



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab de Blida 1

Faculté de Technologie  
Département des énergies renouvelables



# Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

## MASTER

Option : Conversion Photovoltaïque

Par

**MECIBAH RIDHA**

**KHETTAR MOHAMED LAMINE**

Thème :

---

*Étude et expérimentation sur le mécanisme de régénération des  
batteries au plomb acide application :*

*Systeme photovoltaïque*

---

Déposé le /10/2022 devant le jury composé de :

BEDIA Asma

MCA/ USBD-Blida

Présidente

FERRAJI Fatma Zohra

MCB/ USBD-Blida

Examineur 1

KHOUDJA FOUAD

MCB/ USBD-Blida

Examineur 2

DEGLA Aicha

MRB/ CDER-l'EPST

Encadreur

BOUKENOUI Rachid

MCB/ USBD-Blida

Co-Encadreur

Année Universitaire 2021-2022

## ملخص

تلعب الطاقات المتجددة دوراً رئيسياً في مواجهة تغير المناخ العالمي، وخاصة الطاقة الشمسية، والتي لها العديد من المزايا. أما عن عيوبها، ففضوء الشمس غير متوفر طوال اليوم، لذلك اضطررنا إلى اللجوء إلى نظام تخزين الطاقة باستخدام البطاريات. في دراستنا، بحثنا عن أعراض وأسباب شيخوخة البطارية وقمنا بدراسة تجريبية آلية تجديد بطارية الرصاص الحمضية، وبهذه الطريقة منحناها دورة حياة ثانية ويمكننا إعادة استخدام البطارية. في الواقع، شاركنا في الحد من النفايات الخطرة وتقليل الخسائر المادية بشكل كبير، مع معايير اختبار محددة جيداً، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أداء أفضل للبطارية المجددة، وهذه الأخيرة ساعدت في تمديد استخدام تكنولوجيا حمض الرصاص.

**الكلمات المفتاحية:** البطارية، الطاقة الشمسية، دورة حياة، النفايات الخطرة، تكنولوجيا حمض الرصاص.

## Résumé

Les énergies renouvelables jouent un rôle majeur dans la lutte contre le changement climatique mondial, en particulier l'énergie solaire qui présente de nombreux avantages. Quant à ses inconvénients, la lumière du soleil n'est pas disponible toute la journée, nous avons donc dû recourir à un système de stockage d'énergie utilisant des batteries. Dans notre étude, nous avons recherché les symptômes et les causes du vieillissement de la batterie et avons fait une étude expérimentale du mécanisme de régénération de la batterie au plomb, de cette façon nous lui avons donné un deuxième cycle de vie et nous avons pu réutiliser la batterie.

En fait, nous avons participé à la réduction des déchets dangereux et à la réduction drastique des pertes de matière, avec des critères de test bien définis, les résultats obtenus ont montré de meilleures performances de la batterie régénérée, cette dernière a permis d'étendre l'utilisation de la technologie plomb-acide.

**Mots clés :** batterie, énergie solaire, cycle de vie, déchets dangereux, technologie plomb-acide.

## Abstract

Renewable energies play a major role in the fight against global climate change, especially solar energy which has many advantages. As for its drawbacks, sunlight is not available all day, so we had to resort to an energy storage system using batteries. In our study, we researched for the symptoms and causes of battery aging and we did an experimental study of the mechanism of regeneration of the lead acid battery, in this way we gave it a second life cycle and we could reuse battery.

In fact, we participated in the reduction of dangerous waste and the drastic reduction of material losses, with well-defined test criteria, the results obtained showed better performance of the regenerated battery, the latter allowed to extend the use of lead-acid technology.

**Keywords:** battery, solar energy, life cycle, dangerous waste, lead acid technology.

## Dédicace

### **Mecibah Ridha**

Je dédie ce modeste travail...

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

J'espère que je saurai à la hauteur des valeurs que vous avez semées en moi... que vous serez fière de moi comme moi je le suis. A toutes ma famille Mecibah sans exception.

A mon binôme Mohamed khattar et à toute sa famille. Et à toutes les amis et camarades sans exceptions qui sont vraiment n'nombreux.

### **Khattar Mohamed lamine**

Remerciez Dieu, assez et priez pour le bien-aimé Mustafa, sa famille et ceux qui sont fidèles  
Et pourtant.

Je voudrais remercier Dieu et le remercier de m'avoir aidé à compléter cette note

Je dédie ce modeste travail...

À ceux que Dieu a dotés de prestige et de révérence... A celui qui m'a appris à donner sans attendre... À qui je porte fièrement son nom Mon cher père

À mon ange dans la vie... Au sens de l'amour et au sens de la tendresse et de la dévotion... À la grâce de la vie et au mystère de l'existence... Pour qui sa prière était le secret de ma réussite et sa tendresse un baume chirurgical... Aux amoureux les plus chers Maman bien-aimée

Au phare de la science et des scientifiques... Au majestueux édifice (Université de Blida)

A ceux que j'ai gagnés un cadeau du destin aux Compagnons du chemin dont nous avons partagé les moments, chers amis, que Dieu les bénisse et leur accorde

À tous ceux qui ont eu un impact sur ma vie... Et à tous ceux que mon cœur a aimés et que ma plume a oubliés

## Remerciements

Nous remercions à Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience afin d'aboutir à la réalisation de notre projet

Nous tenons à remercier les membres du jury pour avoir accepté et jugé ce travail. Pour nous avoir honorés par votre présence. Nous vous remercions de votre enseignement et nous vous sommes très reconnaissants de bien vouloir porter intérêt à ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus chaleureux à notre promotrice **Dr. Degla Aicha**, qui n'a jamais épargné ni de leur temps ni de leur effort pour nous aider à la réalisation de ce projet.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à notre Co-promoteur **Dr. Boukenoui Rachid**. On lui est extrêmement reconnaissant pour sa confiance, sa disponibilité, et aussi pour son aide et ses conseils.

Nous tenons à remercier toute l'équipe de l'entreprise **Powerboost** pour nous bien accueillir et de nous donner la chance de réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de notre travail de recherche.

## Liste des abréviations

(PbO<sub>2</sub>) : Dioxyde de plomb

(PV) : Les systèmes photovoltaïques

(Li-ion) : Lithium-ion

(OFEN) : L'office fédéral de l'énergie

(Ni/Cd) : Nickel/cadmium

(Ni/MH) : Nickel/hydrure métallique

(PB-A): Plomb-acide

(PbSO<sub>4</sub>): Sulfate de plomb

(ESS) : Systèmes de stockage d'énergie

(VRLA): Valve Regulated Lead Acid Batteries

## NOMENCLATURE

<i>symbole</i>	<i>signification</i>	<i>unité</i>
$u$	L'énergie spécifique (densité d'énergie massique)	[Wh/kg]
$\rho$	Densité d'énergie volumique	[Wh/l]
$\rho'$	Densité de puissance massique	[W/kg]
$E$	Potentiel redox	[V/ENH]
$M$	Masse molaire	[g/mol]
$c$	Capacité massique	[Ah/kg]
$T$	Température	[°C]
$E$	Energie	[Wh]
$V$	La tension	[V]
$I$	Le courant	[A]
$C$	Capacité de stockage	[Ah]
$C_{jr}$	Consommation journalière requise	[Wh]
$T$	Autonomie	[h]
$E$	Potentiel de la batterie	[V]
$E_0$	Tension sur circuit ouvert	[V]
$Q$	Capacité de la batterie	[Ah]
$i$	Courant de la batterie	[A]
$i_r = \int idt$	Capacité actuelle de la batterie	[Ah]
$R$	Résistance interne par unité de surface de la cellule	[ $\Omega$ ]
$A$	Amplitude de la zone exponentielle	[V]
$\eta$	Rendement de l'accumulateur	[%]
$U_{bat}$	Tension de la batterie	[V]
$C_{tot}$	Capacité totale de l'accumulateur	[Ah]
$C_u$	Capacité utile	[Ah]
$D$	Le rapport cyclique.	[/]
$f_s$	La fréquence.	[Hz]
$R$	La résistance de la charge.	[ $\Omega$ ]

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : L'état de l'art	2
I.1 INTRODUCTION	2
I.2 GENERALITES SUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	2
I.2.1. Historique sur les differents systemes de stockage	2
I.3 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES DE LA PART MONDIALE DES BATTERIES ET DESULFURATION DES BATTERIE	5
I.3.1 Les recherches sur le stockage d'énergie dans les batteries	5
I.3.2 Les recherches le processus de régénération des batteries	7
I.4 CONCLUSION	10
CHAPITRE II : Caractéristiques et phénomènes de vieillissements des batteries	11
II.1. INTRODUCTION	11
II.2. LES BATTERIES EN TANT QUE SOLUTION POUR LE STOCKAGE ELECTRIQUE	11
II.3. ROLE D'UNE BATTERIE	12
II.4. DIFFERENTS TYPES DE BATTERIES	12
II.4.1. Les batteries Nickel-Cadmium	12
II.4.2. Les batteries au lithium	13
II.4.3. Les batteries Plomb-acide	13
II.5. LA PLACE DES BATTERIES AU PLOMB AUJOURD'HUI	14
II.5.1. Les deux types des batteries au Plomb-acide	15
II.5.2. Catégories est technologies des batteries au Plomb-acide	15
II.5.3. Caractéristique électrique de la batterie au plomb (Pb)	18
II.6. CONSTITUANTS DES BATTERIES AU PLOMB-ACIDE	18
II.6.1. Les grilles	19
II.6.2. Electrode positive	20
II.6.3. Les plaques planes	21
II.6.4. Les plaques tubulaires	21
II.6.5. Le séparateur microporeux	22
II.6.6. L'électrode négative	23
II.6.7. Electrolyte	23
II.7. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA BATTERIE AU PLOMB-ACIDE	24
II.8. DIFFÉRENTS DOMAINES D'APPLICATION DES BATTERIES AU PLOMB	27
II.9. PRÉCAUTIONS D'EXPLOITATION	28

II.10. VIEILLISSEMENT DES BATTERIES-----	28
II.10.1. Durée de vie des batteries-----	28
II.10.2. Le processus de vieillissement-----	29
II.10.3. Performances-----	31
II.11. CONCLUSION-----	33
<i>CHAPITRE III : Régénération-----</i>	<i>11</i>
III.1. INTRODUCTION-----	34
III.2. L'effet du sulfate sur l'efficacité de la batterie-----	37
III.3. Désulfatation de la batterie plomb-acide par impulsion haute fréquence-----	38
III.4. Matériel , logiciel et outils utilisés dans l'étude-----	39
III.4.1. Régénérateur des batteries EnergicPlus-----	39
III.4.2. Avantages du régénérateur de batteries-----	39
III.4.3. DÉCHARGEUR DE BATTERIE MPD-1007-----	40
III.4.4. ANALYSEUR DE BATTERIE FLUKE BT521-----	41
III.4.5. RAPPORTS SUR LA RÉGÉNÉRATION-----	42
III.4.6. BATTERIES-----	42
III.5. Test sur l'état de la batterie-----	44
III.6. Conclusion-----	56
<i>CONCLUSION GENERALE-----</i>	<i>57</i>
<i>LES REFERENCES-----</i>	<i>58</i>



## Liste des figures

### **Chapitre-I-**

<b>Figure. (I-1)</b> la pile de volta .....	3
<b>Figure. (I-2)</b> La pile de Daniell .....	3
<b>Figure. (I-3)</b> batterie au nickel-cadmium .....	4
<b>Figure.(I-4)</b> batterie alcaline.....	5
<b>Figure (I-5)</b> : Capacité après désulfuration : capacité cellulaire mesurée après chaque test de désulfuration à gauche (vert-solide) ; pourcentage de la variation de la capacité des cellules à droite (pointillés bleus).....	7
<b>Figure (I-6)</b> : La variation de l'énergie d'entrée en fonction du rapport cyclique à différentes fréquences.....	8
<b>Figure (I-7)</b> : La tension finale en basse fréquence en fonction des valeurs de rapport cyclique .....	8
<b>Figure (I-8)</b> : Résistance interne lors de la charge et décharge .....	9
<b>Figure (I-9)</b> : Ampères de démarrage à froid lors de la charge et décharge.....	9

### **Chapitre-II-**

<b>Figure. (II-1)</b> Batteries Nickel-Cadmium.....	12
<b>Figure. (II-2)</b> Batteries au lithium .....	13
<b>Figure. (II-3)</b> Batteries au plomb acide .....	14
<b>Figure. (II-4)</b> Batterie de démarrage au plomb acide.....	16
<b>Figure. (II-5)</b> Vue éclaté d'une batterie de traction.....	16
<b>Figure. (II-6)</b> Batterie stationnaire acide-plomb .....	17
<b>Figure. (II-7)</b> Batteries Sonnenschein VRLA pour applications solaires .....	17
<b>Figure. (II-8)</b> Batterie AGM au plomb acide .....	18
<b>Figure. (II-9)</b> Batterie d'accumulateurs au plomb .....	19
<b>Figure. (II-10)</b> Photos de grilles en plomb .....	20
<b>Figure. (II-11)</b> Photo de plaques positives .....	20
<b>Figure. (II-12)</b> Photo de plaques planes .....	21
<b>Figure. (II-13)</b> Photo de plaques tubulaires .....	22
<b>Figure. (II-14)</b> Photo de séparateurs en polyéthylène .....	22
<b>Figure. (II-15)</b> Photo de plaques négatives .....	23
<b>Figure. (II-16)</b> Charge de la batterie au plomb .....	25
<b>Figure. (II-17)</b> Décharge de la batterie au plomb.....	25
<b>Figure. (II-18)</b> Évolution de la tension durant la décharge d'une batterie au plomb.....	26
<b>Figure. (II-19)</b> Évolution de la tension durant la charge d'un batterie au plomb.....	27
<b>Figure.II-20)</b> Marché mondial des batteries d'accumulateurs au Plomb 2020.....	27

### **Chapitre-III-**

<b>Figure (III-1)</b> : Emerson network power UPS .....	35
<b>Figure (III-2):</b> Onduleur DC/AC .....	35

<b>Figure (III-3):</b> regulation de régénérateur pour régénérer les batteries stationnaires .....	36
<b>Figure (III-4):</b> régénération des batteries de traction.....	36
<b>Figure (III-5):</b> REGENERATEUR MODÈLE M1005G .....	40
<b>Figure (III-6):</b> DÉCHARGEUR DE BATTERIE MPD-1007.....	41
<b>Figure (III-7):</b> ANALYSEUR DE BATTERIE FLUKE BT521 .....	41
<b>Figure (III-8):</b> rapports sur la régénération.....	42
<b>Figure (III-9):</b> batterie CSB GPL 121000.....	43
<b>Figure (III-10):</b> le nombre de cycle en fonction de DOD.....	44
<b>Figure (III-11):</b> valeur de résistance interne et la tension.....	45
<b>Figure (III-12):</b> Panneau d'affichage de régénérateur.....	45
<b>Figure (III-13):</b> résultat de décharge (1 <sup>ème</sup> cycle) .....	46
<b>Figure (III-14):</b> Courbe de charge de la batterie en fonction du temps (1 <sup>ème</sup> cycle).....	46
<b>Figure (III-15):</b> courbes de 2 <sup>ème</sup> test de décharge en fonction du temps .....	47
<b>Figure (III-16):</b> Courbe de 2 <sup>ème</sup> charge de la batterie en fonction du temps .....	48
<b>Figure (III-17):</b> courbes de 3 <sup>ème</sup> test de décharge en fonction du temps.....	49
<b>Figure (III-18):</b> Courbe de 3 <sup>ème</sup> test de charge de la batterie en fonction du temps .....	50
<b>Figure (III-19):</b> Courbes de 4 <sup>ème</sup> test de décharge en fonction du temps.....	51
<b>Figure (III-20):</b> Courbe de 4 <sup>ème</sup> charge de la batterie en fonction du temps.....	52
<b>Figure (III-21):</b> courbes de 5 <sup>ème</sup> décharge en fonction du temps.....	53
<b>Figure (III-22):</b> Courbe de 5 <sup>ème</sup> charge de la batterie en fonction du temps.....	54
<b>Figure (III-23):</b> courbes de 6 <sup>ème</sup> décharge en fonction du temps.....	55

## Liste des tableaux

### *Chapitre-III-*

<b>Tableau (III-1) :</b> courant constant de décharge.....	43
<b>Tableau (III-2):</b> données de charge de la batterie (1 <sup>ème</sup> cycle).....	47
<b>Tableau (III-3):</b> données de 2 <sup>ème</sup> test de décharge de la batterie.....	48
<b>Tableau (III-4):</b> données de 2 <sup>ème</sup> charge de la batterie.....	49
<b>Tableau (III-5):</b> données de 3 <sup>ème</sup> test de décharge de la batterie.....	50
<b>Tableau (III-6):</b> données de 3 <sup>ème</sup> test de charge de la batterie.....	51
<b>Tableau (III-7):</b> données de 4 <sup>ème</sup> test de décharge de la batterie.....	52
<b>Tableau (III-8):</b> données de 4 <sup>ème</sup> test de charge de la batterie.....	53
<b>Tableau (III-9):</b> données de 5 <sup>ème</sup> test de décharge de la batterie.....	54
<b>Tableau (III-10):</b> données de 5 <sup>ème</sup> test de charge de la batterie.....	55
<b>Tableau (III-11):</b> données de 6 <sup>ème</sup> test de charge de la batterie.....	56

**INTRODUCTION  
GENERALE**

Les énergies renouvelables ont connu une croissance extraordinaire au cours des deux dernières décennies. Elles sont considérées comme une source d'énergie inépuisable, car elles n'émettent aucun gaz à effet de serre. Malgré ces énormes atouts, leur part dans la production énergétique mondiale reste faible par rapport aux combustibles fossiles.

Il existe cinq types d'énergies renouvelables : l'éolien, le solaire, l'hydraulique, la géothermie et la biomasse. Différentes technologies coexistent dans chacune. Prenant l'exemple de l'énergie solaire, elle se divise en plusieurs volets : panneaux photovoltaïques, chauffe-eau solaires, centrales thermiques, etc. Quant aux avantages, ils sont inépuisables, émettent peu ou pas de gaz à effet de serre, et ne polluent pas l'environnement. Cependant, chacun a ses inconvénients et aucun ne peut à lui seul remplacer les combustibles fossiles. Dans le système photovoltaïque, les batteries sont utilisées pour couvrir le manque de disponibilité de l'électricité la nuit ou le jour en l'absence de soleil.

L'utilisation de batteries au plomb varie selon l'industrie, car elles sont efficaces, peu coûteuses et capables de fournir un courant élevé, ce qui signifie que la batterie a une puissance/un poids relativement lourd. Cependant, un problème majeur qui peut survenir avec les batteries au plomb est la sulfatation, qui se produit en raison d'une charge et d'une décharge incorrecte. Le sulfate entraîne une réduction de l'efficacité de la batterie, une augmentation de la résistance interne, une fraction du courant de décharge normal, une augmentation du temps de charge, une charge incomplète, une augmentation de la température de la batterie.

Pour résoudre à ce problème, un désulfateur d'impulsions à haute fréquence est utilisé pour désulfater les batteries au plomb acide, pour améliorer leur efficacité et leur donner un nouveau cycle de vie.

Dans ce mémoire, le mécanisme de désulfatation est présenté avec une comparaison entre l'état de la batterie avant et après l'utilisation du désulfateur d'impulsions. Notre thèse est organisée en 3 chapitres :

Dans le premier chapitre : une présentation générale sur la part des batteries comme technologie de stockage électrique dans le monde est discutée, suivie par un état de l'art sur les recherches les plus pertinentes concernant le processus de régénération des batteries

Suivie par le Deuxième chapitre où on a présenté les phénomènes et les causes qui peuvent raccourcir la durée de vie des batteries.

Dans le Troisième Chapitre : une étude expérimentale basée sur des tests a été effectuée sur le mécanisme de régénération pour différentes technologies de batteries au plomb.

Enfin une Conclusion générale dans la dernière partie de la thèse qui résume les résultats obtenus.

# **CHAPITRE I : L'état de l'art**

## I.1 INTRODUCTION

L'un des principaux inconvénients des énergies renouvelables, et de l'énergie photovoltaïque en particulier, est le manque d'électricité en continu, ce qui réduit l'efficacité de la production. Cette pénurie a conduit à l'adoption de l'utilisation de multiples dispositifs de stockage d'énergie selon la nature de la demande et le type d'application. En particulier, les sites géographiquement isolés ne sont pas raccordés à des réseaux intégrant des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, nécessitant des systèmes de stockage décentralisés. En conséquence, les problèmes de fluctuation sont communs par rapport à la plupart des sources d'énergie renouvelables.

Dans cette section introductive, le stockage de l'énergie électrique en général est présenté avant de se concentrer sur le stockage à petite échelle adapté à une utilisation dans des endroits isolés. Le stockage de l'énergie est désormais reconnu comme un élément essentiel dans la chaîne d'approvisionnement énergétique moderne.

C'est principalement parce qu'il peut améliorer la stabilité du réseau, augmenter la pénétration des énergies renouvelables, améliorer l'efficacité du système énergétique, économiser l'énergie fossile et réduire l'impact environnemental de la production d'énergie. Bien que, de nombreuses technologies de stockage d'énergie aient été examinées dans la littérature, ces technologies actuellement elles possèdent divers degrés de maturité technologique, dont certaines ont été établies pour des applications à l'échelle commerciale. La plupart des travaux sur le stockage de l'énergie traitent ces technologies en détail, cependant qu'il en reste peu d'informations sur l'application réelle de ces technologies à des fins de stockage d'énergie.

## I.2 GENERALITES SUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques pour faciliter l'accès à l'énergie, cela permet d'ajuster la production et la consommation d'énergie en limitant les pertes. L'énergie est stockée lorsque la disponibilité est supérieure à la demande et elle est récupérée lorsque la demande s'avère plus importante. Cette opération peut également répondre à une demande continue face à une production intermittente ou fluctuante de certaines sources d'énergie, comme les énergies renouvelables.[1]

### I.2.1. Historique sur les différents systèmes de stockage

Intéressons-nous tout d'abord à l'histoire de la batterie, depuis son invention jusqu'à nos jours, nous ont permis d'avoir un large aperçu sur le sujet. En effet, en 1800, Alessandro Volta[2] fut le premier à réaliser un système de stockage d'électricité avec sa célèbre pile de rondelles métalliques alternant le cuivre et le zinc, et entre lesquelles un tissu imbibé de saumure assurait le rôle de séparateur et d'électrolyte. Une photographie de la pile de Volta est représentée sur la (figure I- 1). En 1829, le français Antoine César Becquerel [3] proposa une évolution de la pile de Volta, permettant d'éviter les phénomènes de polarisation provoquant la formation de petites bulles d'hydrogène sur l'électrode de cuivre, entravant le passage du courant électrique. Pour ce faire, il élaborait un agencement différent : la plaque de zinc baignant dans de l'eau acidulée était enfermée dans un sac de baudruche, fabriqué à partir du gros intestin de bœuf, ce qui permettait d'obtenir une pellicule très fine.



Figure. (I-1) la pile de volta [49]

En plongeant ce dispositif dans une solution de sulfate de cuivre, on évitait le mélange entre les deux liquides, qui était indésirable pour le bon fonctionnement de la pile, sans pour autant gêner le passage du courant électrique. Il s'agit de la première pile à courant électrique constant. La pile de Daniell, en 1836 [3](Voir Figure I-2), reprend le principe de celle de Becquerel, mais échange la baudruche contre un vase en terre cuite poreuse. En 1868, Georges Leclanché propose une pile qui a beaucoup de succès. Celle-ci était composée d'un bocal en verre dans lequel se trouvaient un crayon en zinc et un cylindre en terre cuite poreuse contenant notamment du charbon ainsi que des éléments dépolarisants, le tout baignant dans un électrolyte à base de chlorure d'ammonium. La première pile secondaire, c'est-à-dire rechargeable, que nous appelons plus communément batterie, fut inventée par Gaston Planté, chimiste français, en 1859[3-4]. Il réussit une succession de cycles de décharge/charge en reliant les accumulateurs entre eux de façon à obtenir une batterie au plomb. Malgré son prix attractif, cette batterie présentait des utilisations assez limitées du fait de sa faible énergie spécifique (c'est-à-dire la quantité d'énergie stockée par unité de masse) et du nombre de cycles assez limité qu'elle permettait d'atteindre.

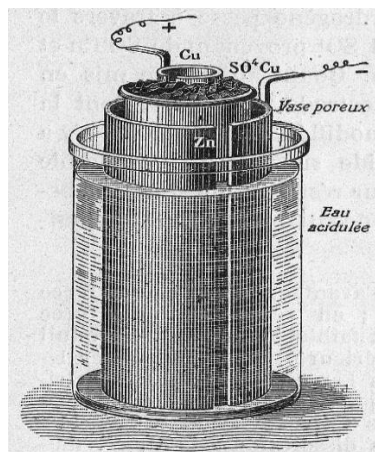


Figure. (I-2) La pile de Daniell [50]

Ce dispositif est principalement utilisé dans les voitures utilisant un moteur thermique.

C'est en 1899 que Waldemar Jungner [4] inventa la première batterie au nickel-cadmium. Plusieurs versions de cette pile suivent (Voir Figure I-3), , comme par exemple les nickel-zinc, nickel-fer ou

encore nickel-hydrogène. Ces batteries permettent d'atteindre de meilleures performances en termes de nombre de cycles réalisables ainsi que d'énergie spécifique. En 1988, une nouvelle batterie dérivée du nickel-cadmium voit le jour [4]: la batterie nickel-métal-hydrure. Son principe de fonctionnement ouvre la voie aux batteries lithium-ion qui sont énormément utilisées à l'heure actuelle. En effet, ce type de batterie a amené l'utilisation d'une électrode d'insertion, cela signifie qu'au lieu de consommer une des électrodes au cours de la réaction, dans ce cas l'anode, est capable d'absorber et de désorber les ions actifs dans les réactions électrochimiques. Cela permet de ne pas consommer de métal. Cette technologie a été utilisée pour la première voiture hybride, la Toyota Prius, malgré son coût élevé et son énergie spécifique inférieure.

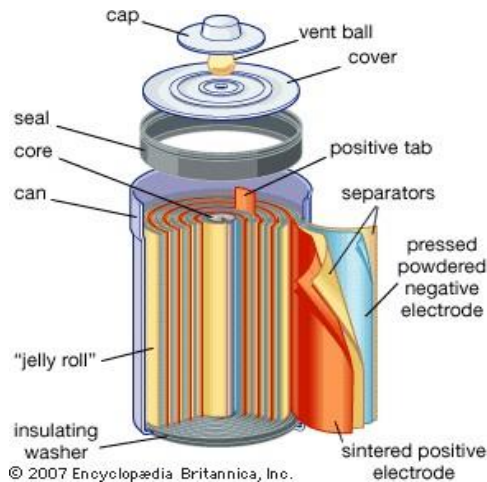


Figure. (I-3) batterie au nickel-cadmium[5]

La première batterie alcaline primaire a été développée au milieu des années 1960[3-6] (Voir Figure I-4). Dans cette pile, le charbon de la pile Leclanché est remplacé par du dioxyde de manganèse et le chlorure d'ammonium par de l'hydroxyde de potassium, le potassium étant un élément alcalin. Cette batterie présente certains avantages par rapport à celle proposée par Georges Leclanché : elle permet de fournir une intensité plus élevée pendant une plus longue période. Les premières batteries au lithium métallique sont alors apparues en 1973[3-4]. Grâce au développement des électrodes d'intercalation, le matériau actif est absorbé ou désorbé à l'intérieur même de l'électrode au lieu de consommer celle-ci ; le lithium s'est avéré être un bon matériau étant donné qu'il s'agit du plus petit des métaux. L'énergie spécifique d'une batterie lithium-métal est plus que doublée par rapport aux chimies précédemment utilisées. Ainsi une telle batterie peut présenter une énergie spécifique de 200 Wh/kg, là où une batterie au plomb présentera une énergie spécifique de 20 à 35 Wh/kg, 50 à 80 Wh/kg pour une batterie nickel-cadmium et 80 Wh/kg pour une batterie nickel-métal hydrure. La production de ces batteries lithium-métal a cependant été arrêtée suite à certains problèmes de sécurité. Cependant des solutions ont été trouvées : la batterie lithium-polymère et la batterie lithium ion.





Figure.(I-4) batterie alcaline[7]

La compagnie Sony a lancé la production en masse des batteries lithium-ion en 1991. Elles sont, depuis lors, largement utilisées dans toute une série de domaines tels que les Smartphones, les ordinateurs portables, les caméras ...etc.

Notons que la plupart de ces batteries sont toujours utilisées à l'heure actuelle, le choix de la chimie dépend de l'application qui sera faite par la batterie. Ainsi certaines applications préféreront un coût plus faible, d'autres une sécurité optimale ou encore d'une capacité plus grande [3].

## I.3 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES DE LA PART MONDIALE DES BATTERIES ET DESULFURATION DES BATTERIE

### I.3.1 Les recherches sur le stockage d'énergie dans les batteries

Dans cette partie, nous verrons plusieurs articles qui parlent de l'utilisation des batteries comme solution de stockage d'énergie au niveau local (Algérie) et mondial. Diverses applications actuelles et futures pour l'utilisation de batteries de différents types.

N. Achaïbou [8] Dans leur article, l'utilisation de batteries a été abordée pour résoudre les problèmes du système d'énergie solaire dus au manque d'énergie pendant la nuit ou à l'absence de soleil, ainsi qu'à voir les différents types de batteries disponibles et à les comparer. En termes d'avantages, de capacité minimale et de coût.

Enfin, il a été conclu que la grande diversité des batteries et leurs différentes caractéristiques rendent la caractérisation des équipements de stockage difficile, cependant, les batteries au plomb sont les plus utilisées en raison de leur durée de vie et de leur faible coût.

R. Kabouche et all, [9]. L'auteur de cet article vise à connaître les meilleures technologies de stockage pour le système photovoltaïque en Algérie (système couplé au réseau et isolé) à la lumière de l'application du programme de développement des énergies renouvelables. L'article mentionnait la disponibilité de plusieurs technologies de stockage (Gravitaire, Thermique, De pression, Chimique, Cinétique Electromagnétique et Electrostatique), une comparaison sensible a été faite à partir de différents critères pour connaître les propriétés de ces technologies telles que l'énergie disponible, la capacité de stockage et l'efficacité. Il a été conclu que ces propriétés font des batteries la meilleure technologie de stockage d'énergie dans le système d'énergie solaire, d'autant plus que d'autres technologies n'ont pas atteint le stade de maturité.

Patrice SIMON [10]. Cet article traite des techniques actuelles de stockage d'énergie électrique et mentionne quelques applications nécessitant l'utilisation de batteries de natures diverses. Le document mentionne que la technologie de stockage par étape est la plus largement utilisée en raison de l'énorme capacité de stockage. Il y a aussi le stockage thermique et cinétique (par volant d'inertie) avec un pourcentage de moins de stockage, cependant, les batteries sont considérées comme l'une des technologies les plus largement répandue en raison de leur succès en polyvalence au niveau des applications portables (téléphones et ordinateurs) comme ainsi que dans le secteur des transports (voitures électriques et utilisation plus large de l'électricité à l'intérieur des avions), et enfin des applications stationnaires dans les systèmes d'énergie solaire, Nous constatons que les batteries ont une efficacité énergétique élevée de l'ordre de 97% avec la possibilité d'être recyclées, ces avantages avec la multiplicité et le développement des familles de batteries et l'expansion de l'utilisation des applications portables, du secteur électrique et des sources d'énergie alternatives feront que le pourcentage d'utilisation de la batterie comme technologie de stockage ne cessera d'augmenter.

Hélène HORSIN MOLINARO – Bernard MULTON [11] les technologies de stockage de l'énergie électrique, leurs caractéristiques et leurs avantages. Une étude approfondie de ces technologies a été réalisée, à travers laquelle une grande diversité de technologies de batteries a été observée, chaque famille ayant des spécificités (Pb, Ni/cd, lithium).

Enfin, il a été conclu qu'au milieu de cette forte demande d'énergie et de l'exploitation obligatoire des énergies renouvelables, les techniques nécessaires et recyclables doivent être utilisées pour réduire l'épuisement des matières premières (un exemple en a été présenté avec une batterie au lithium), ainsi que l'accent mis sur l'amélioration et le développement des coûts des technologies de stockage.

Jean-Marie Tarascon [12]. Ce Comptes Rendus traite de la nécessité d'utiliser des énergies alternatives (énergies renouvelables) pour produire de l'énergie propre, avec la nécessité de coupler les systèmes de production d'énergie avec des systèmes de stockage pour augmenter l'efficacité et assurer des économies d'énergie à tout moment. Au sein de ces tendances, l'utilisation de voitures électriques au lieu de voitures ordinaires pour préserver l'environnement a été discutée. Cette approche nécessite de s'appuyer sur des batteries lithium-ion hautement efficaces pour fournir de l'électricité aux voitures électriques. Il a été conclu aussi que certaines conditions devaient être respectées pour assurer une utilisation à haut rendement des batteries et leur bonne exploitation comme utiliser de l'énergie primaire provenant d'énergies renouvelables pour les recharger, d'élaborer des matériaux d'électrodes de plus haute capacité et à base de métaux abondants via des procédés moins énergivores, de développer des technologies de batteries plus éco-compatibles, d'injecter de l'intelligence dans les batteries via des capteurs et des fonctionnalités auto-réparatrices pour repousser l'âge pivot de recyclage et permettre de donner une seconde vie à la batterie et enfin de lancer une politique de recyclage agressive incluant des procédés et circuits courts de récupération et la mise en place de normes strictes

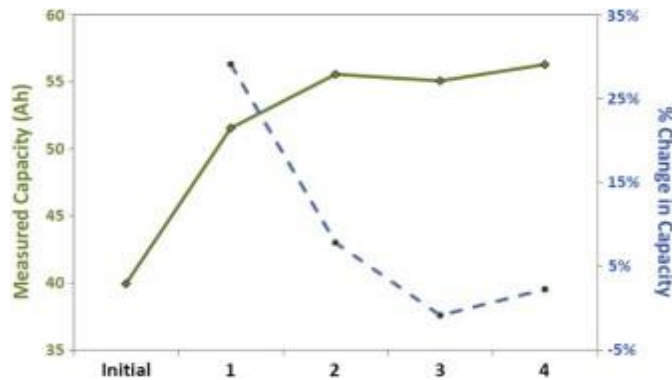
L'office fédéral de l'énergie (OFEN) [13] a traité la stratégie de l'État suisse pour rendre le système énergétique plus respectueux à l'environnement et pour réduire les émissions de gaz nocifs d'ici 2050, dans le cadre de cette stratégie. L'office fédéral de l'énergie (OFEN) a commandé un ouvrage d'analyse des besoins potentiels en technologies de stockage de l'énergie électrique l'étude a traité les différentes technologies et leurs avantages et inconvénients positifs. Une comparaison a été faite entre ces

technologies en termes de capacité de stockage, capacité et d'efficacité, leurs durées des économies d'électricité, de coût au (kWh) et de degré de développement pour chaque technologie, on peut conclure que les batteries se caractérisent par la capacité à fournir de l'électricité au quotidien, commercialisable et développement. Contrairement à diverses autres technologies, dont la plupart sont encore en recherche et développement (Stockage chimique et Stockage mécanique).

### I.3.2 Les recherches sur le processus de régénération des batteries

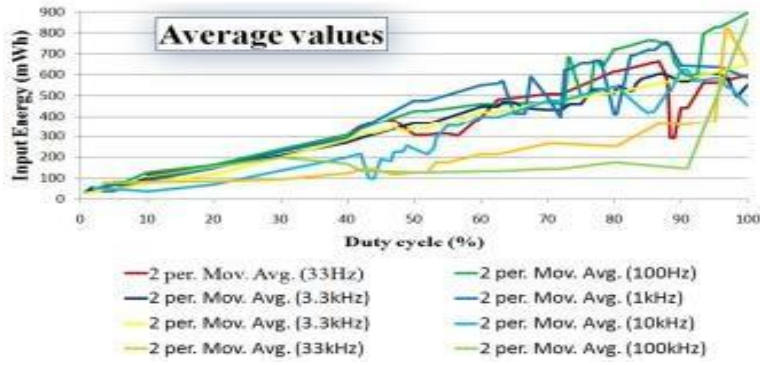
Bien qu'étant la batterie technique la plus utilisée pour le stockage dans le système d'énergie solaire, elle souffre de la perte de sa capacité de stockage et de la fin de sa vie avant sa date d'expiration en raison du processus de sulfatation. Cela est dû à une mauvaise gestion des conditions d'utilisation de la batterie, par exemple en la plaçant dans un endroit inapproprié. Mauvais processus de charge-décharge... etc., une solution à ce problème a été trouvée et la capacité de stockage de la batterie a été restaurée grâce au processus de désulfuration. Vous trouverez ci-dessous plusieurs articles qui parlent de ce processus et de son efficacité.

Ying Shi et all,[14] ont publiés un article qui étudier l'Identification et remédiation de la sulfatation dans les batteries au plomb à l'aide de la détection de la tension et de la pression des cellules. Dans leur étude, la tension et la pression des cellules des batteries VRLA neuves et mortes sont surveillées pendant les tests pour déterminer la cause de la mort des cellules, la figure (I.5) montre les résultats de la désulfuration dans laquelle 41% de la capacité de la cellule est restaurée.



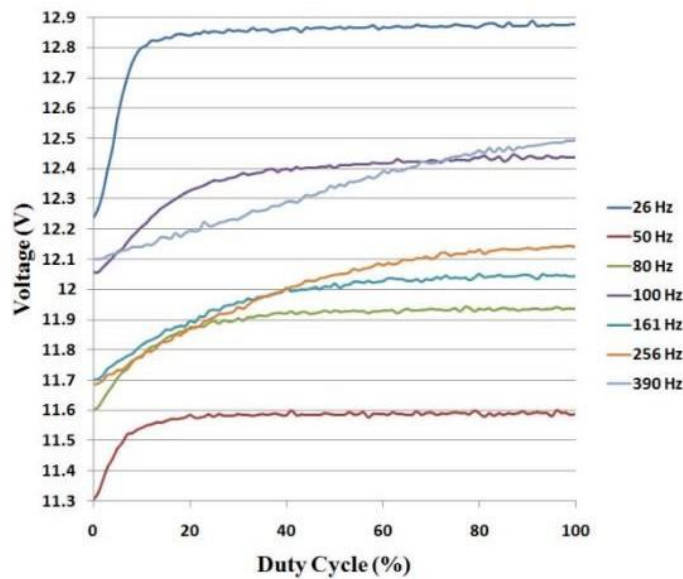
**Figure (I-5) :** Capacité après désulfuration : capacité cellulaire mesurée après chaque test de désulfuration à gauche (vert-solide) ; pourcentage de la variation de la capacité des cellules à droite (pointillés bleus),[14]

S. Levente,[15]. A publiés un article qui étudier sur une contribution de la charge de la batterie avec des impulsions Des mesures expérimentales de la quantité d'énergie de charge de la batterie montrent qu'il existe des maxima et des minima avec différents rapports cycliques dans le domaine fréquentiel entre 33 Hz et 100 kHz (voir figure I.6). Ce fait est causé par les propriétés physiques et électrochimiques des particules, qui déterminent la vitesse de mouvement et de réaction sous champ électrique.



**Figure (I-6) :** La variation de l'énergie d'entrée en fonction du rapport cyclique à différentes fréquences.

Levente Szabo et all ,[16].A publiés un article qui étudier La réponse en tension de la batterie au plomb par le biais d'impulsions de charge avec une fréquence et un cycle de service variables. Dans cet article, les processus de charge des batteries au plomb, il semble y avoir des aspects peu clairs. Dans la charge avec des impulsions à fréquence et rapport cyclique variables (voir la figure I.7), la réponse en tension ne se traduit pas toujours par les caractéristiques attendues. L'applicabilité des résultats peut être étendue à tous les types de batteries utilisées aujourd'hui.



**Figure (I-7) :** La tension finale en basse fréquence en fonction des valeurs de rapport cyclique.

J. Wuttibhat,[17]. A publiés un article qui étudier la désulfuration de la batterie plomb-acide par impulsion haute fréquence. Les résultats ont montré qu'après que la batterie au plomb ait été chargée avec une impulsion à haute fréquence, la batterie avait une résistance interne plus faible. La tension de la batterie complètement chargée et les ampères de démarrage à froid étaient plus élevés, ce qui se traduisait par de meilleures performances de la batterie. Les figures suivantes représentée les résultats de désulfuration

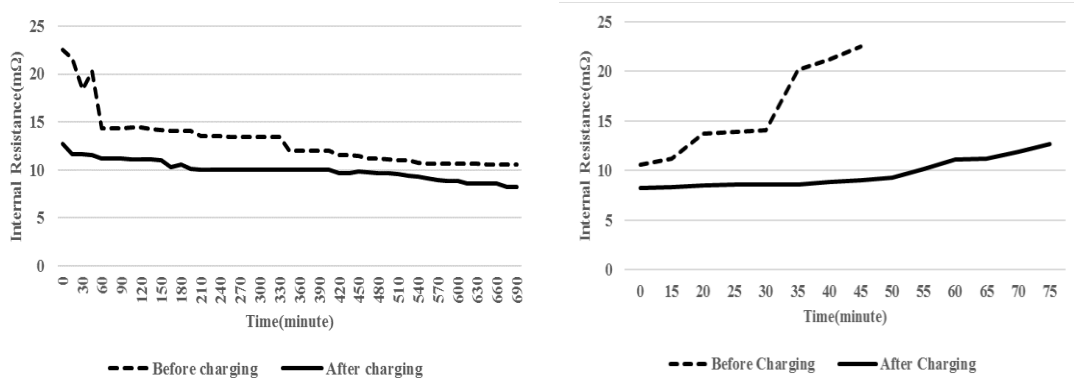


Figure (I-8) : Résistance interne lors de la charge et décharge

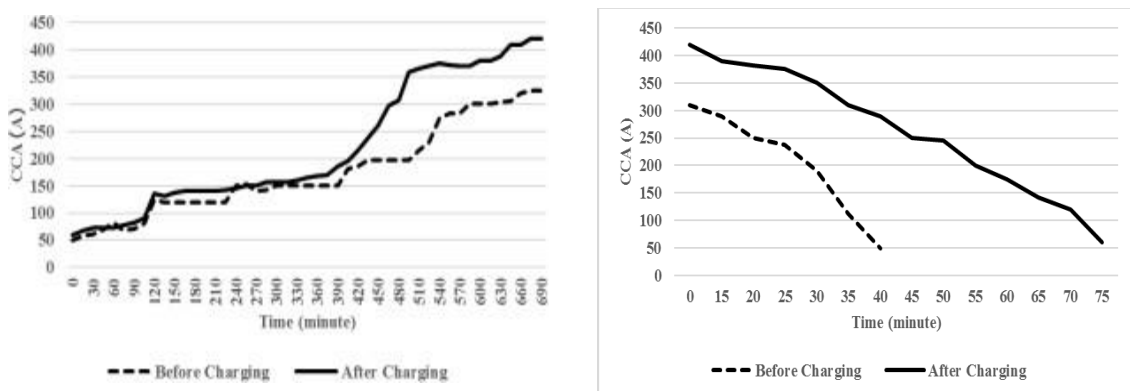


Figure (I-9) : Ampères de démarrage à froid lors de la charge et décharge

Mahmut Turhan ,[18]. A publiés un article qui étudier Chargement avec la technologie Igbt pour prolonger la durée de vie des batteries sous-marines. Dans cet article, la raison principale de la défaillance des batteries au plomb est la sulfatation. La charge est partiellement consommée pour l'électrolyse de l'eau et le dégagement d'hydrogène et d'oxygène. La charge est partiellement consommée pour l'électrolyse de l'eau et le dégagement d'hydrogène et d'oxygène. Le processus de conception et de production d'un chargeur-déchargeur de batterie sous-marine avec une sensibilité de sept pour mille, qui a été développé par la technologie IGBT pour empêcher la sulfatation dans les batteries sous-marines.

## I.4 CONCLUSION

L'électricité est un vecteur énergétique très pratique, l'un de ses inconvénients essentiels est l'intermittente, notamment l'énergie électrique produite à partir de l'énergie solaire, le stockage de l'électricité avec des batteries et un autre dispositif de stockage est donc une solution idéale pour assurer l'approvisionnement et la continuité de l'énergie électrique, notamment l'énergie électrique produite par les panneaux solaires.

Dans ce chapitre, un état de l'art a été présenté sur les différents mécanismes et techniques de stockage dans le temps, Dans la deuxième partie, il y a deux sections. La première section couvre plusieurs articles sur la part mondiale des batteries, nous notons l'importance des batteries à la fois localement et globalement, car l'utilisation des batteries au plomb est importante dans les systèmes solaires aujourd'hui et dans un avenir proche. Les batteries lithium ion s'emparent du marché du véhicule électrique, en deuxième section la désulfuration solution pour renouveler les batteries et leur donner une seconde vie et restaurer leur capacité de stockage.

# **CHAPITRE II : Caractéristiques et phénomènes de vieillissements des batteries**

## II.1. INTRODUCTION

Actuellement, les batteries au plomb représentent une part importante du marché mondial pour le stockage de l'énergie à moyenne et à grande échelle, en particulier pour les applications photovoltaïques. Ces dernières présentent un intérêt particulier car elles offrent une variété d'installations pour de nombreuses applications électriques modernes. De plus, elles sont considérées comme la technologie de choix en raison de leur fiabilité, efficacité énergétique et leur disponibilité, surtout par rapport au coût attractif qu'elles présentent. Cependant, malgré leur large utilisation dans l'industrie, leur comportement affecté par l'environnement interne et externe se caractérise par des réactions électrochimiques imprévisibles, telles que des changements de température, qui conduisent à la dégradation de leur efficacité et nécessitent donc une étude bien profonde sur les causes de vieillissement des batteries.

## II.2. LES BATTERIES EN TANT QUE SOLUTION POUR LE STOCKAGE ELECTRIQUE

Les batteries (accumulateurs) restituent l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques sous forme d'énergie électrique. Un accumulateur, quelle que soit sa technologie est défini par les quatre grandeurs suivantes :

- Sa densité d'énergie massique : (ou énergie spécifique) exprimée en Wh/kg, qui correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse d'accumulateur.
- Sa densité d'énergie volumique : exprimée en Wh/l, qui correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de volume d'accumulateur.
- Sa densité de puissance massique : exprimée en W/kg, qui représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur.
- Sa cyclabilité : exprimée en nombre de cycle qui caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge [19].

Les fabricants d'accumulateurs ont étudié ces vingt dernières années de nombreux couples électrochimiques pour remplacer les accumulateurs traditionnels, plomb et nickel/cadmium (Ni/Cd). Plus récemment, deux nouvelles familles d'accumulateurs, le nickel/hydrure métallique (Ni/MH) et le lithium-ion (Li-ion) ont vu le jour. Ces deux systèmes possèdent des énergies spécifiques et des densités d'énergie très supérieures aux systèmes traditionnels, et excluent le plomb ou le nickel/cadmium pour toutes les applications de téléphonie portable.

Les accumulateurs au plomb voient leurs performances limitées par une importante modification morphologique des matières actives au cours du cyclage conduisant à un faible taux d'utilisation de ces dernières. Elles ont néanmoins l'avantage d'une production industrielle de masse sans comparaison avec les autres filières. Leur coût est nettement inférieur à celui des autres technologies et qui reste le principal facteur d'attraction pour les constructeurs d'automobiles. L'augmentation du rendement des matières actives ayant jusqu'à ce jour été une butée, les améliorations sont orientées surtout vers la recherche de nouvelles architectures internes (pseudo-bipolaire, bipolaire) et de nouveaux procédés de mise en œuvre (compression, mousses métalliques) [19].



## II.3. ROLE D'UNE BATTERIE

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

Dans un système PV, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- a) **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- b) **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- c) **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée [20].

## II.4. DIFFERENTS TYPES DE BATTERIES

### II.4.1. Les batteries Nickel-Cadmium

Les batteries aux Nickel- Cadmium dans la figure (1) ont une structure physique semblable à celles du Plomb- Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70% [28]. En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas le gel.



Figure. (II-1) Batteries Nickel-Cadmium

### II.4.2. Les batteries au lithium

L'utilisation et la diversité sans cesse grandissantes des applications électriques ont conduit au développement de nouvelles technologies de stockage électrochimique, comme les systèmes Redox, les systèmes de stockage via l'hydrogène, ou les batteries au lithium figure (2).

L'élément lithium présente des caractéristiques physico-chimiques intéressantes :

- Fort potentiel redox :  $E_{Li/Li^+} = -3,04 \text{ V/ENH}$  ;
- Masse molaire faible :  $M = 6,94 \text{ g/mol}$  ;
- Capacité massique =  $3,87 \text{ Ah/g}$ .

Utilisé comme matière active à l'anode, il permet d'obtenir des batteries à fort potentiel énergétique. Mais sa réactivité avec le milieu ambiant (notamment avec l'air) en fait un matériau difficile à manipuler à l'état métallique. Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère [29].



Figure. (II-2) Batteries au lithium [51]

### II.4.3. Les batteries Plomb-acide

C'est la plus ancienne technologie de stockage rechargeable. En raison de leur coût attractif et de leur grande disponibilité, les batteries au plomb (voir la figure (3)) sont l'option la plus simple et la moins chère pour de nombreuses applications. Bien que largement utilisé dans les applications d'énergie solaire, il est rarement équipé d'un système intelligent de gestion de l'énergie pour éviter toute interruption de service. De plus, des températures élevées signifient toujours une durée de vie limitée, un entretien technique régulier (remplacement de la batterie) est donc nécessaire [19].



Figure. (II-3) Batteries au plomb acide [52]

#### ❖ Avantages

- Le fonctionnement de ces batteries ne disperse pas de plomb
- Le plomb est plus économique
- Elles n'ont pas d'effet de mémoire, c'est-à-dire qu'on peut les recharger n'importe quand sans les abîmer.
- Elles ont de grosses capacités et solides.
- Auto- décharge faible 5% par mois.
- Nombre de cycles de charge/décharge variant de 600 à 900 sur un banc d'essai : cette valeur importante est réduite de moitié en condition d'utilisation réelle, ce qui donne par exemple, sur un véhicule, environ 300 cycles.
- Insensibilité aux traitements mécaniques et électriques.
- Elements recyclables à 99, 96 %.
- Coût à l'achat le plus faible, fiables et ne posant aucun problème de sécurité.
- Facilité à charger et à gérer énergétiquement, surtout en mode tampon (char permanente).
- Operations de maintenance simplifiées

## II.5. LA PLACE DES BATTERIES AU PLOMB AUJOURD'HUI

Bientôt 150 ans d'études sur l'accumulateur au Plomb et pourtant, loin d'être un produit suranné, il continue de faire l'objet de diverses recherches et reste l'accumulateur le plus vendu dans le monde. Les principales raisons de cet engouement sont présentées par un faible coût et une maturité technologique, ainsi que sa capacité à atteindre des taux de récupération supérieurs à 97 % [20-21].

Il existe aujourd'hui différents types de batteries au plomb et différentes technologies pour mieux s'adapter aux spécificités de l'application qui les utilise. Les batteries au plomb se sont améliorées au fil des ans et continueront de le faire. Il est notamment utilisé pour le démarrage de véhicules (domaine actuellement le plus actif), le remorquage (manutention de camions), les alimentations de secours, le photovoltaïque. La technologie des batteries au plomb adaptée à ces domaines se caractérise notamment par des grilles d'épaisseur et d'alliage, des électrolytes liquides ou fixes, des plaques planes ou tubulaires, etc. Le marché mondial des batteries (toutes technologies confondues) se compose de trois catégories : Batteries portables, de démarrage et industrielles (de traction et stationnaires) La croissance du marché mondial des batteries au plomb devrait passer de **34,776.7 \$ Mn** milliards en 2022 à **49,086.4 \$ Mn** milliards d'ici 2030, à un TCAC de **3.5 %** au cours de la période de prévision [31].

L'importance de ce nombre s'explique par le fait que malgré l'augmentation substantielle de la part des technologies lithium-ion (Li-ion), nickel-métal hydrure (Ni-MH) pertinentes pour le marché des batteries portables, le plomb reste comme une technologie de batterie encore principalement utilisée dans les zones de démarrage, de remorquage et stationnaires. Pour ces zones encombrées, les batteries plomb-acide sont souvent préférées pour leurs faibles coûts d'investissement.

### II.5.1. Les deux types des batteries au Plomb-acide

Il existe deux types d'accumulateurs au plomb, la batterie dite ouverte et la batterie scellée ou à recombinaison de gaz.

#### ❖ La batterie au plomb ouverte

Lors du fonctionnement des batteries au plomb dites ouvertes, les gaz produits par la réaction secondaire de séparation de l'eau s'échappent naturellement par des trous disposés au niveau du couvercle. Le dégagement d'hydrogène gazeux là où sont stockées les batteries est un danger car son mélange avec l'air ambiant est explosif à partir de 4% en volume. Dans le cadre des installations de secours, il doit être installé dans un local spécialement ventilé. Les cellules ouvertes produites aujourd'hui (basées sur des grilles à fortes poussées d'oxygène et d'hydrogène) sont souvent appelées batteries sans entretien.

Ce nom a été choisi car la consommation d'électrolyte est si faible que la réserve d'électrolyte d'origine est suffisante pour assurer le fonctionnement normal de la batterie tout au long de son cycle de vie [19].

#### ❖ La batterie à recombinaison de gaz

L'un des principaux inconvénients des batteries ouvertes est qu'elles nécessitent un entretien important, notamment l'ajout régulier d'eau.

La réponse est venue au début des années 1980 avec un nouveau type de batterie qui ne nécessitait qu'un très faible niveau d'entretien : la batterie composite à gaz. Dans le cas du dégazage, l'hydrogène et l'oxygène se recombinaient pour former de l'eau. Le taux de recombinaison varie entre 95% et 99%, et est inférieur à 30% dans le cas des cellules ouvertes. Ces batteries ont une valve pour libérer du gaz si la pression d'air interne devient trop élevée, d'où leur nom anglais : VRLA Batteries for Valve Regulated Lead Acid Batteries [32,33].

### II.5.2. Catégories est technologies des batteries au Plomb-acide

Il existe 3 principales catégories définies par leur domaine d'application :

- Batterie de **démarrage** : utilisée dans les automobiles, elle est composée de plaques fines, de grande surface, et autorise des courants de décharge élevés, mais de courte durée



Figure. (II-4) Batterie de démarrage au plomb acide [53]

- Batterie de **traction** : elles sont utilisées dans les transpalettes, les chariots élévateurs ou les véhicules électriques. L'épaisseur de la plaque est beaucoup plus importante que dans le cas précédent : elle varie entre 2 mm et 6 mm .Les alliages Pb-Sb sont couramment utilisés dans ce type de batterie.  
Ce type de cellule est plus adapté aux applications PV. Ils peuvent avoir une durée de vie de sept à huit ans avec 80% d'émissions mais un entretien irréprochable.



Figure. (II-5) Vue éclaté d'une batterie de traction [54]

- Batterie **stationnaire** : elles sont souvent utilisées pour fournir un courant de qualité (alimentation sans interruption UPS) pour les relais télécoms, les salles informatiques, ...etc.  
Ces batteries sont typiquement conçues pour être chargées en permanence avec un courant faible (courant dit float), n'ont qu'une faible autodécharge (1 à 2%/mois), et sont capables de supporter des décharges profondes.  
Les alliages Pb-Ca sont couramment utilisés dans ce type de batterie.

Sur certaines cellules stationnaires, la capacité à délivrer une puissance élevée sera privilégiée, tandis que d'autres seront construites pour avoir une très bonne longévité en cyclage profond, ce qui les rend idéales pour les applications photovoltaïques.



Figure. (II-6) Batterie stationnaire acide-plomb [55]

Et pour les batteries stationnaires les technologies les plus connus :

- **VRLA** (Valve Regulated Lead Acid) : c'est une batterie à soupape. En cas de dégazage, l'hydrogène et l'oxygène se recombinent à l'intérieur de la batterie pour former de l'eau.



Figure. (II-7) Batteries Sonnenschein VRLA pour applications solaires [56]

Jeu de batteries Sonnenschein VRLA pour applications solaires L'une des meilleures batteries au plomb sur le marché est la Valve de Régulation Lead-Acid (technologie VRLA, Plomb) adaptée aux applications solaires. Le taux d'autodécharge est inférieur à 2% par mois à 20 °C. Toutefois, l'autodécharge double pour chaque augmentation de la température de 10 °C [25].

- **Si la** pression interne devient trop forte, une vanne-soupape relâche les gaz : si ce stade est atteint fréquemment, l'électrolyte se dessèche et rend la batterie inutilisable.

- Type **AGM** (Absorbed Glass Mat) : une fine feuille de fibre, imbibée d'électrolyte (70% d'eau et 30 % d'acide) est placée entre les plaques de plomb de la batterie. Cette batterie peut fournir un courant élevé, de courte durée



Figure. (II-8) Batterie AGM au plomb acide [57]

- Type **GEL** : l'électrolyte est figé par l'addition de gel de silice. Ces batteries sont étanches et peuvent être placées dans n'importe quelle position

### II.5.3. Caractéristique électrique de la batterie au plomb (Pb)

Une batterie est caractérisée par sa tension et son courant de décharge, et sa capacité en ampères/heure :

**La tension nominale** :  $U$  qui dépend du nombre d'éléments  $n$ , égale au nombre d'éléments multiplié par 1.8 V. Généralement, on considère qu'un accumulateur au plomb est déchargé lorsqu'il atteint la tension de 1.8V par élément, donc une batterie de six éléments où

- 12 V est déchargée lorsqu'elle atteint la tension de 10.8 V :  
$$U = n \times 1.8 \text{ si } n = 6 \Rightarrow U = 10.8 \text{ V} \quad (\text{II.1})$$

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

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

$$E = C \times U \quad (\text{II.2})$$

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

$E = 6000 \text{ Wh}$ .

## II.6. CONSTITUANTS DES BATTERIES AU PLOMB-ACIDE

Une batterie au plomb est constituée d'un certain nombre d'éléments accumulateurs montés en série et reliés par des connexions en plomb soudé (une batterie de 12 V contient 6 éléments)

Les accumulateurs sont logés dans un bac en plastique (polypropylène, ABS...), fermé par un couvercle scellé, chaque accumulateur est composé d'un ensemble de couples d'électrodes positives et négatives isolées par un séparateur microporeux, destiné à éviter les courts-circuits tout en laissant circuler les ions

Les électrodes sont formées d'une grille en alliage de plomb, dont les alvéoles sont remplies d'une pâte poreuse :

- de peroxyde de plomb  $PbO_2$  pour l'électrode positive
- de plomb métallique  $Pb$  pour l'électrode négative

Les électrodes baignent dans un électrolyte, solution diluée d'acide sulfurique  $H_2SO_4$ , sous forme de liquide, sous forme de gel ou absorbée dans des feutres en fibre de verre

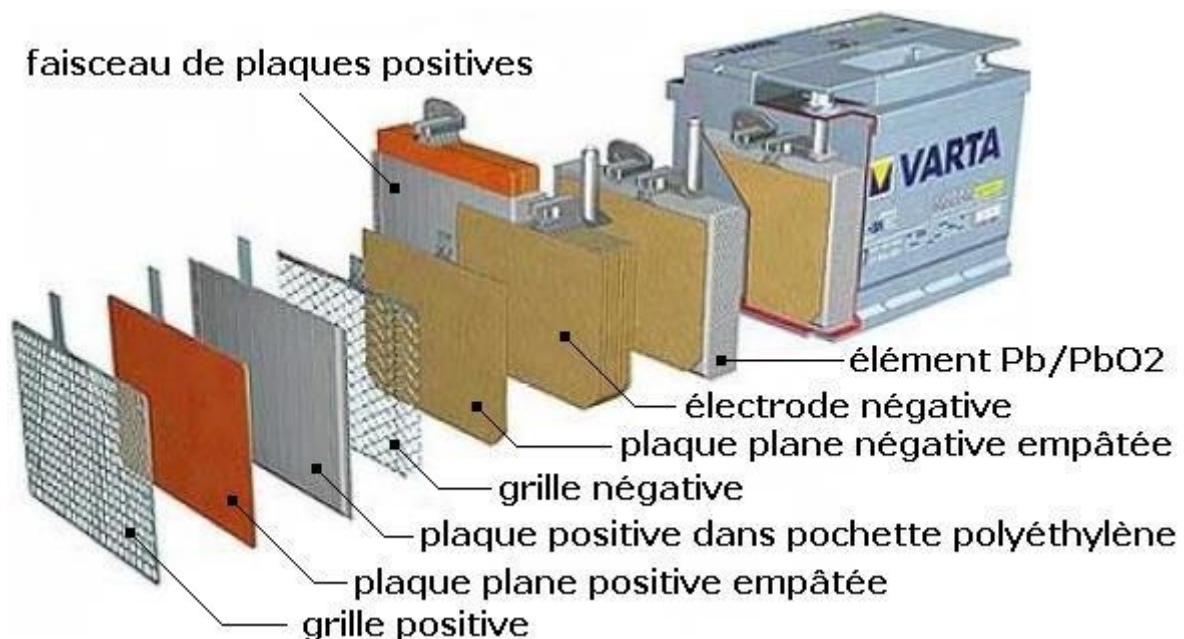


Figure. (II-9) Batterie d'accumulateurs au plomb [58]

### II.6.1. Les grilles

Maillon de base de la batterie, la grille est en alliage de plomb. Ils sont utilisés pour le captage de courant et la résistance mécanique des matières actives. Beaucoup de recherches ont été faites sur eux, et beaucoup d'attention a été portée sur leurs alliages car c'est généralement la corrosion de la grille qui limite la durée de vie des batteries au plomb-acide. Les options métalliques pour la calandre sont encore limitées. Le plomb est le seul métal qui n'est pas suffisamment toxique pour les batteries pour supporter les conditions corrosives de l'environnement. Le plomb pur est trop mou pour être utilisé directement, d'autres métaux (étain, antimoine, calcium, argent...) sont introduits dans la composition des grilles pour augmenter leur dureté mais aussi leur résistance à la corrosion.



Que ce soit pour les batteries de démarrage ou les batteries industrielles, les alliages traditionnels constitués de (plomb-antimoine) sont souvent négligés. Aujourd'hui, la plupart des alliages sont à base de (plomb-calcium) : il existe d'innombrables grilles dans l'industrie, appelées (plomb-calcium), avec des teneurs différentes en étain, argent, etc.... selon l'application [34-35]

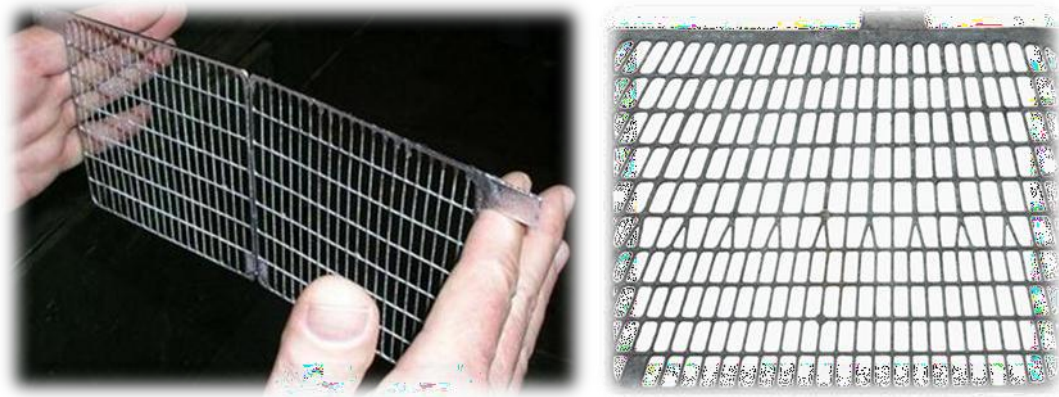


Figure. (II-10) Photos de grilles en plomb [59]

### II.6.2. Electrode positive

L'électrode positive est un maillage, utilisant des alliages de plomb binaires ou ternaires (Pb-Sb, Pb-Sn, Pb-Ca, Pb-Sb-As, ...) dont les alvéoles sont remplies d'une pâte poreuse de peroxyde de plomb  $PbO_2$  (actif matériau à l'électrode positive). Les éléments d'alliage améliorent les propriétés mécaniques de la grille et ont un impact sur les performances de la cellule. Les plaques positives peuvent être fabriquées selon deux techniques : les plaques planes et tubulaires [36].



Figure. (II-11) Photo de plaques positives [60]

### II.6.3. Les plaques planes

Fabriqués selon le procédé Faure, ils sont constitués d'une grille en alliage de plomb (a) (Figure I-3), qui assure la tenue mécanique des plaques et la captation du courant. La grille est garnie d'une pâte à base d'acide sulfurique et d'une poudre constituée d'un mélange d'oxyde de plomb et de plomb métallique. Lors de la formation de la plaque positive, la matière active est oxydée en dioxyde de plomb ( $PbO_2$ ), qui est de couleur brun foncé (b). La granulométrie de la poudre est très importante car elle détermine la surface spécifique de la matière active, la surface de réaction : la taille moyenne des pores est d'un micron. Pour la plaque positive, la surface de réaction est d'environ  $2m^2/g$ .

La technologie Flat plate est la plus économique (parce qu'elle contient le moins de matière et un processus de fabrication simple), est la plus fragile et permet les meilleures performances de qualité. Principalement utilisé dans le domaine des batteries de démarrage



Figure. (II-12) Photo de plaques planes

### II.6.4. Les plaques tubulaires

La plaque tubulaire est constituée d'épines en alliage de plomb (collecteurs de charge) enfilées dans des tubes poreux qui reçoivent la matière active dans l'espace libre entre les épines et la gaine. Ainsi, l'électrode positive est constituée d'une rangée de tubes cylindriques placés verticalement. La forme cylindrique permet au matériau actif de se dilater et de se contracter lors des cycles de charge et de décharge tout en conservant une excellente cohésion et un bon contact électrique avec le conducteur central : augmentation de la durée de vie de l'électrode.

Cette technologie plus robuste (plus lourde et plus encombrante) sera utilisée dans des applications nécessitant une grande durabilité et longévité : remorquage lourd, stationnaire (secours et photovoltaïque), sous-marins... [37].

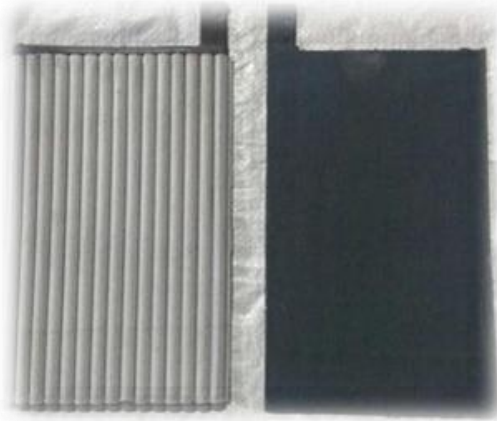


Figure. (II-13) Photo de plaques tubulaires [61]

### II.6.5. Le séparateur microporeux

Afin d'éviter le contact entre les électrodes positive et négative et donc les courts-circuits, les plaques sont isolées les unes des autres par des séparateurs. Ces séparateurs sont généralement des tôles rectangulaires entre les plaques positives et négatives et sont d'une qualité exceptionnelle :

- Isolation électrique parfaite.
- Très haute perméabilité aux ions chargés.
- haute porosité.
- Excellente résistance à l'acide sulfurique.

Les séparateurs sont généralement constitués de nattes de fibres de cellulose protégées par de la résine, voire de nattes de PVC fritté ou de fibres de verre [36].



Figure. (II-14) Photo de séparateurs en polyéthylène [62]

### II.6.6. L'électrode négative

L'électrode négative, de façon complémentaire, est anode durant la décharge et cathode durant la charge. La matière active est en plomb spongieux. Comme pour l'électrode positive, elle est rapportée sur un support en alliage rigide de plomb [38].



Figure. (II-15) Photo de plaques négatives [63]

### II.6.7. Electrolyte

Selon le type de batterie, l'électrolyte est liquide, gélifié ou absorbé. Dans l'accumulateur au plomb, l'électrolyte joue un double rôle : il assure le transport d'électricité par conduction ionique et participe, en tant que réactif, aux réactions ayant lieu lors de la charge et de la décharge.

#### ❖ Électrolyte liquide (libre)

L'électrolyte est une solution dont le solvant est de l'eau distillée et le soluté est de l'acide sulfurique. Le rapport du mélange détermine la densité de l'électrolyte. La densité d'un électrolyte contenant 33 % en masse de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  est de  $1.28 \text{ g.cm}^{-3}$ . A l'état liquide, les molécules d'eau sont dissociées en ions  $\text{H}^+$  et  $\text{OH}^-$ . L'ion  $\text{H}^+$  n'existe pas seul, il est toujours combiné avec une molécule  $\text{H}_2\text{O}$  pour former un ion  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Dans l'eau, les molécules d'acide sulfurique se décomposent principalement en ions hydrogène  $\text{H}^+$  (qui deviennent  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) et en ions hydrogènesulfate  $\text{HSO}_4^-$  (anions solvatant, entourés de molécules  $\text{H}_2\text{O}$ ). Une plus petite proportion est l'ion sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$ .

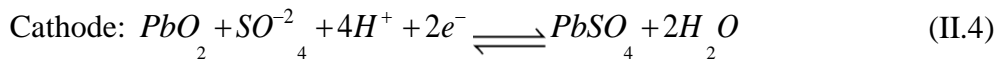
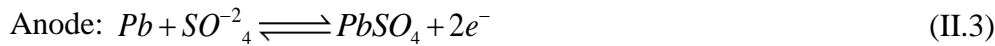
#### ❖ Électrolyte gélifié ou absorbé (immobilisé)

Les électrolytes en gel sont constitués de poudre de silice colloïdale qui coagule en réagissant avec l'acide contenu dans l'électrolyte. Le gel ainsi formé peut retenir l'électrolyte dans le récipient. L'électrolyte absorbé est un électrolyte liquide qui sature des séparateurs fibreux placés entre des plaques de polarités différentes. Outre le fait qu'il est stationnaire, cet électrolyte est encore une solution aqueuse d'acide sulfurique. Le volume et la densité de l'électrolyte sont définis par le fabricant en fonction du type et de l'utilisation de la batterie. C'est un compromis résultant de la conciliation de la capacité requise, de la durée de vie, de l'intensité du courant à fournir, de la résistance aux basses températures (la température agit sur

la viscosité et donc sur la conductivité de l'électrolyte). Considérez deux cartes dans une batterie, ce sont les deux surfaces en vis-à-vis et le volume d'électrolyte entre les plaques qui ont un rôle largement prépondérant car les lignes de courant sont les plus courtes et drainent la majeure partie du courant [39].

## II.7. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA BATTERIE AU PLOMB-ACIDE

Lorsque des batteries alimentent un équipement extérieur, plusieurs réactions chimiques se produisent simultanément. Une réaction de réduction se produit à l'électrode positive (cathode) lorsque le peroxyde de plomb ( $PbO_2$ ) est converti en sulfate de plomb ( $PbSO_4$ ). Par contre, sur la plaque négative (anode), une réaction d'oxydation se produit et le plomb métallique est transformé en sulfate de plomb. L'électrolyte acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) fournit des ions sulfate pour les deux demi-réactions et agit comme un pont chimique entre elles. Pour chaque électron produit à l'anode, un électron est consommé à la cathode, l'équation est la suivante [40] :



### ✓ Les principales réactions en charge-décharge

Bien que les phénomènes électrochimiques mis en jeu pendant la charge et la décharge soient complexes et imparfaitement connus, certaines réactions prédominent et peuvent être décrites. En plus de l'évolution des matériaux actifs (équations (4) et (5)), une autre réaction (dite secondaire) se produit en permanence au sein de l'accumulateur : l'électrolyse de l'eau.

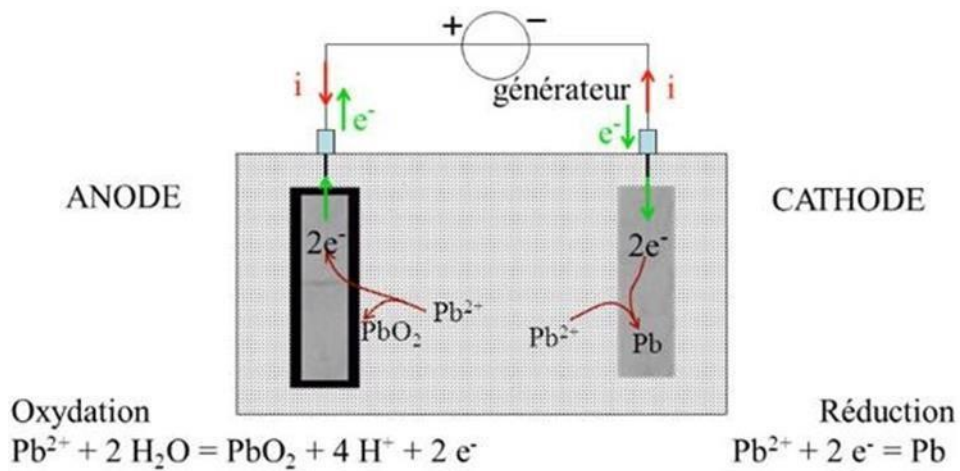


Figure. (II-16) Charge de la batterie au plomb

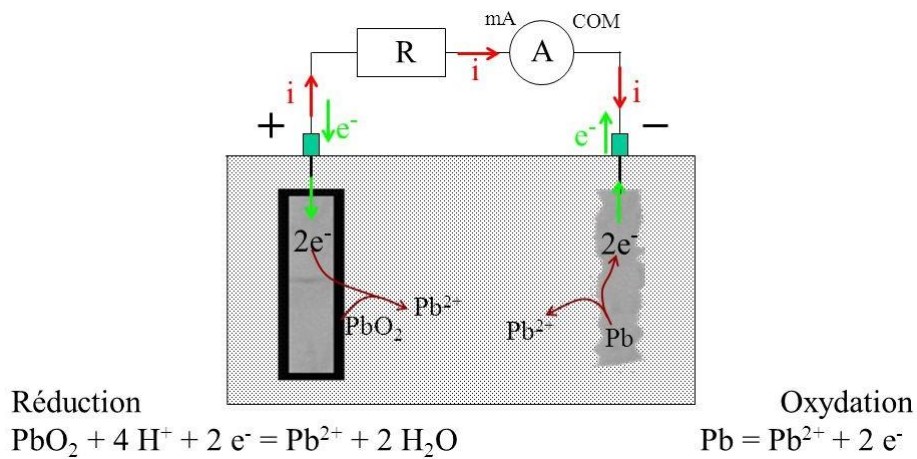


Figure. (II-17) Décharge de la batterie au plomb

En conséquence, lors de la décharge de l'accumulateur, les grains de sulfate de plomb formés à l'électrode positive entrent en contact entre eux, ce qui a pour effet d'accroître la taille des grains des matériaux actifs à l'électrode positive au cours des cycles charge- décharge. Plus les grains des matériaux actifs sont volumineux et plus il est difficile d'atteindre le centre des particules et de faire réagir la totalité du matériau actif. La proportion croissante du sulfate de

plomb formé au cours des cycles charge-décharge de la batterie entraîne la sulfatation des électrodes et réduit les performances de l'accumulateur [41]. En général, la matière active positive n'est utilisée qu'à 25 voire 40% dans le meilleur des cas [42].

#### ❖ En décharge

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

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

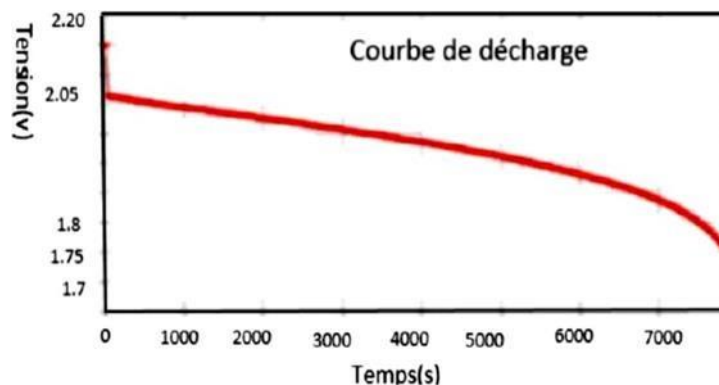


Figure. (II-18) Évolution de la tension durant la décharge d'une batterie au plomb [28]

#### ❖ En charge

Durant la charge, le sulfate de plomb est transformé au niveau des plaques, en plomb (Pb) pour l'électrode négative et en oxyde de plomb ( $PbO_2$ ) pour l'électrode positive. Cette formation s'accompagne de la formation d'acide sulfurique. La densité augmente.

La charge d'une batterie dans un système photovoltaïque s'effectue généralement selon la caractéristique de charge IU Figure (19). La première phase s'effectue à courant quasiment constant jusqu'à atteinte de la tension de fin de charge à partir de laquelle commence la deuxième phase de charge qui s'effectue à tension constante. Durant cette deuxième phase, le courant de charge sera réduit à niveau correspondant au maintien de la charge dans le but de conduire à une charge complète de la batterie.

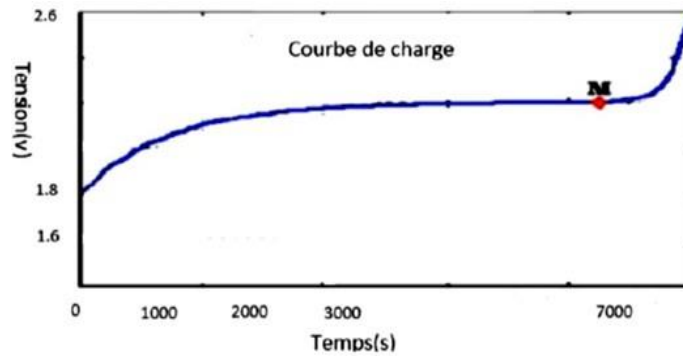


Figure. (II-19) Évolution de la tension durant la charge d'un batterie au plomb [28].

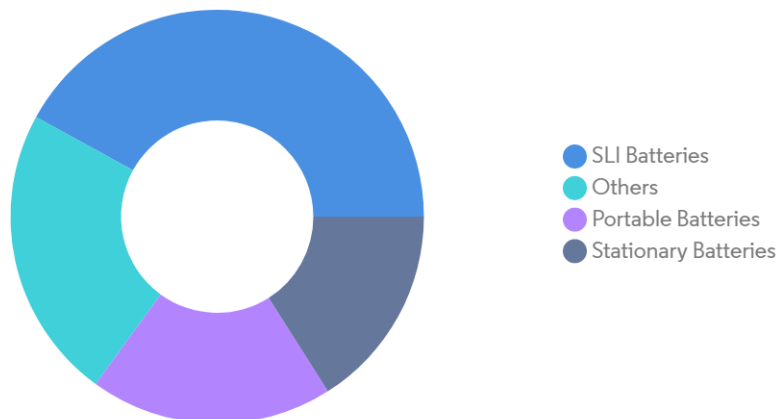
## II.8.DIFFÉRENTS DOMAINES D'APPLICATION DES BATTERIES AU PLOMB

Aujourd'hui, les batteries au plomb sont utilisées dans trois grands types d'applications :

Le marché des batteries au plomb est segmenté par application (batteries SLI (démarrage, éclairage et allumage), batteries stationnaires (télécom, onduleurs, systèmes de stockage d'énergie (ESS), etc.), batteries portables (électronique grand public, etc.), et autres applications), la technologie (batterie inondée et régulée par valve) et la géographie (Amérique du Nord, Europe, Asie-Pacifique, Amérique du Sud, Moyen-Orient et Afrique).

Le marché mondial des batteries au plomb est largement dominé par les batteries de démarrage, ainsi qu'illustré sur les diagrammes ci-dessous figure (20) :

Lead-Acid Battery Market: Revenue Share (%), by Application, Global, 2020



Source: Mordor Intelligence



Figure.II-20) Marché mondial des batteries d'accumulateurs au Plomb 2020 [43].

Le marché des batteries au plomb était évalué à 39,93 milliards USD en 2020, et il devrait atteindre 54,45 milliards USD d'ici 2027, enregistrant un TCAC de plus de 3,9 % au cours de la période 2022-2027. L'épidémie de COVID-19 au premier trimestre 2020 a eu un impact négatif sur le marché des batteries au plomb. Les restrictions de verrouillage imposées par les



gouvernements du monde entier ont réduit la demande des industries utilisatrices finales comme l'automobile, ce qui a nui à la croissance. De plus, les restrictions sur le commerce non essentiel, la fermeture des usines de fabrication et les perturbations de la chaîne d'approvisionnement ont eu un impact négatif sur le marché des batteries au plomb. Des facteurs tels que la croissance du secteur automobile et le faible coût du plomb devraient stimuler le marché des batteries au plomb au cours de la période de prévision. Cependant,

- Le segment des batteries SLI devrait dominer le marché en raison de la croissance du secteur automobile dans le monde.
- Avec la baisse du coût des équipements solaires photovoltaïques et les initiatives mondiales de soutien visant à éliminer les émissions de carbone et à promouvoir les sources renouvelables, l'utilisation des projets solaires hors réseau devrait augmenter de manière significative au cours de la période de prévision. Ainsi, il devrait offrir de grandes opportunités pour le marché des batteries au plomb au cours de la période de prévision.
- L'Asie-Pacifique devrait dominer le marché des batteries au plomb, la majeure partie de la demande provenant de la Chine, du Japon et de l'Inde [43].

## **II.9. PRÉCAUTIONS D'EXPLOITATION**

Selon les caractéristiques fonctionnelles des batteries au plomb décrites ci-dessus, certaines mesures peuvent être prises qui sont essentielles au bon fonctionnement de ces batteries [29].

- Le réglage de la tension de fin de charge doit tenir compte de la température : il faut prévoir un dispositif appelé compensateur de température qui règle automatiquement la tension de fin de charge en fonction de la température mesurée.
- Il faut s'assurer que la déflation ne dépasse pas 10 heures par mois.
- Le réglage du seuil de tension de fin de décharge doit tenir compte du courant de décharge moyen
- Programmer une charge d'égalisation au moins deux fois par an (si le régulateur n'active pas automatiquement la charge d'égalisation) pour éviter la formation prolongée de sulfate sur les panneaux.

## **II.10. VIEILLISSEMENT DES BATTERIES**

La production d'énergie des systèmes PV fluctue fortement en fonction de beaucoup de conditions météorologiques. C'est pourquoi il faut penser à stocker cette vitalité. Les accumulateurs électrochimiques peuvent stocker chimiquement l'électricité produite par des générateurs PV et récupérer sous forme d'électricité selon la réaction réversible. Le taux de variation de ces réactions chimiques varie avec la durée de vie des batteries.

### **II.10.1. Durée de vie des batteries**

La durée de vie d'une batterie est directement liée à ses conditions d'utilisation. Elle dépend essentiellement du nombre de cycles de charge-décharge. Pour obtenir 10 à 15 ans de durée de vie, la batterie est alors doit être maintenue un état de charge supérieur à 50 %.

La durée de vie d'une batterie au plomb est déterminée par les trois facteurs suivants :

- **Le premier facteur** : vie cyclique et résistance aux températures élevées, qui existent dans toutes les applications des batteries.
- **Le deuxième facteur** : les effets de la sulfatation et de la sous-charge, qui ne sont que spécifiques dans les applications PV.
- **Le troisième facteur** : c'est un facteur catastrophique, un défaut de fabrication, en Redimensionnement, mauvaise utilisation, gel, etc., ceux-ci sont généralement évitables.

Toute surcharge élevée entraînera de la corrosion, des déformations et de la corrosion planche et surchauffe. La présence de certains composés organiques et les matières inorganiques (utilisées comme matières actives, additifs dans les électrolytes) provoquent l'agglomération des particules de plomb entraîne une perte de porosité. Il y a des produits ajoutés au matériau de la plaque négative, ce défaut peut être évité.

Les batteries des systèmes PV fonctionnent différemment. Les conditions de fonctionnement de la batterie dans ces systèmes entraînent une faible durée de vie. Pour les systèmes PV utilisant des cellules plomb-acide à plaques tubulaires, La durée de vie est généralement limitée par la dépendance à la température, en particulier [25]. La résistance à la corrosion et durée de vie des cycles.

### II.10.2. Le processus de vieillissement

Le vieillissement des batteries au plomb/acide dans les systèmes PV est principalement causé par les raisons suivantes :

- Corrosion positive des plaques : le plomb métallique Pb se transforme en plomb  $PbO_x$ .
- Dégradation du matériau actif de la plaque positive due à la déformation ce dernier ( $PbO_2 \leftrightarrow PbSO_4$ ) est chargé et décharger.
- Sulfatation -  $PbSO_4$  recristallise sous une charge prolongée ou l'état de charge est faible.

La corrosion est la destruction des métaux sous l'action du milieu environnant. Cette destruction est le résultat d'une réaction de nature chimique ou électrochimique qui se produit sur une surface de séparation du métal de son environnement. Ce sont généralement des réactions d'oxydation métal.

La grande majorité des problèmes de corrosion rencontrés sont liés à la présence d'eau contacts métalliques. La corrosion est un problème très important d'un point de vue économique.

La corrosion modifie les caractéristiques courant/tension de la batterie. Par rapport à ce qui devrait théoriquement être obtenu, la capacité atteignable est appelée le facteur d'utilisation. Cela dépend du type d'élément, de la vitesse de décharge et la température. Il convient également de garder à l'esprit certaines conditions qui empêchent l'utilisation complète des matières actives, en particulier dans le processus de décharge.

L'un d'eux est la formation de revêtements de sulfate non conducteur sur le matériau actif ; un autre est le résultat d'une baisse de conductivité électrolyte, en raison de la teneur réduite en  $H_2SO_4$  ; en raison de la porosité réduite les sulfates se forment dans les pores du matériau et empêchent par la suite la diffusion du matériau  $H_2SO_4$  est le troisième type.

Ce dernier effet est pour densité de courant élevée, car plus la densité de courant est élevée, plus la réaction est importante. Le sulfate bouche les pores présents en surface, réduisant ainsi la conductivité et la diffusion interne le conseil lui-même.

❖ **La sulfatation :**

Le terme de sulfatation est un peu impropre et on devrait parler de sulfatation anormale ou irréductible. En effet la sulfatation est la formation de sulfate de plomb à la surface et dans les pores de la matière active. Cette sulfatation se produit normalement à l'occasion de la décharge et seul un élément parfaitement chargé est exempt de sulfate. Le sulfate ainsi formé est constitué de petits cristaux qui sont facilement réduits lors de la charge.

On dit en fait qu'il y a sulfatation lorsqu'il devient impossible de réduire le sulfate de plomb en plomb et peroxyde de plomb par une charge normale. La charge est plus difficile et la désulfatation ne se fait plus que partiellement : de gros cristaux et même des croûtes peuvent apparaître, les plaques prennent une couleur plus claire, deviennent dures et compactes, imperméables à l'électrolyte et augmentant de volume, sont le siège de contraintes mécaniques qui entraînent la chute de la matière active, la déformation et même la rupture des grilles.

Symptômes

En dehors de la couleur des plaques qui est difficile à déceler, la sulfatation se traduit pratiquement par les symptômes suivants :

- Diminution de la densité de l'électrolyte en fin de charge, par rapport à un élément sain puisqu'une partie des radicaux  $SO_4$  est restée combinée au plomb,
- Longueur anormale de la durée de la charge puisque la transformation du sulfate est plus difficile,
- Décharge plus rapide puisque la quantité de matière active convertible est plus faible,
- Résistance intérieure plus forte, ce qui provoque une élévation de température plus importante.

Causes de la sulfatation

Les principales causes de la sulfatation sont les suivantes :

- ✓ Une décharge trop importante ceci peut résulter :
  - D'une décharge volontaire conduite trop loin,
  - De l'abandon d'une batterie déchargée pendant un temps trop long,
  - De l'insuffisance persistante de charge
- ✓ Une utilisation à une température excessive vis-à-vis de la densité de l'électrolyte convenable
- ✓ Une valeur excessive de la densité de l'électrolyte qui entraîne une attaque spontanée des plaques ceci peut résulter :
  - D'une erreur, lors du remplissage initial de la batterie
  - D'erreurs ou d'omission dans la réfection des niveaux

Des impuretés introduites notamment par l'électrolyte. Remèdes à la sulfatation il faut commencer par analyser l'électrolyte qui devra être remplacé s'il contient une quantité excessive d'impuretés.

Une sulfatation légère doit disparaître après une charge normale suivie d'une surcharge à faible régime.

Pour traiter une sulfatation importante, on charge l'accumulateur dans un électrolyte de faible densité. Il suffit, à l'issue d'une charge complète normale, d'enlever l'électrolyte et de le remplacer par de l'eau distillée. On charge alors à très faible régime. La désulfuration est complète lorsque la densité de l'électrolyte cesse de croître.

Il faut éviter tout dégagement gazeux important. On règle ensuite la densité de l'électrolyte à sa valeur normale. Ce traitement peut être renouvelé une seconde fois en cas de nécessité. Si, après un second traitement, la désulfuration n'est pas obtenue c'est que l'avarie est trop importante [44-45].

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

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

➤ **Court-circuit**

Les courts-circuits des éléments sont générés par :

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

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

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

➤ **La température**

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

### II.10.3. Performances

Les batteries au plomb ont l'énergie spécifique la plus faible, 35 Wh/kg, juste derrière les batteries au nickel-fer. Mais il est encore largement utilisé, notamment dans les véhicules automobiles et la plupart des véhicules ferroviaires, en raison de sa capacité à fournir des courants de crête de forte intensité pour le démarrage électrique des moteurs à combustion interne. Il présente également l'avantage d'être insensible aux effets mémoire. [30].

➤ **Choix de batteries d'accumulateurs**

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

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

➤ **Entretien de batteries d'accumulateurs**

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

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

- Garder la batterie propre ; ne laisser pas la poussière s'accumule sous peine de risque de court-circuit.
- Il est généralement admis que le courant de charge ne doit pas dépasser 10% de capacité de la batterie.
- Ne pas les surcharger.
- Elle doit être stockée dans un endroit sec à l'abri du soleil.
- Elle doit être maintenue charger par une charge d'entretien à intervalle régulier

➤ **Mesures de sécurité**

- Pour être en sécurité pendant la charge d'une batterie, ses mesures doivent être suivies:
- Pour toute manipulation il faut portez des protections individuelles tel que : les gants, les lunettes, surtout avec des batteries à électrolyte.
- Il est nécessaire de bien ventiler le local où s'effectue cette charge.
- Il ne faut jamais brancher les câbles de chargeur au niveau de la batterie avant d'avoir éteint le chargeur.
- La batterie ne doit jamais être mise en court-circuit.
- Il ne faut pas inversez la polarité.
- Il ne faut pas surcharger et ne jamais percez pas le boîtier.
- Éviter les décharges profondes.

➤ **Aspects environnementaux et santé humaine**

Le plomb peut provoquer une intoxication aiguë ou chronique s'il est ingéré ou inhalé. Cela peut être la cause d'un empoisonnement au plomb. Par conséquent, une bonne maîtrise des risques posés par les batteries au plomb usagées est vitale et dangereuse pour la santé et l'environnement, et ces batteries doivent être collectées et retraitées par des sociétés spécialisées. Pour prévenir les risques de contamination, les entreprises Algériennes doivent mettre en place des procédés conformes aux meilleures technologies disponibles et faire l'objet de contrôles stricts et réguliers, Powerboost est un très bon exemple a voire dans le 3ème chapitre. Ils doivent également garantir un haut niveau de protection à leurs salariés. Cette protection passe par une formation aux risques liés au plomb et l'utilisation systématique des équipements de protection collective et individuelle. Vérifier régulièrement l'efficacité de ces

mesures en mesurant la plombémie des salariés. La démolition dans des conditions difficiles peut entraîner la mort et une pollution durable.

## **II.11. CONCLUSION**

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 utilisée avec des panneaux solaires est une batterie stationnaire (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de démarrage par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

Dans ce chapitre on a vu dans la première partie les différents types et technologies des batteries, spécifiquement la batterie au plomb-acide leurs principes de fonctionnement leurs avantages et inconvénients et la constitution de cette technologie, dans la deuxième partie on a parlé sur les différents facteurs de vieillissements des batteries plomb-acide comme l'effet de la températures élevé et le phénomène sulfatation, Le défiance de la partie stockage cause des problèmes pour tout un système PV il faut vraiment trouver des solutions de maintenances pour prolongée la durée de vie de ces batteries.

# **CHAPITRE III : Régénération**

### III.1. INTRODUCTION

La capacité des batteries diminue avec les années à cause de l'accumulation de sulfate de plomb (matière cassante couleur blanchâtre). En effet, durant la décharge, des cristaux de sulfate de plomb ( $PbSO_4$ ) se forment sur les plaques de plomb. C'est une réaction chimique liée au fonctionnement même de la batterie.

Une fois le sulfate de plomb cristallisé, il ne se retransforme plus en acide sulfurique au moment de la charge, il est trop stable, et un chargeur de batterie est inefficace, la batterie est dite

« Sulfatée ». Seule la régénération permet de dissoudre les cristaux de sulfate de plomb qui se sont formés à la surface des plaques de plomb. Au cours du processus de régénération, les particules de plomb reprennent leur place à la surface spécifique des plaques de plombs.

Ainsi, toute la matière active qui était figée sous forme cristalline redevient disponible dans l'électrolyte de la batterie.

Une batterie régénérée peut être plus efficace qu'une batterie neuve et on va voir pourquoi.

### III.2. Stage pratique

Dans le cadre de notre formation d'ingénieurs spécialité les énergies renouvelables, option conversion photovoltaïque, nous avons effectué un stage professionnel de 4 mois à l'EURL PowerBoost à Ouled Chebel Alger.

Ce stage nous a permis d'approfondir nos connaissances et de côtoyer des ingénieurs et des techniciens dans leur carrière.

EURL PowerBoost a été choisi comme environnement pratique en raison de son impact écologique et socio-économique.

### III.3. Présentation EURL PowerBoost

PowerBoost est une société spécialisée dans la réparation d'équipements électriques/électroniques industriels avec un positionnement fort dans les systèmes d'alimentation télécom, les centres de données informatiques, et l'audit et le conseil sur les solutions d'alimentation en courant continu et la régénération des batteries.

PowerBoost a été créé en 2013, s'appuyant sur une équipe d'experts en électronique possédant une vaste expérience dans le domaine de la maintenance des équipements électroniques, et son envergure et ses responsabilités n'ont cessé de s'étendre ces dernières années.



## III.4. Les unités EURL Powerboost

### III.4.1. Maintenance et Réparation des Equipements Electriques :

Leur domaine d'activité est la réparation d'équipements électriques et électroniques dans divers secteurs industriels : Cela comprend les baies d'alimentation (alimentations), les redresseurs AC/DC, les onduleurs, les modules de contrôle de l'alimentation, les alimentations AC et DC, les chargeurs de batterie.



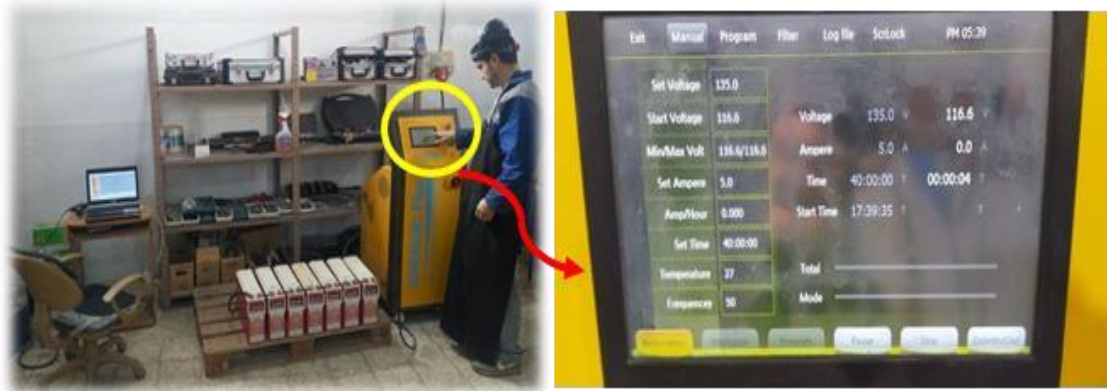
Figure (III-1) : Emerson network power UPS.



Figure (III-2): Onduleur DC/AC

### III.4.2. Regeneration des batteries:

Pour la partie autonome des sites de télécommunications, batteries et onduleurs, PowerBoost est spécialisée dans la régénération des batteries stationnaires par procédés électroniques c'est le représentant officiel d'ENERGIC Plus, un équipementier européen majeur.



**Figure (III-3):** regulation de régénérateur pour régénérer les batteries stationnaires.



**Figure (III-4):** régénération des batteries de traction.

Leurs méthodes d'intervention sont purement électroniques, sans ajouter des additifs chimiques à la batterie,

Leurs méthodes de régénération sont validées par le rapport d'évolution graphique, ils utilisent un système de surveillance, qui permet d'identifier avec précision le comportement de la batterie PowerBoost possède également des équipements de mesure de batterie spéciaux pour les diagnostics internes afin d'améliorer l'efficacité du processus de traitement.

Plusieurs types de batteries de toutes marques, et de différentes gammes de tension allant de 2V, 6V jusqu'à 12V, avec des capacités allant jusqu'à 3000Ah.

Après régénération de la batterie, une autonomie minimale de 80% à 110% de la capacité d'origine de la nouvelle batterie est assurée, avec une garantie d'un an.

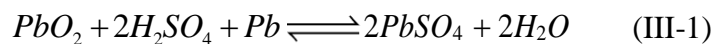
En plus des batteries stationnaires, des batteries de traction pour chariots élévateurs, gerbeurs, transpalettes et nacelles élévatrices sont gérés.

Au final, PowerBoost redonne une nouvelle vie pour la batterie, avec un nouveau cycle de fonctionnement.

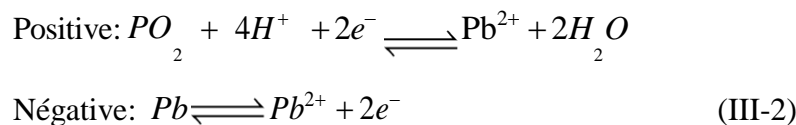
### III.5. L'effet du sulfate sur l'efficacité de la batterie

L'avènement de l'électricité est l'une des plus grandes réalisations de l'histoire de l'humanité et a considérablement amélioré la vie de l'humanité. Accompagnant la découverte de l'électricité, des batteries au plomb-acide (PB-A) ont été inventées pour stocker cette nouvelle forme d'énergie. Les batteries (PB-A) ont ouvert la porte au développement rapide des industries, à la naissance des véhicules électriques et à la vie moderne des êtres humains. Bien que les batteries (PB-A) aient été développées par l'accumulation de nouvelles technologies et la découverte de nouveaux matériaux depuis plus de 150 ans, la courte durée de vie, les pollutions sévères et la faible capacité des batteries (PB-A) limitent encore ses applications. De nos jours, les batteries au plomb-acide régulées par soupape (VRLA) révolutionnaires sont largement répandues et utilisées dans les véhicules de transport, les technologies de l'information et les systèmes de stockage d'énergie en raison de leur sortie stable et de leur pollution lumineuse. Cependant, la durée de vie des batteries VRLA est également courte en raison du problème d'accumulation de sulfate. Bien que les compositions de l'électrolyte chimique et la structure aient été améliorées, le principe de fonctionnement et les principales raisons à l'origine des pannes de la batterie restent inchangés. Un précédent rapport écrit par Jiramoree et all. Mentionné que la sulfatation causée par le cristal de sulfate sur les électrodes des batteries a contribué à plus de 80% de toutes les pannes de batterie (PB-A). Une littérature ancienne a rapporté que la sulfatation pouvait entraîner une corrosion des électrodes de batterie, augmentant les résistances internes des batteries et réduisant également la surface effective des électrodes. Ces effets entraîneraient une grande quantité de chaleur pendant le processus de charge et l'atténuation de la réaction chimique entre l'électrolyte et les matériaux actifs, influençant ainsi la capacité et la durée de vie des batteries (PB-A). Par conséquent, il est essentiel d'enquêter sur la cause profonde de la sulfatation et de trouver une méthode efficace pour surmonter ce problème.

Le principe de fonctionnement est essentiellement la réaction chimique illustrée :

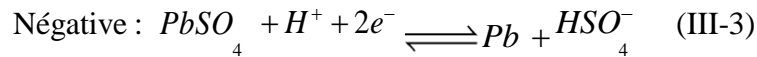


Lorsque la batterie est en état de décharge, les matériaux actifs de l'électrode positive, le dioxyde de plomb, seront convertis en sulfate de plomb. De même, l'électrode négative composée de plomb sera également convertie en sulfate de plomb. L'électrolyte, l'acide sulfurique, sera consommé en réagissant avec les matières actives. Les équations de réaction d'électrode de l'électrode positive et de l'électrode négative en état de décharge sont démontrées ci-dessous



Lorsque la batterie est en état de charge, le sulfate de plomb sera reconverti en matériaux actifs





Théoriquement, une batterie (PB-A) peut être utilisée pendant très longtemps, si l'équation de réaction chimique comme indiqué dans l'Eq. (1) peut continuer complètement. Il est montré dans l'Eq (1) que la réaction chimique se déroulant dans les batteries (PB-A) est en quelque sorte réversible, par conséquent, le sulfate de plomb se cristallisera progressivement et se déposera sur les électrodes. Ce phénomène est connu sous le nom de sulfatation. Cela conduit généralement à une courte durée de vie des batteries (PB-A) [46]

### III.6. Désulfatation de la batterie plomb-acide par impulsion haute fréquence

Une fois cristallisé le sulfate de plomb sous forme solide n'est plus accessible au chargeur classique. Les cristaux figent la matière active qui ne rentre plus dans le circuit de production d'électricité. Au fil des cycles les ramifications cristallines grossissent, ce qui augmente la perte de capacité. Cette perte de capacité conduit au biberonnage, ce qui est auto aggravant car cela favorise la cristallisation.

La régénération des batteries permet de retrouver les capacités d'origine par décristallisation des cristaux de sulfate de plomb. La régénération peut se faire en curatif après 5 ans d'âge, ou en préventif tous les ans. Le préventif permet de maintenir la pleine capacité de la batterie tout au long de la vie du porteur et permet d'éviter d'autres problèmes comme des problèmes mécaniques liés au gonflement des plaques, sous la pression de développement des cristaux. La régénération préventive se fait selon des cycles beaucoup plus courts que la régénération curative.

Chaque batterie d'acide de plomb a une fréquence totale d'environ 2 à 6 mégahertz. Si des impulsions d'électricité à faible puissance, mais une fréquence élevée et une haute tension sont envoyées dans la batterie, la résonance rythmique des plaques provoque la division des dépôts de cristal et le sulfate revient à la solution d'électrolyte. Cependant, cette méthode de désulfatation prend de quatre à six cycles de charge normalement à travers laquelle la batterie doit être chargée, c'est-à-dire chargée parallèlement au désulfatage afin que la batterie soit rajeunie et complètement chargée. [47]

Le désulfateur d'impulsions à haute fréquence fonctionne en envoyant des impulsions à une fréquence d'environ 3,26 MHz à la batterie pour faire vibrer le cristal de sulfate de plomb à la fréquence de résonance des cristaux de soufre, qui est de 3,26 MHz et a donc un impact sur l'énergie qui provoquera la dissolution des molécules de sulfate à dos dans l'électrolyte Il existe de nombreux produits sur le marché dans le monde entier qui prétendent utiliser la technique d'impulsion à haute fréquence pour désabonner efficacement les batteries de plomb sulfatées. Mais il y a peu ou pas de recherches approfondies pour tester et analyser les performances de ces produits pour savoir s'ils font ce qu'ils sont affirmés par leurs fabricants. Cette recherche vise donc à tester et à analyser l'un de ces produits pour déterminer s'il peut relancer les batteries au plomb sulfatées [48]

Afin d'assurer la capacité et l'efficacité du processus de décomposition du soufre grâce à des impulsions à haute fréquence, nous avons réalisé une étude expérimentale basée sur des tests a été effectuée sur le mécanisme de régénération pour différentes technologies de batteries au plomb

## III.7. Matériel, logiciel et outils utilisés dans l'étude

### III.7.1. Régénérateur des batteries EnergicPlus

L'équipement appareil utilise pour régénère la batterie est Energic Replus. Régénérateur Energic Plus élimine avec succès la sulfatation en appliquant une impulsion à haute fréquence en plusieurs étapes. Ce processus restaure la capacité de la batterie, vous permettant de réutiliser les batteries usées et sulfatées. Équipement peut également être utilisé pour l'entretien annuel, ce qui peut doubler la durée de vie de vos batteries. En plus de restaurer la capacité des batteries, le régénérateur de batterie Energic Replus constitue également un analyseur idéal pour les batteries. Notre banc de charge complet intégré dans ce dispositif permet d'effectuer un test de charge intégral pour vérifier la capacité actuelle de la batterie

### III.7.2. Avantages du régénérateur de batteries

- Un déchargeur et chargeur de batterie, 2-en-1
- Rapports de test détaillés
- Coût minimal d'entretien
- Durée de vie prolongée des batteries
- Régénération rapide
- Logiciel d'analyse gratuit
- Programme d'automatisation appliqué
- Connexion sans fil entre le régénérateur et l'ordinateur
- Possibilité de suivre le processus de régénération depuis un smartphone ou un ordinateur portable (en réseau local)
- S'applique aux industries suivantes : chariot élévateur, nacelles élévatrices, matériel aéroportuaire, transporteurs de personnes et de marchandises, nettoyage, télécommunication, UPS et énergie solaire.

En utilisant MODÈLE M1005G (figure III.6) :

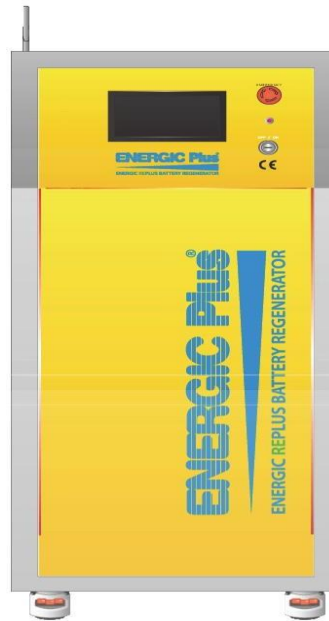
Puissance d'entrée : AC 3P3W + PE 380/400 V-50/60 Hz, 20 A max.

Sortie : DC 1,2-120 V, 0-50 A

Capacité de la batterie : 500 Ah (c10)

Transformateur : 10 kVA

Certification : CE



**Figure (III-5):** REGENERATEUR MODÈLE M1005G

### **III.7.3. DÉCHARGEUR DE BATTERIE MPD-1007 :**

Un test de décharge est la seule manière pour bien vérifier la capacité d'une batterie, Pendant le test de décharge, il n'est pas nécessaire de faire des ajustements manuels au courant, vu que le MPD1007E (Figure III.7): est un déchargeur à courant constant doté d'une fonction de détection précise du courant moyennant un contrôle numérique, quelle que soit la gamme de tension. Il peut être connecté au système de régénération Replus et vérifier les performances d'une batterie avec précision. Le déchargeur peut être utilisé de façon autonome, ou peut être connecté en synchronisation avec les régénérateurs Replus afin d'augmenter la puissance de décharge des régénérateurs Replus.

Caractéristiques :

Commutation automatique en fonction du courant de décharge Conçu pour tester des batteries 12 V, 24 V, 36 V, 48 V, 72 V, 80 V, 96 V

Gamme de décharge : 1-200 A (jusqu'à 1000 Ah c5 batterie de chariot élévateur)

Arrêt de décharge automatique pour la durée de temps, le réglage de la tension et la capacité

Protection de décharge excessive de la batterie

Disjoncteurs intégrés pour arrêt d'urgence et protection contre la surcharge

Protection contre la polarité inversée

Logiciel d'analyse



Figure (III-6): DÉCHARGEUR DE BATTERIE MPD-1007

#### III.7.4. ANALYSEUR DE BATTERIE FLUKE BT521

L'analyseur de batterie Fluke BT521(Figure III.8) est l'outil de test idéal pour l'entretien, le dépannage et le contrôle de performance des batteries stationnaires individuelles et des blocs de batteries utilisés par les applications critiques de batterie de secours.

- L'interface utilisateur intuitive, la conception compacte et la construction robuste garantissent des performances, des résultats de test et une fiabilité optimale
- Couvre un large éventail de fonctions de test de batterie, allant des tests de tension DC et de résistance jusqu'au test d'état complet, basé sur une chaîne automatisée et sur le système de mesure de température avec sonde infrarouge intégrée
- Conçu pour effectuer des mesures sur batteries stationnaires de tous types
- Mesures principales : résistance de la batterie, tension DC et AC, courant DC et AC, tension d'ondulation, fréquence et température de la batterie
- Sondes de test ergonomiques
- Communication sans fil & port USB pour les téléchargements de données



Figure (III-7): ANALYSEUR DE BATTERIE FLUKE BT521

### III.7.5. RAPPORTS SUR LA RÉGÉNÉRATION

Le logiciel Replus vous permet de créer des rapports détaillés au format PDF, Word ou Excel, vous donnant une bonne compréhension de l'état de la batterie avant et après le processus. La courbe ci-dessous (voir la figure III-9) montre le processus complet de maintenance de la batterie :

- 1 décharge
- 2 Frais de réparation
- 3 refroidissements
- 4 Charge d'égalisation
- 5 décharges
- 6 Récupération



**Figure (III-8):** rapports sur la régénération

### III.7.6. BATTERIES

#### a) Batterie CSB GPL 121000

GP 121000 est une batterie à usage général jusqu'à 5 ans en service de veille-avec plus de 260 cycles à 100 % de décharge.

Les batteries CSB GPL se sont des batteries rechargeables, étanches et sans entretien (voir Figure III.10)





Figure (III-9): batterie CSB GPL 121000

**b) Fiche technique**

- Tension (V) : 12
- Capacité (Ah) : 100, Taux de 20 heures à 1,75 V par cellule à 25 °C (77 °F)
- Technologie : Plomb
- Courant de décharge maximal : 800A (5sec)
- Résistance interne : env. 4,5 mΩ
- Poids (Kg) : 31.200
- Longueur (mm) : 343
- Largeur (mm) : 170
- Hauteur (mm) : 216
- Type : Batterie
- Fabricant : CSB GPL Batterie

**c) Caractéristiques de décharge à courant constant**

Le courant de décharge est la mesure de courant qu'il faut pour alimenter l'appareil grâce à la batterie, l'intensité du courant de décharge change en fonction du temps d'utilisation (voir Tableau III.1)

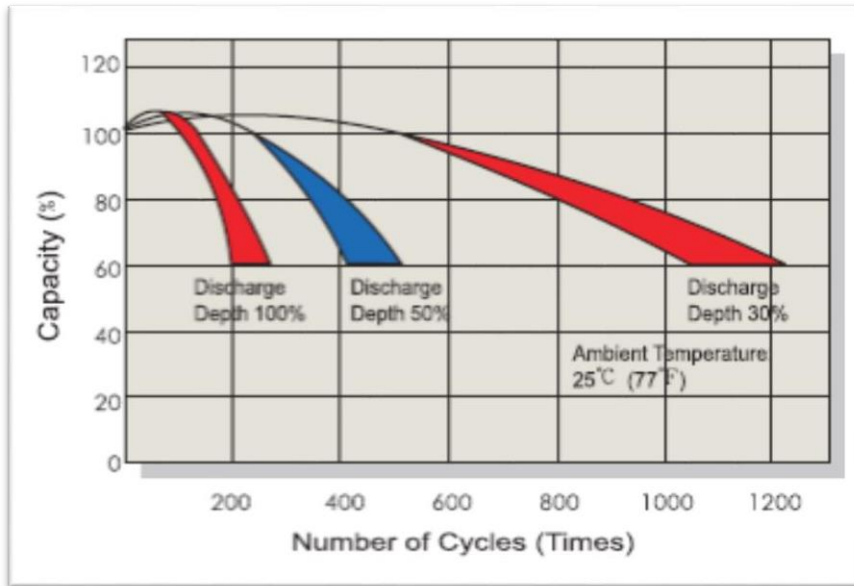
Tableau (III-1) : courant constant de décharge

Constant Current Discharge Characteristics Unit:A (25°C,77°F)												
F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	60MIN	90MIN	2HR	3HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	372	257	197	121	70.1	50.4	39.9	29.0	18.6	12.3	10.1	5.26
1.67V	326	242	187	117	68.8	49.5	39.2	28.6	18.3	12.1	9.94	5.23
1.70V	315	234	183	116	68.1	49.1	38.9	28.4	18.2	12.0	9.86	5.20
1.75V	286	213	175	113	66.8	48.3	38.4	27.9	17.9	11.8	9.72	5.10
1.80V	241	192	157	105	65.4	47.3	37.6	27.3	17.5	11.5	9.59	5.00
1.85V	202	165	135	96.8	62.5	46.0	36.6	26.5	17.1	11.2	9.24	4.80

**d) Durée de vie du cycle**

Le cycle d'une batterie correspond à la durée sur laquelle la batterie se charge et se décharger une seule fois. C'est un indicateur de la longévité d'une batterie rechargeable. On calcule la durée de vie de la batterie en estimant son nombre de recharge et de décharge profonde qui affecte également la durée de vie de la batterie

Le DOD ou (Depth of Discharge) indique le niveau de décharge d'une batterie. Il s'agit du rapport entre la capacité première de la batterie et sa capacité après plusieurs recharges (voir Figure III.11)



**Figure (III-10):** le nombre de cycle en fonction de DOD

**e) Fonctionnement de la batterie choisie**

La batterie a servi pour alimenter l'éclairage public avec l'énergie photovoltaïque pendant deux ans dans l'unité de développement de l'énergie solaire (UDES).

La capacité de la batterie s'est détériorée tout au long de la nuit, nous allons essayer de régénérer cette batterie.

**III.8. Test sur l'état de la batterie**

**a) Test de décharge (1<sup>ème</sup> cycle)**

La batterie est placée dans un endroit sec et à une température appropriée (20°C). La tension de la batterie mesurée était de 13 volts et sa résistance interne était de 13,6 mΩ (voir Figure III.12)



**Figure (III-11):** valeur de résistance interne et la tension

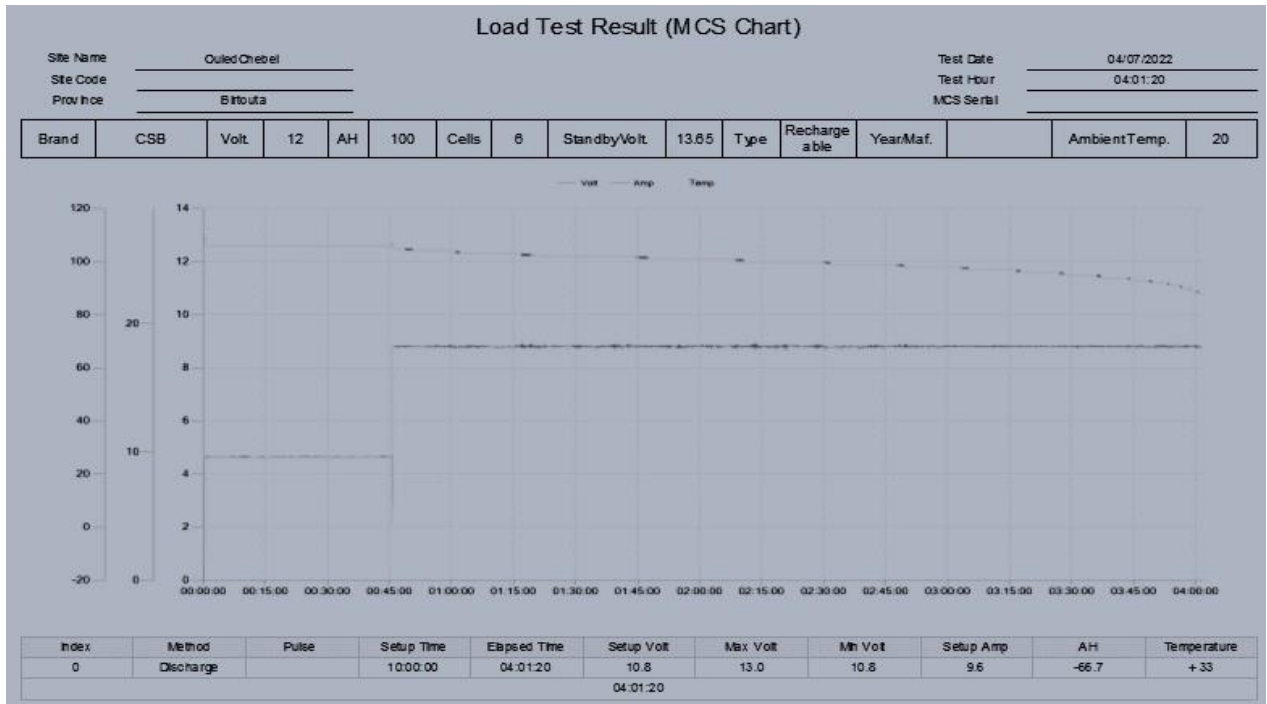
On a pris des mesures après avoir terminé ces procédures. La batterie a été connectée au régénérateur (en mode déchargeur) avec un courant de décharge de 9,6A qui a été appliqué pendant 45 minutes, Puis un courant de 18,6A (voir Figure III.13) a été appliqué jusqu'à la fin de la décharge (l'intensité du courant de décharge a été choisie par rapport aux tableau présenté précédemment (voir la Tableau III-1)



**Figure (III-12):** Panneau d'affichage de régénérateur

Les résultats d'acquisition des données ont été recueillis à l'aide d'un logiciel spécial appelé (graphique MCS). Les courbes de courant, de tension et de la température de la batterie et la capacité de consommation. Voir la Figure (III.14)

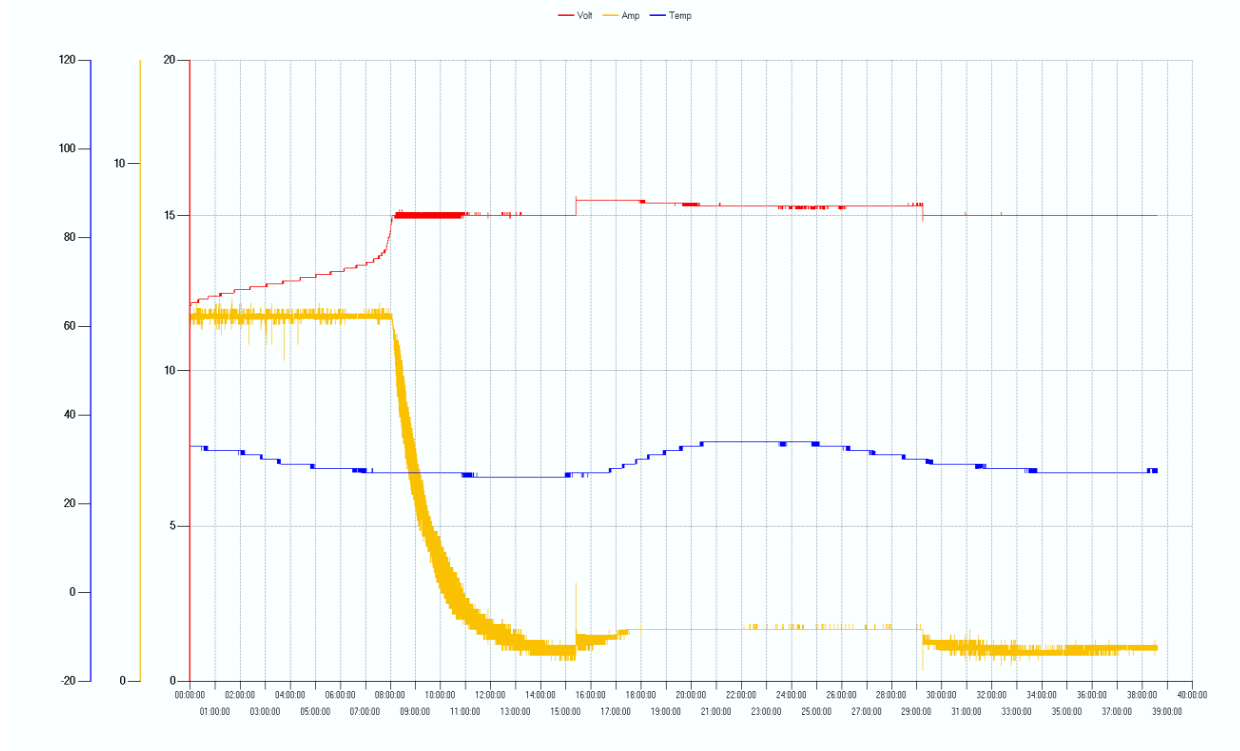
Les résultats du 1<sup>er</sup> test de la décharge de la batterie ont obtenu 66,7Ah ou équivalent à 69,47% de la capacité totale de la batterie.



**Figure (III-13):** résultat de décharge (1<sup>ème</sup> cycle)

**b) Optimisation de l'état de batterie (régénération)**

À ce point, nous connecterons la batterie au chargeur après avoir noté les données de la batterie. On définit la valeur de la tension maximale jusqu'à 15.5V. Le courant est de 7A. Le temps de charge peut aller jusqu'à 40 heures, (Figure III.14)



**Figure (III-14):** Courbe de charge de la batterie en fonction du temps (1<sup>ème</sup> cycle)

Ce cycle de charge a pris plus de 38 heures. Le taux de charge de la batterie est d'environ 90% (89,5 Ah) (voir le Tableau III.2)

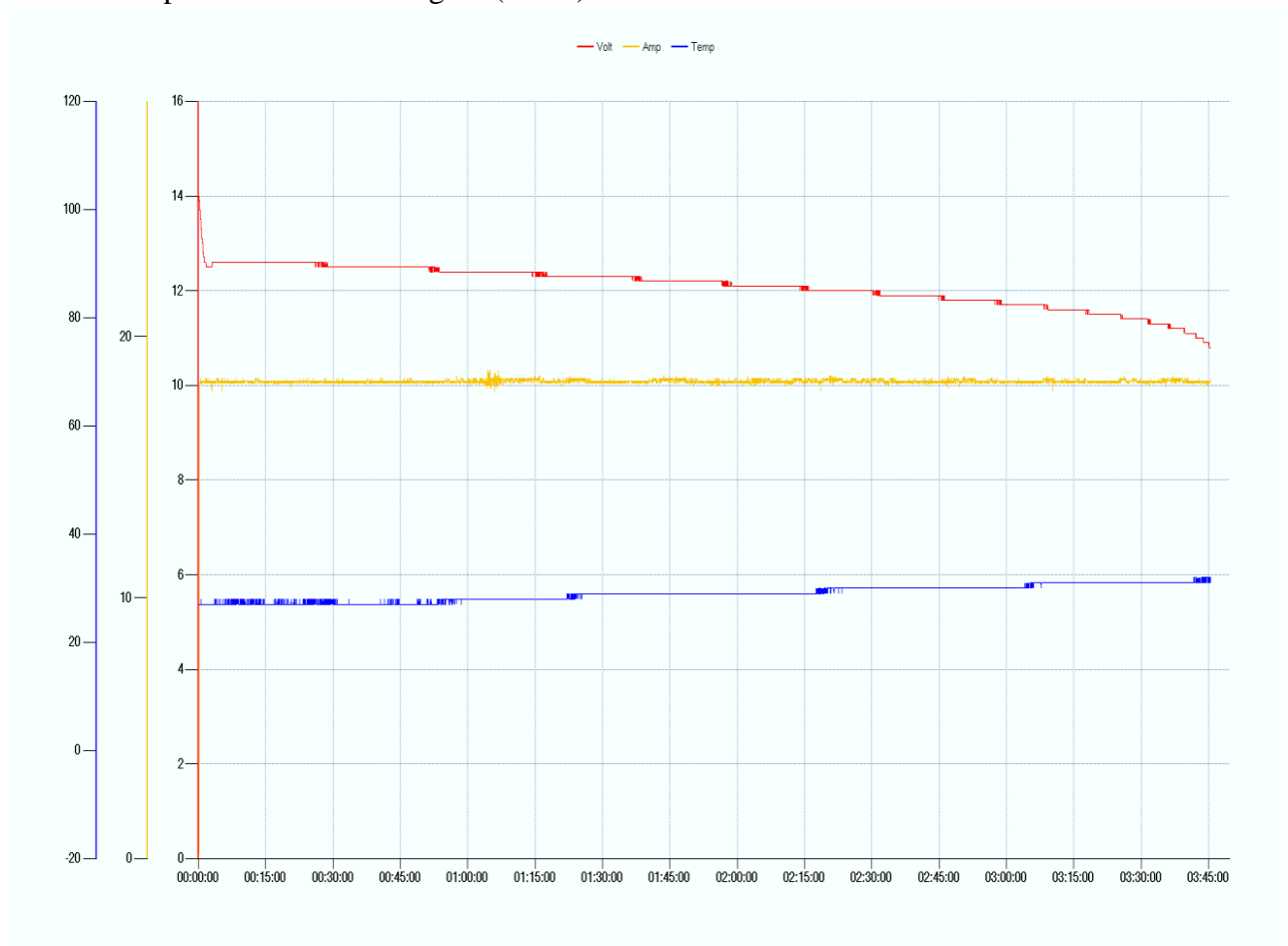
**Tableau (III-2):** données de charge de la batterie (1<sup>ème</sup> cycle)

Model		Serial		Method		Time	
				Restoration		38:37:22 / 40:00:00	
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH		
15.0	1.0	11.9	89.5		1229.8		
Max / Min V							
15.6 / 11.9							

**c) Test de décharge (2<sup>ème</sup> cycle)**

Après avoir chargé la batterie. Nous allons effectuer un autre test de décharge pour nous assurer que sa capacité de stockage est correcte. Nous ferons les mêmes étapes que le premier test.

Nous appliquons un courant de décharge de 18.2A en mode C<sub>5</sub>. Les courbes de la décharge du test sont présentées dans la Figure (III.16) suivante.



**Figure (III-15):** courbes de 2<sup>ème</sup> test de décharge en fonction du temps

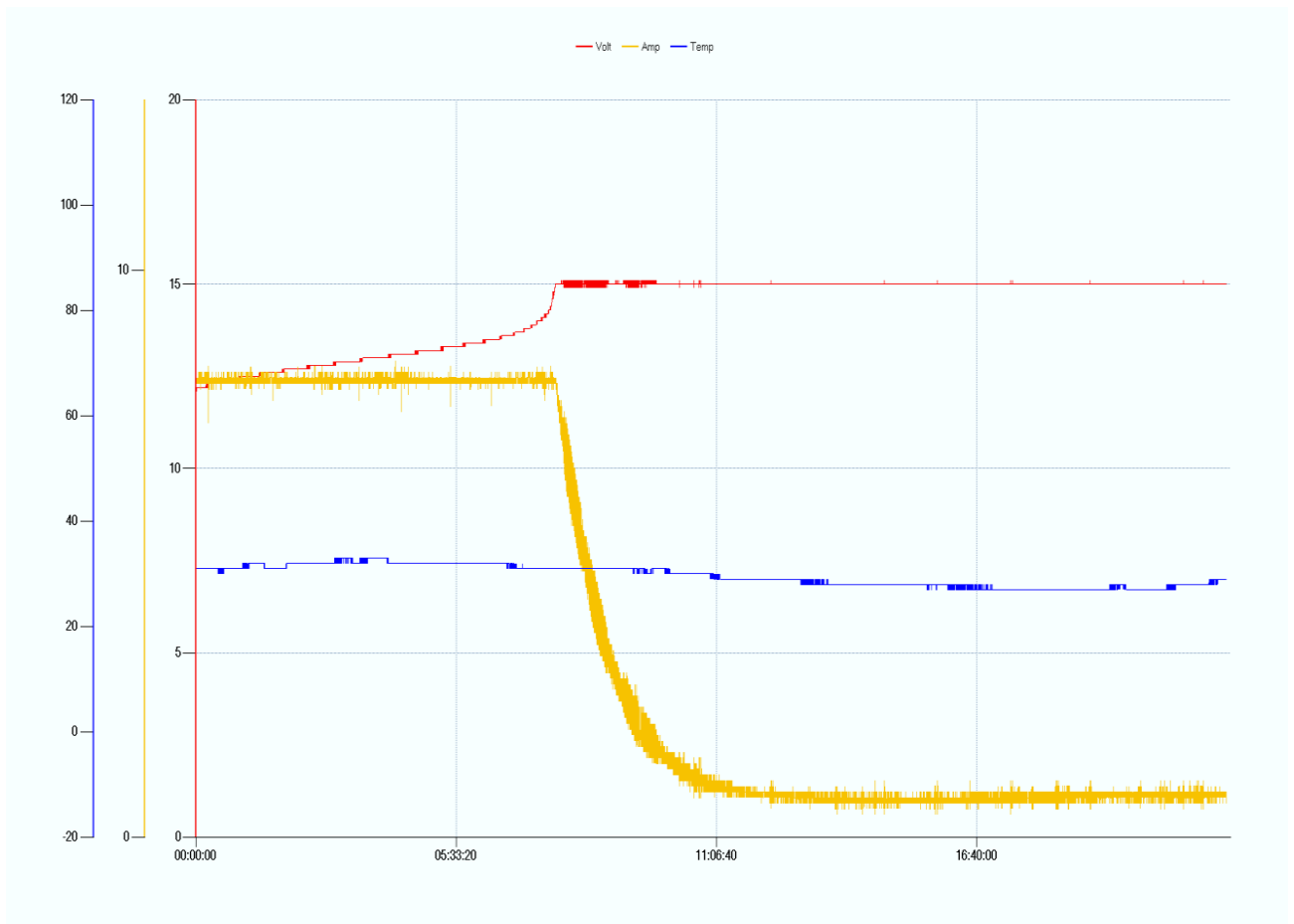
A partir de ce test nous avons obtenu une capacité de stockage de 68.6 Ah (voir Tableau III.3). Équivalent à 79,84% de la charge de stockage précédente de la batterie

**Tableau (III-3):** données de 2<sup>ème</sup> test de décharge de la batterie

Model		Serial		Method	Time
				Discharge	03:45:35 / 05:00:00
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH
10.8	18.2	14.0			
Max / Min V			<b>-68.6</b>	<b>-830.1</b>	
14.0 / 10.8					

**d) Optimisation de l'état de batterie (2<sup>ème</sup> cycle)**

Nous allons charger la batterie. Avec les mêmes étapes appliquées. Le courant de décharge appliqué est de 7A et la tension maximale est de 15V. Les résultats de charge sont affichés dans la Figure suivante (III.17)



**Figure (III-16):** Courbe de 2<sup>ème</sup> charge de la batterie en fonction du temps

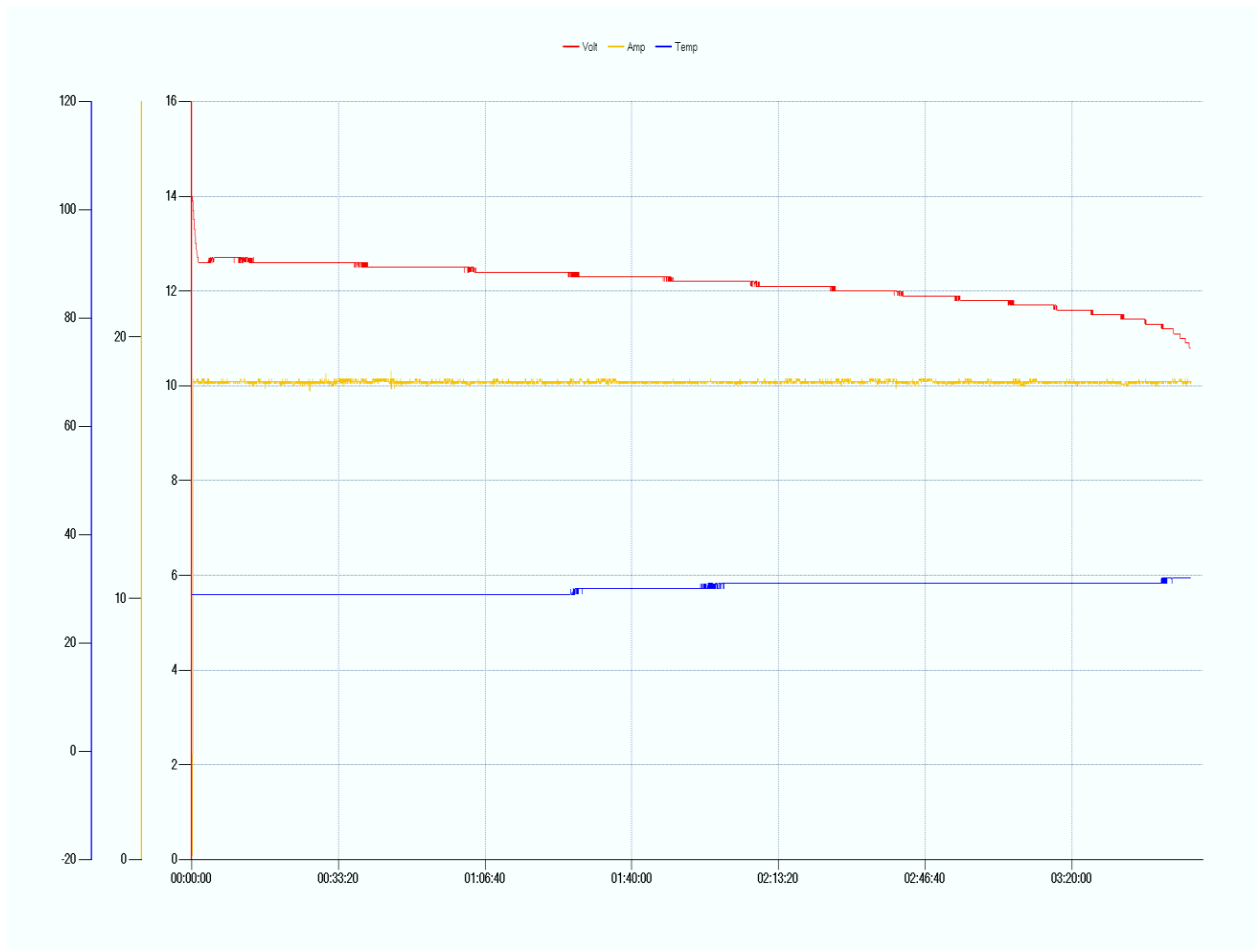
Ce cycle de charge à durer environ 22 heures. Le taux de charge de la batterie est d'environ 80 %. (79,5 Ah) (Voir le Tableau III.4)

**Tableau (III-4):** données de 2<sup>ème</sup> charge de la batterie

Model		Serial		Method		Time	
				Restoration		21:59:46 / 40:00:00	
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH		
15.0	8.0	11.9	<b>79.5</b>		<b>1071.6</b>		
Max / Min V							
15.1 / 11.9							

**e) Test de décharge (3<sup>ème</sup> cycle)**

Après avoir chargé la batterie. Nous allons nous assurer que la batterie a atteint sa bonne capacité de stockage. Nous allons effectuer les mêmes étapes que les tests précédents, Nous appliquerons un courant de décharge de 18.2A en mode C<sub>5</sub>. La courbe de décharge est illustrée sur la Figure (III.18) suivante



**Figure (III-17):** courbes de 3<sup>ème</sup> test de décharge en fonction du temps

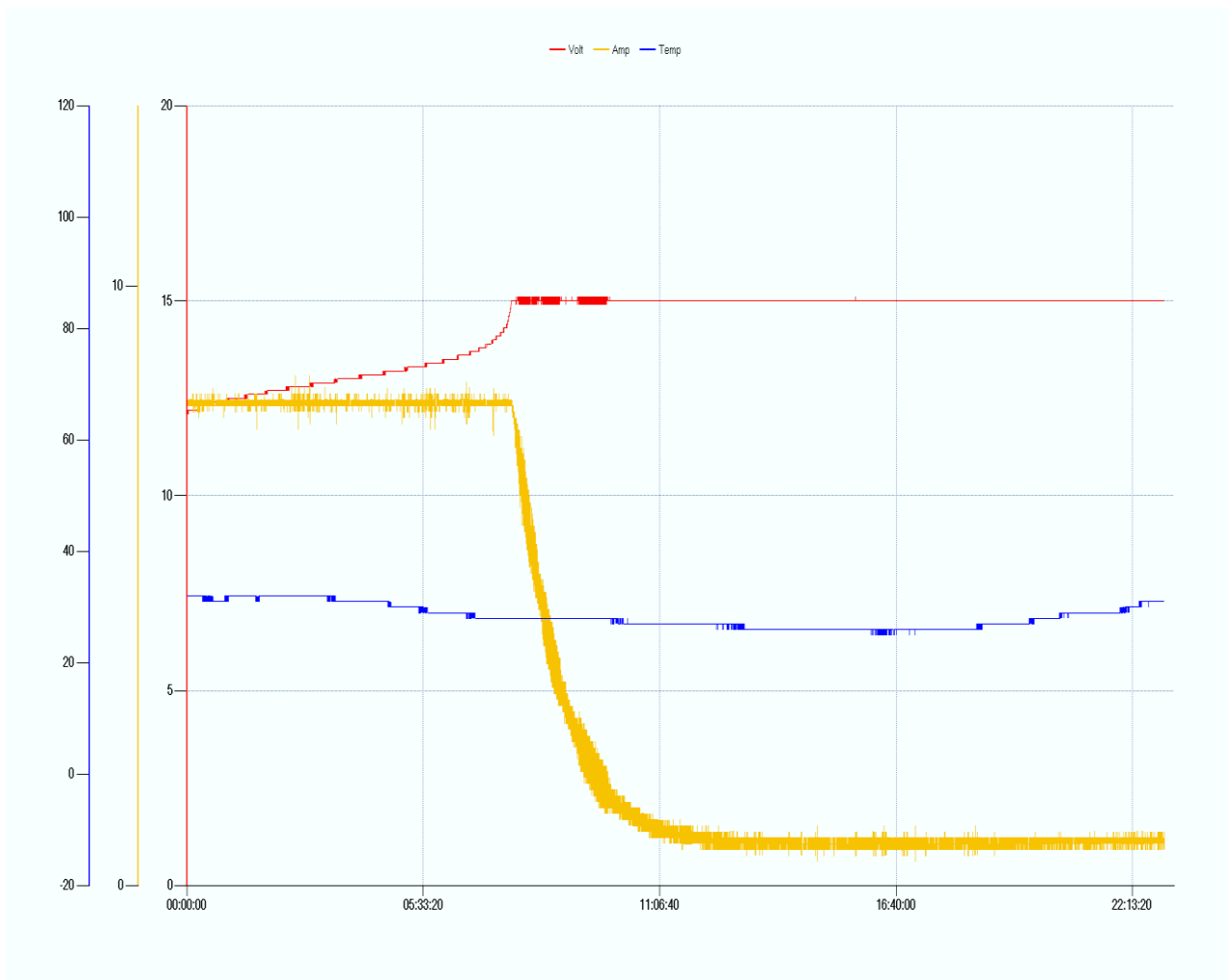
Avec cette décharge, on obtient une capacité de stockage de 69Ah (voir Tableau III.5). Équivalent à 90.4% de la charge précédemment stockée de la batterie

**Tableau (III-5):** données de 3<sup>ème</sup> test de décharge de la batterie

Model		Serial		Method		Time	
				Discharge		03:47:00 / 05:00:00	
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH		
10.8	18.2	14.0					
Max / Min V				<b>-69.0</b>		<b>-838.7</b>	
14.0 / 10.8							

**f) Optimisation de l'état de la batterie (3<sup>ème</sup> cycle)**

Nous allons charger la batterie. Avec les mêmes étapes appliquées précédemment mais avec un changement de l'intensité du courant électrique uniquement. Nous appliquerons un courant de 8A et la tension maximale est de 15V. Les résultats sont affichés dans Figure (III.19) suivante



**Figure (III-18):** Courbe de 3<sup>ème</sup> test de charge de la batterie en fonction du temps



La durée du cycle de charge a pris environ 23 heures. Le taux de charge de la batterie est d'environ 80% (80.2 Ah) (voir le Tableau III.6)

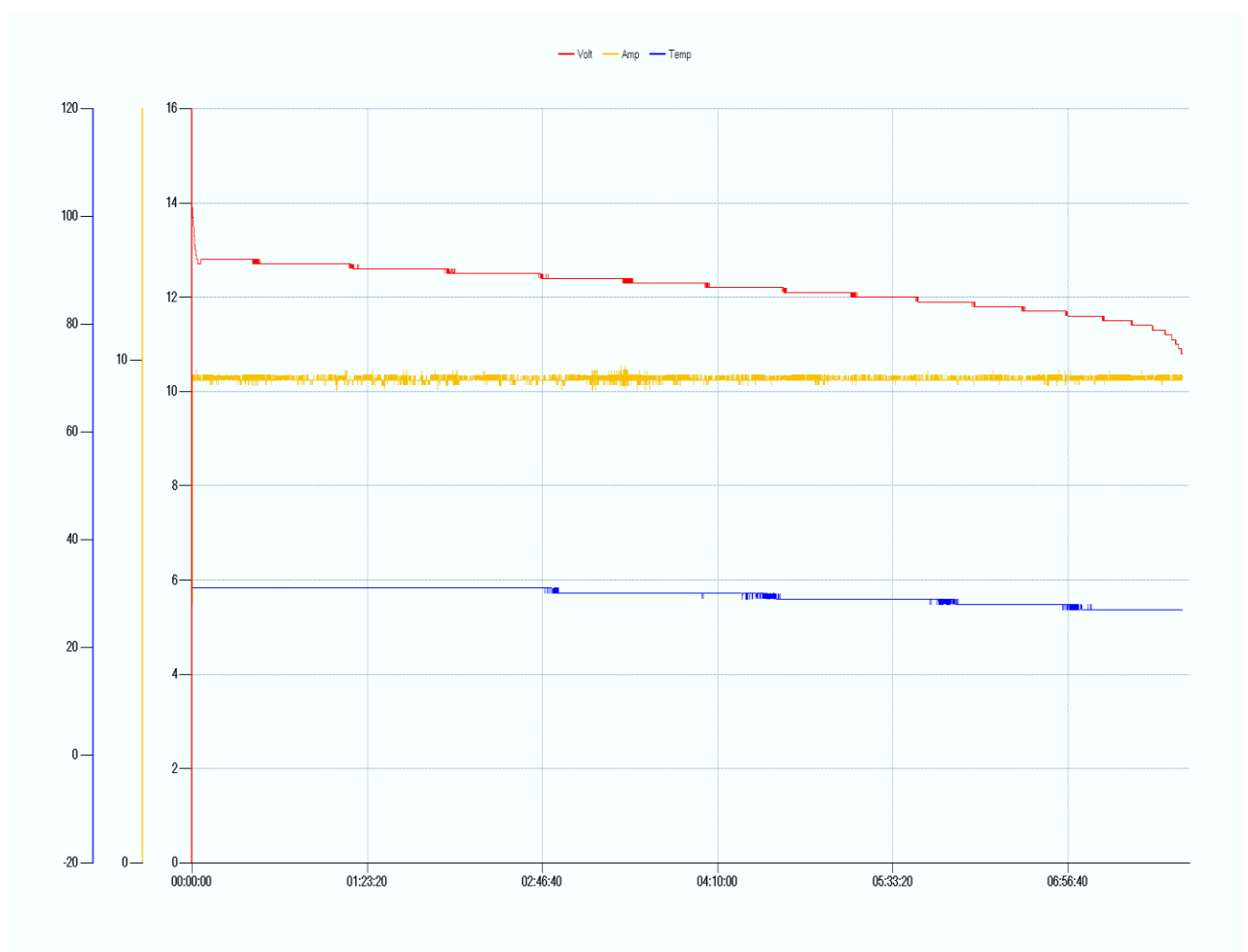
**Tableau (III-6):** données de 3<sup>ème</sup> test de charge de la batterie

Model		Serial		Method	Time
				Restoration	22:58:28 / 40:00:00
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH
15.0	8.0	11.8	80.2		1083.4
Max / Min V					
15.1 / 11.8					

**g) Test de décharge (4<sup>ème</sup> cycle)**

Après avoir chargé la batterie. On doit s'assurer que la batterie a atteint la bonne capacité de stockage. On va effectuer les mêmes étapes que les premiers tests de décharge, mais avec un changement de l'intensité du courant de décharge à 9.6A en mode C<sub>10</sub>. La courbe de décharge est illustrée dans la Figure ci-dessous Figure (III.20)

Avec cette décharge, une capacité de stockage de 75.5Ah a été obtenue (voir Tableau III.7). Ou équivalent à 98,05% de la charge de la batterie précédemment stockée



**Figure (III-19):** Courbes de 4<sup>ème</sup> test de décharge en fonction du temps

Tableau (III-7): données de 4<sup>ème</sup> test de décharge de la batterie

Model		Serial		Method	Time
				Discharge	07:51:12 / 10:00:00
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH
10.8	9.6	14.1			
Max / Min V			-75.5	-921.9	
14.1 / 10.8					

**h) Optimisation de l'état de la batterie (4<sup>ème</sup> cycle)**

Nous allons charger la batterie avec les mêmes étapes appliquées. Le courant de décharge appliqué est de 9.6 A et la tension maximale est de 15V. Les résultats de charge sont affichés sur la Figure suivante (III.21)

La durée du cycle de charge est de 21 heures. Le taux de charge de la batterie est d'environ 87% (87.2Ah) (voir le Tableau III.8).

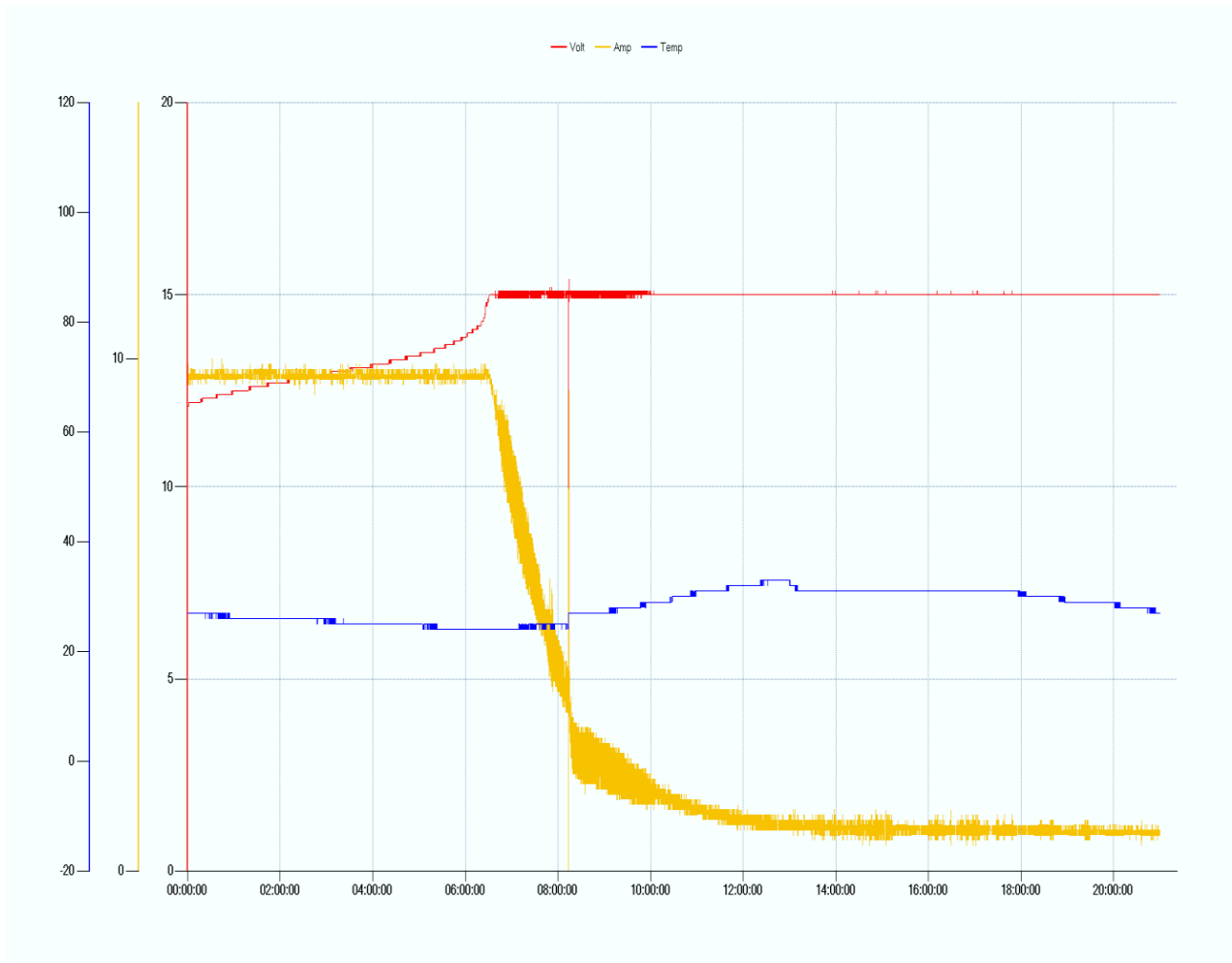


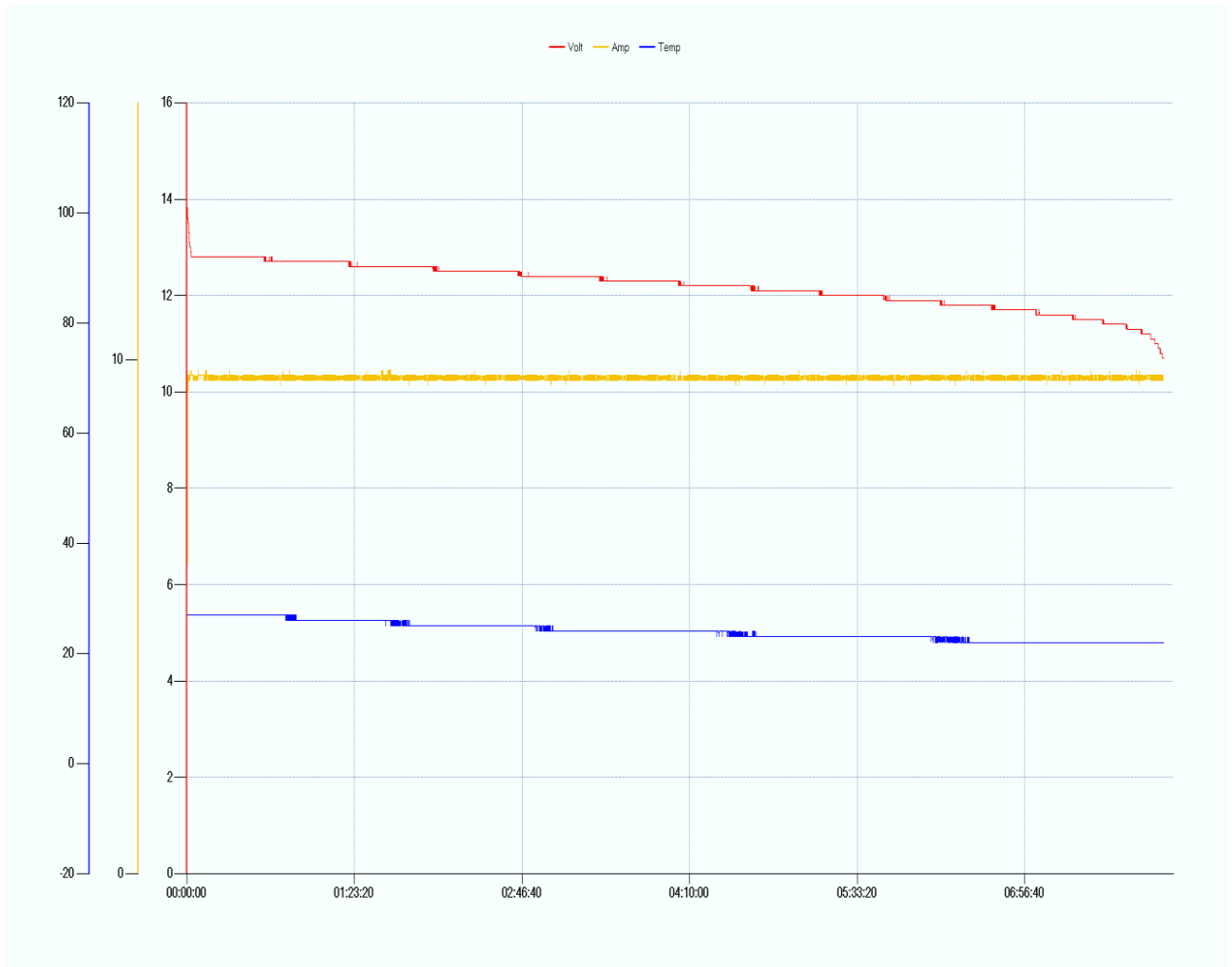
Figure (III-20): Courbe de 4<sup>ème</sup> charge de la batterie en fonction du temps

**Tableau (III-8):** données de 4<sup>ème</sup> test de charge de la batterie

Model		Serial		Method	Time
				Restoration	21:00:18 / 72:22:00
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH
15.0	9.6	11.7			
Max / Min V			<b>87.2</b>	<b>1185.1</b>	
15.4 / 1.8					

**i) Test de décharge (5<sup>ème</sup> cycle)**

Nous allons décharger la batterie pour la cinquième fois. Nous conserverons les mêmes paramètres que la décharge précédente. Le courant est de 9,6 A en mode C<sub>10</sub>, avec une tension minimale de 10,8 V. La courbe de décharge est illustrée sur la Figure (III.22), à partir de ce test nous avons obtenu une capacité de stockage de 78Ah (voir le Tableau III.9). Ou équivalent à 93.13% de la charge de stockage précédente de la batterie



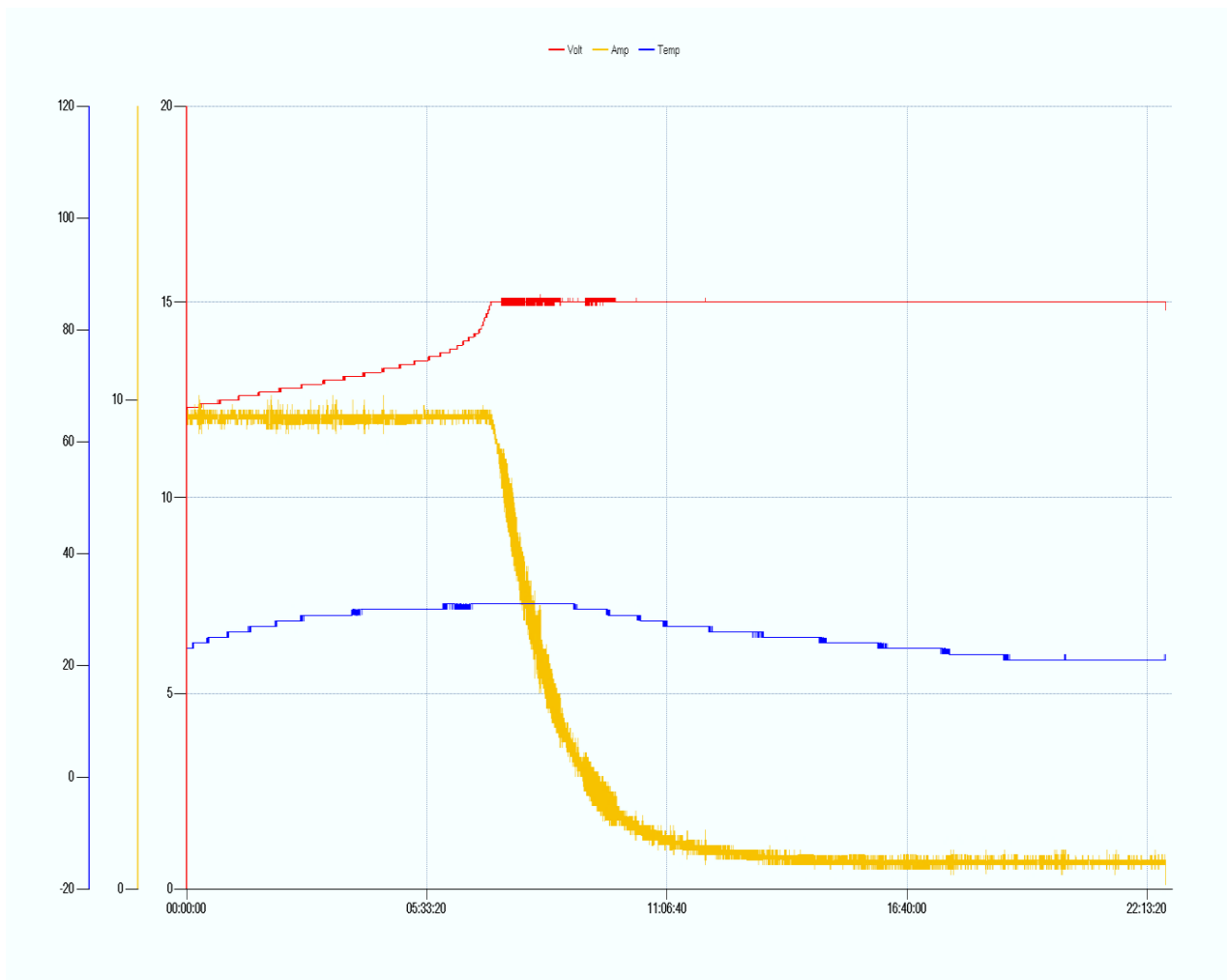
**Figure (III-21):** courbes de 5<sup>ème</sup> décharge en fonction du temps

**Tableau (III-9):** données de 5<sup>ème</sup> test de décharge de la batterie

Model		Serial		Method		Time	
				Discharge		08:05:47 / 10:00:00	
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH		
10.7	9.6	14.1					
Max / Min V			<b>-78.0</b>		<b>-951.4</b>		
14.1 / 10.7							

**j) Optimisation de l'état de la batterie (5<sup>ème</sup> cycle)**

Nous allons charger la batterie une dernière fois. En appliquant les mêmes étapes précédentes. Le courant de décharge appliqué est de 9.6 A et la tension maximale est de 15 V. Les résultats de charge sont illustrés sur la Figure (III.23)



**Figure (III-22):** Courbe de 5<sup>ème</sup> charge de la batterie en fonction du temps

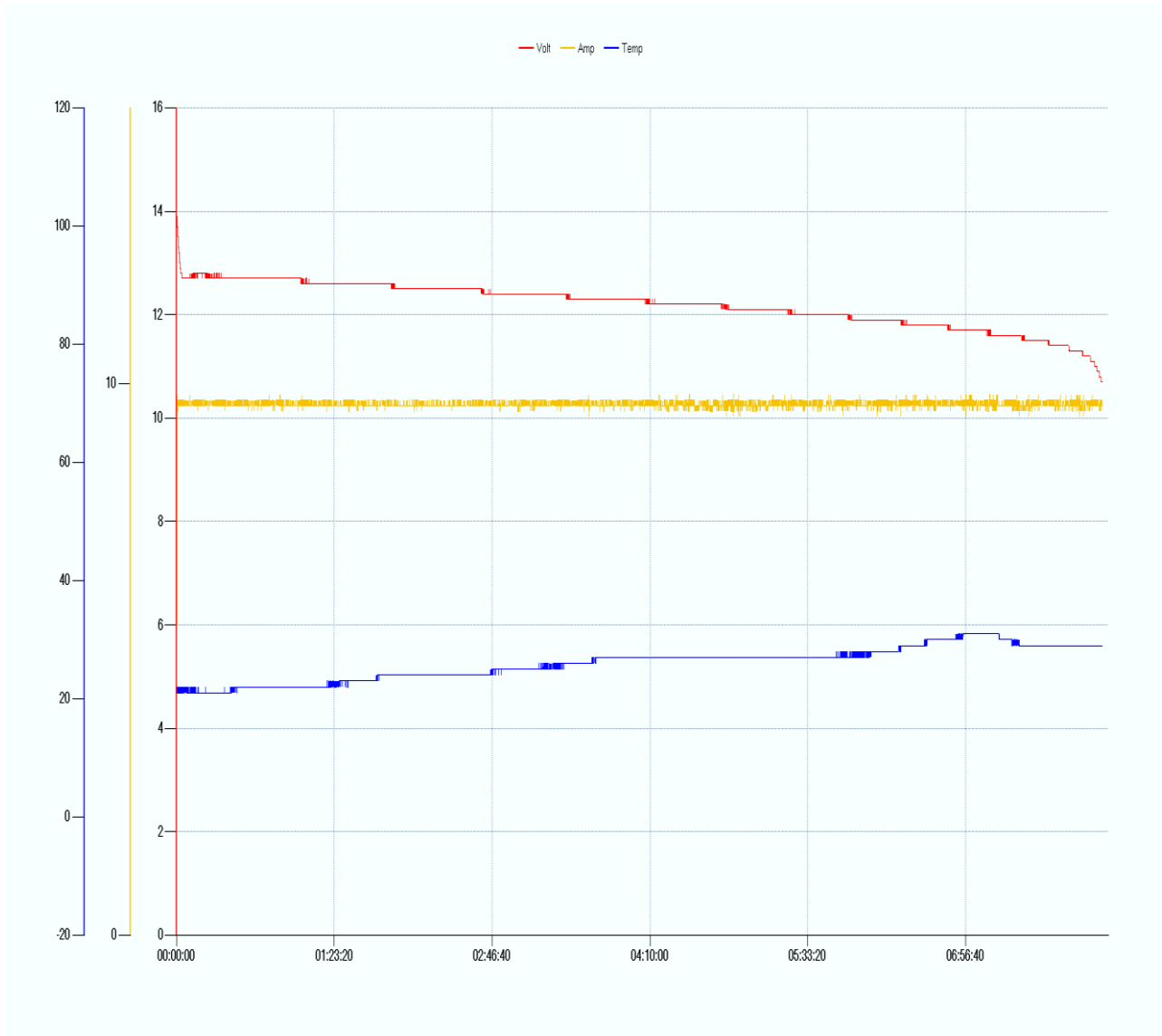
Le temps de cycle de charge a pris environ 22 heures. Le taux de charge de la batterie est d'environ 90% (89.3 Ah) (Tableau III.10).

**Tableau (III-10):** données de 5<sup>ème</sup> test de charge de la batterie

Model		Serial		Method	Time
				Restoration	22:39:34 / 40:00:00
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH
10.8	9.6	11.8			
Max / Min V			<b>89.3</b>	<b>1211.6</b>	
15.2 / 11.8					

**k) Test de décharge (6<sup>ème</sup> cycle)**

Nous allons décharger la batterie pour la dernière fois. Nous conserverons les mêmes paramètres que la décharge précédente. Le courant est de 9.6 A en mode C<sub>10</sub>, avec une tension minimale de 10.8 V. La courbe de décharge est illustrée sur la Figure (III.24).



**Figure (III-23):** courbes de 6<sup>ème</sup> décharge en fonction du temps

A partir de ce test de décharge nous avons obtenu une capacité de stockage de 78.4 Ah (voir le Tableau III.11). Ou équivalent à 91.48% de la charge de stockage précédente de la batterie

**Tableau (III-11):** données de 6<sup>ème</sup> test de charge de la batterie

Model		Serial		Method	Time
				Discharge	08:09:04 / 10:00:00
Setup V	Setup A	Start V	AH		WH
10.7	9.6	14.1			
Max / Min V			<b>-78.4</b>	<b>-955.3</b>	
14.1 / 10.7					

### III.9. Conclusion

Accumulation de soufre est le plus grand ennemi des batteries acides qui perdent leur avantage de stockage d'énergie électrique

Ce chapitre traite de l'étude de la régénération de la batterie en éliminant le soufre accumulé à l'aide d'un désulfateur d'impulsions à haute fréquence qui envoie des ondes pour fibrer le cristal de sulfate de plomb Une étude expérimentale du processus de régénération de la batterie a été menée en mentionnant les mécanismes et les étapes du processus. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec une amélioration de la capacité de stockage de la batterie de 42%.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Ce travail a été créé dans le but d'aborder le problème des batteries solaires issu de l'accumulation de sulfate au moyen d'un désulfateur d'impulsions à haute fréquence. Avec une étude appliquée sur une batterie solaire

Au départ une étude bibliographique riche et diversifiée a été faite sur le rôle des batteries en tant que technologie de stockage de l'électricité produite à partir de l'énergie solaire L'étude comprenait également une connaissance des résultats les plus importants de la recherche sur la régénération de la batterie endommagée,

Elle a été suivie d'un chapitre axé sur les types de batteries et leurs utilisations, en mentionnant les problèmes dont souffrent les batteries plomb acides,

Dans le dernier chapitre, nous avons parlé d'un dispositif désulfateur de soufre comme solution pour donner à la batterie un second cycle de vie, et de le vérifier en mener une expérience sur une batterie solaire dans des conditions très appropriées en mentionnant les protocoles et les mécanismes du procédé de régénération les résultats ont montré au final une amélioration significative de la batterie

D'un autre point de vue. En Algérie, la machine (REGENERATEUR MODÈLE M1005G) est utilisée uniquement comme dispositif de charge, et un dispositif de décharge (DÉCHARGEUR DE BATTERIE MPD-1007) spécial est nécessaire, ce qui entraîne des coûts supplémentaires La machine (REGENERATEUR MODÈLE M1005G) doit être connectée au réseau électrique algérien pour pouvoir faire fonctionner toutes ses fonctions, il existe également d'autres types de batteries de traction et au lithium, il serait bon de faire une étude sur ces types et de faire un comparatif économique et technique entre eux



## Les Références

- [1]. RASSIM, S. and A.S. Eddine, Modélisation et simulation d'un système de stockage photovoltaïque, 2021.
- [2]. Linternaute, Alessandro Volta.
- [3]. I. Noels, Évolution des piles et des batteries,". 2017.
- [4]. Cognet, M. and M. Carboni, Stockage de l'énergie: évolution des batteries,". 2017.
- [5]. britannica, E. batterie au nickel cadmium. 2007.
- [6]. Renaudeau, L., Historique des piles.
- [7]. Energizer. batteries alcalines.
- [8]. Achaïbou, N., Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque. 1999: p. 6.
- [9]. R. Kabouche, S. Harrouni and A. Talha , Etude Comparative des Différentes Techniques de Stockage de l'Energie Photovoltaïque .2012
- [10]. Patrice SIMON , Le stockage électrochimique de l'énergie : principes, applications et futurs défis .2015
- [11]. MOLINARO, H.H. and B. MULTON, Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique. 2019: p. 21.
- [12]. Jean-Marie Tarascon ,Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ? .2020
- [13]. OFEN, Technologies de stockage de l'énergie. 2021: p. 36.
- [14]. Shi, Y., C.A. Ferone, and C.D. Rahn, Identification and remediation of sulfation in lead-acid batteries using cell voltage and pressure sensing. Journal of Power Sources, 2013. 221: p. 177-185.
- [15]. Levente, S. Contribution to charging of battery with pulses. in 2015 IEEE 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). 2015.
- [16]. Szabó, L., D. Pitică, and O. Pop. The voltage response of lead-acid battery through pulses charging with variable frequency and duty cycle. in 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2016
- [17]. Jamratnaw, W. Desulfation of lead-acid battery by high frequency pulse. in 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2017.
- [18]. Turhan,M."Charging with IGBT Technology to Extend the Life of Submarine Batteries". Available at SSRN
- [19] « Hand Book of Chemistry and physics», Ed. 62 - 63, New York, (1982).
- [20] Modélisation et simulation d'une batterie à usage solaire photovoltaïque par (TITRAOUI Bilal BOUDISSA Fatima Zohra) UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [21] N. Saadallah, « étude du mécanisme de réduction de PbO<sub>2</sub>: application de l'électrode à microcavité », thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif, (2012), p18.
- [22] M.Fogiel, « Handbook of basic electricity», Research & Education, Association, (2002), p496
- [23] B.Xavier, « Elaboration et caractérisation physico-chimique de nano composite plomb/céramique pour batteries Acide», thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, (2007).
- [24] I.Derafa, «Etude comparative des propriétés électriques de PbO<sub>2</sub> préparé par voie chimique et électrochimique», thèse de magister, Université Ferhat Abbas Sétif, (2014).
- [25] P. PASCAL, «Nouveau traité de chimie minérale», Tome VVI, Ed. Masson, (1963) 579.

- [26] M.Foudia, «Contribution à l'étude du rôle de l'eau de structure dans le mécanisme de formation de  $\alpha$ -PbO<sub>2</sub> », thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif, (2011).
- [27] F. Lappe, «Some physical properties of sputtered PbO<sub>2</sub> films», 23 (1962) 1563.
- [28] P. POLMOER, Structural Chemistry, Kassel, PFA (1968) 254.
- [29] B. Thomas, «The electrical conductivity of lead dioxide», J. Electrochem. Soc., 94 (1948) 42.
- [30] Patrick T. Moseley, J.Garche, C.D. Parker, D.A.J. Rand «Valve-Regulated lead–acid batteries», 1ed, ELSEVIER, (2004).
- [31] Global Lead Acid Battery Market By Type (VRLA Battery, and Flooded Battery), By Application (UPS, Motorcycles and Electric Bikes, and Automotive), By Country, and Manufacture - Industry Segment, Competition Scenario and Forecast by 2030
- [32] D. Pavlov, E. Bashtavelova, «A model of the structure of the positive lead-acid battery active mass», J. Electrochem. Soc, 131 (1984) 1468.
- [33] A.Tvarusko, «Investigation of manganese dioxides: I. Water Content», J. Electrochem. Soc., 111 (1964) 125.
- [34] P. D'antonio, A. Santoro, «Powder neutron diffraction study of chemically prepared  $\beta$ - lead dioxide », Acta Cryst., B 36, (1980) 2394.
- [35] A.Santoro,P.D'antonio and S.M.Caulder , «A.Neutron powder diffraction study of  $\alpha$  - and  $\beta$  - PbO<sub>2</sub> in the positive electrode material of lead-acid batteries »,J.Electrochem.soc.,130(1983)1451.
- [36] D. Pavlov, G. Papazov and V. Iliev, «Mechanism of the processes of formation of lead-acid battery positive plates», J.Electrochem. Soc., 119 (1972) 8.
- [37] D. Pavlov and G. Papazov, «Zone processes at the formation of the lead-acid battery positive plate», J. Electrochem. Soc., 127 (1980)2104.
- [38] M. Dimitrov, D. Pavlov, «Influence of grid alloy and fast charge on battery cycle life and structure of the positive active mass of lead acid batteries», J. Power Sources, 93 (2001) 234.
- [39] E.E. Ferg, P. Loyson, N. Rust, «Porosity measurements of electrodes used in lead-acid batteries», J. Power Sources, 141 (2005) 316.
- [40] S. M. Caulder, J. S. Murday and A. C. Simon, «The hydrogen-loss concept of battery failure: The PbO<sub>2</sub> Electrode», J. Electrochem. Soc., 120 (1973) 1515.
- [41] P.T.Moseley,J.L.Hutchison, C.J.Wright, M.A.M.Bourke, R.I.Hill and V.S.Rainey,«Inelastic neutron scattering and transmission electron microscope studies of lead dioxide», J. Electrochem. Soc., 130 (1983) 829.
- [42] P. Boher, P. Garnier, J.R. Gavarri, «Mise en évidence et localisation des protons dans les bioxydes de plomb PbO<sub>2</sub> $\alpha$  et  $\beta$  chimiques et électrochimiques», J. Solid State Chem, 52 (1984) 146.
- [43] MARCHÉ DES BATTERIES AU PLOMB – CROISSANCE, TENDANCES, IMPACT DU COVID-19 ET PRÉVISIONS (2022-2027)
- [44] Sources d'énergie des sous-marins : batteries d'accumulateurs électriques par l'Ingénieur en Chef de l'Armement DARPAS, édition 1974
- [45] Connaissance des accumulateurs au plomb et autres générateurs électrochimiques par G. GORY, édition SEMIS, collection Auto-Volt, 1977
- [46] Ka Lok Man, Eng Gee Lim, M. Leach, Jin Kyung Lee and Kyung Ki Kim, "Simulation and analysis of desulfator for smart battery system," 2014 International SoC Design Conference (ISOCC), 2014, pp. 173-174, doi: 10.1109/ISOCC.2014.7087682.

- [47] <https://www.upsbatterycenter.com/blog/battery-desulfation/>
- [48] Jamratnaw, W. Desulfation of lead-acid battery by high frequency pulse. in 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2017.
- [49] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile\\_volta%C3%AFque](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_volta%C3%AFque)
- [50] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile\\_Daniell](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_Daniell)
- [51] [https://batteriepower.com/utilisation-batterie-lithium-moto\\_9.html](https://batteriepower.com/utilisation-batterie-lithium-moto_9.html)
- [52] <https://www.amazon.fr/NP17-12-batterie-plomb-acide-approbation-technologie/dp/B002Y2LRJA>
- [53] <https://www.electricbee.co/kengen-plans-electric-car-charging-facility/>
- [54] <https://batterysupplies.be/fr/producten/produits/batteries-cycliques/traction-2v/>
- [55] <https://www.solostocks.fr/vente-produits/autres-produits-lies-a-lenergie/batterie-stationnaire-acide-plomb-ouvert-opzs-803791>
- [56] <https://www.gnb-nordic.com/en/network/applications/photovoltaic/>
- [57] <https://www.photovoltai4all.de/agm-batterien/q-batteries-12lc-260-12v-278ah-agm-akku>
- [58] <https://sitelec.org/cours/abati/accu/accu.htm>
- [59] <https://www.powerframe.com/en-us/compare-grids>
- [60] [https://www.wvishop.com/?category\\_id=2336737](https://www.wvishop.com/?category_id=2336737)
- [61] <http://www.zenbattery.in/battery-plates-2955143.html>
- [62] <https://suzukibattery.com/category/starter-battery-knowledge/>
- [63] [https://www.wvishop.com/?category\\_id=2336737](https://www.wvishop.com/?category_id=2336737)