



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar TELIDJI- Laghouat

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Electrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

- **BOUMEDIENE Fatima Zohra**
- **FODIL Bakhta**

DOMAINE : Science et technologie

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Electrotechnique Industrielle

Thème

**Etude comparative du développement des batteries
utilisées dans les voitures électriques**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
BIRAME M'hamed	MC-A	Président
BOUCHIBA OumElkheir	MC-B	Examinatrice
MAHDJOUBI Abdelhalim	MC-A	Rapporteur

Promotion : 06 - 2023

الإهداء

- الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى وأهله ومن وفى أما بعد:
- الحمد لله والشكر لله الذي وفقني وأعانني لإكمال مذكرتي هذه المكلفة بالإجتهاد والسعي للنجاح، من قال أنا لها "نالها" وأنا لها وإن أبت رغما عنها أتيت بها.
- أهدي فرحة تخرجني إلى:
➤ من قال فيهما الله سبحانه وتعالى: "وَإِخْفُضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا"
➤ إلى أبي الذي توفي قبل أن نحقق أحلامنا سويا، لطالما كنت سندي قبل أن تموت ولا زالت ذكراك تعينني على إكمال الطريق. رحمة الله عليك يا فقيد قلبي ...
- إلى أمي حبيبة قلبي التي لم تشعرني يوما أنني يتيمة أب، هاهي ابنتك ترفع رأسك بقبعة التخرج. أدام الله فرحتك هاته ليدوم دائما إبداعا وتألقي ...
- إلى من قال فيه الله سبحانه وتعالى: "سَنَشُدُّ عُضُدَكَ بِأَخِيكَ"، أخي زاخ أدامك الله لي كتفا لا يميل
- إلى أخواتي: رقية صفية، دنيا، فاطمة، هجير ه وخضرة لم تكن يوما كأخي أخوات. أنا التي كلما حالفني النجاح أعود لكن لأرى إنعكاس فرحتي في عيونكن ...
- إلى أبناء قلبي: سفيان، عبد الإله، زكريا، عبد الكريم، آية، نور اليقين ومريم رزقكم الله طول العمر ووفقكم وسدد خطاكم لنسعد برؤيتكم في أعلى المراتب
- صديقتي فاطمة الزهرة رفيقة دربي كنتي دائما معي في طريق النجاح والخير أدامك الله نعمة لروحي لا تزول ...

بختة

إهداء

- الحمد لله وكفى والصلاة على الحبي بالمصطفى وأهله ومن وفى أما بعد:
- الحمد لله الذي وفقنا لتثمين هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه
ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى مهداة
 - إلى الوالدين الكريمين حفظهما الله وأدامهما نورا لدربي
 - لكل العائلة الكريمة التي ساندتني ولا تزال
 - إلى أختي المحبة: فضيلة
 - إلى إخوتي: أحمد، وسيم نصرالدين عبد الرؤوف.
 - إلى رفيقتي في المشوار بختة رعاها الله ووفقها في حياتها.

فاطمة

Remerciements

- Tout d'abord nous remercions Allah d'avoir nous donner la force et le courage afin de finir ce travail
 - Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur Mr. Mahdjoubi pour tous ses conseils et directives
- Nous tenons à remercier aussi Mr. Birame et Mme. Bouchiba d'avoir accepté d'évaluer notre travail
- Nos remerciements à tout individu qui nous a aidé de près ou de loin

ملخص

السيارات الكهربائية تزداد توسعا من حيث الإنتاج والاستعمال. شهدت بطاريات هذه السيارات تطورا على مر السنين إذ نلاحظ هذا التطور للسيارات في الأداء والاستقلالية وزيادة العمر الافتراضي والامان.

الغاية من دراستنا تطوير البطارية بتقديم مقترحات عبارة عن معادن يمكن دمجها في البطاريات للحصول على بطاريات عالية الكفاءة من حيث كثافة الطاقة ودرجة الحرارة. نقترح في الأخير حولا يمكن ان تساهم في تطوير البطاريات تكلفة وكفاءة.

Résumé

Les voitures électriques se développent en termes de production et d'utilisation. Les batteries de ces voitures ont évolué au fil des années, on constate cette évolution dans les voitures en termes de performances, d'autonomie, d'augmentation de la durée de vie et de sécurité.

Le but de notre étude est de faire développer la batterie en soumettant des propositions constituées de métaux pouvant être incorporés dans les batteries pour obtenir des batteries à haute efficacité en termes de densité d'énergie et de température. A la fin, nous proposons des solutions qui peuvent contribuer au développement des batteries en termes de coût et d'efficacité.

Abstract

Electric cars are growing in terms of production and use. The batteries of these cars have evolved over the years, we see this evolution in the cars in terms of performance, autonomy, increased life and safety.

The purpose of our study is to develop the battery by submitting proposals consisting of metals that can be incorporated into the batteries to obtain batteries with high efficiency in terms of energy density and temperature. At the end, we offer solutions that can contribute to the development of batteries in terms of cost and efficiency.

LISTE DES ABREVIATIONS

Pb	Plomb
Sb	Antimoine
Ca	Calcium
Sn	Etain
PbO ₂	Dioxyde de plomb
Pb-Sb	Plomb-Antimoine
Pb-Sn	Plomb-Etain
Pb-Ca	Plomb-Calcium
Pb-Sb-As	Plomb-Antimoine-Arsenic
HSO ₄	Hydrogène sulfate
H ₃ O	Hydronium
e-	Electron
PbSO ₄	Sulfate de plomb (II)
H ₂ O	Monoxyde de dihydrogène
Ni(OH)	Hydroxyde de nickel
HO-	Anion hydroxyde
NiO(OH)	Oxyhydroxyde de nickel
Cd(OH) ₂	Hydroxyde de cadmium
Cd	Cadmium
Ni(OH) ₂	Hydroxyde de nickel
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
Ni-Mh	Nickel métal hydrure
M	Métal
MH	Métal hydrure
OH-	Ion hydroxyde

LCO	Lithium et de l'oxyde de cobalt
Li-ion	Lithium-ion
Li-po	Lithium polymère
FePO ₄ /LiFePO ₄	Phosphate ferrique/ Phosphate de fer au lithium
LFP	Lithium fer phosphate
Al	Aluminium
Cu	Cuivre
BMS	Système de gestion de la batterie
CO ₂	Dioxyde de carbone
CE	Parlement européen et du conseil
Li+	Ion de lithium
LiC ₆	Lithium-benzotriyne
LiMn ₂ O ₄	Oxyde de lithium et de manganèse
PO ₄	Phosphate ion
Fe	Fer
Li	Lithium
CCME	Calculateur Contrôle Machine Electrique
AC	Courant alternatif
AC/DC	Convertisseur qui convertir le courent alternative à courant continu
DC/DC	Convertisseur qui convertir le courant continu à courant continu
ONE	Our Next Energy
Cl ₂	Chlore gazeux
LiCl	Chlorate de lithium
Li ₂ CO ₃	Carbonate de lithium
HClO ₃	Acide chlorique
LiClO ₃	Lithium chlorate
Li ₂ SO ₄	Sulfate de lithium

$\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$	Chlorate de baryum
BaSO_4	Sulfate de baryum
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	Ethylène glycol
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	Oxyde d'éthylène
ClBr	Monochlorure de brome
Br_2	Brome gazeux

LISTE DES ABREVIATIONS DANS LES EQUATIONS

x	numéro d'équilibrage de l'équation
s	solide
l	liquide
g	gaz
aq	aqueous

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Diagramme schématique d'une batterie au plomb.....	04
Figure I.2 : Etat de la batterie lithium en charge et en décharge.....	10
Figure I.3 : Processus des électrodes.....	12
Figure I.4 : Assemblage des cellules.....	13
Figure I.5 : Formation et vieillissement du module.....	14
Figure I.6 : De la cellule Li-Ion au pack batterie.....	15
Figure I.7 : Principe de fonctionnement de la batterie lithium fer phosphate.....	17
Figure I.8 : Comparaison entre la composition des batteries lithium-ion et tout solide.....	18
Figure I.9 : Architecture d'une voiture électrique.....	20
Figure II.1 : Montage des batteries en série.....	27
Figure II.2 : Montage des batteries en parallèle.....	27
Figure II.3 : Montage des batteries en série/parallèle.....	28
Figure II.4 : Chargement des batteries plomb acide et lithium-ion.....	31
Figure II.5 : Chargement de la batterie nickel cadmium.....	32
Figure III.1 : Batterie sodium-ion (a).....	34
Figure III.2 : Batterie sodium-ion (b).....	35
Figure III.3 : Super batterie.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Comparaison entre deux types d'alliage.....	24
Tableau II.2 : Comparaison entre les différents types des batteries.....	29

TABLE DES MATIERES

RESUME	i
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX	1
INTRODUCTION GENERALE	
CHAPITRE I	DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE BATTERIES
I.1. Introduction.....	3
I.2. Batterie au Plomb.....	3
I.2.1 Composition.....	3
I.2.2 Principe de fonctionnement.....	5
I.3 Batterie Nickel – cadmium.....	6
I.3.1 Principe de fonctionnement.....	6
I.4 Batterie Nickel Hydrure Métallique.....	7
I.4.1 Composition.....	7
I.4.2 Principe de fonctionnement.....	8
I.4.3 Fabrication.....	9
I.5 Batterie lithium.....	9
I.5.1 Principe de fonctionnement.....	9
I.5.2 Fabrication de la batterie.....	10
I.5.3 Différents types de batterie au lithium.....	10
I.6 Batterie lithium-ion.....	11
I.6.1 Composition et mode de fabrication.....	11
I.6.2 Principe de fonctionnement.....	16
I.7 Batterie lithium Fer Phosphate.....	17
I.7.1 Principe de fonctionnement.....	17
I.7.2 Fabrication de cette batterie.....	18
I.8 Batterie tout solide.....	18
I.8.1 Composition.....	18
I.8.2 Principe de fonctionnement.....	19
I.8.3 Fabrication.....	19
I.9 Architecture d’une voiture électrique.....	20
I.10 Entreprises fabrication les batteries.....	21
I.11 Conclusion.....	22

CHAPITRE II FACTEURS QUI INFLUENT SUR L'OPTIMISATION DE LA BATTERIE

II.1	Introduction	23
II.2	Facteurs et composants qui influent sur l'optimisation de la batterie plomb acide.....	23
II.3	Facteurs et composants qui influent sur l'optimisation de la batterie nickel cadmium.....	25
II.4	Facteurs et composants qui influent sur l'optimisation de la batterie lithium-ion.....	25
II.5	Facteurs qui influent sur l'optimisation de la batterie lithium fer phosphate.....	26
II.6	Facteurs qui influent sur l'optimisation de la batterie tout solide.....	26
II.7	Interconnexion des batteries.....	27
II.8	Autonomie de la batterie.....	28
II.9	Comparaison entre les différents types des batteries.....	28
II.10	Courbes de chargement des batteries.....	31
II.11	Conclusion.....	32

CHAPITRE III DEVELOPPEMENT DE LA BATTERIE

III.1	Introduction.....	34
III.2	Développement en étude de la batterie.....	34
III.2.1	Introduction sur la batterie sodium-ion.....	34
III.2.2	Composition et le principe de fonctionnement.....	35
III.2.3	Fabrication.....	35
III.2.4	Entreprises fabricant la batterie sodium-ion.....	35
III.3	Super batterie.....	35
III.3.1	Principe de fonctionnement et composition.....	36
III.3.2	Fabrication.....	36
III.4	Perspective.....	36
III.4.1	Combinaison de chlore et de lithium.....	37
III.4.2	Mettre en place d'un système de refroidissement.....	37
III.4.3	Utilisation d'un générateur thermoélectrique.....	38
III.4.4	Densité d'énergie dans la batterie LFP.....	38
III.4.5	Utilisation du potassium dans la batterie.....	39
III.5	Conseils pour améliorer la batterie.....	39
III.6	Conclusion.....	40
	CONCLUSION GENERALE.....	41
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

INTRODUCTION GENERALE

Les problèmes et les difficultés auxquels l'homme est confronté le poussent à réfléchir à l'innovation et à l'invention pour les éliminer ou les réduire. C'est pourquoi les chercheurs et les inventeurs ont eu recours à la voiture, qui est devenue un élément essentiel de la vie humaine. La première voiture en ce domaine était une voiture traditionnelle propulsée par un moteur à combustion interne. Elle consomme de l'essence ou du diesel, mais il y a des effets négatifs entourant cette voiture, notamment : le réchauffement climatique à cause des émissions du dioxyde du carbone, la destruction de la couche d'ozone et la pollution, qui entraîne par accumulation des catastrophes majeures dans le monde et des problèmes de santé.

De là est venue l'idée d'exploiter l'électricité, car ils ont produit une voiture hybride, avec deux moteurs pouvant fonctionner à l'électricité, selon le moteur électrique, et fonctionner au carburant, selon le moteur thermique. Cela est constaté comme une phase intermédiaire pour une vision de la voiture 100% électrique. C'est pourquoi le moteur thermique a été supprimé, reposant entièrement sur l'électricité et nommant ces voitures électriques, car les scientifiques et les chercheurs ont déclaré qu'elles auront un avenir prometteur, et cela est dû à leurs avantages, notamment : elles sont bonnes en performances, production d'énergie pendant le mouvement, le calme et le respect de l'environnement.

Toute voiture électrique contient un moteur électrique, un convertisseur électrique et un calculateur CCME qui gère la puissance, en plus de la batterie, qui est le composant principal de la voiture.

Pour développer les performances des voitures électriques, il faut travailler au développement des batteries, car elles sont chargées d'alimenter la voiture en énergie, dont le but est de stocker l'électricité pour qu'elle puisse être utilisée plus tard et soit rechargeable en mouvement. La batterie utilisée dans les voitures thermiques était la base aux chercheurs pour développer et fabriquer des batteries pour les utiliser dans les voitures électriques. C'est-à-dire des batteries à base du plomb, et après diverses études, ils ont obtenu une batterie au plomb-acide, puis une batterie au nickel-cadmium, suivi d'une batterie nickel-hydrure métallique,

INTRODUCTION GENERALE

puis la batterie lithium-ion qui est la plus utilisée à l'heure actuelle. Après développement, ils ont développé une batterie au lithium fer phosphate, et après la batterie à semi-conducteurs.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Chapitre I : Dans ce chapitre, nous donnons des informations générales sur les différentes batteries représentées dont le principe de travail, les composants et de leurs fabrication. Nous exposons le principe de fonctionnement de la voiture et de ses composants, tout en mentionnant certains des fabricants de ces batteries.

Chapitre II : Dans ce deuxième chapitre, nous montrons les différents facteurs et composants qui améliorent chaque batterie et comment connecter les batteries, en plus comment calculer l'autonomie. Nous montrons aussi un comparatif entre différentes batteries pour avoir une idée sur la meilleure.

Chapitre III: C'est l'essentiel de notre travail, nous illustrons des informations sur les batteries modernes, à savoir la batterie sodium-ion et la super-batterie, et nous présentons quelques propositions pour dépasser les obstacles et les contraintes auxquels sont confrontées la batterie lithium-ion et la batterie lithium fer phosphate.

Nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Description des différents types de batteries

I.1.Introduction

La batterie prend une ampleur primordiale dans la fabrication d'une voiture électrique. Dans ce chapitre, nous présenterons des différents types des batteries. On va focaliser sur leurs matériaux de base, la fabrication et le principe de fonctionnement de chaque type.

Ils existent plusieurs types de batteries, l'intérêt d'utilisation et le degré du développement technologique affecte essentiellement sur chaque type. Dans ce qui suit quelques types en se basant sur les informations collectées.

I.2 Batterie au Plomb

C'est dans la nature humaine qu'on cherche à s'offrir une belle vie et économique ; et avec les prix élevés de l'essence, les inventeurs cherchent à découvrir et inventer des voitures électriques rechargeables et c'est ce que le français Gaston Planté dans l'année 1859 a inventé batterie plomb-acide dans laquelle des électrodes sont utilisées sous forme de plaques jusqu'en l'année 1881 Luxembourgeois Henri Owen Tudor travailla dur et le développa puisqu'il remplace les plaques de plomb recouvertes d'acide sulfurique par des plaques de plomb recouvertes de pâte active qui est la première batterie rechargeable. L'un des avantages de cette batterie est qu'elle est économique ; facile à produire ; mais le problème de cette batterie c'est la durée de vie un peu limitée (environ 600 cycles).

I.2.1 Composition

Une batterie au plomb est constituée par un ensemble d'accumulateurs. La tension nominale d'un accumulateur étant d'environ 2.1 V.

Dans cette partie nous allons apprendre la composition de la batterie 12V est constituée de 6 accumulateurs montés en série et reliés par des connexions en plomb soudées. Ces accumulateurs sont logés dans un bac, le plus souvent en plastique (polypropylène, ABS...), qui est fermé par un couvercle scellé (Figure I.1).

Chaque accumulateur est constitué d'un ensemble de couples d'électrodes positives et négatives plates c'est pourquoi on les appelle des plaques qui sont installées parallèlement, il y a un séparateur placé au milieu de chaque couple.

Les électrodes sont composées d'une grille sur laquelle est déposée une matière active poreuse, respectivement à l'électrode négative et positive, le plomb et le peroxyde de plomb PbO_2 .

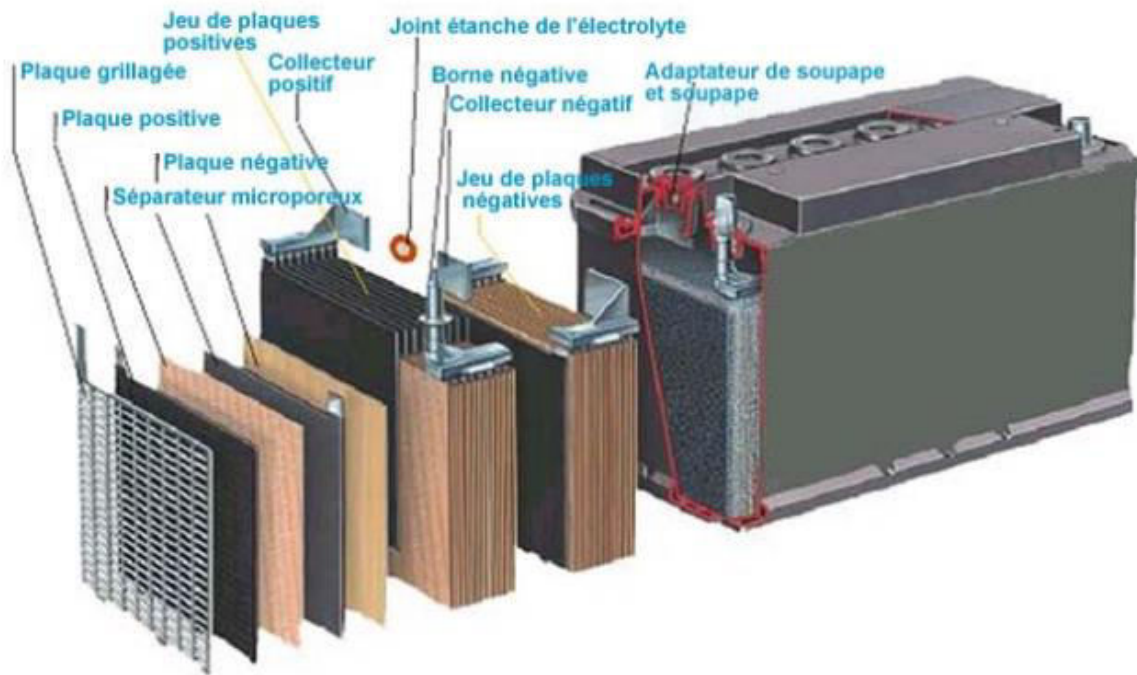


Figure I.1 Diagramme schématique d'une batterie au plomb [1]

a) Electrodes positives

Ils sont composés sous la forme des grilles, en alliage binaire ou ternaire de plomb ($Pb-Sb$, $Pb-Sn$, $Pb-Ca$, $Pb-Sb-As...$) dont les alvéoles sont remplis d'une pâte poreuse de peroxyde de plomb PbO_2 .

b) Electrodes négatives

Les électrodes négatives comparables aux grilles positives, sont remplies de plombs métalliques très poreux : on parle d'éponge de plombs métalliques.

c) Séparateurs

Ils utilisés pour isoler les électrodes positives et négatives, pour éviter les courts-circuits. Ils sont généralement des feuilles rectangulaires, Ces séparateurs sont caractérisés

par isolant électrique parfait ; barrière pour les particules de matières ; excellente tenue à l'acide sulfurique

d) Electrolyte

L'électrolyte est une solution diluée d'acide sulfurique, sous forme liquide, de gel ou absorbée dans des feutres en fibre de verre.

e) Expandeurs

Les premiers accumulateurs au plomb industriels ont utilisé des séparateurs en bois. Quand on a mis des séparateurs en plastique ou en fibre de verre. Le bois libère des macromolécules organiques en milieu sulfurique. Ces composés appelés ligno-sulfonates sont utilisées dans les batteries modernes afin de maintenir leur performance dans le temps. [2]

I.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de cette batterie c'est des réactions chimiques. Lors de l'application de tension continue aux bornes des plaques, se produire un courant et alors il se passe des modifications chimiques. Aboutir à produire une différence de potentiel entre les deux plaques, et les électrons sont tourner dedans l'électrolyte, cela est dû à aux ions.

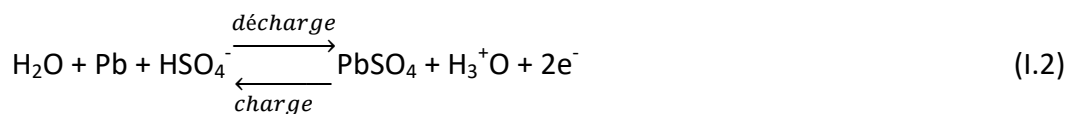
En cas de déchargement ; il se passe réaction d'oxydation ; consommation d'électrons par des plaques positives ; Quant au plaques négatives ils libèrent des électrons ; Cela conduit production gaz oxygène et gaz hydrogène grâce à décomposition de l'eau ; cette réaction avoir lieu principalement dans la fin de cycle de charge.

Le phénomène inverse se produit pendant la charge :

Réaction à l'électrode positive



Réaction à l'électrode négative



En plus d'autres réactions (oxydation du plomb) est responsable essentiellement sur le phénomène d'auto décharge. [3]

I.3 Batterie Nickel-cadmium

Inventé par Waldemar ; l'ingénieur suédois en 1899, c'était l'une des meilleures batteries en termes de longue durée de vie. Ces batteries ont été interdites car elles contiennent du cadmium puisque c'est toxique.

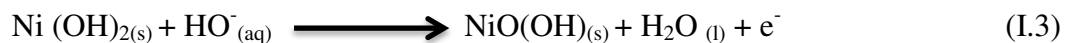
I.3.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la batterie varie selon le mode de chargement ou déchargement [3]

Charge

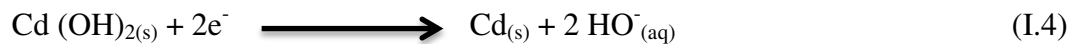
Réaction à l'anode

C'est l'électrode positive, dans cette électrode l'hydroxyde de nickel Ni(OH)_2 est oxydé



Réaction à la cathode

C'est l'électrode négative, dans cette électrode l'hydroxyde de cadmium est réduit.



Décharge

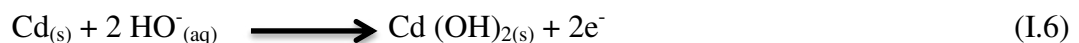
Réaction à l'anode

Dans cette électrode positive, l'oxo hydroxyde de nickel NiO(OH) est réduit en hydroxyde de nickel Ni(OH)_2 :



Réaction à la cathode

Dans cette électrode, le cadmium Cd est oxydé en hydroxyde de cadmium Cd(OH)_2 :



I.4 Batterie Nickel Hydrure Métallique

C'est la batterie la plus utilisée au début des années 2000 ; c'est pour ses points positifs : c'est une batterie rechargeable et économique et il n'a pas besoin de métaux lourds dans sa fabrication.

I.4.1 Composition

a) Electrode positive

Dans les électrodes positives ; la substance en question est produite dans des chambres de précipitation en faisant réagir du sulfate de nickel avec certains additifs comme des sels de cobalt et de zinc avec de l'hydroxyde de sodium mélangé à un peu d'ammoniac.

Ces batteries reposent sur l'hydroxyde de nickel dans leur fabrication.

b) Electrode négative

Employer dans ces électrodes une grille nickel perforée à travers lequel il est établi alliage de stockage d'hydrogène actif ; contenir ces alliages à des métaux de terres rares en proportions variables.

c) Séparateur

Le but du séparateur c'est l'isolation entre les électrodes positives et les électrodes négatives et conserver l'électrolyte transporteur ionique.

Le séparateur fait de polyamide était diffusé dans la première génération sauf qu'elle est affecté sur la batterie Ni-Mh ce qui était exposer à l'autodécharge. En outre la décomposition de polyamide à cause d'oxygène et d'hydrogène gazeux qui a produit ions nitrites ; et elle, à son tour était la raison d'être l'hydroxyde de nickel qui a conduit à divers négatifs : libération prématurée d'oxygène et être la mode de des composant avoir la capacité de la navette redox entre les deux électrodes qui a conduit à une interdiction l'utilisation de celle séparateurs.

Dans la prochaine génération, c'est d'utiliser les séparateurs en polyoléfine ; il est encore utilisé jusqu'à présent ; parce qu'il est mouillable en permanence.

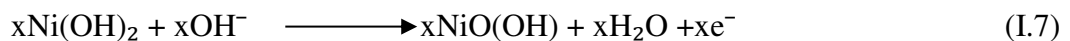
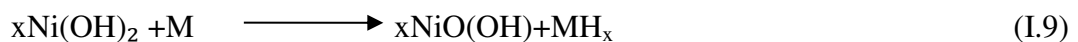
d) Electrolyte

C'est à propos solution aqueuse contient 30% de hydroxyde de potassium et ce dernier c'est un additif toujours concentriquement arriver à 17g par litre (GPL).

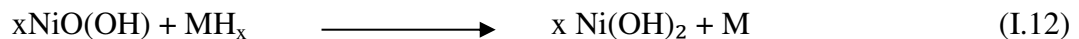
La batterie de Ni-Mh dépend à l'électricité dans les plaques en plus de le séparateur. [4]

I.4.2 Principe de fonctionnement

On peut constater que le fonctionnement pendant la charge de la cellule vu que la cathode est de l'hydroxyde de nickel et l'anode est un métal lorsqu'un chargeur est connecté un courant circule. L'électrolyte qui est l'oxyhydroxyde de potassium se divise en ion potassium positif et en ion hydroxyde négatif ; l'ion hydroxyde réagit avec l'hydroxyde de nickel afin de produire de l'oxyhydroxyde de nickel, donnant de l'eau également des électrons sont produits qui traversent le circuit externe et atteindre l'anode. L'anode réagit avec le métal pour former un hydrure métallique en dégageant un ion hydroxyde à la cathode. [5]

Réaction inversées**Réaction à la cathode****Réaction à l'anode****Réaction cellulaire**

Pendant la décharge de la cellule à la cathode de l'oxyhydroxyde de nickel est produit et à l'anode de l'hydrure métallique est produit pendant la charge est connectée entre les électrodes l'électrolyte d'oxyhydroxyde de potassium se divise en ion potassium et ion hydroxyde. L'ion hydroxyde réagit avec l'hydrure métallique afin de former du métal donnant de l'eau H₂O et des électrons sont produits.

Réaction à la cathode**Réaction à l'anode****Réaction cellulaire****I.4.3 Fabrication**

Cette batterie est une boîte hermétiquement fermée pour éviter toute fuite de métal, car elle était munie de dispositifs de sécurité, car la boîte était séparée du couvercle au moyen de scellés métalliques. Il n'a pas été largement approuvé par les constructeurs de voitures électriques pour diverses raisons, et il est coûteux, ne fonctionne pas bien à des températures élevées et a un taux de décharge négatif par rapport à d'autres batteries. Certaines voitures électriques telles que Toyota et Honda l'ont adopté car il est plus durable que les batteries plomb-acide et lithium-ion.

I.5 Batterie Lithium

La batterie lithium a été découverte en 1965 jusqu'à l'année 1985 début de la batterie au lithium métal.

La base de cette batterie dépend de la cathode, qui contient un lithium métal qui est un métal dangereux, il a nécessité son changement avec du graphite et l'anode se compose de cobalt. Son nom a été changé pour la batterie lithium-ion.

I.5.1 Principe de fonctionnement

L'interaction entre l'électrode positive contenant du lithium et de l'oxyde de cobalt(LCO), et l'électrode négative contenant du graphite. Cette réaction est dans l'électrolyte pour l'échange d'électrons entre les deux électrodes.

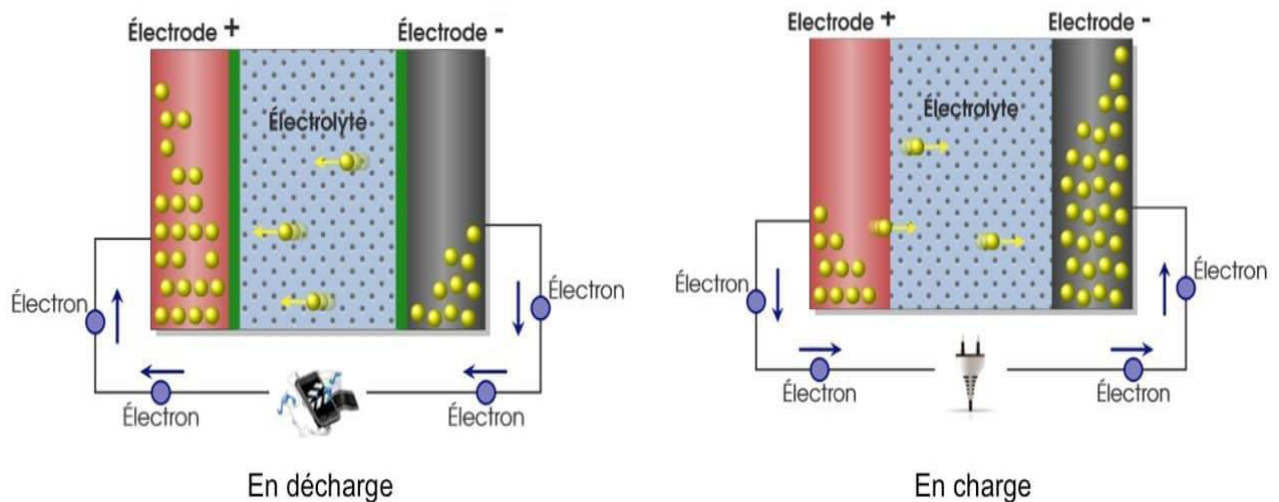


Figure I.2 Etat de la batterie lithium en charge et en décharge [6]

I.5.2 Fabrication de la batterie

Les types de batteries au lithium diffèrent selon les différentes cellules lithium-ion et composants au lithium, ce sont des batteries sensibles à la température.

I.5.3 Différents types de batteries au lithium

On trouve sur le marché trois principaux types de batteries constituées de lithium :

- Lithium-Ion
- Lithium-Polymère
- Lithium-Fer Phosphate

Chacun de ces types ont leurs propres particularités et sont adaptés à des usages différents.

- a) **Batterie lithium-ion (Li-ion)** : Il a une densité d'énergie électrique élevée pour la capacité de la voiture à parcourir de longues distances, de plus ; il peut fournir une puissance élevée et un courant de charge important, ce qui augmente les performances de la voiture, grande stockage d'énergie en peu de temps.
- b) **Batterie au lithium polymère (Li-po)** : Moins efficace, plus cher à produire plus sensible aux chocs.

- c) **Batterie au lithium fer phosphate (LifePO₄ ou LFP)** : Faible cout, longue durée de vie, sécurité, il est respectueux de l'environnement car il ne contient pas de cobalt, il est moins susceptible d'être endommagé lors de la charge et de la décharge.

I.6 Batterie lithium-ion

Les scientifiques et les inventeurs s'efforcent d'avoir tout parfait. C'est ce qui les rend insatisfaits des batteries au nickel et à la recherche d'autres batteries qui ne présentent pas ses inconvénients. Jusqu'à l'apparition de la batterie lithium-ion s'est rapidement répandue sur le marché des batteries en raison de ses avantages : haute tension, rapport densité énergétique, leurs poids et leurs prix.

I.6.1 Composition et mode de fabrication

Pour fabriquer une cellule Li-ion, nous devons passer par trois étapes principales :

Fabrication des électrodes, assemblage de la cellule et sa formation.

a) Fabrication des électrodes

La première étape regroupe les activités nécessaires pour fabriquer les électrodes (voir Figure I.3) :

- ❖ La formulation et préparation par mélangeage d'une encre (matériaux actifs, percolants électroniques, liants, solvants) ;
- ❖ L'application de l'encre sur le support métallique d'électrode, appelé collecteur, (une face puis l'autre ou double face) ;
- ❖ Le séchage pour évaporer les solvants nécessaires à la formulation de l'encre ;
- ❖ Le calandrage ou laminage de l'électrode pour atteindre l'épaisseur et la porosité cibles.

Cet enchaînement permet de produire des feuilles d'électrodes de l'ordre de 100 µm d'épaisseur.

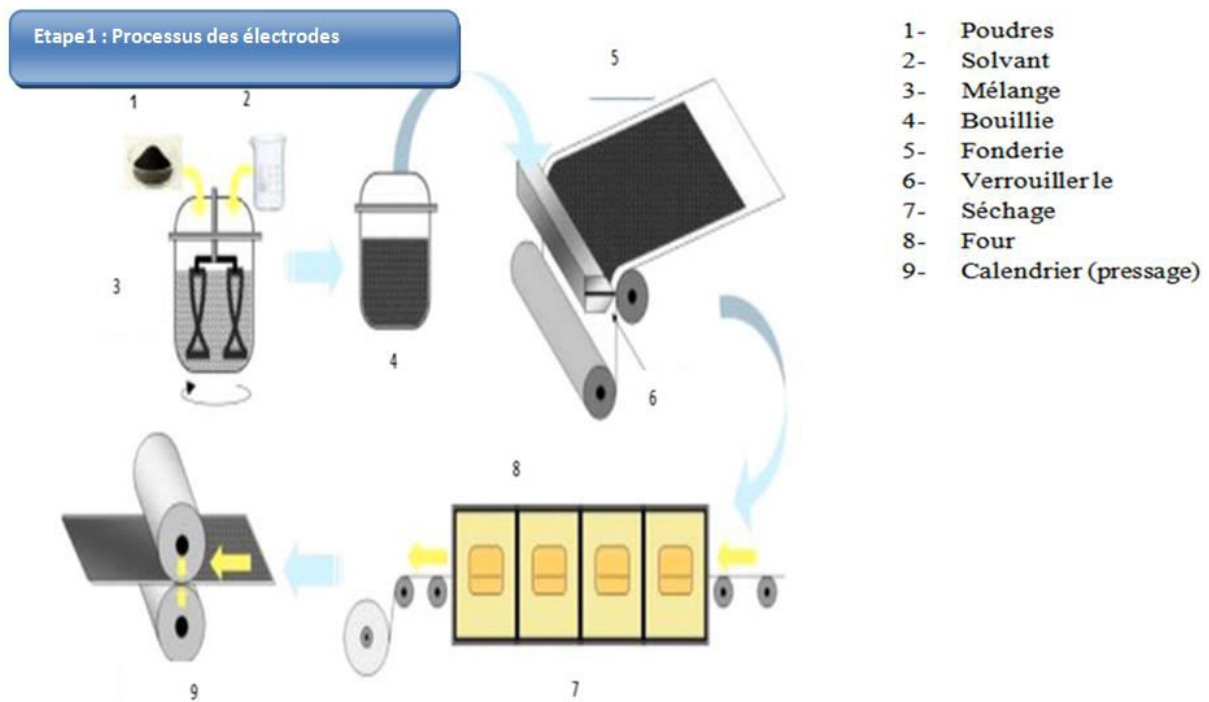


Figure I.3 Processus des électrodes [7]

b) Assemblage de la cellule

La seconde étape consiste à assembler l'électrode positive, l'électrode négative et le séparateur en couches (par ex 20-30 couches) pour former une structure de cellule de format parallélépipédique type boîtier métallique (prismatique) ou enveloppe souple métalloplastique (poche), ou plus rarement de type spiralé dans un boîtier cylindrique (cylindrique).

Ces formats traditionnels sont obtenus en enchaînant (voir Figure I.4 pour l'exemple poche) :

- ❖ Le découpage de l'électrode
- ❖ L'assemblage des principaux constituants : électrodes positive, négative et séparateur, où le positionnement des différentes couches doit être très précis. L'assemblage consiste soit à empiler les constituants (empiler), soit à les enrouler (bobinage)
- ❖ La soudure des bornes sur les collecteurs (en Al pour la positive, en Cu pour la négative)
- ❖ L'insertion dans le sachet souple
- ❖ La scellée partielle du sachet
- ❖ L'injection d'électrolyte suivie d'une extraction sous vide pour disperser l'électrolyte
- ❖ La scellée complète de la cellule.

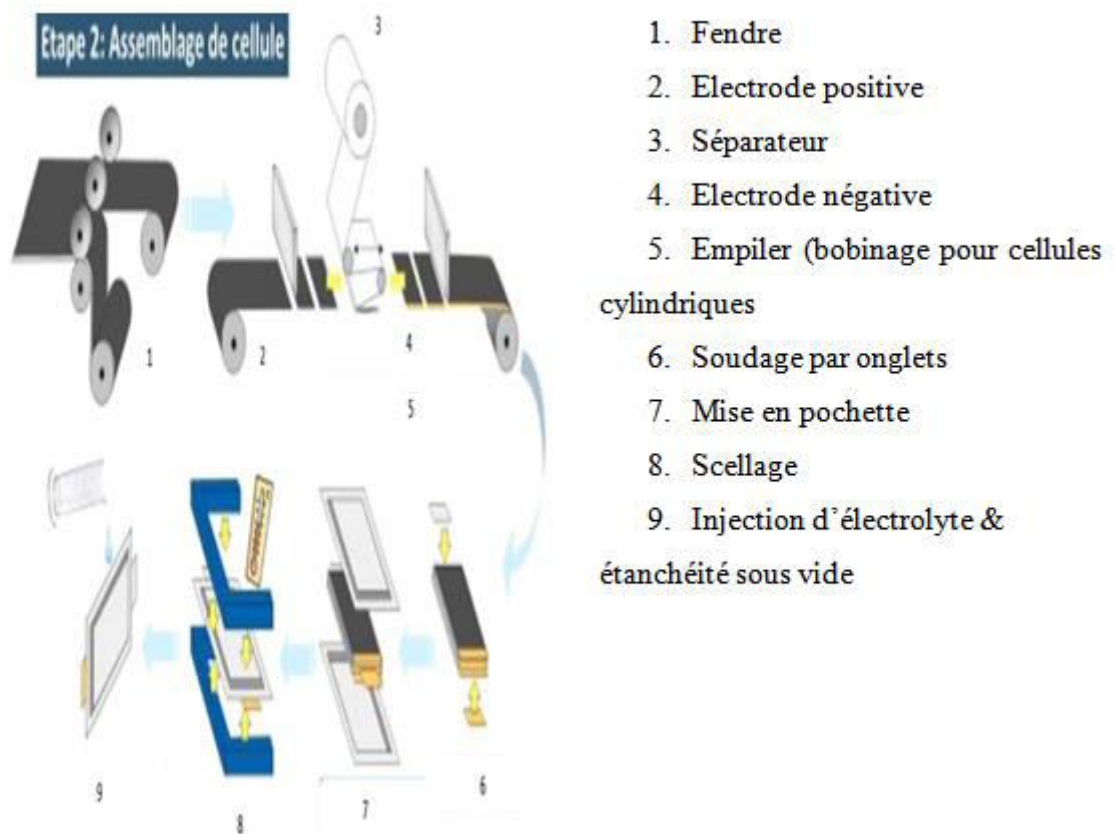


Figure I.4 Assemblage des cellules [7]

c) Finition

La dernière étape, majeure, consiste à effectuer au moins un cycle de charge et décharge sur la cellule. Puis le gaz formé durant la formation (décomposition de l'électrolyte) est évacué et la cellule définitivement scellée. (Figure I.5)

Ensuite, des tests de vieillissement à haute température et température normale sont effectués pendant plusieurs semaines.

Enfin, la cellule est stockée pendant quelques semaines à une certaine température pour finaliser l'étape de formation, cruciale pour le bon fonctionnement ultérieur de la cellule.

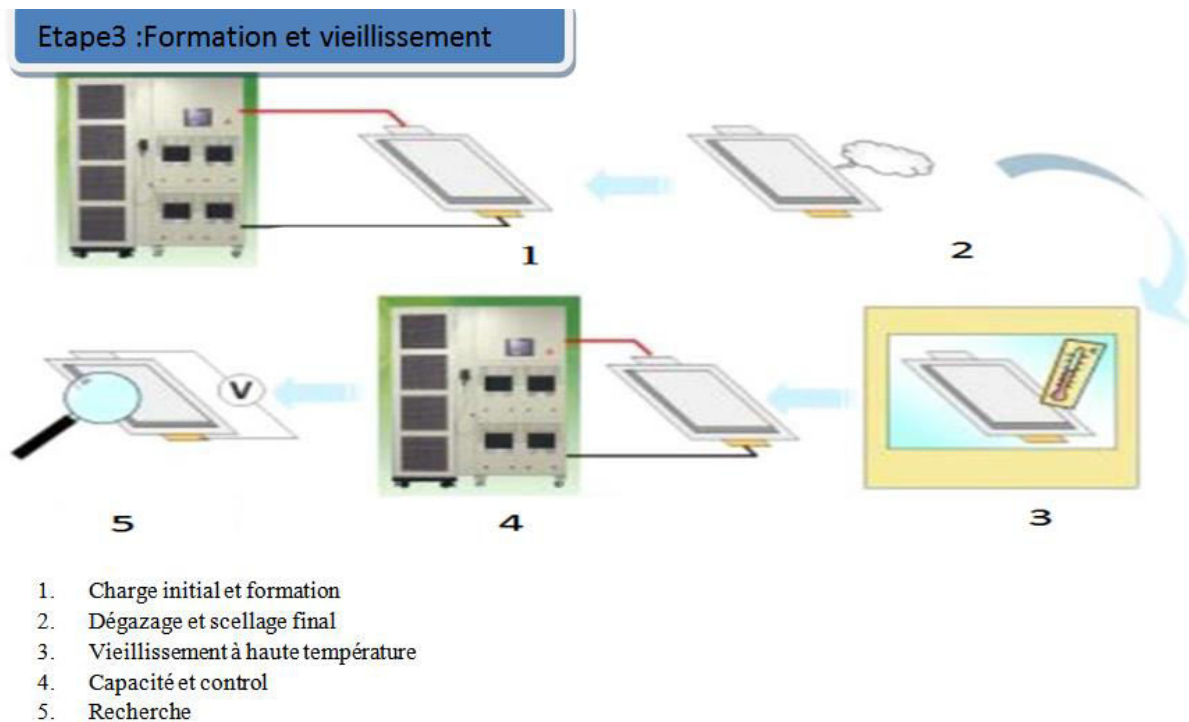


Figure I.5 Formation et vieillissement du module [7]

d) Assemblage d'un pack batterie

Les cellules sont d'abord assemblées en série et /ou parallèle dans des modules, dont les caractéristiques sont diverses d'un fabricant à l'autre, et d'un véhicule à l'autre. (Figure I.6) Ensuite les modules sont assemblés pour former un pack batterie de tension et capacité données, qui contient également toute la connectique :

- ❖ câbles, jeux de barres, relais.
- ❖ capteurs (de courant, de tension, de température,...).
- ❖ Contrôleur électronique BMS.
- ❖ Disjoncteur.
- ❖ Eventuel système de refroidissement et un packaging offrant une structure mécanique, protégeant notamment des chocs (voir Figure I.6).

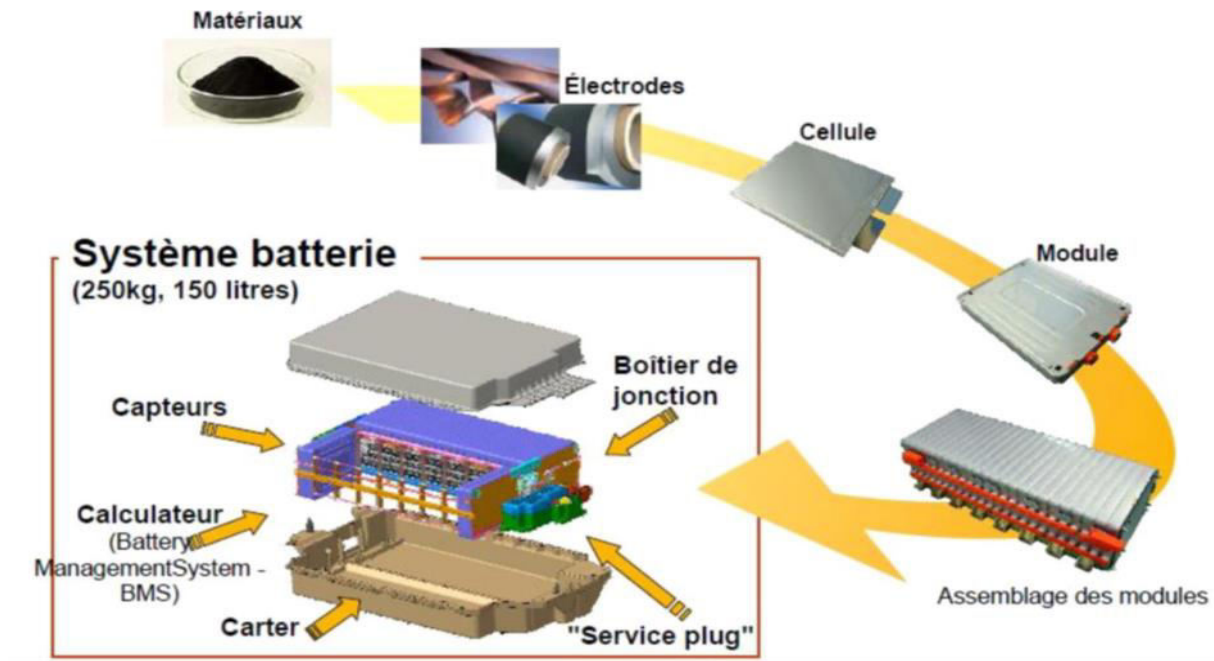


Figure I.6 De la cellule Li-Ion au pack batterie [7]

e) Recyclage et émissions de CO₂

Cette partie traite uniquement des batteries de véhicules électriques. Les batteries de véhicules électriques comportent une grande quantité de matériaux et la mise en décharge des véhicules est bien organisée, ce qui facilite le recyclage. Rajoutons que la directive européenne 2006/66/CE oblige les constructeurs automobile à s'assurer du recyclage d'au moins 50 % de la masse des batteries véhicules qu'ils produisent.

Le recyclage des batteries Li-ion des voitures électriques est possible mais pour l'instant peu développé, le coût des matériaux recyclés (Lithium, Nickel, Cobalt) suffisamment purs étant supérieur au coût des matériaux du marché des matières premières et la quantité de batteries lithium-ion en fin de vie peu significative.

Les tensions sur le marché du cobalt, le flot de batteries usagées à venir et les obligations environnementales des constructeurs amènent la filière à se développer.

Les émissions carbone connexes (notamment la fabrication de la batterie, la production d'électricité) doivent être évaluées afin de s'assurer du gain global de réduction des émissions de CO₂. Les estimations, difficiles à réaliser, ne sont pas toutes similaires selon les études, mais elles montrent qu'il faut veiller à ce que la fabrication de la batterie en amont ait une empreinte CO₂ minimale pour optimiser le bénéfice final. De surcroît, la production d'électricité dépend fortement du pays considéré, mais la tendance de produire de l'électricité décarbonée est forte et continue (grâce aux énergies renouvelables), et c'est un levier qui existe, contrairement au véhicule thermique très dépendant des énergies fossiles. [7]

I.6.2 Principe de fonctionnement

Les différents composants de la cellule de base :

- Electrode positive et électrode négative présentant une différence de potentiel, placées dans des compartiments séparés et reliées par un circuit extérieur.
- Des collecteurs de courant supportant les électrodes, sous forme de feuillets métalliques d'aluminium (pour la positive), de cuivre (pour la négative) ; ces collecteurs étant reliés aux bornes.
- Un électrolyte conducteur ionique : sel de lithium dans un solvant organique (non aqueux) permettant le déplacement des ions Li^+ .
- Un séparateur poreux, permettant le passage des ions mais évitant le contact direct entre électrodes.
- Un boîtier rigide ou souple pour contenir le système.

L'électrode positive contient oxyde de manganèse et l'électrode négative contient graphite.

Charge

Sous l'effet du courant délivré par un chargeur externe.

Dans l'électrode positive

L'oxyde de manganèse lithié s'oxyde, libérant des ions Li^+ dans l'électrolyte et des électrons dans le circuit électrique (rôle d'anode).

Dans l'électrode négative

Les électrons qui arrivent permettent la réduction des ions lithium issus de l'électrolyte et leur insertion dans le graphite (lithié à pleine charge suivant la stœchiométrie LiC_6). La négative joue le rôle de cathode.

Décharge

Les réactions électrochimiques sont inversées : le lithium emprisonné dans le graphite à l'anode repart vers la cathode en oxyde de manganèse.

Dans l'électrode positive

La réduction de l'oxyde de manganèse sous la forme LiMn_2O_4 se produit, consommant les ions lithium arrivant via l'électrolyte et les électrons arrivant via le circuit électrique (rôle de cathode).

Dans l'électrode négative

L'oxydation conduit à la libération des ions Lithium dans l'électrolyte et des électrons partent dans le circuit électrique (rôle d'anode). [7]

I.7 Batterie Lithium Fer Phosphate

En raison des problèmes rencontrés par le lithium-ion, les inventeurs ont travaillé dur pour rechercher l'alternative parmi ces batteries, on cite LFP études qui sont apparues en 1996, nous pouvons les trouver dans de nombreux domaines tels que les voitures électriques, dont le nom est extrait du matériau dans la cathode.

I.7.1 Principe de fonctionnement

Charge

L'ion lithium se déplace de l'électrode positive (feuille d'aluminium) constituée de LFP à l'électrode négative (feuille de cuivre) constitué de carbone, c'est-à-dire de graphite à travers l'électrolyte. L'ion lithium à travers l'électrolyte et un membre polymère. Dans ce cas le LFP diminue et FePO_4 se forme, qui a la même structure cristalline LiFePO_4 .

Décharge

En inversant le processus de charge, l'ion lithium se déplace de l'électrode négative à l'électrode positive.

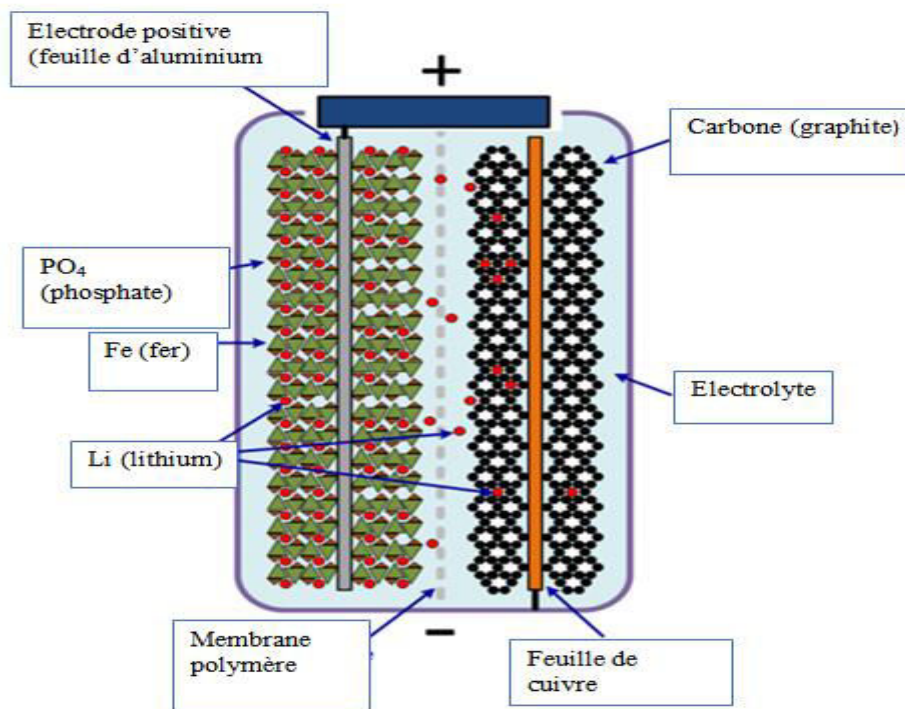


Figure I.7 Principe de fonctionnement de la batterie lithium fer phosphate [8]

I.7.2 Fabrication de cette batterie

Ils contiennent moins d'énergie, mais ils sont plus sûrs et moins chers car ils utilisent des matériaux plus abondants. Ses composants comprennent le fer, le graphite et le phosphate c'est-à-dire des matériaux non toxiques dans la nature.

I.8 Batterie tout solide

Les pays développés dépendent de l'utilisation de batteries lithium-ion dans leurs voitures électrique. Cependant ; certains de ses inconvénients les obligent à le remplacer. Les consommateurs se concentrent sur la durée de vie de la batterie ainsi que sur l'autonomie ; en plus du coût de production et de la dépendance à la sécurité. Puisque les batteries lithium-ion contiennent de l'électrolyte liquide qui est une source dangereuse à cause de l'aspect inflammable difficile à éteindre. C'est ce qui a poussé les inventeurs à se tourner vers les batteries tout solide. Le constructeur automobile Japonais Toyota a utilisé la première voiture électrique contenant une batterie tout solide en septembre 2021 sous le slogan All Solid State Battery, et c'est maintenant une source de concurrence pour la plupart des pays comme la Chine, l'Amérique, le Corée de sud.

I.8.1. Composition

Elle contient les mêmes composants que le lithium-ion sauf dans l'électrolyte liquide est remplacé par un électrolyte solide, il peut prendre la forme d'un polymère ; d'un céramique.

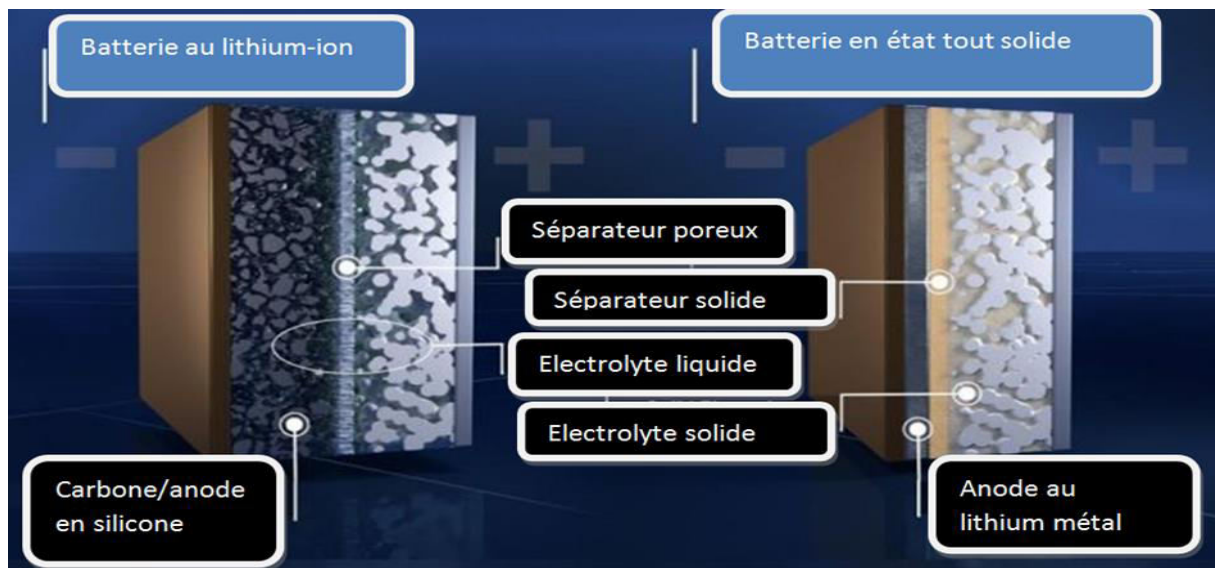


Figure I.8 Comparaison entre la composition des batteries lithium-ion et tout solide [9]

I.8.2. Principe de fonctionnement

Lors de la charge ou de la décharge, les batteries tout solides utilisent d'électrolyte solide avec des matériaux d'électrode positifs et négatifs solides. Les ions sont transférés vers une matrice solide conductrice d'ions au lieu d'un sel ionique dissous dans une solution, c'est ainsi que se produisent les réactions de charge ou de décharge.

Décharge

Les ions provoquent une réaction chimique entre les matériaux de la batterie appelée oxydation et réduction. L'oxydation se produit au pôle positif pour former des composés avec des électrons libres qui fournissent de l'énergie électrique, et la réduction se produit au pôle négatif pour former des composés qui gagnent des électrons, ce qui entraîne une conservation de l'énergie. Les batteries à semi-conducteurs (cathode) développent une charge positive au niveau de l'électrode négative et absorbent les électrons de l'électrode positive.

Charge

En inversant le processus de décharge, les ions chargés positivement traversent l'électrolyte de l'électrode négative (anode) à l'électrode positive (cathode). Lors de la décharge de batteries tout solide (cathode). Et parce que les électrons ne peuvent pas se déplacer à travers l'électrolyte, ils traversent un circuit qui fournit de l'énergie à ce qui y est connecté, c'est-à-dire que les ions passent à l'électrode positive pour former une charge qui absorbe les électrons de la cathode à travers un circuit. Une batterie est considérée comme complètement chargée lorsqu'il n'y a plus d'ions qui circulent vers l'électrode négative. [10]

I.8.3. Fabrication

Ces batteries ont un avenir prospère car elles sont étudiées à tous égards et présentent divers avantages :

- a) **Côté sécurité** : comme mentionné, l'électrolyte liquide est inflammable et il est difficile d'éteindre l'incendie qu'il provoque. Le changer par de l'électrolyte solide est une bonne idée car ce dernier n'est de toute façon pas inflammable, et c'est bien pour mettre fin aux incendies de voitures électriques.
- b) **Côté temps d'expédition** : dans d'autres batteries ; ils sont confrontés au problème du long temps de charge, et dans les batteries tout solide ; ils étudient des solutions à ce problème.
- c) **Côté d'énergie** : il a pu stocker une grande énergie avec la même taille et le même poids, et obtenir l'indépendance, et ce sont parmi les avantages qui font que le monde se débarrasse des batteries lourdes de grande taille.

I.9 Architecture d'une voiture électrique

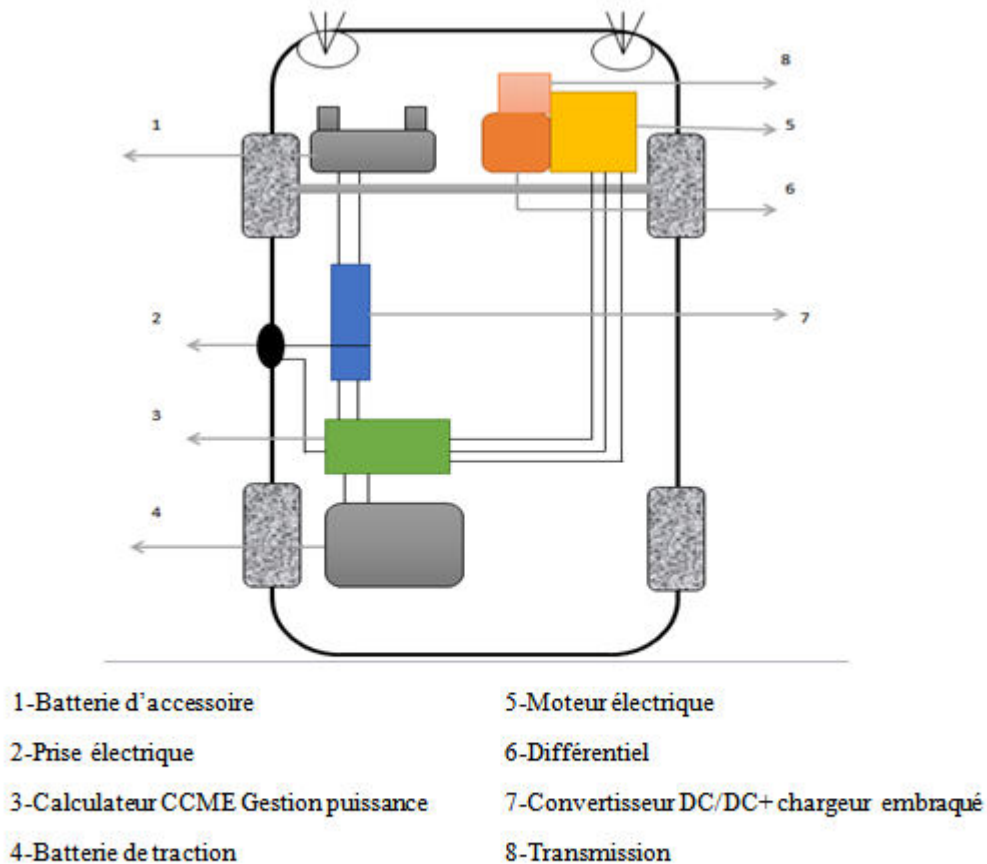


Figure I.9 Architecture d'une voiture électrique

Il est chargé au moyen d'un chargeur de batterie de voiture électrique qui lui est connecté l'énergie circule du réseau à travers le point de charge jusqu'à la batterie. Avec une explication détaillée, un câble est utilisé pour connecter le connecteur de voiture à la station de charge AC. Dans certains cas, le câble du chargeur est connecté en permanence à la station de charge, comme pompe à essence Pour un processus de charge sûr et fiable, il doit y avoir plusieurs composants de base dans la station de charge.

La voiture électrique est chargée aux stations de charge (réseau de distribution AC), mais la batterie doit être chargée en courant continu, elle a donc besoin des convertisseurs, le premier convertisseur est une convertisseur AC/DC qui convertir le courant alternatif en courant continu en utilisant un pont redresseur à diodes ou bien pont à thyristors ou bien un convertisseur à absorption sinusoïdale de courant. Ensuite, un convertisseur DC/DC est utilisé

pour convertir la haute tension de la batterie de traction en courant continu 12V pour recharger la batterie de service, cette batterie c'est la même batterie que celle que l'on trouve dans les voitures normale qui fonctionnent à l'essence et alimenter les différents équipements au courant électrique (lumière, chauffage, essuie-glace, radio et les vitres électriques...etc). Les batteries sont connectées au moteur électrique (les voitures électriques alimenté par un moteur électrique par opposition aux voitures conventionnelles alimentées par un moteur à carburant conventionnel), un moteur électrique est utilisé pour convertir l'énergie électrique provenant de la source en énergie mécanique utilisée pour propulser la voiture pendant les phases de traction. Ou à l'inverse de l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage, pour permettre la récupération d'énergie. Dans la phase ralentissement, le calculateur fait fonctionner le moteur électrique comme un générateur, et l'énergie fournie par ce générateur est utilisée pour recharger la batterie. Dans la phase de contrôle, l'énergie est envoyée au moteur pour être convertie en mouvement qui passe à travers la transmission de roue pour la propulser.

I.10 Entreprises fabricant les batteries

a) Batterie plomb acide

JYC (JYC Battery Manufacturer Co), un fabricant chinois de batteries au plomb avec 23 ans d'expérience, ils ont plus de 240 modèles de 2V, 4V, 6V, 12V. [11]

b) Batterie lithium-ion

-CATL (Comtemporary Amperex Technology Limited), une Entreprise chinoise créée en 2011, elle est considérée comme le premier fournisseur au monde, elle a élargi sa production ; car en 2021 son taux de production était de 32% et ce nombre a augmenté à 34% dans l'année en 2022. En plus elle est considérée comme le fournisseur leader des entreprises mondiales qui fabriquent des voitures électriques comme Tesla, Peugeot, Hyundai, Honda, Volvo, Volkswagen, Toyota et BMW. [12]

-AESC (Automotive Energy Supply Corporation), une société au Japon installée en 2007 en partenariat avec NEC Corporation et Nissan Motor Company et NEC Tokin. [13]

c) Batterie tout solide

Toyota, fondée en 1937 par Kiichiro Toyoda, une entreprise considérée comme le premier fabricant des voitures dans le monde. [14]

I.11 Conclusion

D'après les informations mentionnées auparavant, on peut constater que le type de la batterie doit être choisi avec précision et perfectionnement.

L'existence de plusieurs types de batteries ouvre le choix de prendre la batterie qui convient selon les besoins des consommateurs.

Nous avons conclu que chaque batterie contient des avantages et des inconvénients. En plus ils existent plusieurs facteurs qui influent sur le fonctionnement de la batterie. C'est l'objet du deuxième chapitre.

Chapitre II

Facteurs qui influent sur l'optimisation de la batterie

II.1 Introduction

La batterie est une source d'énergie dans la voiture électrique ; c'est-à-dire c'est son cœur battant qui lui donne son énergie. L'importance de la batterie nous exige à connaître les facteurs qui améliorent son comportement y compris son autonomie.

II.2 Facteurs et composants qui influent sur l'optimisation de la batterie plomb acide

Ils existent plusieurs facteurs et composants qui influent directement ou indirectement sur le bon fonctionnement de la batterie plomb acide.

- a) **Poids de la batterie** : elle possède un poids élevé, pas une meilleure solution pour les voitures électriques.
- b) **Température de l'environnement** : il peut varier à une température allant de -40°C et 55°C .
- c) **Temps de charge** : elle consomme long temps 12 jusqu'à 16h.
- d) **Maintenance** : elle a besoin d'un entretien permanent ; car elle doit être utilisée à surface plate et contrôler régulièrement le niveau d'eau, l'endroit où on doit déposer la batterie doit être entretenu avec de l'eau et du bicarbonate de soude.
- e) **Les alliages de plomb**

Il a une propriété qui permet une mise en forme plus facile ; puisque la température de fusion de ces alliages est faible, les alliages couramment utilisés sont :

- **Pb-Sb** : il est utilisé dans les batteries ouvertes à électrolytes liquides, et cela est dû à libération de l'hydrogène résultant à dépôt d'antimoine sur l'électrode négative en cas d'érosion de l'électrode positive.
- **Pb-Ca ; Pb-Ca-Sn** : sont utilisés dans les batteries Pb liquides scellées ou bien les batteries étanches Gel ou AGM car leur dégagement gazeux est moindre qu'avec les alliages Pb- Antimoine.

Tableau II.1 Comparaison entre deux types d'alliage

Nature de l'alliage	Pb-Sb	Pb - Ca – Sn
Durée de vie / décharge profonde	Bonne	Faible
Durée de vie / T° élevée	Meilleure résistance à la corrosion	Risque d'emballement thermique
Dégagement gazeux	Elevée	Faible
Maintenance	Elevée	Faible
Auto décharge	Forte	Faible

f) Cristallographie-microstructure des électrodes

Les électrodes électriques sont confrontées au problème de la corrosion, la solution est d'éliminer les pores ; aussi on fabrique des électrodes de petite taille ce qui améliore la résistance à la corrosion des panneaux.

g) Géométrie des plaques

Au début les batteries utilisent des plaques planes et vu leurs efficacités, on utilise maintenant des batteries à plaques tubulaires ; l'électrode positive qui était plate sous la forme d'un tube est modifiée, l'une des caractéristiques de ces plaques est une bonne résistance à la corrosion.

h) Epaisseur des plaques

Il existe une relation entre l'épaisseur des panneaux et la durée de vie de la batterie, et comme la corrosion se produit dans les électrodes positives comme nous l'avons mentionné précédemment, ces électrodes doivent être plus épaisses que les électrodes négatives.

i) Volume de l'électrolyte

Plus, on a un volume d'électrolyte grand, plus la durée de vie de la batterie est grande. [2]

II.3 Facteurs et composants qui influent sur l'optimisation de la batterie nickel cadmium

Ils existent plusieurs facteurs et composants qui influent directement ou indirectement sur le bon fonctionnement de la batterie nickel cadmium.

- a) **Poids de la batterie** : ce sont des batteries légères ; ce qui rend la voiture plus légère et le résultat moins de consommation d'énergie.
- b) **Température de l'environnement** : la plage de température de fonctionnement est large entre -40°C et 60°C , ils peuvent tolérer des températures extrêmes de -50°C à 70°C pendant de courtes périodes.
- c) **Temps de chargement** : le temps de charge de cette batterie est plus de 10h.
- d) **Maintenance** : on n'a pas besoin d'une grande maintenance car le couvercle est scellé.
- e) **Chocs** : puisqu'ils sont des batteries fermées, cela signifie qu'ils sont protégés contre les chocs.

II.4 Facteurs et composants qui influent sur l'optimisation de la batterie lithium-ion

Ils existent plusieurs facteurs et composants qui influent directement ou indirectement sur le bon fonctionnement de la batterie lithium-ion.

- a) **Poids de la batterie** : il dispose de petite taille, c'est la raison de son utilisation à ce moment.
- b) **Température de l'environnement** : elle ne résiste pas aux températures élevées car elle est plus sujette à l'inflammation et à l'explosion, la plage de température est spécifiée de 20°C à 25°C .
- c) **Temps de chargement** : il faut un temps moyen pour la charger, entre 3 à 5h.
- d) **Chocs** : non antichoc, plus susceptible d'être endommagé en cas d'accident.
- e) **Electrolyte**

En général c'est dans les batteries lithium-ion, on trouve deux solvants organiques ; des sels de lithium et des différents additifs, et cela doit être dans des batteries sans eau, et lorsqu'une interaction avec l'électrolyte se produit, il laisse des produits secondaires (comme acide fluorhydrique) qui nuit la batterie et sa sécurité.

- f) **Cathode et l'anode**

Le matériau actif de cette batterie est la cathode car il affecte considérablement sur les performances et la sécurité liés aux charges et décharges, ce pôle est à l'exposition de l'eau

donc il doit également être analysé ; c'est-à-dire l'étalonnage pour déterminer la teneur en métal (le cobalt, le manganèse, le fer, le nickel) du matériau de la cathode, en plus voir le taux des impuretés (les chlorures, les hydroxydes, les carbonates).

g) Séparateurs

Il a un effet sur la durée de vie de la batterie. Exemple : la dégradation du matériau du séparateur est souvent la cause première d'un court-circuit interne entraînant une défaillance de la cellule.

II.5 Facteurs qui influent sur l'optimisation de la batterie lithium fer phosphate

Ils existent plusieurs facteurs et composants qui influent directement ou indirectement sur le bon fonctionnement de la batterie lithium fer phosphate.

- a) **Poids de la batterie** : ces batteries se caractérisent par un poids léger, c'est-à-dire une petite taille par rapport aux batteries au plomb.
- b) **Température de l'environnement** : il se caractérise par sa capacité à résister à une température élevée et à travailler dans cette atmosphère ; entre -20°C à 60°C .
- c) **Temps de chargement** : il faut 10h pour la charger.
- d) **Maintenance** : il ne nécessite pas d'entretien actif pour prolonger sa durée de vie.

II.6 Facteurs qui influent sur l'optimisation de la batterie tout solide

Ils existent plusieurs facteurs et composants qui influent directement ou indirectement sur le bon fonctionnement de la batterie tout solide.

- a) **Poids de la batterie** : moins de poids, on peut constater qu'elle est moins volumineuse que la batterie lithium-ion.
- b) **Température de l'environnement** : plus stable en raison de ses composants non inflammables.
- c) **Temps de chargement** : il se caractérise par une charge rapide et ne prend pas longtemps pour la charge, il faut 10min pour une charge rapide.
- d) **Chocs** : résistant aux chocs et moins susceptible d'être endommagé en cas d'accident.
- e) **Utilisation excessive** : même avec une utilisation excessive, il reste valable de fonctionner.

II.7 Interconnexion des batteries

Le fabricant dépend de la façon du couplage des batteries, et cela se fait au déterminent de la batterie qui doit soit augmenter en tension, soit en capacité, soit dans les deux. Voici un exemple pour l'association en série ou en parallèle.

a. Association en série

Brancher 4 batteries de 12V/100Ah pour donner au total une batterie 48V/100Ah, c'est à dire brancher le pôle moins (-) du régulateur avec le pôle moins (-) de la batterie et brancher le pôle plus (+) de la première batterie avec le moins (-) de la batterie suivante.

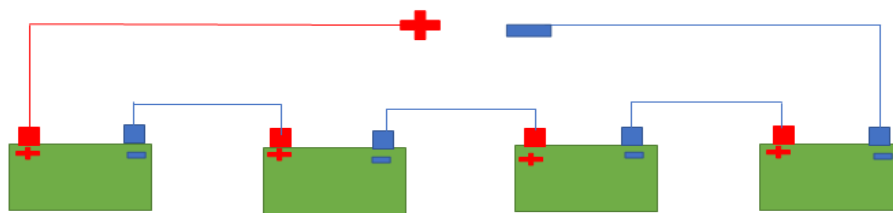


Figure II.1 Montage des batteries en série

b. Association en parallèle

Brancher 4 batteries de 12V/100Ah pour donner au total une batterie 12V/400Ah, c'est-à-dire brancher le pôle moins (-) du régulateur avec le pôle moins (-) de la batterie et brancher le pôle moins (-) de la première batterie avec le moins (-) de la batterie suivante.

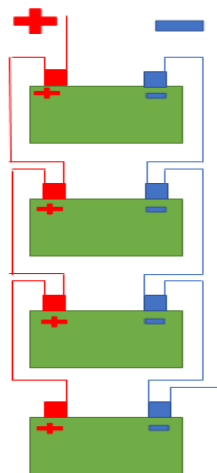


Figure II.2 Montage des batteries en parallèle

c. Association en série/parallèle

Brancher 4 batteries de 12V/100Ah pour donner au total une batterie 24/200Ah par exemple, 2 batteries contiennent une chaîne reliée en série et 2 batteries contiennent une chaîne reliée en parallèle.

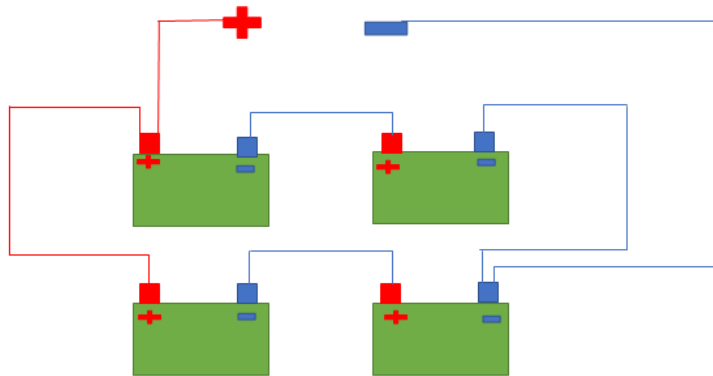


Figure II.3 Montage des batteries en série/parallèle

II.8 Autonomie de la batterie

C'est Le temps nécessaire à la batterie pour fonctionner (alimenter la voiture y compris ses équipements) avant son expiration. Pour calculer l'autonomie, on divise la capacité de la batterie par la consommation moyenne affichée, ensuite vous n'avez plus qu'à multiplier le résultat par 100 km

Exemple :

- La capacité de la batterie : 50 KWh
- La consommation moyenne affichée (kWh/100km) : 17 KWh
- L'autonomie : $(50/17) \times 100 = 294.11$ Km

II.9 Comparaison entre les différents types des batteries

Dans cette partie on traduit une comparaison entre différentes batteries : plomb acide, nickel cadmium, nickel Mh, lithium-ion, lithium fer phosphate.

Tableau II.2 Comparaison entre les différents types des batteries

Batterie	Plomb acide	Nickel cadmium	Nickel Mh	Lithium-ion	Lithium fer phosphate
Nombre de cycles moyenne	600	750	500 cycles	1250	Plus de 2000
Tension (les cellules)	2.1V	1.2V	1.2V	3.75V	3.2V
Temps de charge	12h à 16h	Plus de 10h	3-5h	3h	10h
Température d'utilisation	-40°C à 55°C	-40°C à 60°C	-30°C à 70°C	20°C à 25°C	-20°C à 60°C
Densité d'énergie	25Wh/kg à 50Wh/kg	30Wh/kg à 60Wh/kg	50Wh/kg à 90Wh/kg	100Wh/kg-230Wh/kg	130Wh/kg
Durée de vie	5ans	10 ans	5-10ans	8ans à 12ans	10ans
Effet de mémoire	Oui	Oui	Oui	No	No
Toxique	+	+	+	-	-

Ce tableau (II.2) nous montre les principaux facteurs adoptés par les entreprises de l'industrie des batteries et leur développement :

- Pour le nombre de cycles : les entreprises cherchent à développer le nombre de cycles au fil des années, par exemple la batterie au plomb acide compte 600cycle tandis que batterie au nickel présente en moyenne 750 cycle, suivie de la batterie lithium-ion où le nombre de cycles en moyenne 1250 cycle, vient ensuite la batterie au lithium fer

phosphate qui se caractérise par le plus grand nombre de cycles estimé à 2000cycle ou plus.

- Pour la tension : plus la tension des cellules sont élevées, on utilise moins de cellules, et donc la taille de la batterie est petite.

Exemple :

Nous adoptons cette étude pour une batterie 12V

- ❖ 4 cellules de lithium fer phosphate ou bien lithium-ion =12.8V
- ❖ 10 cellules de nickel cadmium ou bien nickel métal hydrure=12V
- ❖ 6 cellules de plomb acide=12.6V

Nous notons que l'utilisation de cellules de batterie lithium-ion ou bien lithium fer phosphate est meilleure que le reste des autres.

- Pour le temps de charge : toutes les batteries prenaient autrefois un temps de charge long, limité entre 10h et 16h, à l'exception de la batterie lithium-ion qui améliorerait ce paramètre ; puisqu'elle prenait un temps de charge 3h.
- Pour la température : le principe facteur adopté par les entreprises est la sécurité en termes de température d'utilisation, car toutes les batteries résistent à des températures confinées entre -40°C et 70°C, à l'exception de la batterie lithium-ion dont le défaut est de ne pas supporter les températures car elle est susceptible d'exploser.
- Pour la densité d'énergie : toutes les batteries sont connues pour avoir une faible densité d'énergie confinée entre 25Wh/kg et 130Wh/kg, à l'exception de la batterie lithium-ion qui a une grande densité d'énergie stockée confinée entre 100Wh/kg et 230Wh/kg sans augmenter sa taille.
- Pour la durée de vie de la batterie : la durée de vie de la batterie est généralement estimée entre 8ans et 12ans, la durée de vie de la batterie est contrôlée par des facteurs externes comme des températures élevées, dommages aux cellules de la batterie, manque de la maintenance pour les batteries qui ont besoin de maintenance, perte d'énergie lors de la charge et de la décharge.
- Quant à l'effet de mémoire, c'est un phénomène qui se produit lorsque la batterie est rechargée avant qu'elle ne soit complètement déchargée. Elle a des négatifs qui affectent les performances et la durée de vie de la batterie et de l'utilisateur de la voiture en particulier pendant les déplacements. Les batteries affectées par l'effet de

mémoire sont les batteries plomb acide, nickel cadmium et nickel métal hydrure, contrairement aux batteries lithium-ion et lithium fer phosphate.

- En termes de toxicité des composants, la batterie plomb acide a été bloquée en raison du plomb ce qui entraîne une pollution de l'environnement et des problèmes de santé (cancérogènes et toxiques). Quant à la batterie nickel cadmium a également été interdite à cause du cadmium métal car il est considéré comme toxique et nocive pour la santé. Tandis que la batterie nickel métal hydrure a été refusée, car le nickel est une espèce métallique lourde et toxique. En ce qui concerne la batterie lithium-ion et la batterie lithium fer phosphate, on les utilise parce qu'elles sont respectueuses de l'environnement et elles contiennent des matériaux non toxiques.

II.10 Courbes de chargement des batteries

Dans cette phase, on discute les courbes de chargement pour différents types de batteries

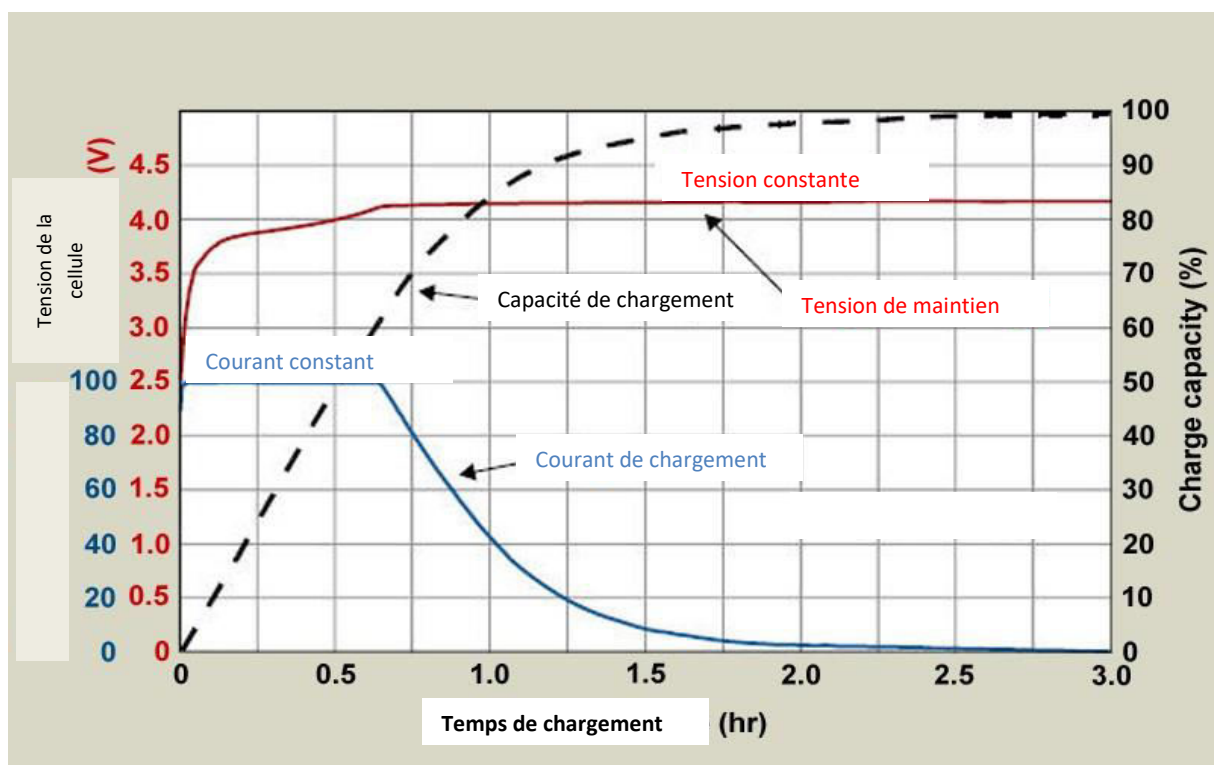


Figure II.4 Chargement de la batterie lithium-ion [15]

La figure II.4 représente des courbes représentatives de la charge de la batterie Li-ion, pour la courbe de la tension à 1h30 la batterie est chargée à 95%, à 3h la batterie est complètement chargée. Pour la courbe du courant, on voit un courant demandé constant (100%) jusqu'à 39 min (65%) environ puis il décroît exponentiellement jusqu'au chargement complet. Donc, on peut constater que la batterie Li-ion est une bonne batterie pour les longs trajets puisque le temps de chargement est faible.

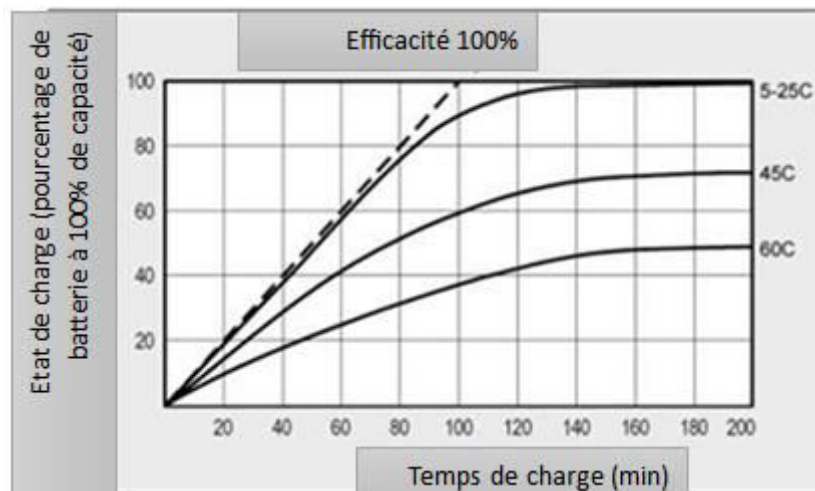


Figure II.5 Chargement de la batterie nickel cadmium [16]

Le temps de charge de la batterie est affecté par sa température. A 60°C il faut 3h20min pour charger 48%, à 45°C il faut 3h20min pour recharger 72%, et à une température comprise entre 5°C et 25°C il faut le même temps pour la charge totale. La température est liée à l'oxygène, lorsque la température augmente il y a un manque d'oxygène, et c'est un facteur qui affecte le temps de charge.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on donne une discussion sur les facteurs affectant l'optimisation de la batterie et son autonomie. Nous avons expliqué comment connecter les batteries ; cet élément de base peut contrôler soit pour augmenter la tension ou bien la capacité au bien les deux au même temps.

Nous avons comparé les différentes batteries en fonction des facteurs que nous avons mentionnés auparavant, nous avons conclu que la batterie lithium-ion et la batterie lithium fer phosphate sont meilleures que le reste des batteries en termes de poids, d'âge et du nombre de cycle ; mais chaque batterie est confrontée à un ou plusieurs problèmes qui rend le consommateur confus à choisir entre eux. La batterie lithium-ion souffre d'un problème à haute température qui le rend inflammable et explosive à tout moment et c'est un risque pour l'utilisateur de la voiture. Quant à la batterie de lithium fer phosphate ses défauts sont de faible densité d'énergie par rapport à la batterie lithium-ion ; en plus du temps de chargement c'est-à-dire qu'il faut beaucoup de temps pour la charger ; sans parler de sa faible efficacité et tous ces défauts affectent la durée de vie de la batterie.

Donc, il faut travailler pour trouver des solutions à ces problèmes, et cela est l'objet du troisième chapitre.

Chapitre III

Développement de la Batterie

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons en particulier le développement des batteries. Ensuite, Nous projetons des informations sur les nouveautés de la batterie d'une voiture électrique.

Vu l'importance de cet aspect d'étude, nous avons fait des hypothèses pour obtenir une bonne batterie.

III.2 Développement en étude de la batterie

Vu plusieurs facteurs qui rendent la batterie au lithium non compétitive tels que le poids, la sécurité, la fabrication et le prix. Des recherches visent sur l'exploitation du sodium pour la fabrication des batteries pour voitures électriques.

III.2.1 Introduction sur la batterie sodium-ion

Les fabricants cherchent toujours à produire une batterie exempte de tous défauts, ce qui signifie qu'ils ne sont pas satisfaits de la batterie lithium-ion, qui se classe au premier rang par rapport au reste des batteries. Vu que le lithium métal est extrait d'Australie et du Chili loin des usines de batteries, il a besoin d'équipement pour le transport à des milliers de kilomètres, ainsi il doit également être extrait avec de l'eau après avoir été transporté ; ce qui affecte négativement l'environnement en raison de l'approvisionnement en eau. En 2023, la Chine a mis au point une batterie appelée sodium-ion et cela est dû à l'ingrédient principal sodium.



Figure III.1 Batterie sodium-ion (a) [17]



Figure III.2 Batterie sodium-ion (b) [18]

III.2.2 Composition et le principe de fonctionnement

Il s'agit d'une batterie sans lithium, cobalt, nickel et graphite, ne contenant que du sel de sodium. Il a le même principe de fonctionnement de la batterie lithium-ion, la même composition chimique de l'électrode négative et de l'électrode positive. Elle utilise des différents métaux tels que l'aluminium, le manganèse et autres.

III.2.3 Fabrication

Le fabricant a adopté le sodium métal dans la fabrication de cette batterie en raison de son abondance, ce qui signifie que ces batteries seront moins chères que le reste des batteries. Le sodium est présent sous de nombreuses formes telles que l'eau de mer ou sous forme de chlorure de sodium. Il a une densité d'énergie inférieure à toutes les batteries en particulier la batterie lithium-ion, tandis que sa densité est inférieure à la moitié ; C'est pourquoi le constructeur a précisé que cette batterie sera adoptée par les petites voitures électriques qui ne déclarent pas une grande indépendance.

III.2.4 Entreprises fabricant la batterie sodium-ion

Les fabricants chinois Chery et CATL ont annoncé la création d'une nouvelle marque nommée Ener-Q qui produira ces batteries.

III.3 Super batterie

Malgré tout ce que la batterie lithium-ion a apporté, les fabricants et les chercheurs s'efforcent toujours d'obtenir une batterie idéale, ce qui signifie que la batterie lithium-ion peut être évitée à tout moment. L'attention de l'entreprise américaine émergente ONE basée dans le Michigan, s'est tournée vers la batterie super batterie utilisée dans les appareils

électroniques et exploitée dans le domaine des voitures électriques. Voiture Tesla S en décembre 2021.



Figure III.3 Super batterie dans la voiture Tesla S [19]

III.3.1 Principe de fonctionnement et composition

La société n'a fourni aucune explication détaillée de la fabrication de la batterie et a seulement précisé qu'elle avait ajouté un pack à la cathode de la batterie contenant du nickel, du cobalt et du manganèse, en plus de l'anode contenant du graphite.

III.3.2 Fabrication

Cette batterie est encore au stade des premiers prototypes, après les premiers tests elle a fourni des résultats étonnants et motivants pour l'installer cette batterie sur tous les types de voitures. Cette voiture se caractérisait par une bonne autonomie que les voitures n'avaient pas vu auparavant, estimée à 1210km sur une charge unique, reconnue comme dépassant une bonne distance avant la nécessité de recourir à la borne de recharge, contrairement aux batteries précédentes qui dépassent des distances confinées entre 200km et 400km, vous constaterez une amélioration du coût, de la sécurité et une bonne autonomie associée à la vitesse élevée, aux températures élevées et au terrain.

III.4 Perspective

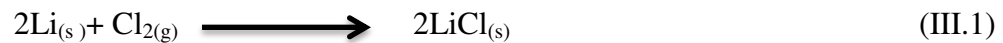
Dans cet aspect de recherche, on aimera bien avoir des batteries concurrentes qui dépassent les inconvénients tels que l'autonomie, la sécurité et autres. On peut envisager des batteries d'avenir plus compactes c'est-à-dire plus petits en poids et d'un autre côté plus de capacité d'énergie ce qui favorise une grande autonomie.

III.4.1 Combinaison de chlore et de lithium

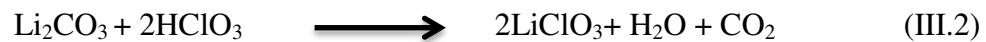
Nous suggérons de combiner le chlore avec le lithium métal dans les batteries lithium-ion. Cette proposition nous permis de défier contre les contraintes thermiques telles que l'échauffement et le risque d'incendie.

Notée Cl située dans le tableau périodique dans le groupe des halogènes. C'est-à-dire qu'il tombe dans le septième groupe et la troisième place.

Nous nous sommes concentrés sur cet élément car il est disponible naturellement sur le sel sous forme de sel extrait de l'eau de mer ou des roches salées. Lorsque le chlore réagit avec le lithium, ce qu'on appelle la réaction directe, le chlorure de lithium est produit. (III.1)



Nous pouvons également préparer le composé chimique chlorate de lithium, Son symbole LiCl par la réaction de l'acide chlorique avec le carbonate de lithium.



Soit par la réaction du chlorate de barium avec le sulfate de lithium.



III.4.2 Mettre en place d'un système de refroidissement

Dans les voitures conventionnelles, la ventilation était utilisée pour refroidir le moteur grâce à un liquide de refroidissement qui recevait l'air de l'extérieur à travers les grilles.

Cependant, les voitures électriques ne dépendant pas de la ventilation pour le moteur mais plutôt pour la batterie qui est l'élément principal dans la voiture, et cela est dû au fait que la batterie ne résiste pas à des températures élevées ce qui affecte son durée de vie et la sécurité de la voiture et de ses utilisateurs.

Actuellement, le refroidissement est utilisé sous deux formes, soit le refroidissement par air ou le refroidissement liquide.

Le refroidissement liquide utilise 50% d'eau et 50% d'Éthylène glycol sous forme des plaques et des tubes spécialement conçus intégrés dans ou sous les cellules de la batterie. Le

liquide de refroidissement circule à travers la batterie pour absorber la chaleur et la transformer en électricité.

a) Définition d'Éthylène glycol

Aussi connu sous le nom d'Ethanediol, c'est le composé le plus simple de la famille des glycols organiques. Il est utilisé comme excellent liquide de refroidissement en plus d'être utilisé comme antigel. Sa forme chimique $C_2H_6O_2$. Il préparé par réaction de l'oxyde d'éthylène avec de l'eau :



b) Proposition visant à combiner le Chlorant et le Brome avec la réaction de l'oxyde d'éthylène avec l'eau

Le Chlore et le Brome sont des métaux réfrigérés, nous suggérons donc de les combiner pour produire d'Éthylène glycol et du $2ClBr$ gazeux, ce qui signifie que la solution que nous obtiendrons aidera grandement à refroidir la batterie.



III.4.3 Utilisation d'un générateur thermoélectrique

Après avoir utilisé le système de refroidissement et s'être débarrassé de la température élevée. Nous suggérons l'utilisation d'un générateur thermoélectrique qui transforme la chaleur dissipée en énergie électrique. Celui-ci fonctionne en passant la chaleur de la partie supérieure à la partie inférieure de cet appareil à travers un semi-conducteur, ce qui entraîne le mouvement des électrons et le résultat une tension qui peut charger la batterie.

III.4.4 Densité d'énergie dans la batterie LFP

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la batterie lithium fer phosphate est l'un de ses inconvénients qu'elle souffre d'une diminution de la densité d'énergie, et pour éliminer ce problème, nous suggérons d'intégrer l'élément d'Uranium radioactif dans cette batterie pour augmenter la densité d'énergie, car cet élément peut stocker de l'énergie un million et demi-million de fois plus que les batteries au lithium pour le même espace. Il est vrai que nous ne pouvons pas utiliser de l'uranium hautement enrichi en raison de son extrême dangerosité, pour réduire l'enrichissement nous utilisons la fission en produisant des

isotopes radioactifs, le seul bémol que ces isotopes ne s'ont pas toujours stable. Donc il faut maîtriser cette technique avant l'utiliser dans les voitures électriques.

III.4.5 Utilisation du potassium dans la batterie

Lorsque les inventeurs et les chercheurs ont été confrontés au problème que le lithium était rare et difficile à recycler, et qu'il était très coûteux, ils se sont précipités pour trouver une alternative comme le sodium et le potassium, car les chimistes de l'Oregon ont annoncé un brevet vieux de plus de 80 ans, visant à augmenter la durée de vie de la batterie et la densité d'énergie élevée. L'idée du sodium a été travaillée et appliquée dans la batterie, et elle s'appelait la batterie sodium-ion, c'est-à-dire que l'idée du potassium peut être prise en considération et appliquée dans les années à venir.

III.5 Conseils pour améliorer la batterie

Vu que la batterie est l'élément essentiel de la voiture électrique, on peut envisager des solutions pour améliorer ses efficacités

- Travailler pour améliorer la durée de vie, c'est-à-dire laisser la batterie chargée à un taux limité entre 20% et 80%
- Une utilisation quotidienne régulière est recommandée, c'est-à-dire que si la voiture est utilisée en permanence, le nombre de cycle de charge sera atteint rapidement ; et si la voiture est laissée longtemps sans utilisation, cela peut accélérer son usure.
- En cas d'immobilité, il est conseillé de ne pas décharger complètement la batterie, au moins elle est chargée à 50% car la voiture consomme son énergie.
- Le style de conduite affecte les performances de la batterie, rouler à grande vitesse entraîne en permanence une consommation d'énergie, il est recommandé d'accélérer en douceur et de ne pas freiner brusquement.
- Surveiller qu'il n'y a pas d'accumulations de graisse ou d'huile sur ses surfaces, c'est-à-dire maintenir la propreté de la batterie de la voiture électrique, pour cela il est recommandé d'utiliser un système de filtration afin de garder la batterie propre et éliminer les impuretés et les dépôts nocifs de la batterie
- Inspecter la batterie périodiquement par un service professionnel, afin de garantir la qualité des cellules et des couvertures de la batterie.
- Eviter l'utilisation excessive de lumières et d'appareils électriques, car ils affectent la durée de vie de la batterie.

- Utiliser une borne de recharge domestique, car elle repose sur une charge lente, c'est-à-dire qu'elle consomme moins d'énergie qu'une charge rapide.
- Une température élevée peut provoquer un vieillissement prématuré de la batterie, il est donc recommandé de la placer dans des endroits où la température est modérée en cas d'exposition intense au soleil ou après l'avoir rechargée, et il faut éviter de recharger fréquemment la batterie à l'aide du chargeur rapide, mais par temps froid, il est recommandé de choisir un endroit chaud pour la garer.
- L'interconnexion des batteries en série ou en parallèle contrôle la capacité de la batterie qui est elle-même en autonomie.
- Technologies utilisées pour améliorer les performances des batteries de voitures électriques, notamment :
 - ❖ Système de gestion de batterie BMS : il peut charger et décharger correctement la batterie et analyse également l'état de la batterie et informe le conducteur de son état.
 - ❖ Système de distribution d'énergie : cette technologie aide à répartir uniformément l'énergie dans le sens d'obtenir les meilleures performances de la voiture électrique.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les nouvelles batteries proposées qui concurrencent la batterie lithium-ion en termes d'autonomie et de longue durée de vie.

En plus, propositions faites afin de voir des solutions pour les problèmes des batteries lithium-ion et la batterie LFP, comme exemple l'élimination des conséquences néfastes de l'excès de la température dans la batterie lithium-ion. Un autre souci est de travailler rigoureusement afin de trouver une solution pour augmenter la densité d'énergie de la batterie LFP.

Nous avons également donné des divers conseils dans le but d'améliorer le bon fonctionnement de la batterie de la voiture électrique. Tout cela mène à l'exploitation des voitures électriques dans les prochaines décennies tout en prend en considération la protection de l'environnement.

CONCLUSION GENERALE

Après avoir terminé ce travail, nous avons conclu que la batterie est la base de la voiture, ce qui signifie qu'aucune voiture électrique ne peut être produite sans une batterie rechargeable. La batterie est un mélange d'électricité et de chimie, car les matériaux de l'anode déterminent le type de batterie. De plus, la fonction de la batterie réside dans la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique en cas de charge, et lors de la décharge, le processus inverse se produit, c'est-à-dire la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique.

L'importance de la batterie se résume à générer de l'électricité pour une voiture et à stocker de l'électricité en cas de besoin, et elle joue un rôle clé pour minimiser d'utilisation des voitures à combustion interne.

La première batterie était au plomb et en raison de plusieurs facteurs, il a été renoncé et remplacée par la batterie au nickel-cadmium. Malgré ses avantages, elle a également été interdite pour diverses raisons. Ils ont essayé de ne pas s'en passer complètement ; dans le sens où ils y ont apporté des modifications afin d'obtenir une batterie nickel-métal hydrure. Ça n'était pas suffisant en comparaison avec la batterie lithium-ion, qui est considérée comme la première batterie en classement à l'heure actuelle, malgré ses défauts.

Divers facteurs affectent la durée de vie de la batterie, tels que la température ambiante élevée, ce qui signifie que la température de la batterie ne doit pas être dépassée. La taille de la batterie est liée à l'ampleur de la consommation d'énergie et a donc une relation avec la durée de vie par défaut. Le chargement fréquent affecte la durée de vie de la batterie. D'autre part, les chocs peuvent diminuer leur durée de vie.

Nous cherchions comme un travail de perspective à développer une simulation de fonctionnement de la batterie dans différentes situations : démarrage, fonctionnement normal, freinage.

Ce développement progressif des batteries est le résultat de penser à réduire ou éliminer les inconvénients et les contraintes de chaque batterie. Nous avons proposé de combiner des matériaux pour supporter le problème de la chaleur et de la densité d'énergie. L'un de ses avantages est d'obtenir une batterie de petite taille et de grande autonomie. On donne une vision sur l'utilisation des matériaux largement disponibles sur le terrain afin de réduire le prix de fabrication.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] TOTAL, les équipements-les batteries, support de cours : exp-pr-eq160 Révision 2, Dernière Révision : 10/07/2007, p. 44.
- [2] ALTERBATT, batterie-solaire Batteries & Energie solaire, les composants d'une batterie plomb, <https://www.batterie-solaire.com/Composants-batterie-plomb.htm>, 2022.
- [3] M. YOUNES SOUFIANE et M. ELAFIFI ILIES (2021/2022) « Contribution à l'étude numérique de l'échauffement des batteries des voitures électriques », Mémoire de Master en Génie Mécanique, Option : Construction Mécanique, Département Génie Mécanique, Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib, Algérie.
- [4] MICROTEx, Batterie nickel-métal-hydrure (NIMH), Nickel Metal Hydride Battery, <https://microtexindia.com/fr/batterie-nickel-metal-hydrure/>, mai 14, 2023.
- [5] A. LI, « Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, Université de CLAUDE BERNARD LYON 1, 2013, p. 234.
- [6] M. TAÏKI VAÏTCHEMÉ, « Modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien », Mémoire de Maitrise en Ingénierie, Université du QUEBEC, 2019.
- [7] Valérie SAUVANT-MOYNOT & François ORSINI & Anthony JUTON, Culture Science de l'Ingénieur. 99e éd. ENS Paris : Saclay, <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay> , 30/03/2020.
- [8] ALTERBATT, batterie-solaire Batteries & Energie solaire, La batterie Lithium Fer Phosphate (LiFePO₄), <https://www.batterie-solaire.com/batterie-lithium-fer-phosphate>, 2022.
- [9] FRANCESCO BARONTINI, traduit par : MAEL PILVEN, <https://insideevs.fr/news/544196/batterie-etat-solide-usa-coree/amp/>, 30 Oct 2021 à 18:00.
- [10] MICROTEx, Qu'est-ce qu'une batterie à l'état solide ? , Comment fonctionne une batterie à l'état solide ?, <https://microtexindia.com/fr/batterie-a-letat-solide/>, mai 14, 2023.

- [11] JYC Battery Manufacturer CO., Ltd, a propos de la batterie JYC, <https://www.jycbattery.com/ar/>, 2023.
- [12] Dr. ABDUL RAHMAN BABRIK , quels sont les 10 principaux fabricants de voitures électriques dans le monde en 2022 , <https://www.arabrena.com/4086/>, 7 octobre 2022.
- [13] BSLBATT, fabricants de batteries : liste de contrôle des 19 principaux fabricants de batteries avec conseils de la boutique du pro, <https://www.lithium-battery-factory.com/ar/bslbatt-battery-manufacturers/>, 10 juillet 2019.
- [14] TOYOTA MOTOR CORPORATION, batterie tout solide, <https://m.marefa.org/%D8%AA%D9%88%D9%8A%D9%88%D8%AA%D8%A7>, 2021.
- [15] ISIDOR BUCHMANN, Battery University, BU-409: Charging Lithium-ion, <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>, 2023.
- [16] BATTERY UNIVERSITY, BU-410 : Chargement à haute et basse température, <https://batteryuniversity.com/article/bu-410-charging-at-high-and-low-temperatures>, 2023.
- [17] TYCORUN ENERGY, <https://www.tycorunenergy.fr/top-5-des-fabricants-mondiaux-de-batteries-sodium-ion/>, 30 Avril 2023.
- [18] SOPHIE VORRATH , Sodium-ion batteries to pump Bondi sewage in test of cheaper lithium alternative,27, [Batterie sodium - Bing images](#) , 26 October 2018.
- [19] CURIOTOPUS, La "super-batterie" pour voitures électriques arrive..., Baptiste Levy. & Laure., eds., <https://www.curioctopus.fr/read/37207/la-super-batterie-pour-voitures-electriques-arrive-:-elle-garantit-plus-de-1-200-km-avec-une-seule-charge>, 18 Janvier 2022.