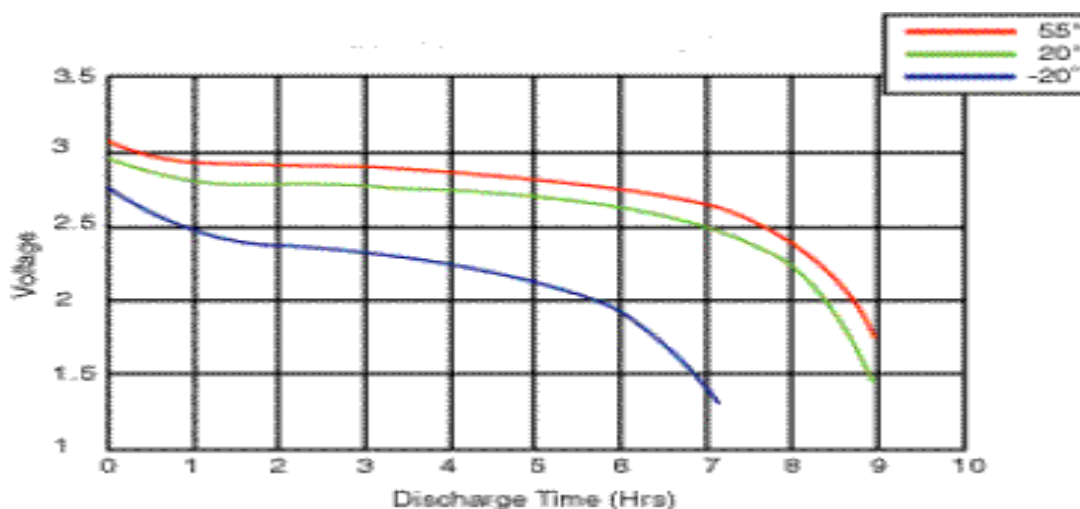


Figure III. 3. L'influence de température sur le déchargement

On peut dire que de tous les facteurs environnementaux, la température est celui qui influe le plus sur le comportement de la batterie en termes de charge et décharge. L'explication réside dans les réactions électrochimiques dépendantes de la température qui se produisent à l'interface électrode / électrolyte, qui peut être considérée comme le cœur de la batterie.

Si la température baisse, le rendement de la réaction sur l'électrode décroît également. En supposant que la tension de la batterie reste constante, le courant de décharge diminue, il en va de même pour la puissance restituable de la batterie.

L'effet opposé apparaît si la température s'accroît, la puissance restituable de la batterie augmente alors.

La température a donc un effet sur la vitesse des réactions chimiques dans l'électrolyte et son électrode poreuse.

Une augmentation de la température accélère les réactions, une baisse de la température les ralentit. Les performances de charge/décharge de la batterie peuvent ainsi être affectées [16].

### III.2.5. Capacité de la batterie - Puissance et énergie

La puissance de la batterie détermine la durée de fonctionnement d'une batterie. La puissance (capacité) de la batterie est exprimée en Wattheures (Wh). Le Wattheure est calculé par:

$$P(Wh) = U \times I \quad (III.1)$$

Avec :

$U$ : Tension de la batterie exprimée [V].

$I$ : Quantité de courant qu'une batterie peut fournir pendant un certain temps exprimé en ampère [Ah ou mAh].

La capacité d'une batterie nous indiquera la puissance qu'elle peut fournir à une application. Par exemple, considérons une batterie de voiture 12V, 10Ah, la capacité réelle de la batterie est de 120Wh (12V x 10Ah), mais dans une batterie d'ordinateur portable de 3,6V qui a la même dissipation de 10Ah aura une capacité de 36Wh (3,6V \* 10Ah). Dans l'exemple, vous pouvez voir même s'ils ont le même Ah, la quantité d'énergie qu'une batterie de voiture peut stocker est trois fois plus élevée qu'une batterie d'ordinateur portable.

### Capacity of batteries in Watts-hours



Figure III. 4. La capacité de la batterie selon leur type

Les batteries à haute puissance offrent toujours une capacité de décharge plus rapide à des taux de vidange élevés comme les outils électriques ou les applications de batterie de démarrage automobile, la plupart des batteries haute puissance auront une faible densité d'énergie [14].

### III.2.6. Chimie de la Batterie

Les batteries sont classées comme batteries au plomb-acide, batteries *Ni-Cad* (*nickel-cadmium*), batteries *Ni-MH* (*hydrure métallique de nickel*), batteries *Li-Ion* (*lithium-ion*). Chaque type a une chimie spécifique qui joue un rôle important dans leurs performances. Bien que nous l'ayons montré dans le tableau (I.1), chaque batterie a des avantages et des inconvénients, donc il n'y a pas de chimie de batterie parfaite, seulement la meilleure chimie de batterie pour un projet Particulier.

### III.2.7. Coût de la batterie

Dans la plupart des produits électroniques portables, la batterie sera l'un des articles les plus chers de la nomenclature, d'où la plupart du temps, elle affectera le coût global des applications électroniques. Par conséquent, nous devons connaître nos besoins et le budget du produit, puis choisir la bonne batterie pour votre produit.

Il y a des moments où nous pouvons avoir besoin de laisser passer une batterie avec de meilleures caractéristiques de performance parce que l'application est très sensible au coût. Cela est particulièrement vrai pour le volume élevé d'applications jetables [15].

### III.2.8. Durée de vie de la batterie

La durée de vie de la batterie est la durée pendant laquelle une batterie peut rester en stockage sans perdre sa capacité. Même lorsqu'elles ne sont pas utilisées, les batteries vieillissent. Le vieillissement de la batterie est généralement affecté par trois facteurs: les produits chimiques actifs présents dans les cellules, la température de stockage et la durée d'inactivité.

Pendant le stockage, les batteries se déchargent spontanément et leur contenu est sujet à la décomposition. Des températures plus élevées accélèrent l'autodécharge de la batterie et des températures plus froides réduisent le taux d'autodécharge. L'électrolyte, un produit chimique dans les batteries contenant une concentration élevée d'ions, peut pénétrer à travers les joints. Cela fait sécher la batterie et devient inutilisable [17].

## III.3. Critères de choix d'une batterie pour un système de production d'énergie renouvelable

Le stockage d'énergie par batterie, généralement des batteries lithium-ion, est devenu le partenaire privilégié des centrales photovoltaïques, éoliennes et hybrides, en particulier dans les zones non interconnectées à un réseau solide. Mais afin de choisir une batterie pour le



stockage d'énergie renouvelable, nous avons respecté certains critères pour garantir que la batterie est la plus adaptée.

Dans la partie suivante, nous allons regarder l'exemple de l'énergie solaire et sur quels critères nous devrions-nous tenir pour choisir une batterie solaire.

### III.3.1. Critères de choix d'une batterie solaire

Lors de l'installation, comme nous considérons nos options de batterie solaire (stockage), nous rencontrons de nombreuses spécifications de produits complexes. Les plus essentiels à utiliser lors de l'évaluation sont :

- La tension
- La capacité et la puissance de la batterie
- Profondeur de décharge (*DOD*)
- Nombre de cycle
- Autonomie nécessaire
- Efficacité aller-retour

#### III.3.1.1. La tension de batterie

Il existe des batteries solaires fonctionnant en *2Volt*, *6Volt*, *12Volt* (les plus utilisées) et *24Volt*.

La capacité (en Ampère heure) est inversement proportionnelle à la tension, cela veut dire que les batteries ayant la capacité de stockage la plus élevée sont les batteries *2V*. On trouve ainsi des batteries solaires avec une tension de *12V* en général limitées à *220Ah* tandis que les batteries avec une tension de *2V* montent jusqu'à *3000Ah*.

L'inconvénient avec ces batterie solaires *2V* c'est qu'elles doivent être mises en séries pour obtenir une tension de *12V* utilisables par la majorité des appareils et leur prix est également très élevé. Le poids est lui aussi assez dissuasif, une batterie *2V* de *3000A* pèse quelques *235kg* [18].

#### III.3.1.2. Capacité et puissance :

La capacité d'une batterie solaire est la quantité totale d'électricité que la batterie peut stocker; il est mesuré en kilowattheures (*kWh*). Nous pouvons connaître la quantité d'énergie électrique qu'une batterie stockera en calculant les wattheures. Pour ce faire, les volts (*V*) de la batterie sont multipliés par les ampères-heures (*AH*) et divisés par 1000, soit  $P = V * I / 1000$ .

La plupart des batteries solaires domestiques sont conçues et fabriquées de manière à pouvoir être empilées, ce qui signifie que les batteries peuvent être combinées en série ou en parallèle pour obtenir une capacité supplémentaire [19].

### III.3.1.3. Profondeur de décharge (*DOD*)

La plupart des batteries solaires sont conçues pour conserver une certaine charge à tout moment en raison de leur composition chimique. Si 100% de la charge d'une batterie est complètement utilisée, sa durée de vie sera considérablement réduite. Par conséquent, la profondeur de décharge (*DOD*) d'une batterie signifie simplement la quantité de capacité de la batterie qui a été utilisée par rapport à la capacité globale de la batterie. La plupart des fabricants spécifient toujours le *DOD* maximal pour les performances optimales d'une batterie solaire [19].

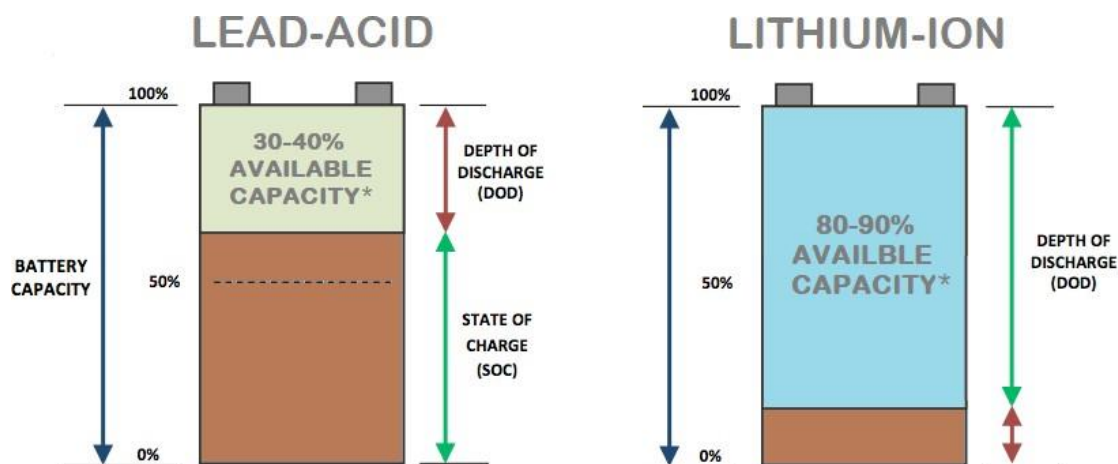


Figure III. 5. La profondeur de décharge d'une batterie solaire

### III.3.1.4. Nombre de cycle

Les batteries doivent pouvoir être chargées et déchargées un grand nombre de fois. C'est là que la notion de cycle prend son importance car c'est l'unité utilisée pour estimer la durée de vie d'une batterie solaire. Un cycle se compose d'une phase de charge et d'une phase de décharge [7].

Le nombre de cycles ou la durée de vie dépend de la profondeur de décharge de la batterie, sachant qu'une décharge trop importante réduit la durée de vie de la batterie solaire, le meilleur compromis est une décharge de 30% pour une durée de vie accrue [18].

On peut donner les estimations suivantes par type de batterie:

- La batterie au plomb ouverte = 400 à 500 cycles
- La batterie *AGM* = 600 à 900 cycles
- La batterie *GEL* = 800 à 1300 cycles
- La batterie *GEL* Long Life = 600 à 2400 cycles

### III.3.1.5. Autonomie nécessaire

L'autonomie de l'installation photovoltaïque est le nombre de jours pendant lesquels les batteries contiennent l'énergie nécessaire à la consommation, sans avoir besoin d'être rechargées. L'autonomie moyenne d'une installation sur site isolé est de 3 à 5 jours. Pour trois jours d'autonomie, nous aurons donc besoin d'une batterie capable de stocker  $3000Wh$  si le besoin énergétique quotidien est de  $1000Wh$ . Avec une tension de  $12V$ , la capacité sera de  $250Ah$ . Pour respecter la profondeur maximale de décharge de 40%, une capacité d'environ  $420Ah$  sera nécessaire [7].

### III.3.1.6. Efficacité aller-retour

L'efficacité aller-retour d'une batterie représente la quantité d'énergie qui peut être utilisée en pourcentage de la quantité d'énergie nécessaire pour la stocker. Par exemple, si vous introduisez cinq  $kWh$  d'électricité dans votre batterie et que vous ne pouvez récupérer que quatre  $kWh$  d'électricité utile, la batterie a une efficacité aller-retour de 80% ( $4 kWh / 5 kWh = 80\%$ ). De manière générale, une efficacité aller-retour plus élevée signifie que vous tirerez plus de valeur économique de votre batterie [20].



Figure III. 6. Exemple d'efficacité aller-retour

### III.3.2. Avantage d'utiliser la batterie lithium-ion comme batterie solaire

La raison pour laquelle l'introduction des batteries solaires au lithium-ion a secoué l'industrie solaire est que la technologie offre une variété d'avantages par rapport aux batteries au plomb-acide.

Les avantages des batteries solaires lithium-ion comprennent:

- Profondeur de décharge plus élevée
- Longue durée de vie
- Densité d'énergie plus élevée
- Haute efficacité
- Moins d'entretien

#### III.3.2.1. Profondeur de décharge plus élevée (*DOD*)

Le *DOD* d'une batterie est la quantité d'énergie stockée dans la batterie qui a été utilisée, par rapport à la capacité totale de la batterie. La plupart des batteries sont livrées avec un *DOD* recommandé afin de maintenir la santé de la batterie.

Les batteries solaires au lithium-ion sont des batteries à décharge profonde, elles ont donc un *DOD* d'environ 95%. De nombreuses batteries plomb-acide n'ont qu'un *DOD* de 50%. Cela signifie que nous pouvons utiliser davantage d'énergie stockée dans une batterie lithium-ion sans devoir la recharger aussi souvent [21].

#### III.3.2.2. Longue durée de vie

Parce que les batteries lithium-ion ont un *DOD* élevé et n'ont pas besoin d'être chargées et rechargées aussi souvent, elles ont une longue durée de vie.

La conception des batteries lithium fer phosphate leur confère un nombre de cycles de charge/décharge très important. Elle réalise 2000 cycles de charge/décharge à 100%. En comparaison, les meilleures batteries au plomb font 400 cycles avec une profondeur de décharge à 100% soit 5 fois moins de cycles [22].

#### III.3.2.3. Densité d'énergie plus élevée

La densité d'énergie d'une batterie est la quantité d'énergie que la batterie peut contenir par rapport à la taille physique de la batterie.

Les batteries *lithium-ion* ont aujourd'hui l'une des densités d'énergie les plus élevées de toutes les technologies de batterie (100-265Wh/kg ou 250-670Wh/L). De plus, les cellules de batterie *Li-ion* peuvent fournir jusqu'à 3,6 Volts, 3 fois plus que les technologies telles que *Ni-Cd* ou *Ni-MH*. Cela signifie qu'ils peuvent fournir de grandes quantités de courant pour les applications haute puissance [23].

### III.3.2.4. Haute efficacité

Les batteries au lithium-ion ont une cote d'efficacité aller-retour plus élevée que les autres types de batteries solaires sur le marché.

L'efficacité fait référence à la quantité d'énergie utilisable que nous retirons de notre batterie par rapport à la quantité d'énergie nécessaire pour la stocker. Les batteries lithium-ion ont des rendements entre 90 et 95% [21].

### III.3.2.5. Moins d'entretien

Un avantage majeur des batteries lithium-ion est qu'elles ne nécessitent aucun entretien pour garantir leurs performances.

Les cellules *Ni-Cad* nécessitaient une décharge périodique pour s'assurer qu'elles ne présentaient pas l'effet mémoire. Comme cela n'affecte pas les cellules *lithium-ion*, ce processus ou d'autres procédures de maintenance similaires ne sont pas nécessaires. De même, les cellules au *plomb-acide* nécessitent un entretien, certaines nécessitant un remplissage périodique de l'acide de la batterie.

Heureusement, l'un des avantages des batteries *lithium-ion* est qu'aucune maintenance active n'est requise [24].

## III.4. Conclusion

Lors du choix d'une batterie pour nos projets, nous devons nous assurer qu'elle est la meilleure pour elle et qu'elle fonctionnera comme nous le souhaitons, et à travers ce chapitre, nous avons donné les différents critères sur lesquels nous devons respecter les lois du choix d'une batterie.

## **CHAPITRE IV**

### **Stockage appliqué aux énergies renouvelables qui nécessitent batterie**

---

### IV.1. Introduction

Les énergies dites renouvelables possèdent souvent le même défaut: elles sont intermittentes, c'est à dire que leur production n'est pas assurée en permanence ni de manière constante. C'est le cas par exemple pour l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Il arrive parfois que ces systèmes produisent plus d'énergie que nécessaire. Le surplus ne pouvant être utilisé est alors perdu alors qu'il pourrait être utile au moment où ces méthodes ne produisent pas d'énergie. Afin de résoudre ce problème, les chercheurs travaillent au développement de méthode de stockage.

Le stockage par batterie est l'une des méthodes les plus importantes qui ont fait leurs preuves dans le domaine des énergies renouvelables, en particulier dans les systèmes de production hors réseau, principalement parce qu'elles sont faciles à transporter et à installer.

Les systèmes d'énergie éolienne, solaire font partie des énergies renouvelables qui utilisent des batteries pour stocker et distribuer l'énergie [25].

Dans ce chapitre, nous ferons une étude et une simulation sur une batterie isolé chargée par un panneau solaire.

### IV.2. Définition de l'énergie solaire

Une cellule photovoltaïque également est un composant électronique qui est, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre un courant continu [28].



Figure IV. 1. Cellule photovoltaïque

### IV.3. Différents types de cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types des panneaux photovoltaïques selon le type de matériaux utilisé dans les constructions:

- Silicium monocristallin
- Silicium poly cristallin
- Silicium amorphe
- Arséniure de gallium
- Tellure de cadmium
- Silicium en ruban

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	Théorique	En laboratoire	Disponibles	
<b>Silicium Monocristallin</b>	27.0%	24.7%	14.0-16.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
<b>Silicium poly Cristallin</b>	27.0%	19.8%	12.0-14.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
<b>Silicium amorphe</b>	25.0%	13.0%	6.0-8.0%	Appareils de faible puissance de production d'énergie embarquée (calculatrice montres...) modules de grandes dimensions
<b>Arséniure de Gallium</b>	29.0%	27.5%	16.0-20.0%	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
<b>Tellure de Cadmium</b>	28.5%	16.0%	8.0%	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)
<b>Silicium en ruban</b>	27.0%	27.0%	9.0-11.0%	Module non spécifique

**Tableau IV. 1. Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques**



## IV.4. Principe de fonctionnement

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges  $N$ ) et des trous (charges  $P$ ). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ  $0.6V$  pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $VOC$ ). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $ICC$ ) [29].

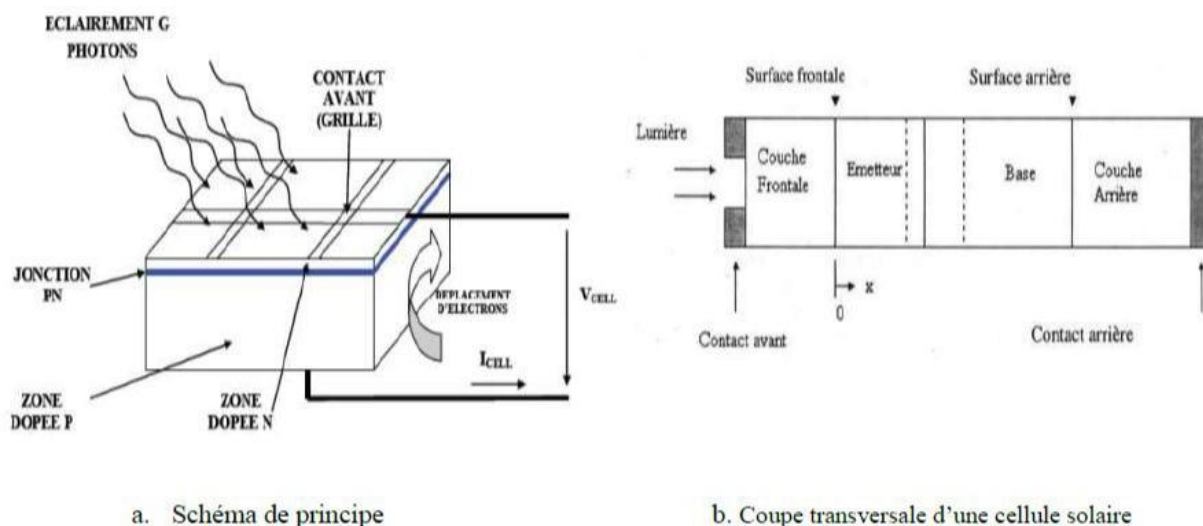


Figure IV. 2. Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium

## IV.5. Stockage de l'énergie solaire

Les panneaux solaires génèrent de l'énergie pendant les heures de pointe ensoleillées. Si cette énergie n'est pas directement utilisée sur place, elle sera stockée dans des batteries solaires. Ces batteries nous permettent de stocker la production excédentaire et d'utiliser cette électricité la nuit ou les jours de mauvais temps. Mais la batterie ne doit pas être directement connectée aux panneaux, car cela pourrait l'endommager. Généralement, un régulateur est installé entre la batterie et le module solaire. L'utilisation de batteries est fréquente en cas d'autoconsommation lorsque l'on veut gagner en autonomie. Ce système de stockage

représente également un partage fiable et permanent de l'électricité pour des sites isolés, qui ne peuvent pas être connectés au réseau public.

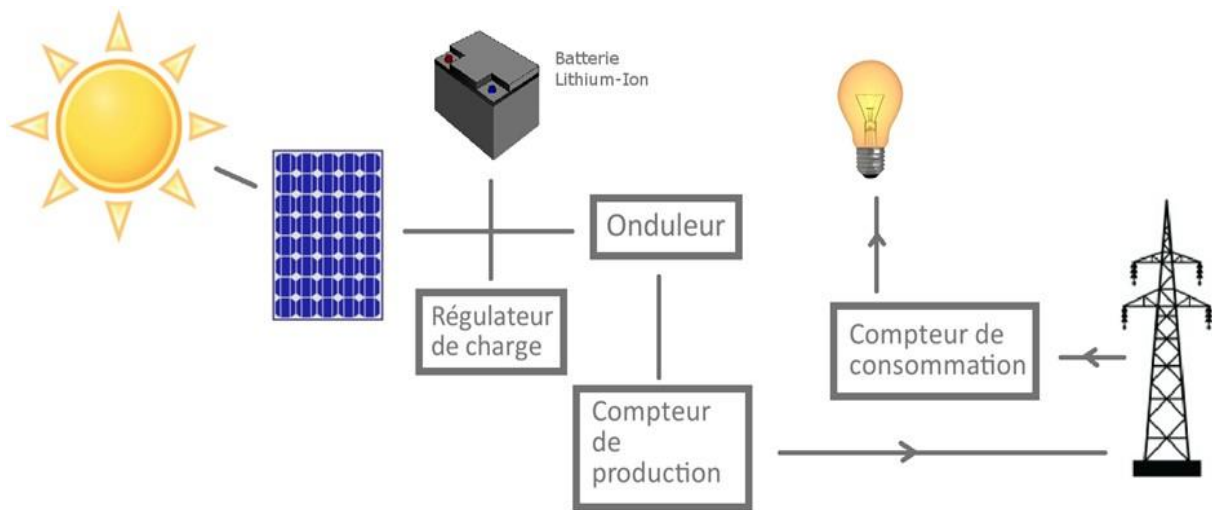


Figure IV. 3. Stockage de l'énergie solaire

### IV.6. Modélisation des composants du système

Pour assurer le charge et décharge de la batterie par le générateur photovoltaïque (*GPV*), un équipement de commande doit être mis entre le *GPV* et la batterie Figure (I.1), dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque - batterie) pour un meilleur transfert d'énergie vers la batterie. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance de *GPV*, nous utilisons pour cela un convertisseur *DC-DC* (hacheur) menu d'une commande de la poursuite de point de puissance maximale (*MPPT*) [7].

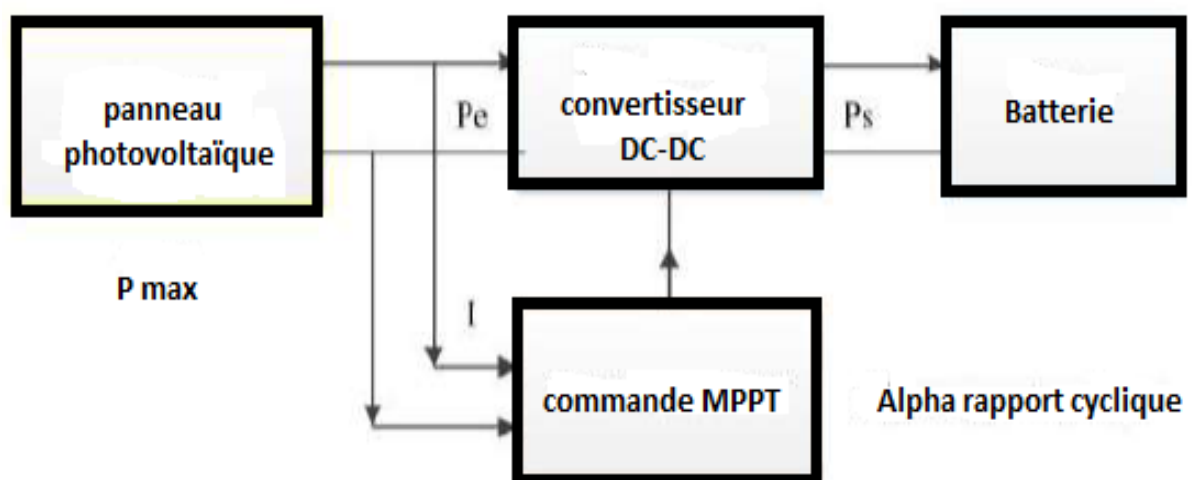


Figure IV. 4. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [3]

### IV.6.1. Modélisation de cellule photovoltaïque

#### IV.6.1.1. Circuit équivalent et modèle mathématique

La figure (IV.6) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. Il correspond à un générateur de courant  $I$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule [28].

- La résistance série ( $R_{ser}$ ) est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt ( $R_{shu}$ ) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

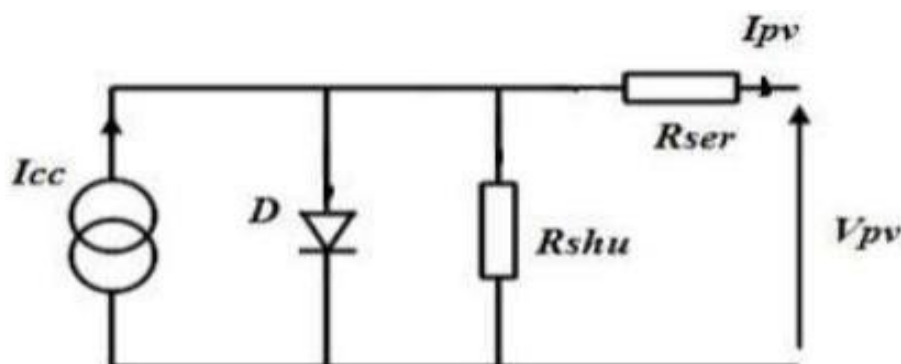


Figure IV.5. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [28]

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par [9]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} = \left[ \exp \frac{e(V_{pv} + (1 + I_{pev} + R_{ser}))}{nkT} - 1 \right] - \frac{V_{pv} - (I_{pv} + R_{ser})}{R_{shu}} \quad (IV.1)$$

Avec

$I_{sat}$  : Courant de saturation (A)

$K$ : Constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ )

$T$ : Température effective des cellules en Kelvin (K)

$e$ : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

$n$ : Facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ), lorsqu'elle fonctionne en générateur

$V_{PV}$  : Tension aux bornes de cette même cellule (V)

$I_{pv}$ : Photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (A)

$R_{shu}$ : Résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction ( $\Omega$ )

$R_{ser}$ : Résistance série représentant les diverses résistances de contacts et déconnexions ( $\Omega$ )

**IV.6.1.2. Modèle cellule photovoltaïque de Matlab/Simulink**

Dans cette étude on a utilisé un module photovoltaïque 1Slotch 1STHP-215-P, ses caractéristiques sont dans le tableau (VI.2):

Caractéristiques	Spécification
Nombre des cellules $N_s$	60
Puissance maximale $P_{max}$	231.15 W
Tension à $P_{max}$ ( $V_{mpp}$ )	29 V
Courant à $P_{max}$ ( $I_{mpp}$ )	7.35 A
Tension de circuit ouvert $V_{co}$	36.3 V
Coefficient de la température de $I_{cc}$	0.102
Coefficient de la température de $V_{co}$	-0.36099

Tableau IV. 2. Caractéristique électrique du module photovoltaïque 1Slotch 1STHP-215-P

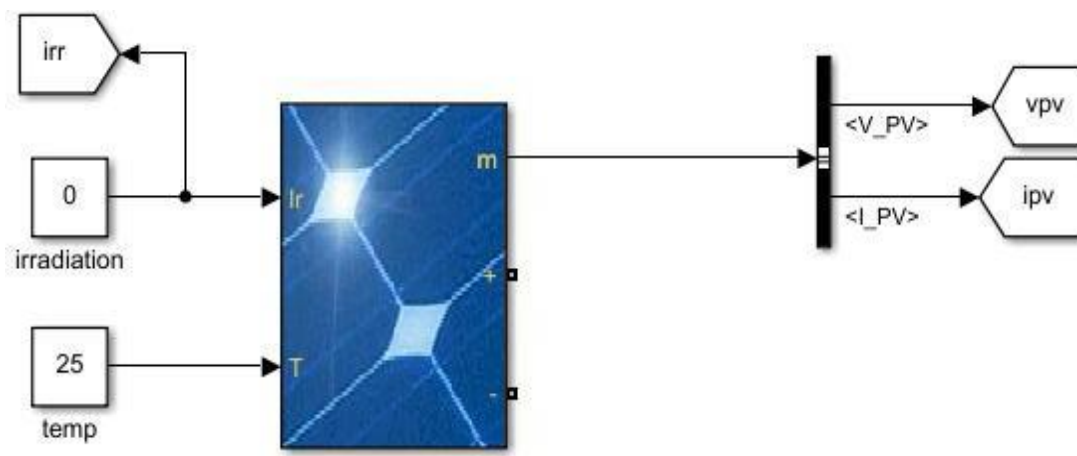


Figure IV. 6. Modèle de cellule créé par Matlab/Simulink

### IV.6.1.3. Caractéristique de puissance et courant en fonction de voltage

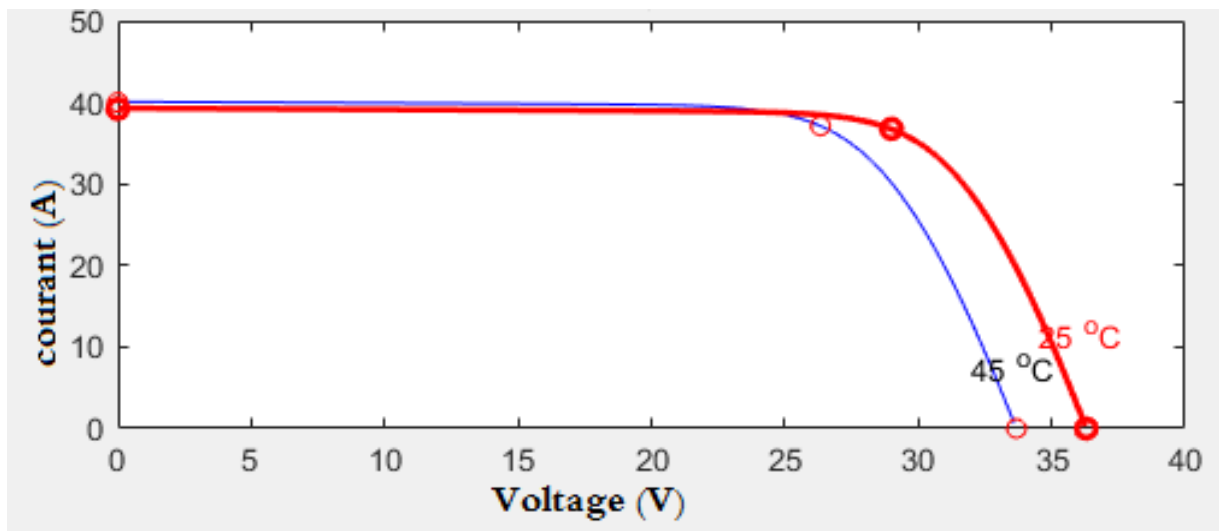


Figure IV. 7. Caractéristique de courant en fonction de voltage

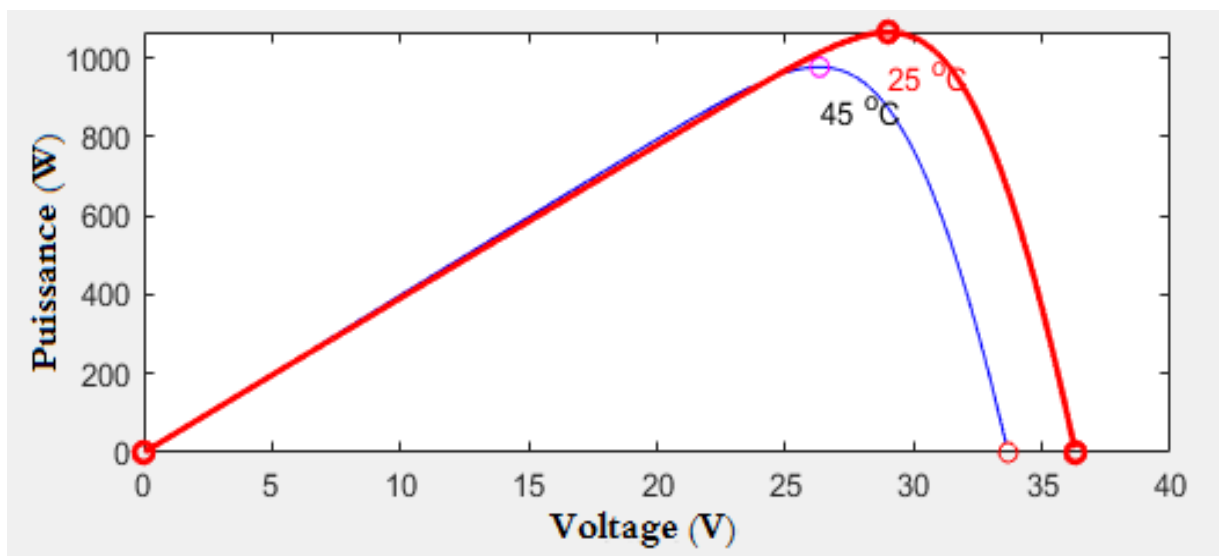


Figure IV. 8. Caractéristique de puissance en fonction de voltage

### IV.6.2. Modélisation d'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 grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se 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.

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [30].

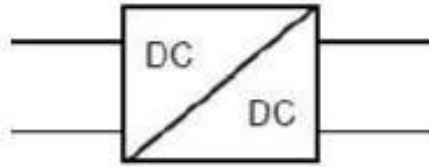


Figure IV. 9. Symbole d'un convertisseur DC-DC

### IV.6.2.1. Hacheur boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) connu aussi sous le nom de "Boost" ou hacheur parallèle; son schéma de principe de base est celui de la figure (VI.11). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [7].

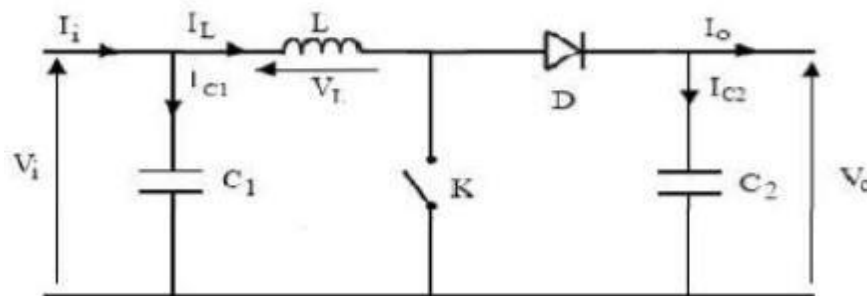


Figure IV. 10. Schéma électrique d'un hacheur boost [7]

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à:

$$V_o (1 - \alpha) = V_i \quad (VI.2)$$

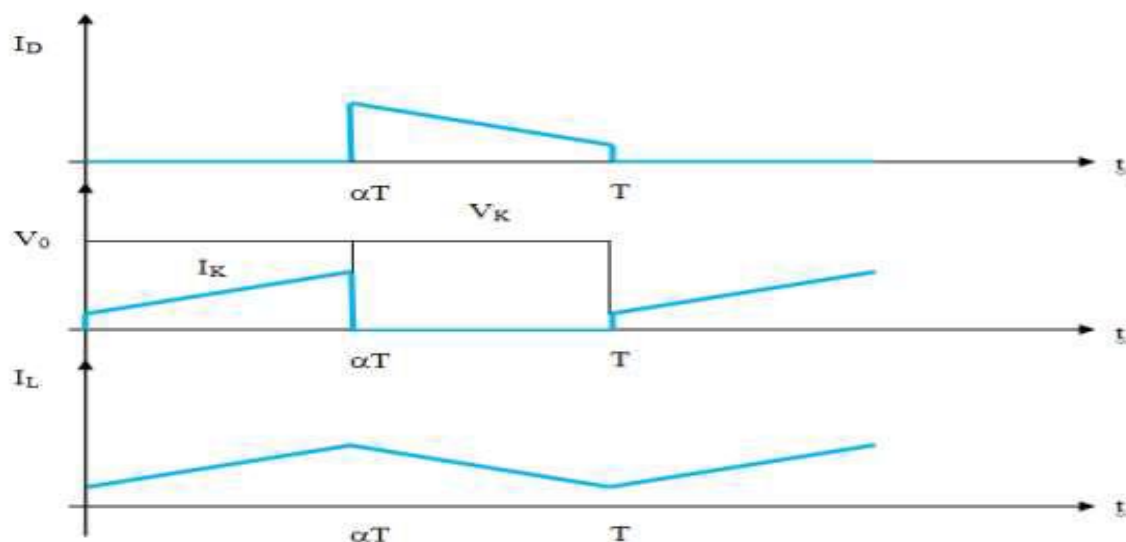


Figure IV.11. Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

#### IV.6.2.2. Modèle Hacheur créé par Matlab/Simulink

Afin de transmettre et de convertir la puissance provenant du photovoltaïque, nous devons concevoir un convertisseur élévateur utilisant les éléments suivants:

- Condensateur côté PV (non idéal) =  $100\mu F$
- Inductance (non idéale) =  $5mH$
- IGBT en tant que commutateur connecté à un signal de porte
- Diode
- Condensateur de sortie =  $3300\mu F$  (nous avons besoin d'un gros condensateur de sortie car c'est le point de câblage du PV avec la batterie)
- Resistance.

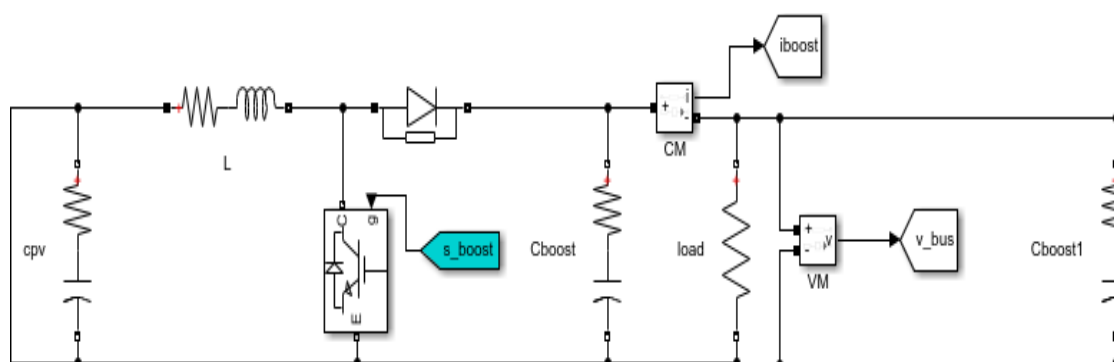


Figure IV. 12. Modèle de cellule créé par Matlab/Simulink

### IV.6.3. Association PV- hacheur

#### IV.6.3.1. Principe de La Commande MPPT

Par définition, une commande *MPPT*, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un *GPV* de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (*VPPM* et *IPPM*). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique commandé par la technique *MPPT*.

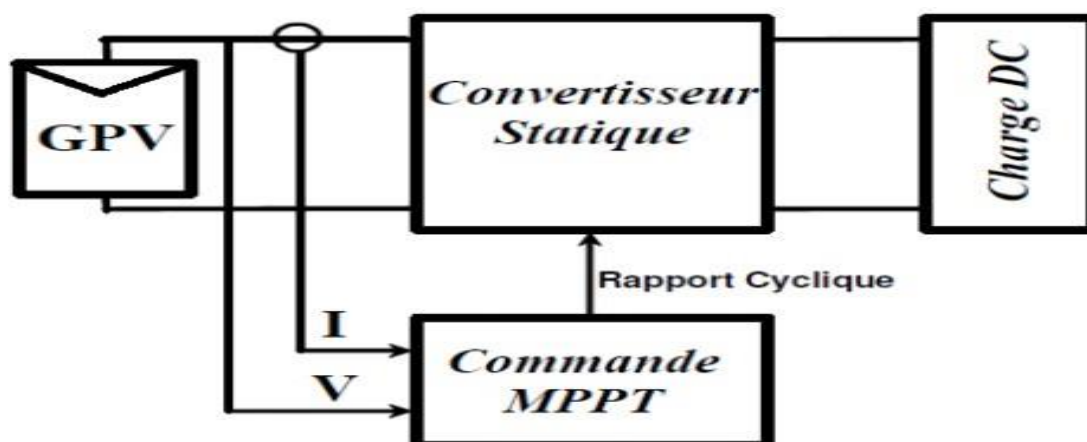


Figure IV. 13. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

La commande *MPPT* fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le *GPV* peut fournir. L'algorithme *MPPT* peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le *MPP*. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (*I* et *V* et par conséquent de la puissance du *GPV*) jusqu'à se placer sur le *MPP* [30].



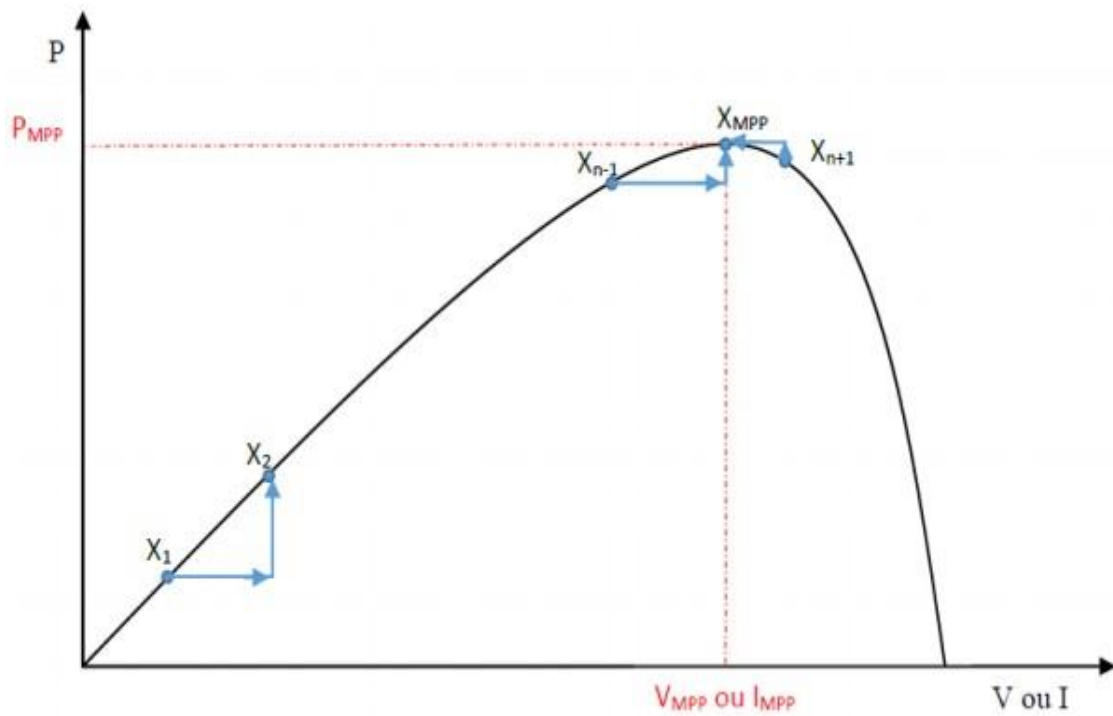


Figure IV. 14. Principe de la commande MPPT

#### IV.6.3.2. Modèle de La Commande MPPT créée par Matlab/Simulink

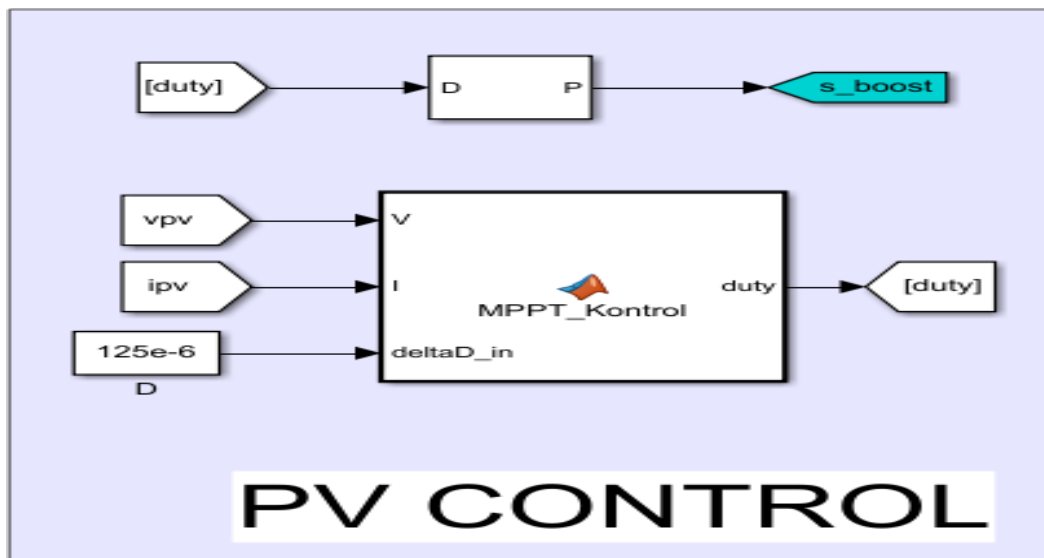


Figure IV. 15. Modèle de la Commande MPPT

IV.6.3.3. Modèle d'association PV-hacheur contrôlé par la méthode MMPT

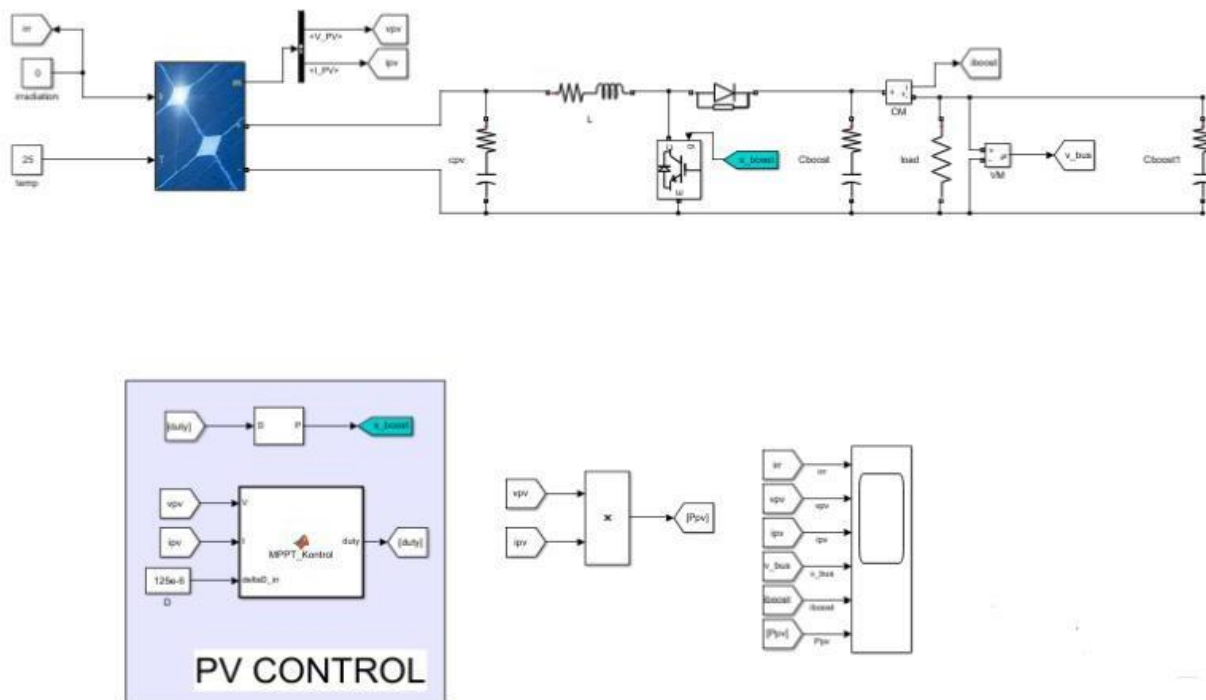


Figure IV. 16. Hacheur contrôlé par MPPT

IV.6.4. Modélisation de stockage

Pour le stockage nous utiliserons la batterie que nous avons déjà modélisée dans le deuxième chapitre, c'est une batterie lithium-ion avec les spécifications suivantes:

Caractéristique	Spécification
Type	Lithium-ion
Tension nominal	24 V
Capacité	50 Ah
SOC initial	45%
Temps de réponse de batterie	1 s

Tableau IV.3.Caractéristique de la batterie

### IV.6.4.1. Contrôle de batterie

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit ciel dégagé ou couvert) une batterie solaire peut être branché directement sur un panneau solaire mais ou risquent d'endommager la batterie si l'énergie électrique fournie par le PV n'est pas stable et si son niveau de charge dépasse les 90%. C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un régulateur entre le panneau solaire photovoltaïque et la ou les batteries solaires (figure IV.17) [31].

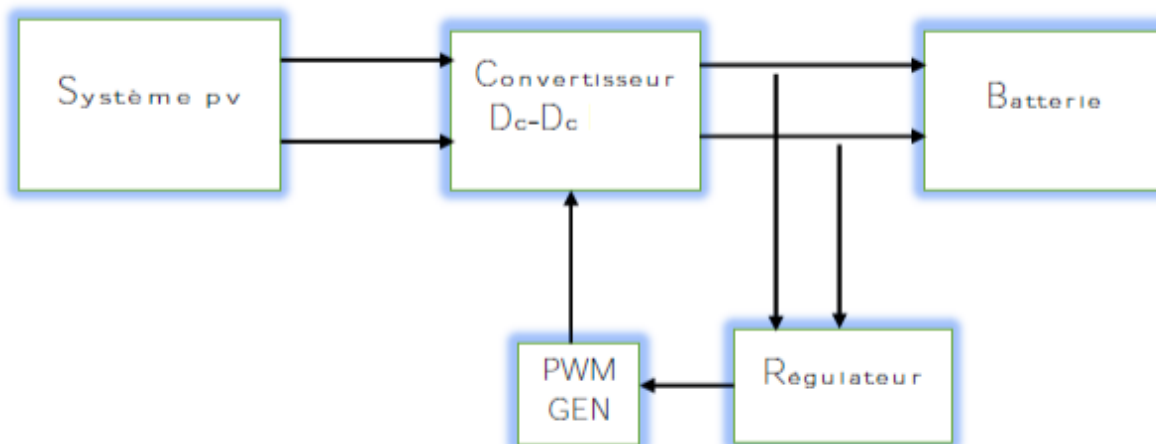


Figure IV. 17. Système PV et régulateur

### IV.6.4.2. Importance du régulateur

Le rôle du régulateur dans une installation photovoltaïque est très important au le niveau de charge des batteries solaires ne doit être ni trop haut ni trop bas. Des charges trop faibles ou trop importantes non régulées détériorent les batteries et limitent leur durée de vie [31].

### IV.6.4.3. Le régulateur PID :

Un régulateur PID remplit essentiellement trois fonctions [32].

1. Il fournit un signal de commande  $u(t)$  en tenant compte de l'évolution du signal de sortie  $y(t)$  par rapport à la consigne  $w(t)$ .
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur

La sortie d'un régulateur *PID*, égale à l'entrée de commande de la centrale, dans le domaine temporel est la suivante [32]:

$$u(t) = K_p e(t) + k_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (IV.3)$$

Avec ;

- $e(t)$ : Représente l'erreur de suivi, la différence entre la valeur d'entrée désiré ( $V$ ) et la sortie réelle ( $W$ ).
- $u(t)$ : Signal de commande.
- $K_p$ : Gain Proportionnel.
- $K_i$ : Gain Intégral.
- $K_d$ : Gain Dérivative.

La fonction de transfert d'un régulateur  $PID$  est trouvée en prenant la transformée de Laplace de l'équation (1).

$$K_p + \frac{k_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p + K_i}{s} \quad (IV.4)$$

Les effets de chacun des paramètres du contrôleur,  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  sur un système en boucle fermée sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Temps de réponse	Dépassement	Temps de stabilisation	Erreur statique
$K_p$	Réduire	Augmenter	Petit changement	Réduire
$K_i$	Réduire	Augmenter	Augmenter	Eliminer
$K_d$	Petit changement	Réduire	Réduire	Pas de changement

Tableau IV. 4. Les paramètres du contrôleur  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  sur un système en boucle fermée

#### IV.6.4.4. Modèle PID construit par Matlab/Simulink

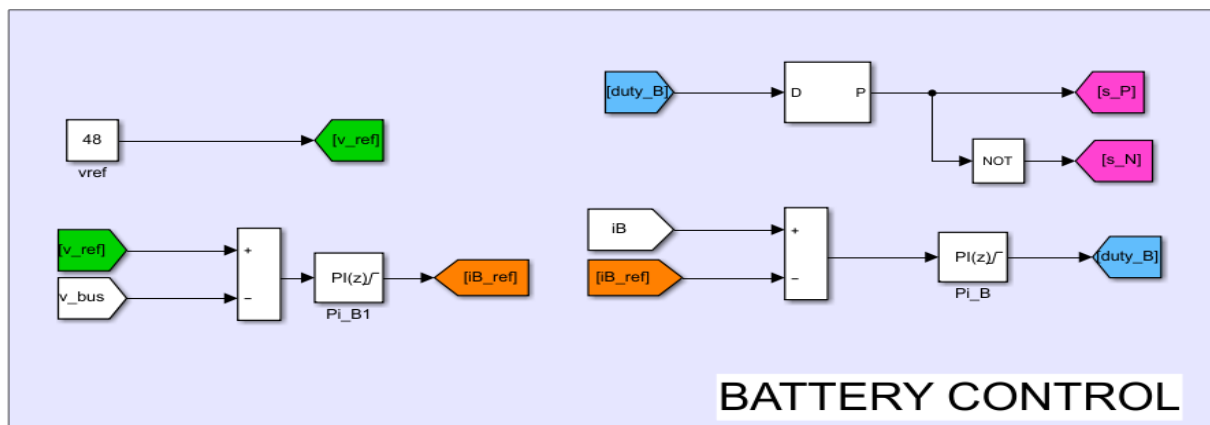


Figure IV. 18. Modèle PID construit par Matlab/Simulink

IV.6.4.5. Modèle de batterie créée par MATLAB SIMULINK

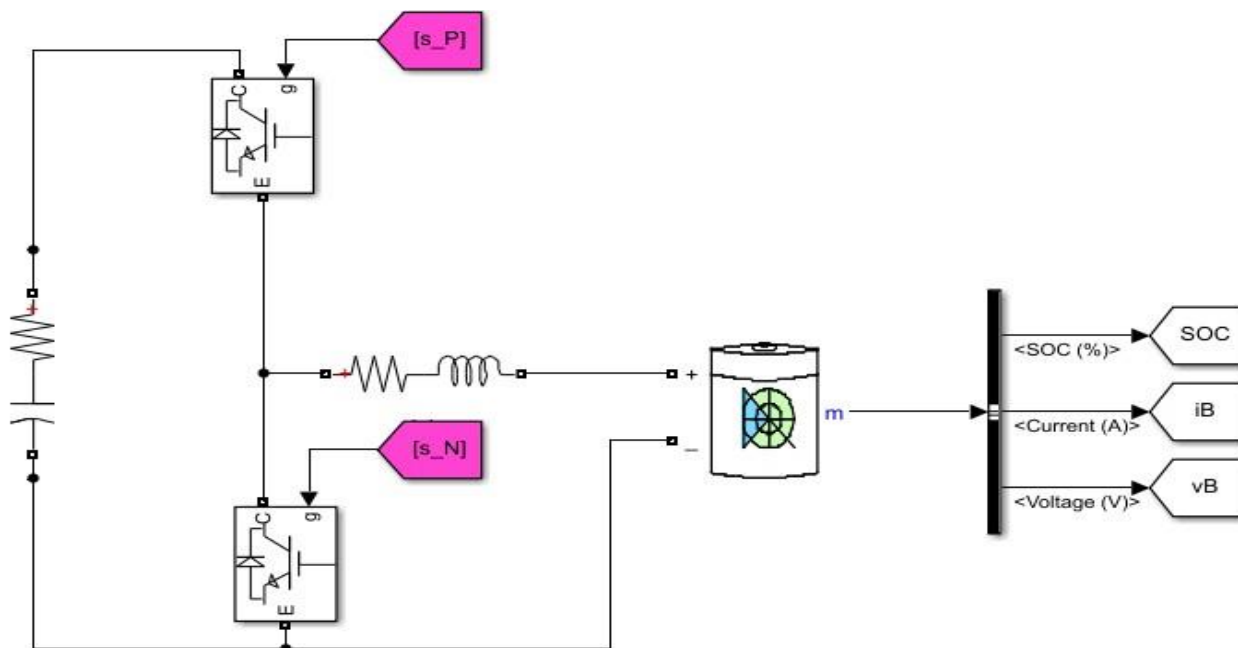


Figure IV. 19. Modèle de batterie créée par Matlab/Simulink

IV.7. Modèle complet de simulation

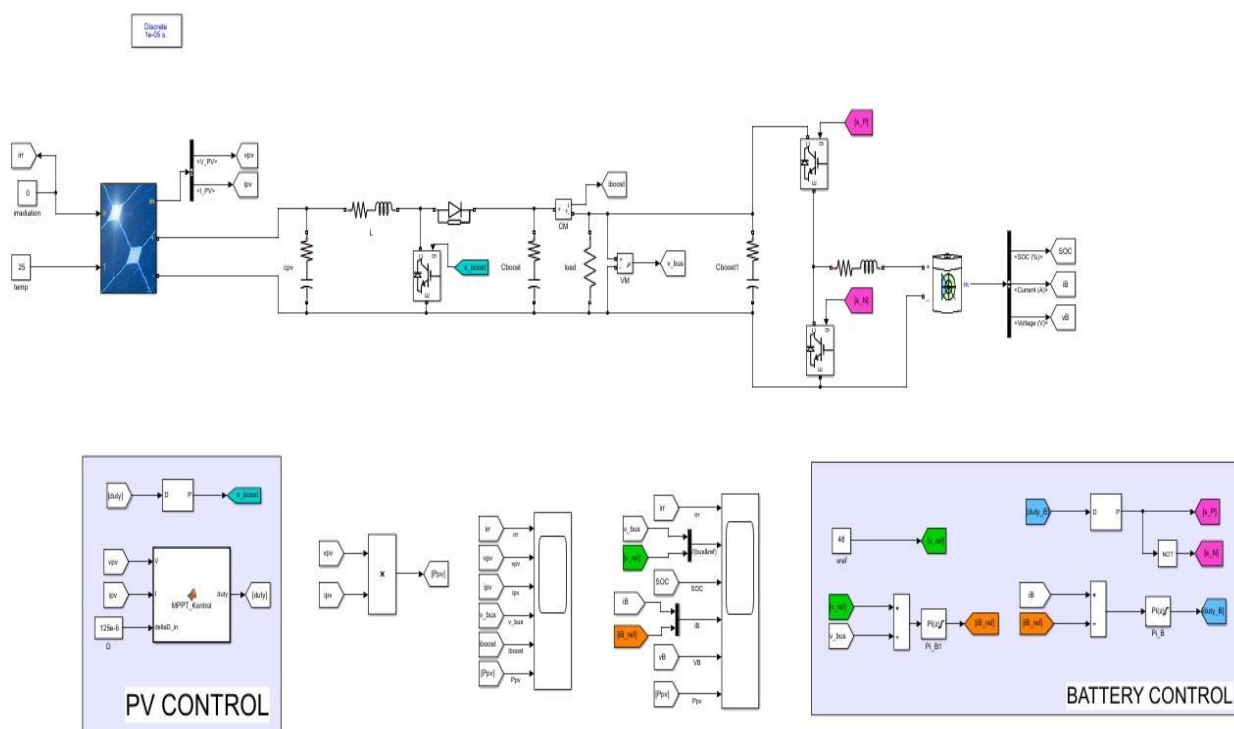


Figure IV. 20 Modèle complet de batterie chargé par un panneau solaire

## IV.8. Résultats et discussion

- Avant l'intégration de batterie

Afin de voir comment l'hacheur et le panneau réagissent, nous avons changé l'irradiation de 0 à 300 puis 500, jusqu'à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , puis nous diminuons progressivement l'irradiation de nouveau jusqu'à atteindre  $0\text{W}/\text{m}^2$ . (Figure IV.26)

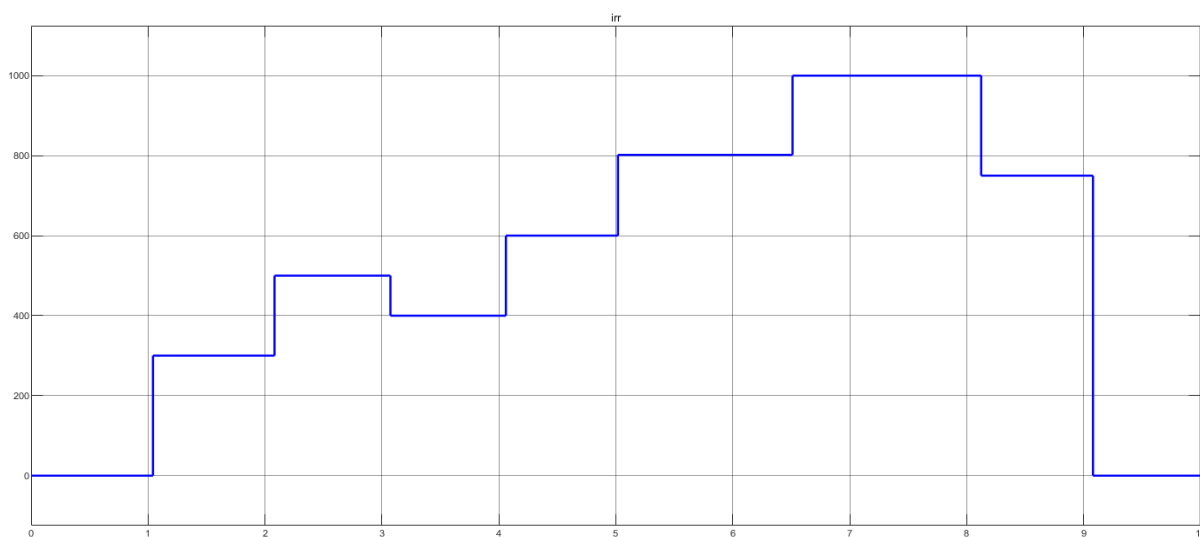


Figure IV. 21. Les valeurs d'irradiations utilisées

Les figures (IV.27) jusqu'à (IV.30) représentent les résultats obtenus après avoir simulé un PV et l'hacheur avant l'intégration de batterie.

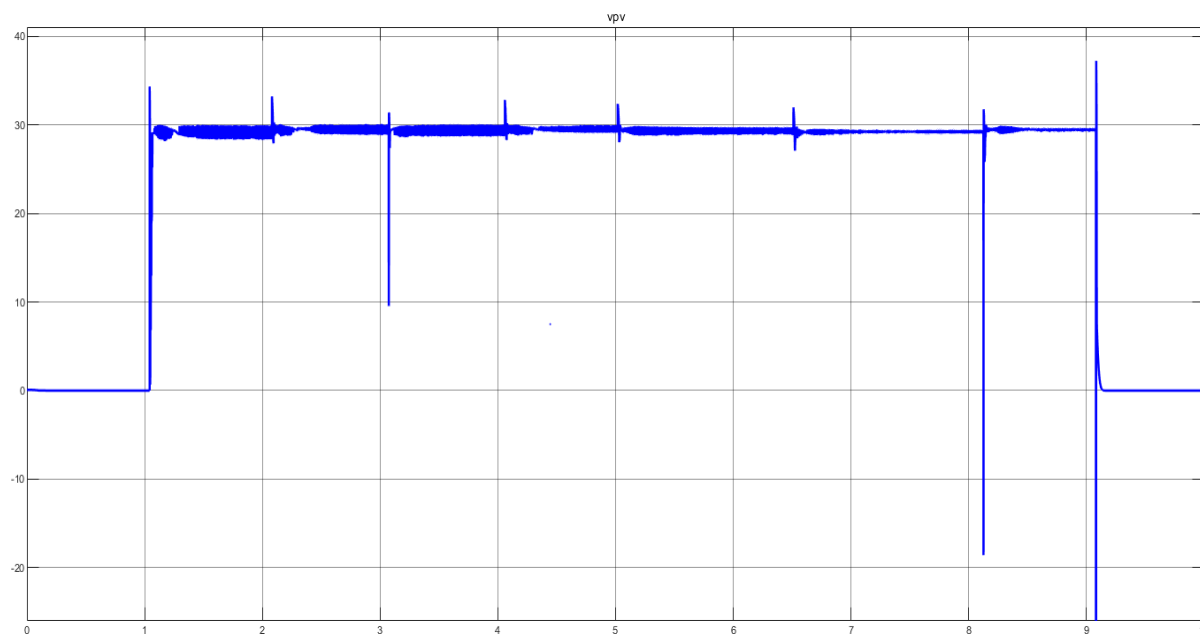


Figure IV. 22. La tension de panneau solaire ( $V_{pv}$ )

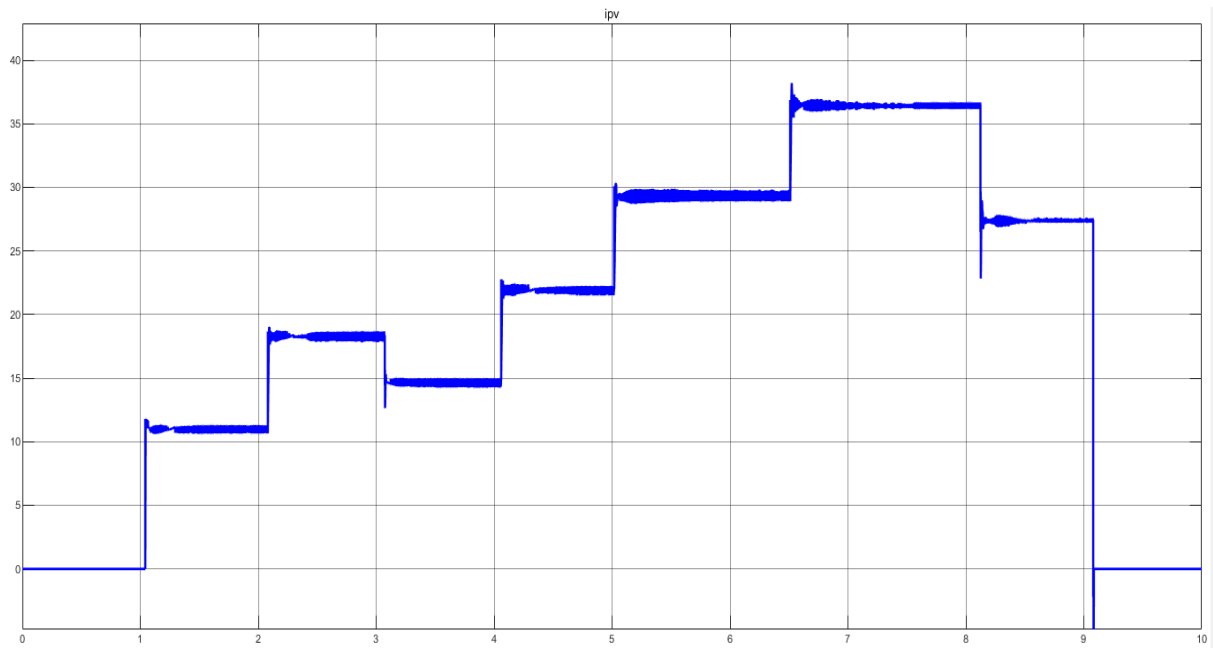


Figure IV. 23. Le courant de panneau solaire ( $i_{pv}$ )

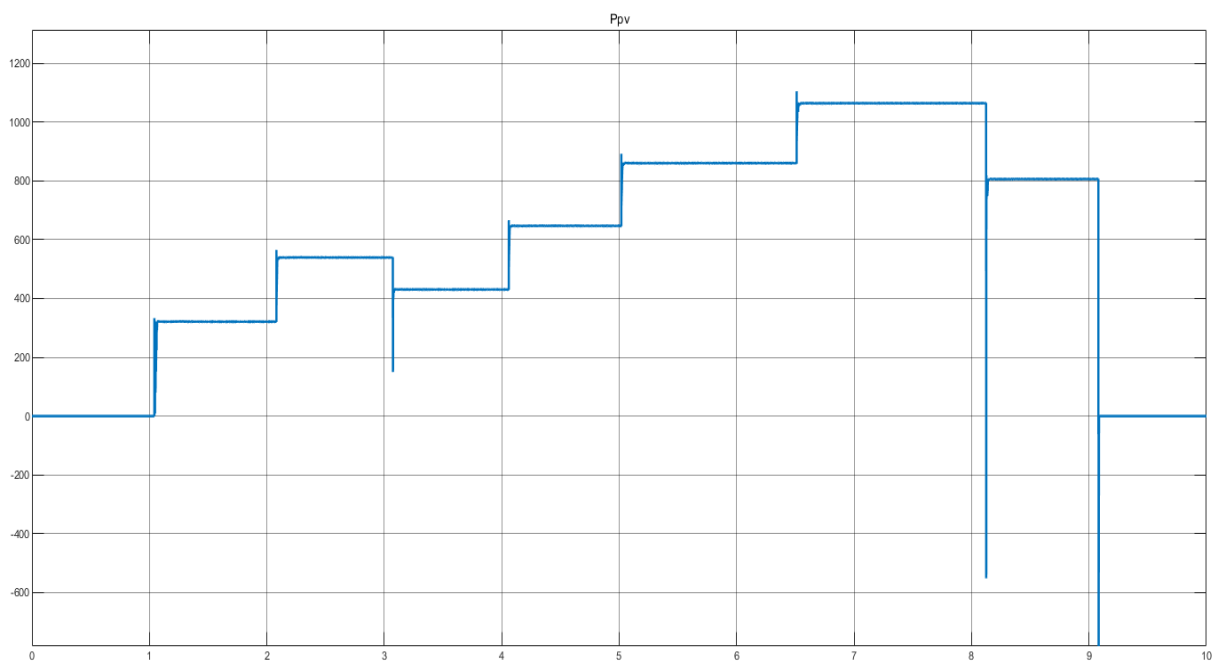


Figure IV. 24. Puissance de panneau solaire ( $P_{pv}$ )

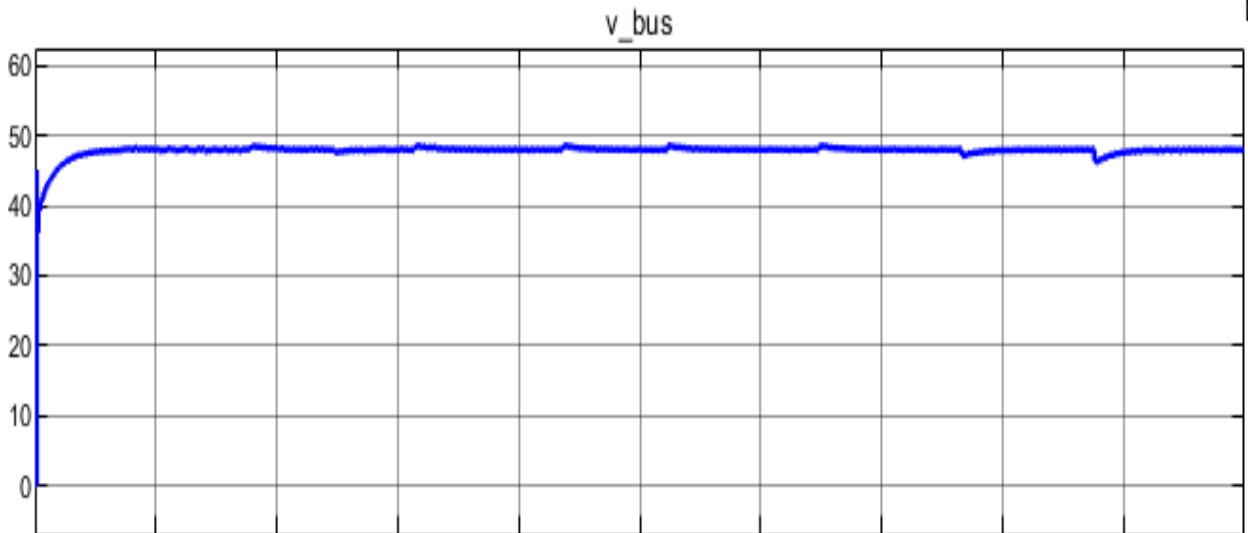


Figure IV. 25. Tension de l'hacheur ( $V_{BUS}$ )

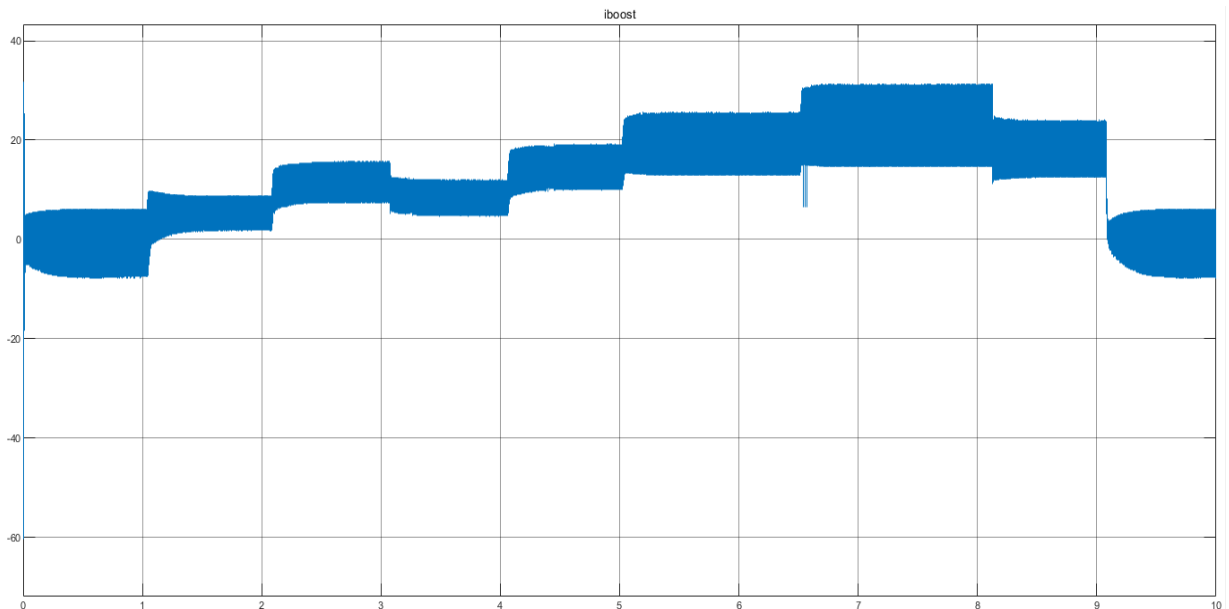


Figure IV. 26. Courant de l'hacheur  $I_{Boost}$

Nous remarquons que la tension et le courant de l'hacheur dépendent principalement de la valeur d'irradiation, car nous pouvons voir les figures étiquetées comme ( $I_{boost}$  et  $V_{bus}$ ) déplacent exactement de la même manière que la figures d'irradiation, vers le haut lorsque nous l'augmentons puis vers le bas lorsque nous le diminuer.



La tension du panneau reste stable pendant la majeure partie de l'expérience avec des pics instantanés générés au moment de la variation de l'éclairage solaire. De même manière que le courant généré par l'hacheur, la puissance générée par le panneau dépend de la variation de l'irradiation comme le montre la figure (IV.29).

- **Après l'intégration de batterie :**

Nous exécutons la même procédure que précédemment d'ou nous avons fait des testes sous le même profile d'irradiation que nous avons considéré avant l'intégration de la batterie.

Les figures (IV.32), (IV.33), (IV.34), (IV.35) et (IV.36) montrent les résultats de simulation d'une batterie connectée à un panneau solaire via un hacheur Boost.

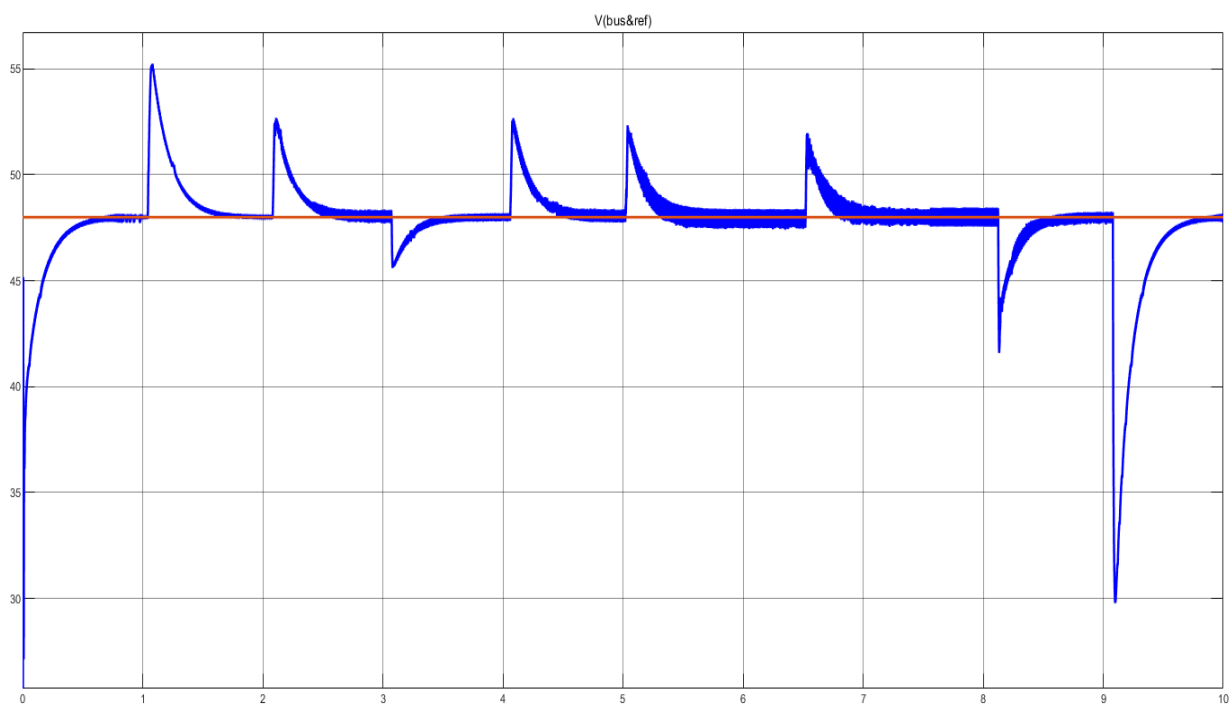


Figure IV. 27. Tension de l'hacheur ( $V_{Bus}$  et  $V_{réf}$ )

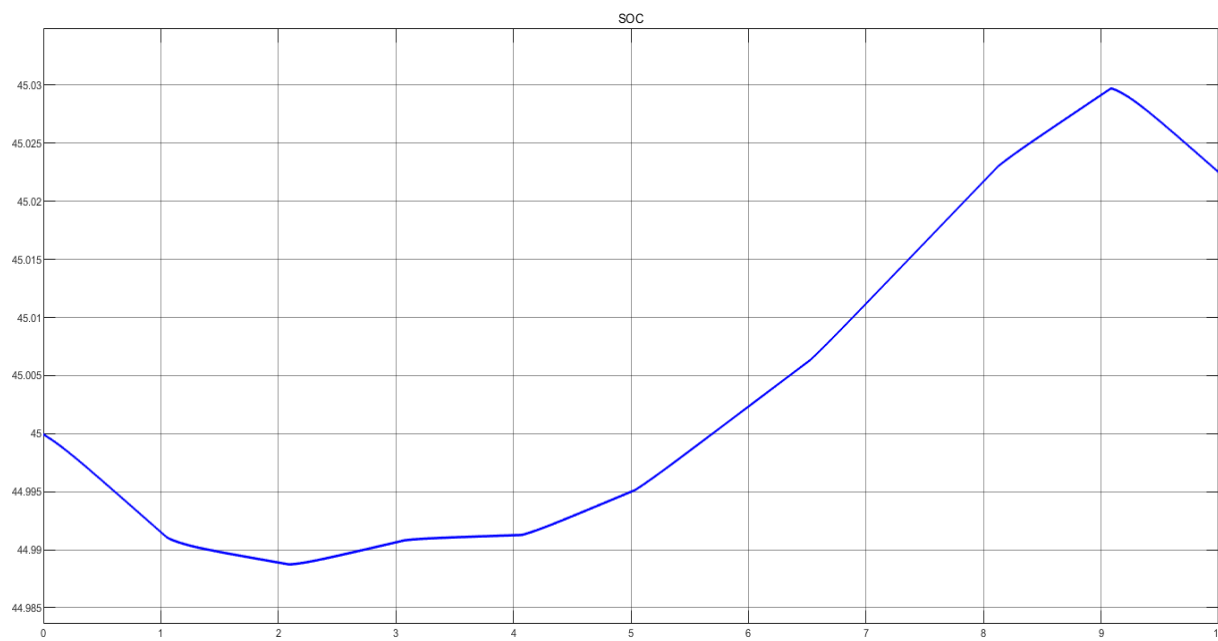


Figure IV. 28. L'état de charge de batterie (SOC)

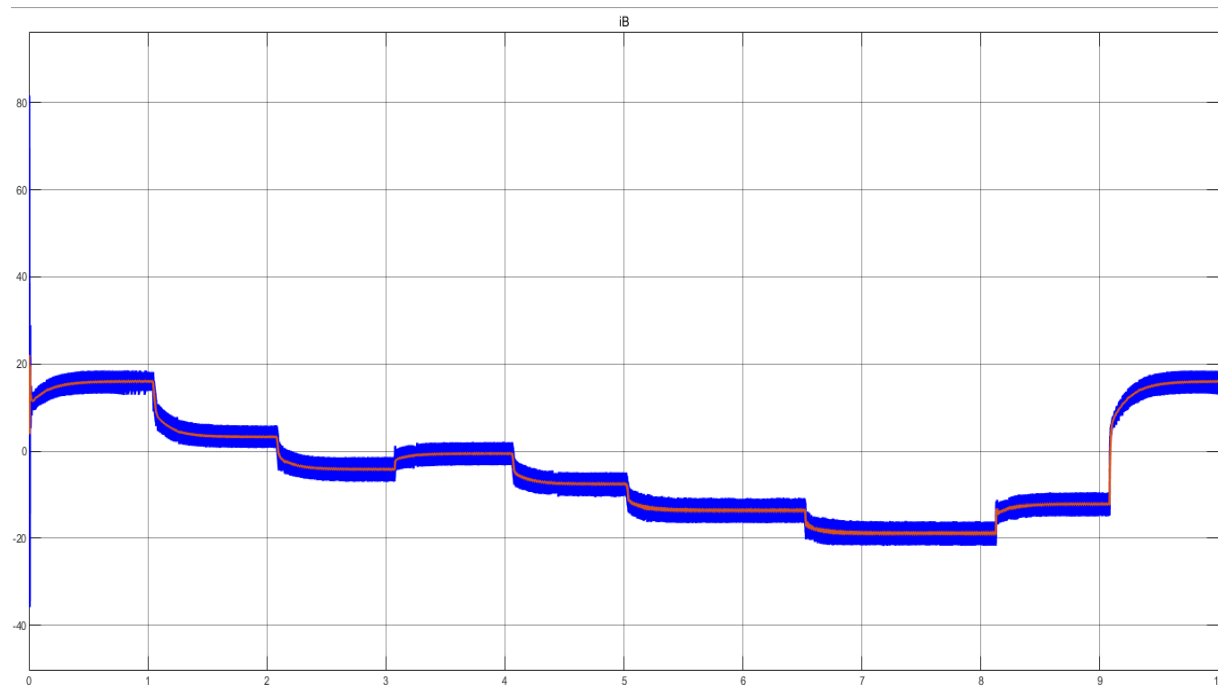


Figure IV. 29. Le courant de batterie ( $i_B$ )

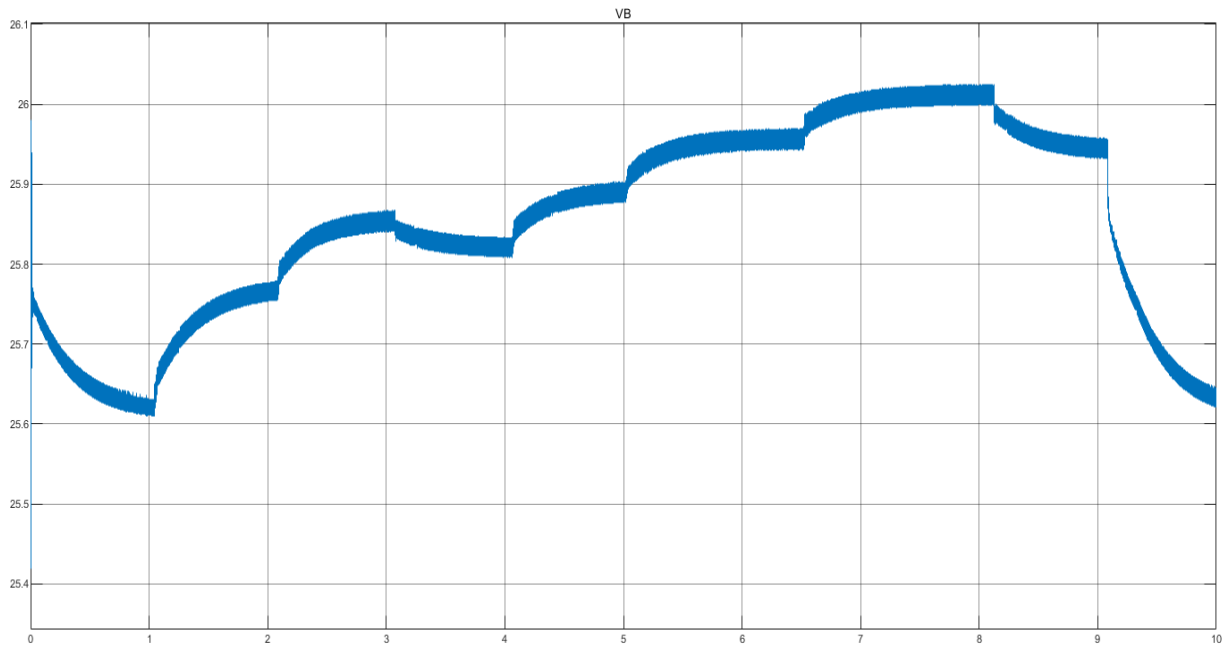


Figure IV. 30. La tension de la batterie ( $V_B$ )

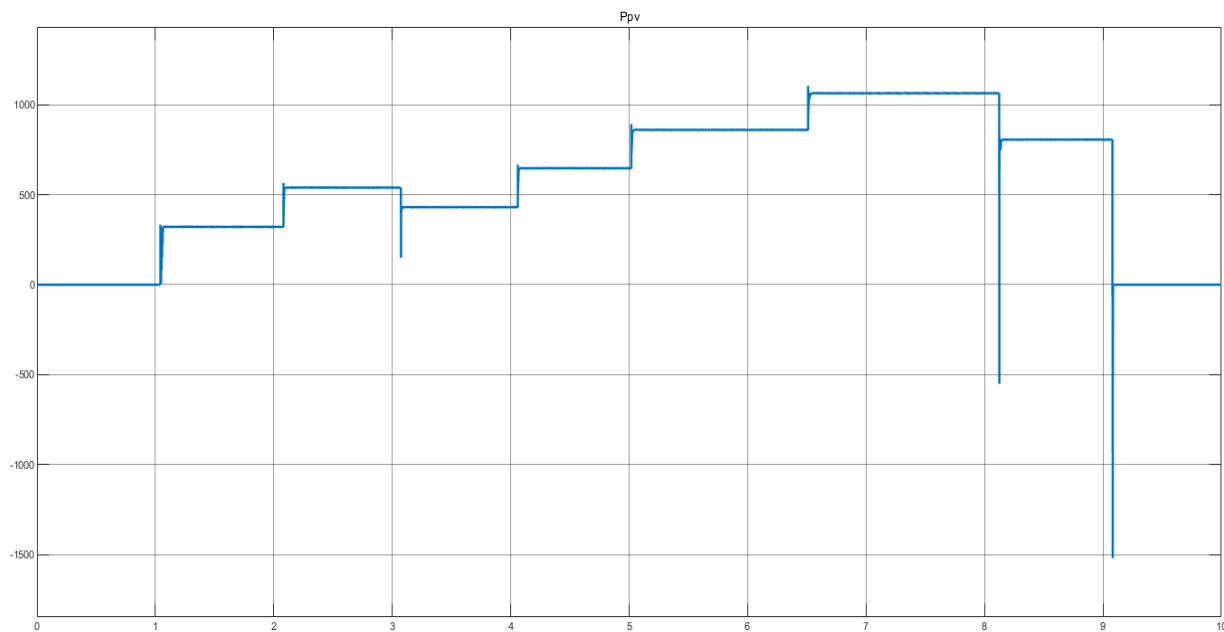


Figure IV. 31. La puissance de panneau solaire ( $P_{pv}$ )

En observant la figure, nous pouvons voir un cycle effectué par notre batterie.

Dans la première phase, lorsque l'irradiation est nulle (absence du soleil), la batterie se décharge et l'état de charge (*SOC*) diminue par rapport à 45% de sa valeur initiale, en remarque aussi que le courant de la batterie est stable à 15A et la puissance du panneau est nulle, cela signifie que la charge absorbe de la puissance à partir de la batterie au lieu du panneau photovoltaïque et ca représente la première phase de cycle de la batterie. En suite, lorsque l'irradiation augmente, on remarque le début de la deuxième phase du cycle (phase de charge) d'ou l'état de charge recommence à augmenter en indiquant que la batterie est en train d'être chargée par le panneau solaire. La tension de l'hacheur augmente également simultanément avec l'irradiation indiquant qu'il est actif et augmentant l'énergie provenant du panneau et la puissance du panneau solaire augmente également à partir de 0 suivant le profile de l'irradiation.

### IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé une simulation d'une batterie isolée chargée par un panneau photovoltaïque et à celui-ci via un hacheur Boost et régulée par un régulateur PID. Selon les résultats obtenus, en conclure que le système proposé réagissent parfaitement avec la présence d'une batterie quelque soit le niveau de l'éclairement.

## **CONCLUSION GENERALE**

---

## **Conclusion Générale**

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude du comportement de la batterie lorsqu'elle est connectée à une source d'énergie renouvelable et du rôle de la batterie dans le maintien de la stabilité de l'installation. Ces systèmes fonctionnent à sa puissance optimale avec l'utilisation des convertisseurs entre les batteries et les sources.

Dans un premier chapitre, nous avons donné une description générale des batteries où nous avons vu les différents types de batteries, sa constitution, son fonctionnement, les différents paramètres caractérisant une batterie et nous avons vu le comportement chimique des batteries lors de la charge et de la décharge.

Dans un deuxième chapitre, nous avons donné les modèles mathématiques pour les types de batteries mentionnés dans le premier chapitre, puis nous avons exécuté une simulation pour celle au lithium-ion à l'aide de Matlab/Simulink et nous avons obtenu et discuté les résultats.

Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord donné les critères de choix de la bonne batterie pour un projet, puis nous avons donné les critères à respecter lors du choix d'une batterie pour une installation d'énergie renouvelable, et enfin nous avons évoqué les avantages d'utiliser une batterie lithium-ion pour un panneau solaire.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons donné une simulation d'une batterie chargée par un panneau solaire via un hacheur Boost et contrôlée avec un contrôleur PID.

D'après cette étude et des résultats de la simulation, nous pouvons conclure:

- Les énergies renouvelables utilisent les batteries comme source de stabilité.
- Les batteries sont souvent considérées comme la solution à l'intermittence énergétique des sources renouvelables.
- Les batteries ont un cycle de charge et de décharge en fonction de l'énergie fournie par la source.
- Les batteries *lithium-ion* sont le partenaire privilégié pour le stockage des énergies renouvelables.
- Les générateurs photovoltaïques fonctionnent le mieux dans des conditions standard (éclairage  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et température  $25^\circ\text{C}$ ).

## CONCLUSION GENERALE

---

- Les hacheurs sont considérés comme nécessaires car ils fournissent dans des conditions optimales une tension de sortie supérieure à celle fournie par le générateur *PV*.
- Le contrôle *MPPT* via un régulateur *PI* est très important dans une installation photovoltaïque.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BEHIR Badr Eddine et BAKER Yassine, "Etude expérimentale d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec des batteries de stockage," Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued, Algérie, 2017.
- [2] Emmanuel ODUNLADE, "Different types of batteries and their applications," <https://circuitdigest.com>, 2018.
- [3] BOUTTE Aïssa, "Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques," Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie, 2015.
- [4] Mary BELLIS, "how a battery works," <https://www.thoughtco.com>, 2019.
- [5] Marshall brain, "how lithium-ion batteries work," <https://electronics.howstuffworks.com>.
- [6] Christiana HONSBERGET, Stuart BOWDEN, "Lead-acid Batteries," <https://www.pveducation.org>.
- [7] TARFAYA Yazid et SIAD Heythem, "Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV," Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2019.
- [8] Mohamed Ansoumane CAMARA, "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs," Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Paris, France, 2011.
- [9] ZENDAH Ramzi, "Etude de la gestion d'énergie d'une chaîne photovoltaïque," Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2018.
- [10] LI An, "Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages: application aux véhicules électriques et hybrides," Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, Lyon, France, 2013.
- [11] D. BERNDT, E. MEISSNER, W. RUSCH, "Aging effects in valve-regulated Lead-Acid batteries," 15<sup>th</sup> International Telecommunications Energy Conference, Vol. 2, pp. 139-145, 1993.
- [12] W. KAPPUS, A. WINSEL, "Sulfate passivation in the Lead-Acid system as a capacity limiting process," Journal of Power Sources, Vol. 2, no. 8, pp. 159-173, 1982.
- [13] BENCHERIF Mohammed, "Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome," Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2015.
- [14] Pauline MACADAMS, " How to select a battery for your next project-factors to consider," <https://www.components101.com>.



- [15] VIDYU Challa, "How to select the right battery for your application? Part1: important battery metric consideration," <https://www.dfrsolutions.com>.
- [16] "l'influence de la batterie sur la température," <http://www.batteries-naoux.com>.
- [17] BOBBY, "Understanding battery shelf life," <https://www.upsbatterycenter.com>.
- [18] SALEM Ben Moussa, "formation en photovoltaïque choix d'une batterie solaire," <https://www.slideshare.net>.
- [19] ECHUA, "Criteria to choose the best battery for a solar electric energy system," [www.electelectglobe.com](http://www.electelectglobe.com).
- [20] "How to choose the best battery for a solar energy system," <https://www.energysage.com>.
- [21] Catherine LANE, "Are lithium-ion batteries the best energy storage option?," [www.Solarreviews.com](http://www.Solarreviews.com).
- [22] "Batterie lithium pour les applications autonomes comme le solaire, l'éolien," <https://www.masolise.com>.
- [23] University of Washington, "Lithium-ion battery," <https://www.cei.washington.edu>.
- [24] "Lithium-ion battery advantages and disadvantages," <https://www.electronics-notes.com>.
- [25] HIMA Saibou, "Stockage de l'énergie électrique," Mémoire de Master, Université Abdou Moumouni, Niger, 2009.
- [26] Guanwei Liu et Feng Gao, "the energy internet," <https://www.sciencedirect.com/> 2019.
- [27] "energy storage 2019," <https://www.eesi.org/> - 22 février 2019.
- [28] HELALI Kamelia, "Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque: Etude Comparative," Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2001.
- [29] N. ACHAÏBOU, "Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque," Centre de Développement des Energies Renouvelables, 1999.
- [30] HAKOUMI Ahmed et BENAMAR Abdeldjalil, "Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue," Mémoire de Master, Université Ahmed Draia, Adrar, Algérie, 2018.

[31] "Batterie solaire (à décharge lente) batterie solaire à stocker l'énergie," <https://www.ecolodis-solaire.com>.

[32] BENSACI Wafa, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT," Mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2011.

[33] 'why renewable energy,' <https://resource-solutions.org/>

[34] 'peut-on stocker l'électricité vert ?' <https://www.happ-e.fr/> 04/08/2020