

# Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE LICENCE

**Filière : Chimie**  
**Option : Chimie Analytique**

Préparé par :

**ZERAIBI KHADIDJA**  
**MEGUELLATI NAWEL**

**THÈME :**  
**LES SOURCES D'ENERGIE MINIATURES**

Soutenu le : 16 /06/2014 devant le jury

**Président**  
**Examineur**  
**Examineur**  
**Rapporteur**

**Dr.MR.KHELADI**  
**M<sup>me</sup>. N.MAGHRAOUI**  
**M<sup>r</sup>.R.THABTI**  
**Pr.N.CHELLALI**

**Université de B.B.Arreridj**  
**Université de B.B.Arreridj**  
**Université de B.B.Arreridj**  
**Université de B.B.Arreridj**

Année Universitaire 2013-2014

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au laboratoire matériaux et systèmes électroniques , de l'université Bachir El ibrahimi de Bordj Bou Arréridj

Nous adressons nos plus vifs et sincères remerciements au Docteur R. KHALLADI , Pour l'honneur qui'il nous fait en acceptant de juger ce travail et d'en présider le jury.

On remercie Madame N. MAGHRAOUI , pour avoir accepter de juger ce travail et de participer au jury.

Je remercie également Monsieur R .THABTI, qui a bien voulu accepter de faire partie de ce jury.

Le professeur N.CHELALI , a su diriger nos recherches avec beaucoup de compétence et de patience. Nous tenons à lui exprimer toute notre reconnaissance pour l'aide efficace qu'il nous a apportée et pour le temps qu'il nous a consacré.

Nous tenons à le remercier vivement.

Enfin, nous tenons à remercier tous nos enseignants du département qui ont su donner le meilleur d'eux même au cours de notre cursus universitaire.

Enfin, nous ne saurons omettre et remercier tous nos collègues de promotion.

## Table des Matières

➤ INTRODUCTION GENERALE .....	1
➤ <b>CHAPITRE I: LES ACCUMULATEURS ELECTROCHIMIQUES</b>	
I.1.Définition .....	2
I.2.composants d'un accumulateur électrochimique .....	3
1.3. Caractéristiques des accumulateurs électrochimiques .....	3
1.3.1. Capacité théorique de l'électrode.....	3
1.3.2.Capacité théorique de l'accumulateur.....	5
1.3.3. La densité d'énergie massique ou volumique .....	6
1.3.4. La densité de puissance massique .....	9
➤ <b>CHAPITRE II: LES DIFFERENTS TYPES DE BATTERIE</b>	
II.1.GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR AU PLOMB ACIDE .....	10
II.1.1.Historique .....	10
II.1.2. Place de l'accumulateur au plomb aujourd'hui.....	10
II.1.3. Constitution de la batterie au plomb .....	11
II.1.4. Différents types d'accumulateurs au plomb .....	13
II.1.4.1. La batterie au plomb ouverte.....	13
II.1.4.2. La batterie à recombinaison de gaz .....	14
II.1.5. Principe de fonctionnement de l'accumulateur au plomb ouvert .....	14
II.1.6. Les grandeurs caractéristiques.....	16
II.2. GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR AU NIKEL CADMIUM	
II.2.1. Historique .....	17
II.2.2. Constitution d'une batterie .....	17
II.2.3. Conditions d'utilisation .....	17

II.2.4. Propriétés et applications des batteries Ni-Cd .....	18
II.2.4.1. Fonctionnement .....	18
II.2.4.2. Format .....	18
II.2.4.3. Problématiques .....	18
II.2.4.4. Marché .....	18
II.2.5. Les grandeurs caractéristiques .....	19
II.3. GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR AU NI-MH .....	19
II.3.1. Historique .....	19
II.3.2. Réalisation des accumulateurs étanches Ni-MH .....	20
II.3.3. Electrode à hydrogène .....	20
II.3.4. Réaction principales .....	20
II.1.6. Les grandeurs caractéristiques.....	21
II.4. GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR au Lithium ion (Li-ion) .....	22
II.4.1. Historique .....	22
II.4.2. Technologie lithium-ion .....	23
II.4.5. Description tituants internes des batteries Li-ion .....	25
II.4.5.1. Electrode négative .....	25
II.4.5.2. Electrode positive .....	26
II.4.5.3.L'électrolyte .....	26
II .4.6.Mécanisme Chimique .....	27
II.1.7. Les grandeurs caractéristiques .....	28
II.4.7. Avantages et inconvénients .....	28
II.4.7.1 . Avantages .....	28
II.4.7.2. Inconvénients .....	28
➤ <b>CHAPITRE III : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES BATTRIES</b>	
III.1.Éléments de comparaison entre les différents types d'accumulateur .....	29
III.1.1.Densité d'énergie .....	29
III.1.2.Durée de vie .....	30
III.1.3.Rapidité de charge .....	31

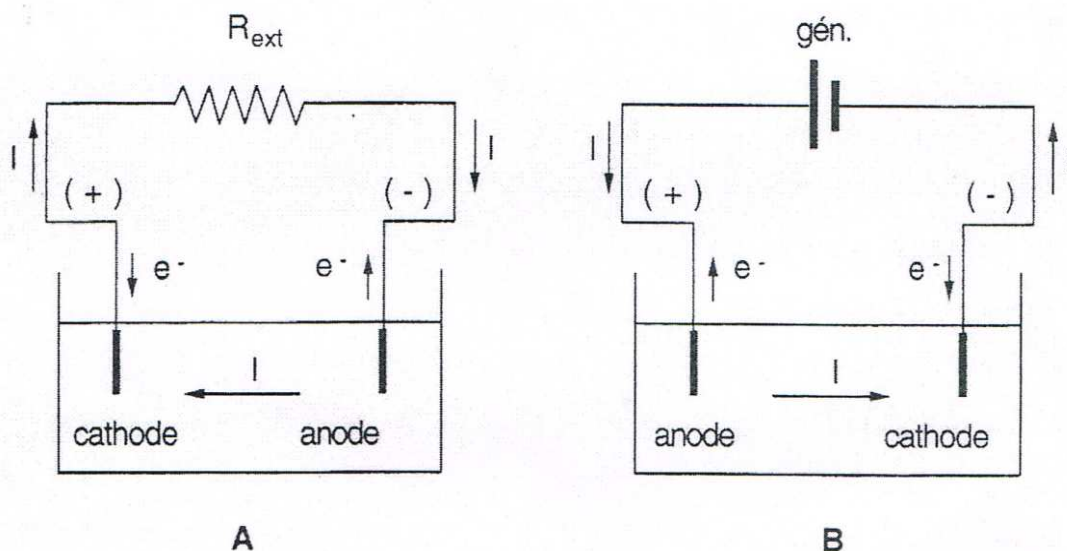
III.2. Etude comparative .....	32
III.2.1. Quantité d'énergie électrique par volume (wh/l ) .....	32
III.2.2. Quantité d'énergie électrique par masse (wh/kg ) .....	32
III.2.3. durée de vie .....	33
III.2.4. Temps de charge en heure .....	33
➤ CONCLUSION GENERALE .....	34
➤ Bibliographie .....	35

## CHAPITRE I

## Les accumulateurs électrochimiques

## I.1.Définition

Les accumulateurs sont des dispositifs électrochimiques composés de deux électrodes positive et négative, généralement solides et toujours de natures différentes et d'un électrolyte généralement liquide, qui peuvent fonctionner soit comme des générateurs, c'est-à-dire comme une pile, soit comme des récepteurs de courant électrique. Dans le premier fonctionnement il y a décharge, dans le second il y a charge et les deux fonctionnements sont parfaitement réversibles, le courant de charge ramenant le générateur à son état de début de décharge. L'opération peut se produire un grand nombre de fois. Le courant de charge est inverse au courant de décharge. Le Principe de fonctionnement est schématisé sur la figure 1.



**Figure 1** : principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique

**A:en décharge      B:en charge**

## I.2.composants d'un accumulateur électrochimique

Les accumulateurs permettent de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome. Dans une cellule élémentaire constituée de deux électrodes immergées dans un électrolyte, l'énergie chimique générée par les réactions électrochimique est restituée sous forme d'énergie électrique. L'accumulateur est un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le mot batterie est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires rechargeables.

- Les électrodes : on utilise communément les termes pôles positif ou pôle (+) pour la cathode et pôle négatif ou pôle(-) pour l'anode.

- Les cathodes : ce sont des matières actives qui se transforment électro chimiquement en libérant de l'énergie électrique, par exemple  $\text{PbO}_2$  se réduit en  $\text{PbSO}_4$  ou  $\text{MnO}_2$  en  $\text{MnOOH}$ .
- Les anodes : elles peuvent être utilisées sous forme métallique tels que le zinc, le cadmium, le lithium, carbone lithium ou hydrure métallique.

- L'électrolyte : C'est un conducteur ionique pur.les plus utilisés dans le domaine des accumulateurs électrochimique sont des solutions salines acide ou basique dans un solvant liquide, des solutions d'un sel dans solvant polymère, des céramiques (conducteurs anioniques ou cationiques), des gels ou des sels fondus.

## 1.3. Caractéristiques des accumulateurs électrochimiques

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par quatre grandeurs :

-Capacité exprimée en (Ah/kg)

- **La capacité** : Pour déterminer la capacité théorique de l'accumulateur, il faut au préalable connaître celles des électrodes.

### 1.3.1.Capacité théorique de l'électrode

La capacité théorique ( $C_{\text{théo}}$ ) délivrée par une électrode est définie par la relation :

$$C_{\text{théo}} = X \cdot nF = \int i \cdot dt \text{ (coulombs)}$$

Où x est le nombre de mole de matière active et n le nombre d'électron échangé théoriquement par mole de matière active et F le faraday égal à 96500 C ou 26,8 Ah.

**Exemple de calcul de capacité théorique d'une électrode**

Pour une électrode de MnO<sub>2</sub>. On écrit la réaction de réduction du bioxyde.



Une mole de bioxyde c'est-à-dire (55 + 32) = 87 g nécessite 1 Faraday = 96500 coulombs ou bien 26,8 Ah pour se réduire alors la capacité est de 26,8/87 = 0,308Ah/g ou bien 308Ah/kg. On écrit **C<sub>MnO2</sub> = 308Ah/kg**. Connaissant la masse volumique du bioxyde ρ = 5 g/cm<sup>3</sup>, on peut calculer la capacité volumique qui égal à 26,8/17,4 = 1,54 Ah/cm<sup>3</sup>.

On peut ainsi, connaissant le nombre d'électrons mis en jeu, calculer la capacité massique ou volumique de chaque électrode. Nous avons rassemblé dans le tableau 1 quelques valeurs pour les matériaux d'électrodes les plus utilisés.

**Tableau1** : capacité théorique de quelques matériaux d'électrodes

Matériau	masse molaire	valence	Masse volumique	Capacité	
	(g)			(g/cm <sup>3</sup> )	Ah/g
<b>Matériaux de cathode</b>					
PbO <sub>2</sub>	239	2	9.5	0.224	2.11
NiOOH	91.7	1	7.4	0.292	2.16
<b>Matériaux d'anode</b>					
Li	7	1	0.54	3.83	2.06
Pb	207	2	11.34	0.26	2.9
Cd	112.4	2	8.65	0.48	4.1

### 1.3.2. Capacité théorique de l'accumulateur

A partir des valeurs de capacités théoriques des électrodes, on évalue les capacités théoriques des accumulateurs. Elle sont déterminées à partir de la relation suivante:

$$1/C = (1/C_1 + 1/C_2) \quad \longrightarrow \quad C = (1/C_1 + 1/C_2)^{-1}$$

Où  $C_1$  et  $C_2$  sont respectivement les capacités de la cathode et de l'anode

#### Exemple de calcul de capacité théorique de l'accumulateur au plomb $PbO_2/Pb$

En appliquant la relation (1) avec  $C_1$  ( $PbO_2$ ) et  $C_2$  ( $Pb$ ) égale respectivement à 0.224 et 0.26Ah/g, on trouve une valeur de 1200Ah/kg. Les valeurs théoriques de quelques piles et accumulateurs sont rassemblés dans le tableau 2.

**Tableau 2 :** capacité théorique de quelque piles et batteries

Systèmes	Anode	cathode	Réaction globale	Capacité (Ah/kg)
<b>Piles</b>				
Pile Alcaline	$MnO_2$	Zn	$MnO_2 + 2MnO_2 + Zn \rightleftharpoons Mn_2O_3 + ZnO$	224
Li/ $MnO_2$	Li	$MnO_2$	$Li + MnO_2 \rightleftharpoons LiMnO_2$	286
<b>Batterie</b>				
Plomb acide	Pb	$PbO_2$	$Pb + PbO_2 + H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + H_2O$	120
Nickel-cadmium	Zn	AgO	$Zn + AgO + H_2O \rightleftharpoons Zn(OH)_2 + Ag$	283

En réalité, la capacité théorique est différente de la capacité réelle délivrée ou fournie par l'accumulateur. On utilise aussi pour l'accumulateur électrochimique le terme capacité

Nominale  $C_n$  qui représente l'énergie que peut délivrer la batterie à partir de son état de pleine charge et dans un environnement de référence pour terminer à la tension d'arrêt.

Cette mesure s'effectue lors d'une décharge à courant constant à  $I=C_n/n$  à la température nominale  $T_n$  pendant  $n$  heures. Les valeurs utilisées habituellement par les constructeurs sont  $n=20, 10,5$  ou  $3$  heures et  $1.75V$  ou  $1.8V$  pour la tension d'arrêt. Chaque constructeur utilise des conditions de tests différentes.

**Exemple :**  $C_5=20Ah$  signifie que la batterie est capable de fournir un courant de  $4 A$  pendant  $5h$  à la température ambiante nominale.

### 1.3.3. La densité d'énergie massique ou volumique

La densité massique, ou énergie spécifique, est une des caractéristiques importantes d'un accumulateur, elle correspond à la quantité d'énergie (Wh/kg) qu'il peut restituer par rapport à sa masse. La densité volumique est une autre caractéristique qui peut avoir son importance, elle correspond à la quantité d'énergie (Wh/cm<sup>3</sup>) qu'il peut restituer par rapport à son volume. On utilise plus couramment les unités Wh/dm<sup>3</sup> soit Wh/l. L'expression de l'énergie électrique est donnée par la relation :

$$dw = E \cdot I \cdot dt$$

La valeur de la densité d'énergie massique théorique est le produit de la capacité théorique massique par la tension théorique de l'accumulateur :

$$W \text{ (wattheures /g)} = E \text{ (volts)} \times C \text{ théorique (Ah /g)}$$

Dans le cas de l'accumulateur au plomb par exemple, elle est de :

$$2,1 \times 120 = 252 \text{ Wh/kg}$$

Dans la pratique, On utilise deux modes de décharge, le mode galvanostatique ou le mode potentiostatique:

En mode galvanostatique, l'équation est :

$$W = I \int E dt / M$$

Avec:

I la valeur du courant imposé,  $\langle E \rangle$  la tension moyenne sous courant nul, t le temps au bout duquel est atteinte la tension de coupure et M la masse des réactifs.

En mode potentiostatique, l'équation devient :

$$W = E \int I dt / M = E.C/M.$$

Il est important de noter que pour avoir des valeurs d'énergie élevées, il faut que la valeur de E soit élevée c'est –à-dire que le potentiel de fonctionnement soit le plus haut possible. Pour augmenter ce facteur, il faut travailler avec des couples électrochimiques dont la différence de potentiel est la plus élevée possible et ayant une faible masse molaire. A cel s'ajoute le minimum de baisse de tension en décharge

Dans la pratique, On utilise deux modes de décharge, le mode galvanostatique ou le mode potentiostatique:

En mode gavanostatique, l'équation est :  $W = I \int \langle E \rangle dt / M$

Avec :

I la valeur du courant imposé, Courant nul, t le temps au bout duquel est atteinte la tension de coupure et M la masse des réactifs.

En mode potentiostatique, l'équation devient :

$$W = E \int I dt / M = E.C/M.$$

Il est important de noter que pour avoir des valeurs d'énergie élevées, il faut que la valeur de E soit élevée c'est –à-dire que le potentiel de fonctionnement soit le plus haut possible. Pour augmenter ce facteur, il faut travailler avec des couples électrochimiques dont la différence de potentiel est la plus élevée possible et ayant une faible masse molaire. Acel s'ajoute le minimum de baisse de tension en décharge et le minimum de hausse en charge autrement dit il faut que les sur tension soient faible ou minimum.

Le tableau 3 rassemble quelques valeurs théoriques et pratiques de densités d'énergie moyennes de différents accumulateurs.

Tableau3 : Valeurs théoriques et pratiques densités d'énergie de quelque piles et batteries

Systèmes Wh/Kg	Anode Wh/Kg	cathode Wh/l	Réaction globale	Tension(V)	Densité d'énergie (Wh/Kg)		
					Théorique	pratique	
<b>Piles</b>							
Alcaline MnO <sub>2</sub>	Zn	MnO <sub>2</sub>	$2\text{MnO}_2 + \text{Zn} \longrightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{ZnO}$	1.5	244	125	330
Li/MnO <sub>2</sub>	Li	MnO <sub>2</sub>	$\text{Li} + \text{MnO}_2 \longrightarrow \text{Li MnO}_2$	3	286	230	550
<b>Batterie</b>							
Plomb acide Pb	PbO <sub>2</sub>	Pb + PbO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$\longrightarrow 2\text{PbSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	2	170	35	70
Nickel-Cadmium	Cd	NiOOH	$\text{Cd} + \text{NiOOH} + 2\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{Ni(OH)}_2 + \text{Cd(OH)}_2$	1.2	211	35	80

### 1.3.4. La densité de puissance massique

La puissance de l'accumulateur est déterminée par relation :

$$P \text{ (W/kg)} = W \text{ (Wh)} / t \text{ (h)} = \langle E \rangle \cdot I$$

Ou W représente l'énergie (Wh /kg)

t: le temps de passage du courant (s)

$\langle E \rangle$  : la tension moyenne (en V)

I= la valeur du courant (A)

Certaines applications nécessitent des fortes puissances. Dans ce cas il faut que les termes tension et courant soient tout deux élevés. Pour cela, il faut choisir des couples électrochimiques constituant les électrodes qui possèdent un potentiel en circuit ouvert le plus élevé possible et qui présentent des cinétiques rapides avec des faibles surtensions.

## **CHAPITRE II**

### **LES DIFFERENTS TYPES DE BATTERIE**

Pour les éléments rechargeables on utilise les termes de batteries ou d'accumulateurs, à la différence d'une pile qui n'est pas rechargeable. La batterie désignera un groupe d'accumulateurs assemblés ou une batterie d'accumulateurs.

#### **II.1.Généralités sur l'accumulateur au plomb**

C'est le type d'accumulateur le plus largement répandu sur le marché et c'est aussi la plus ancienne technologie de stockage d'énergie. Ils sont sur tout utilisés dans nos voitures pour alimenter le démarreur. Il est à remarquer que plus du tiers de la production mondiale de plomb est destinée à la fabrication de batteries au plomb.

##### **II.1.1.Historique**

C'est en 1859 que Gaston Planté réalisa l'accumulateur au plomb par formation de feuilles de plomb pur, dans de l'acide sulfurique et sous l'influence d'un courant électrique. Il fallut cependant attendre l'apparition en 1880 de la dynamo Gramme et la réalisation de l'accumulateur Faure à grilles et à oxyde rapporté pour que l'industrie de l'accumulateur commence à se développer.

##### **II.1.2.Place de l'accumulateur au plomb aujourd'hui**

Bientôt 150 ans d'études sur l'accumulateur au plomb, 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 le faible coût et la maturité de cette technologie et aussi son aptitude à être recyclée à plus de 97% . Aujourd'hui il existe non pas un type de batterie d'accumulateurs au plomb, mais différentes technologies pour mieux répondre aux spécificités des applications qui l'emploient: la batterie au plomb s'est améliorée et spécialisée au fil des ans, et continuera de l'être. La batterie d'accumulateurs au plomb est notamment utilisée pour le démarrage des véhicules (secteur le plus porteur actuellement), la traction (chariots de manutention), les alimentations de secours, le photovoltaïque...

À ces domaines sont adaptées des technologies d'accumulateurs au plomb, qui se caractérisent notamment par l'épaisseur et les alliages des grilles, un électrolyte liquide ou immobilisé, une concentration d'électrolyte, des plaques planes ou tubulaires...

Le marché mondial des batteries (toutes technologies confondues) regroupe 3 catégories : les batteries portables, de démarrage et industrielles (de traction et stationnaire). La croissance du marché mondial des batteries au plomb amène le chiffre d'affaires à 12 milliards d'euros en 2002 (Figure 2) ce qui représente 65% de la production totale. La représentation du marché mondial est représenté sur la figure 2.

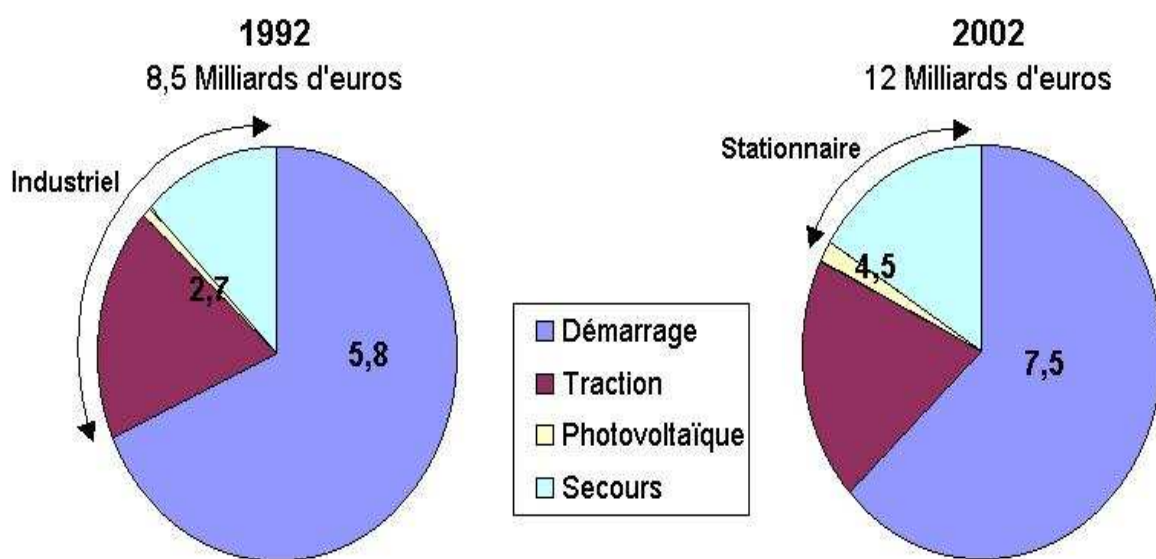
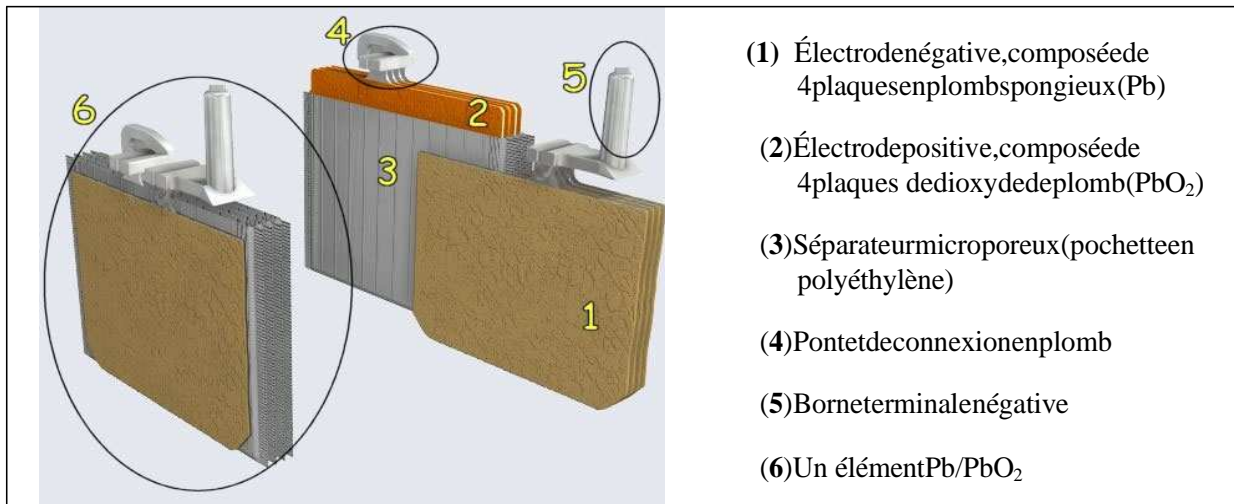


Figure2:Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb. [2]

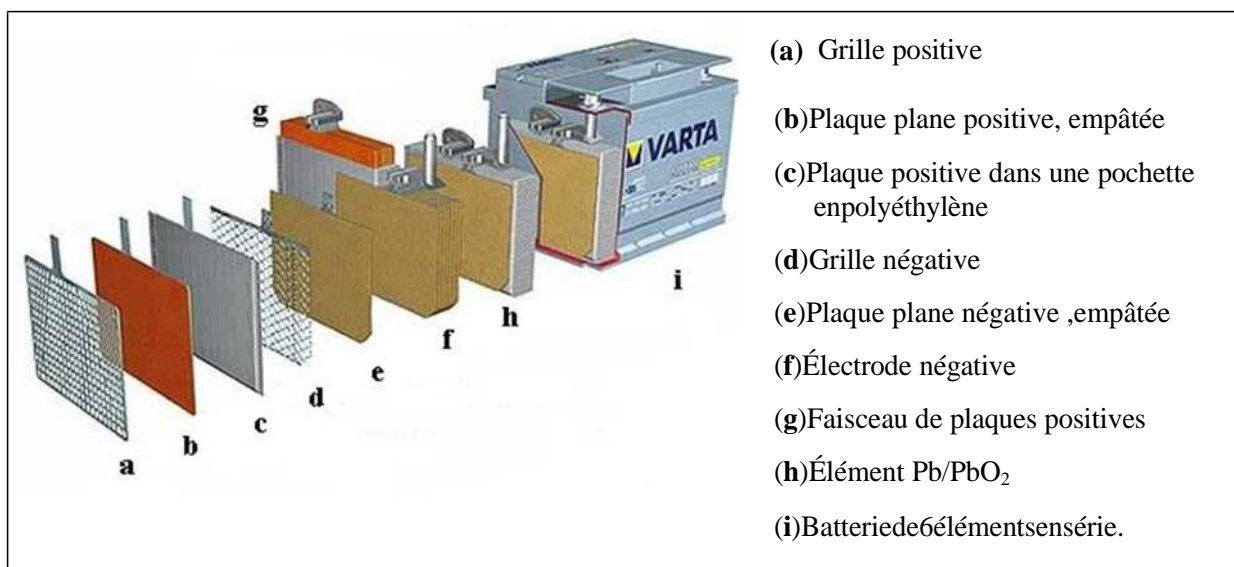
### II.1.3. Constitution de la batterie au plomb

Un accumulateur de 2V est l'unité de base d'une batterie au plomb. Il se compose Notamment d'électrodes positives et négatives, d'un séparateur micro poreux et d'un électrolyte. Un élément de batterie de démarrage (technologie "plomb ouvert") comprend des plaques Planes positives (2) et négatives (1) assemblées en alternance (Figure 3). Le nombre de plaques Pourchaque polarité et leur surface sont des paramètres qui définissent la **capacité** de l'élément. Par exemple, l'électrode positive comporte ici 4 plaques en parallèle, reliées par un connecteur(4). Pour éviter les courts-circuits entre les plaques de polarité différente, un séparateurmicro poreux isolant est placé entre ces plaques lors du montage (3). Les plaques positives et négatives sont assemblées en faisceaux (6) et plongées dans une solution d'acide sulfurique et d'eau distillée. Chaque faisceau constitue ainsi un élément.



**Figure 3:** Vue en coupe d'un élément au plomb ouvert (batterie de démarrage)

L'ensemble est contenu dans un bac (en polypropylène, PVC ou ABS) muni d'orifices en partie supérieure pour permettre le remplissage des éléments et les compléments en eau si nécessaire ainsi que pour l'évacuation des gaz produits (Figure 4). Les deux bornes en plomb raccordées aux faisceaux de plaques de chaque polarité, permettent le raccordement de la batterie au circuit extérieur.



**Figure 4 :** Vue éclatée d'une batterie de démarrage. [3]

**II.1.4. Différents types d'accumulateurs au plomb**

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

**II.1.4.1. La batterie au plomb ouverte**

Dans le tableau 4 la comparaison entre les Lors du fonctionnement de la batterie au plomb dite ouverte, les productions de gaz suite aux réactions secondaires de décomposition de l'eau s'échappent naturellement par les orifices prévus au niveau des bouchons. Le dégagement de dihydrogène dans le lieu de stockage des batteries est source de danger, car son mélange avec l'air ambiant est potentiellement explosif à partir de 4% en volume .Nous avons représenté deux types de batterie.

**Tableau 4 :** Principales comparaisons des deux types de batterie au plomb

TYPE DE BATTERIE AU PLOMB	OUVERTE (I.1.5)	À RECOMBINAISON DE GAZ (I.1.5.2)	
		Gélifié	Absorbé (parle séparateur)
ÉLECTROLYTE	Liquide	Gélifié	Absorbé (parle séparateur)
APPELLATION ANGLO-SAXONNE	Flooded (ou vented) battery	Gel VRLA (ou sealed) Batterie	VRLA (ou sealed) AGM separator battery
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durée de vie pouvant être importante (5 à 15 ans)</li> <li>• technologie la moins chère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• recombinaison =&gt; pas de perte en eau (pas d'entretien)</li> <li>• très faible taux de dégagement de gaz (sécurité)</li> </ul>	
INCONVÉNIENTS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation d'eau (maintenance)</li> <li>• installation en locaux spécifiques (dégagements gazeux)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plus faible durée de vie (modes de défaillance spécifiques)</li> <li>• plus sensible à la température</li> </ul>	

Dans le cadre du stationnaire de secours, une installation en locaux spécifiques ventilés est obligatoire. Les batteries ouvertes produites aujourd'hui (à base de grilles à fortes sur tensions d'oxygène et d'hydrogène, sont souvent qualifiées de batteries "sans maintenance" ou "sans entretien". Ces appellations ont été choisies car la consommation d'électrolyte est si faible que la réserve d'électrolyte d'origine est suffisante pour assurer le bon fonctionnement de la batterie pendant toute sa durée de vie.

### II.1.4.2. La batterie à recombinaison de gaz

Les premières batteries à recombinaison de gaz sont apparues fin des années 1950, grâce à la fabrication d'un électrolyte gélifié. Ce type d'électrolyte permet la formation de chemins gazeux facilitant le transfert rapide du dioxygène, qui suit alors un cycle interne : produit à l'électrode positive, sa diffusion vers l'électrode négative est optimisée et il atteint l'électrode négative où il y est réduit (formation de molécules d'eau. Les batteries à recombinaison de gaz sont appelées aussi batteries VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) ou batteries étanches.

### II.1.5.Principe de fonctionnement de l'accumulateur au plomb ouvert

Considérons un élément de technologie "plomb ouvert". À ses bornes, apparaît une **f.e.m.** d'environ 2,1 V l'électrode en dioxyde de plomb ( $PbO_2$ ) correspond au pôle positif et celle en plomb (Pb) au pôle négatif. Le fonctionnement en décharge du générateur électrochimique  $PbO_2/H_2SO_4/Pb$  peut être schématisé sur la figure 5.

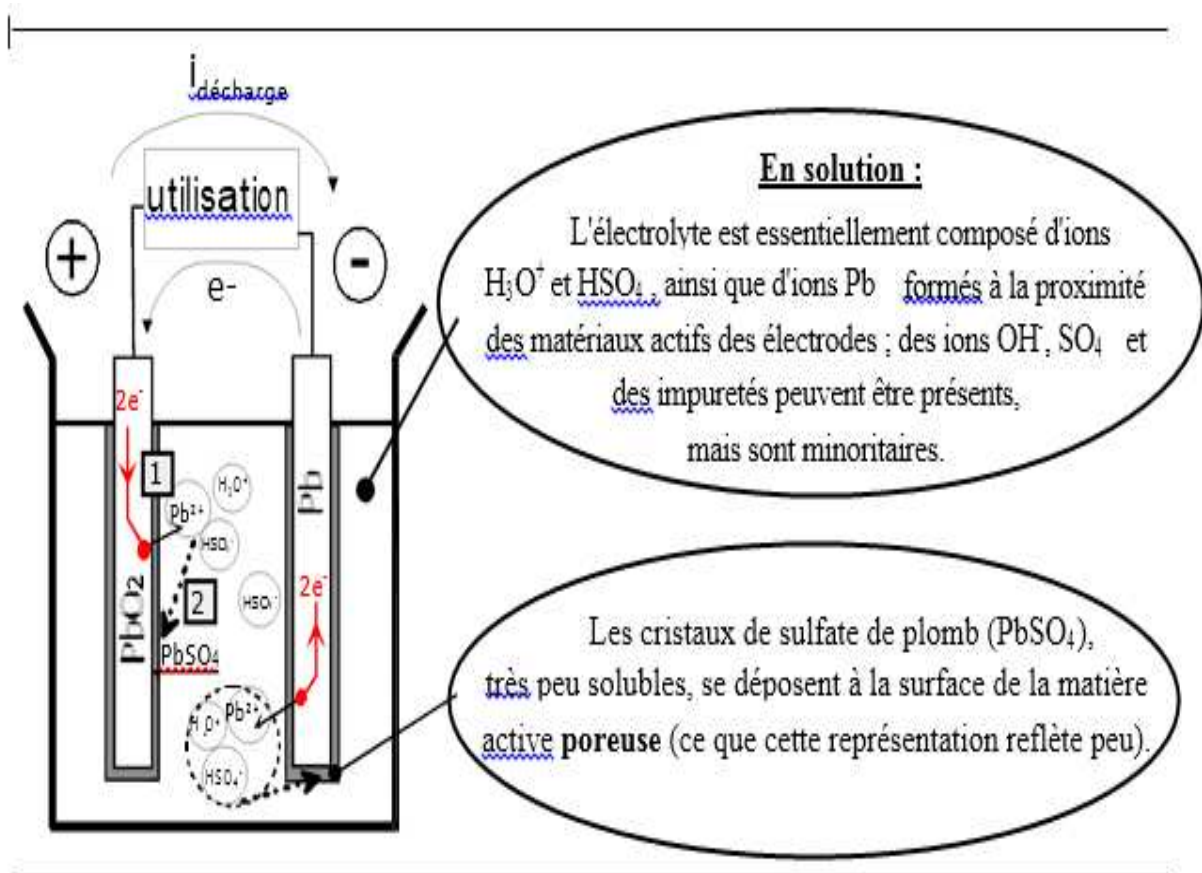
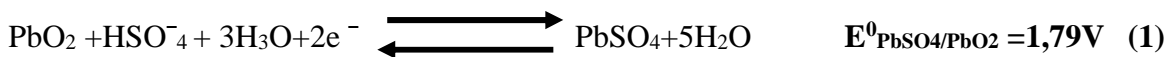


Figure 5: Produits et réactifs d'un élément au plomb-acide, se formant en décharge

En décharge, les matériaux actifs positif et négatif produisent, respectivement par réduction et par oxydation, des ions  $Pb^{2+}$  qui, en se combinant avec des ions sulfate contenus dans l'électrolyte, se fixent en cristaux sulfate de plomb. Cette transformation du dioxyde de plomb et du plomb spongieux porte le nom de "double sulfatation". L'électrode où a lieu l'oxydation est appelée **anode** et celle où a lieu la réduction, la **cathode**.

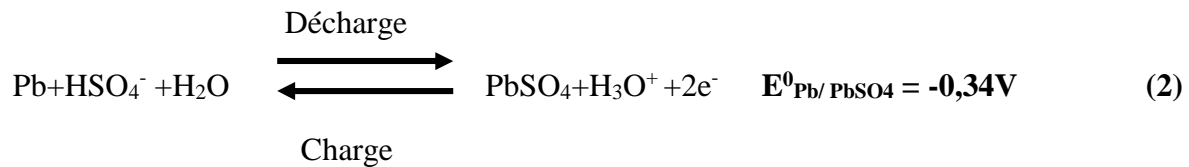
- L'électrode positive a un comportement de **cathode en décharge** car le  $PbO_2$  est **réduit** en  $PbSO_4$ , et devient **anode en charge** puisque le  $PbSO_4$  s'oxyde en  $PbO_2$  selon la réaction :

Décharge

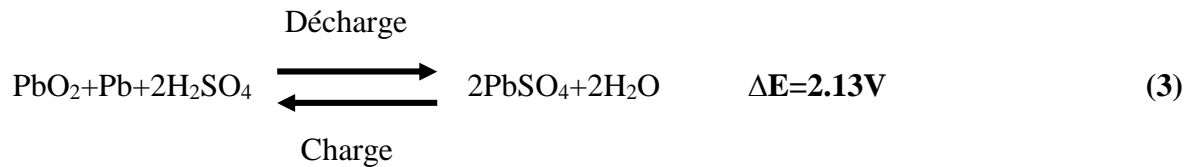


Charge

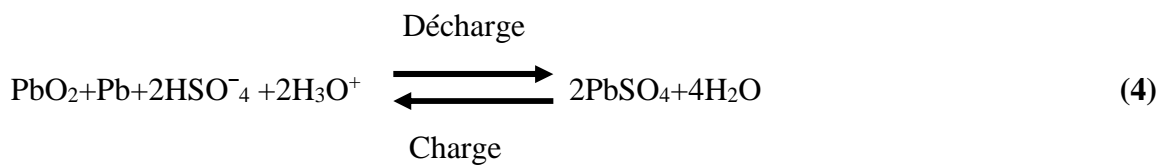
- L'électrode négative est anode en décharge (oxydation du  $Pb$  en  $PbSO_4$ ) et cathode en Charge selon la réaction :



Ces 2 réactions de charge et décharge peuvent se résumer en une seule réaction :



Double sulfatation qui s'écrit aussi, de façon plus rigoureuse :



L'équation bilan (4) de l'élément traduit une consommation d'acide sulfurique et une production d'eau lors de la décharge d'un élément.[2]

### II.1.6. Les grandeurs caractéristiques

Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au plomb sont résumés dans le tableau **Tableau 5** : caractéristiques d'un accumulateur au plomb. [5]

Caractéristiques de l'accumulateur Plomb-acide (Pb)	
Electrode positive	PbO <sub>2</sub>
Electrode négative	Pb
Tension (V)	2
Densité d'énergie massique (Wh/kg)	30-50
Densité d'énergie volumique (Wh/L)	75-120
Nombre de cycles	400-1200
Température de fonctionnement	-20 à 60°c
Coûts (€.KWh)	200-250
Autodécharge (%)	5

## II.2.Généralités sur l'accumulateur au Nickel cadmium

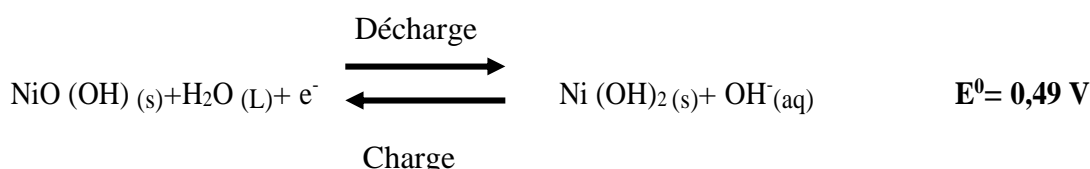
### II.2.1.Historique

Il est mis au point en 1899 par Waldemar Jungner en Suède. C'est un système secondaire (accumulateur) basé sur la réaction entre l'oxyhydroxyde de nickel NiO(OH) et le cadmium. La production industrielle d'accumulateurs nickel-cadmium à électrodes positives planes a débute en 1909. La durée de vie est comparable à celle des accumulateurs au plomb (au moins 1 000 cycles) . En 1928, Schlecht et Ackermann réalisent des plaques frittées des deux polarités .La mise en œuvre vers 1950 a conduit à réaliser des accumulateurs étanches.

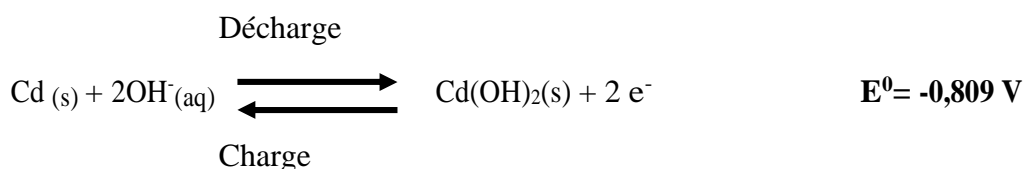
### II.2.2. Constitution d'une batterie

C'est un système secondaire (accumulateur) basé sur la réaction entre l'oxyhydroxyde de Nickel NiO(OH) et le cadmium. Les réactions électrochimiques ayant lieu aux électrodes sont

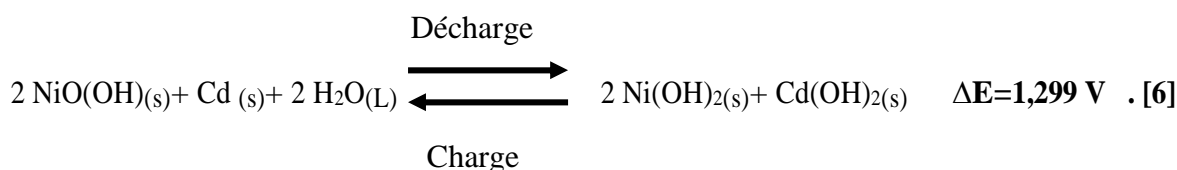
- **Electrode positive(+)**



- **Electrode négative(-)**



- **Réaction globale**



### II.2.3.Conditions d'utilisation

Une batterie Ni-Cd doit permettre au moins 500 cycles de charge/décharge , pour cela, il faut prendre des précautions d'utilisation :

- éviter les surcharges
- proscrire les décharges profondes (<1V par élément)
- ne jamais les court-circuiter

- attendre 1 heure avant d'utiliser une batterie qui vient d'être chargée
- attendre 15 minutes avant de recharger une batterie qui vient d'être déchargée
- une batterie Ni-Cd doit être stockée déchargée, une batterie Ni-MH doit être stockée chargée . [7]

### II.2.4. Propriétés et applications des batteries Ni-Cd

#### II.2.4.1. Fonctionnement

- Supportent des conditions d'exploitation difficiles
  - Surcharges fréquente
  - Régime de décharge élevé
  - Basses températures
- les performances techniques de l'accumulateur nickel cadmium sont comparables à celles des accumulateurs au plomb.

#### II.2.4.2. Format

Un large éventail de produits existe, depuis les batteries spiralées, de capacité comprise entre 10 mAh et 15 Ah, jusqu'aux batteries stationnaires ouvertes de 1 000 Ah et au-delà. Toutes ces batteries présentent des durées de vie de l'ordre de 1000 cycles charge-décharge pour les batteries industrielles et 500 cycles pour les éléments spiralés.

#### II.2.4.3. Problématiques

- Les prix du nickel et du cadmium, ainsi que ceux des procédés de fabrication, conduisent à un coût de l'énergie stockée largement supérieur à celui associé aux accumulateurs au plomb
- La manipulation du cadmium n'est pas sans danger pour la santé
- La mise au rebut des batteries usagées présente un risque pour l'environnement

#### II.2.4.4. Marché

- Pour l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord, le marché des accumulateurs nickel-cadmium représente aujourd'hui environ 10 % de celui des accumulateurs au plomb
- Aujourd'hui largement concurrencé par Ni-MH et Li ion . [6]

### II.2.5. Les grandeurs caractéristiques

Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au Ni-cd sont résumés dans le tableau

**Tableau 6** : caractéristiques d'un accumulateur au Ni-cd. [5]

Caractéristiques de l'accumulateur Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	
Electrode positive	NiOOH
Electrode négative	Cd
Tension (V)	1.2
Densité d'énergie massique (Wh/kg)	45-80
Densité d'énergie volumique (Wh/L)	80-150
Nombre de cycles	2000
Température de fonctionnement	-40à 60°C
Coûts €/KWh	600
Autodécharge / %	20

## II.3. GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR AU NI-MH

### II.3.1. Historique

L'accumulateur étanche nickel-hydrure métallique (désigné par le symbole Ni-MH) est apparu dans les années 1980. Il est l'aboutissement des recherches menées depuis 1970 sur des alliages susceptibles de stocker de l'hydrogène (hydrures métalliques). L'accumulateur Ni-MH diffère de l'accumulateur Ni-Cd au niveau de l'électrode négative dont le matériau actif est de l'hydrogène, stocké sous la forme d'un alliage métallique.

### II.3.2. Réalisation des accumulateurs étanches Ni-MH

Les accumulateurs étanches Ni-MH sont fabriqués industriellement sous forme cylindrique, prismatique ou de « pile bouton ». Les électrodes positives comportent une mousse de nickel imprégnée de composés de nickel qui sont transformés en matériau actif par électrodéposition ou précipitation par voie chimique. Les électrodes négatives sont constituées d'une grille ou d'une feuille perforée de nickel recouverte par l'alliage métallique destiné à stocker l'hydrogène. Dans les deux cas, la porosité est élevée afin de favoriser les régimes rapides. Les séparateurs, réalisés à partir de polypropylène, sont des structures fibreuses non tissées planes afin de réduire l'espace inter-électrodes et la résistance interne. Le conteneur constitue le pôle négatif de l'accumulateur. Le couvercle, qui comporte une soupape de sécurité, en est le pôle positif.

### II.3.3. Electrode à hydrogène

La perspective de stocker de l'hydrogène au sein d'un alliage métallique est apparue dans les années 1960. Les alliages, usuellement du type binaire  $AxB_v$ , se répartissent en deux classes AB2 et AB5 :

- La classe AB2 fait essentiellement intervenir le zirconium et le nickel ( $ZrNi_2$ )
- La classe AB5 fait intervenir le lanthane et le nickel ( $LaNi_5$ ).

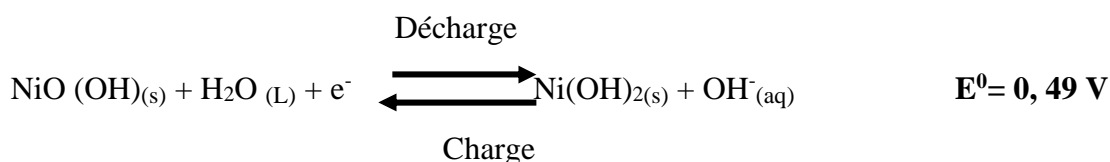
A et B peuvent être partiellement substitués. On améliore les propriétés inter faciales à partir de traces d'aluminium ou de silicium. On réduit l'expansion en volume en substituant partiellement du cobalt au nickel.

On élabore ainsi des alliages comptant jusqu'à huit composants.

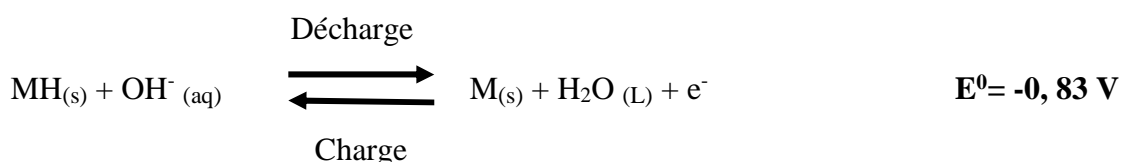
### II.3.4. Réaction principales

- **Electrode positive(+)**

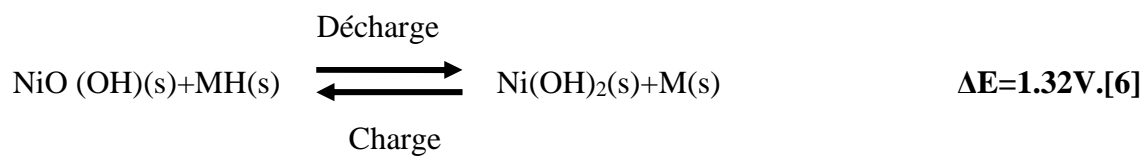
les réactions sont identiques à celles observées du système Ni-Cd :



- **Electrode negative (-)**



- Réaction globale :



### II.3.5. Les grandeurs caractéristiques

Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au Ni- MH sont résumés dans le tableau.

**Tableau 7** : caractéristiques d'un accumulateur au Ni- MH.[5]

Caractéristiques de l'accumulateur Nickel- Hydrure métallique (Ni-MH)	
Electrode positive	NiOOH
Electrode négative	MH
Tension / V	1.2
Densité d'énergie massique / Wh/kg	60-110
Densité d'énergie volumique / Wh/L	220-330
Nombre de cycles	1500
Température de fonctionnement	-20à 60°C
Coûts / €.KWh	1500-2000
Autodécharge / %	30

## II.4. GÉNÉRALITÉS SUR L'ACCUMULATEUR au Lithium ion (Li-ion)

### II.4.1. Historique

C'est la dernière génération d'accumulateurs. Le principe est connu depuis la fin des années 70 mais le lithium étant instable à la charge, la commercialisation n'a été possible qu'en 1991. Les accumulateurs Li-ion sont très utilisés car :

- ils offrent une densité d'énergie très supérieure aux autres technologies pour un poids inférieur (80 à 160 Wh/kg) .La durée de vie est de 2 à 3 ans après leur fabrication , il y a risque d'explosion si elles ne sont pas chargées correctement (les constructeurs intègrent dans les batteries des circuits qui coupent la charge si les caractéristiques de la batterie sont anormales)

La capacité varie de 150 à 4500mAh. Depuis 1999 est apparue une nouvelle génération d'accus Li-ion : le Lithium ion Polymère (Lipo). L'électrolyte est un polymère gélifié qui permet d'obtenir des éléments très fins, souples et se présentant sous la forme de "paquets". Encore chère aujourd'hui, cette nouvelle technologie est promise à beaucoup d'avenir. Elle doit, à terme, revenir moins cher à la réalisation que le Li-ion classique.

La figure 6 représente le schéma de la structure d'un l'accumulateur .[7]

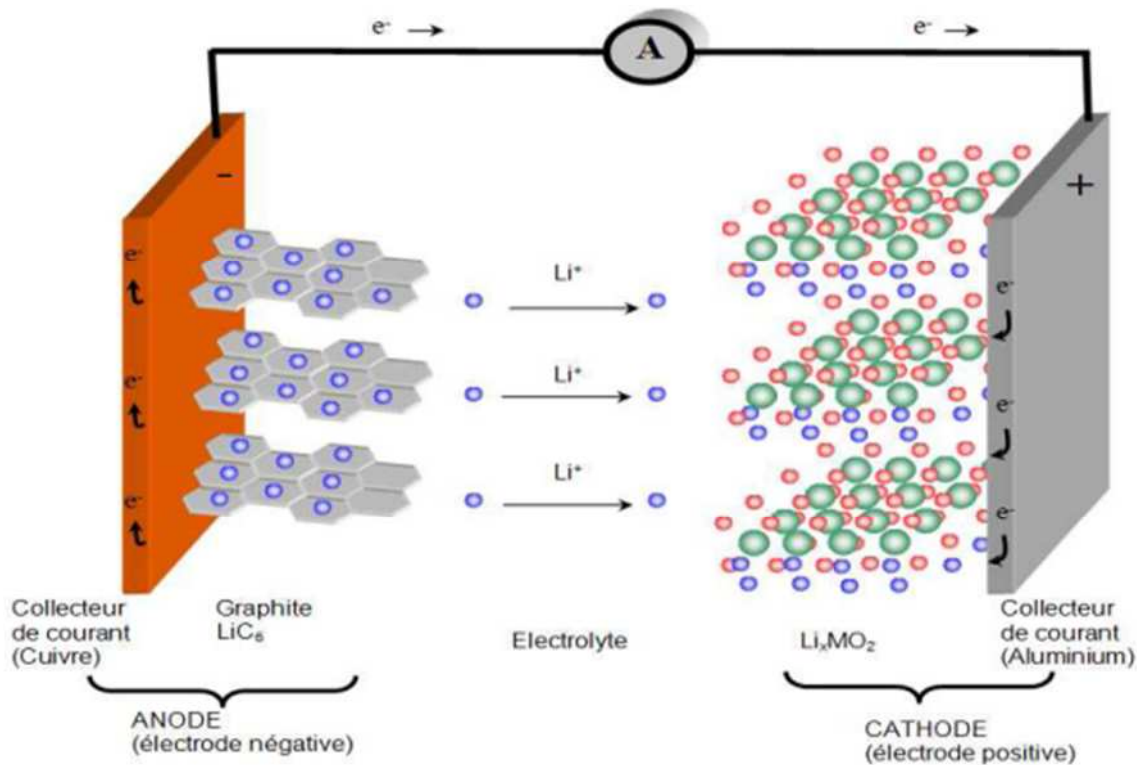
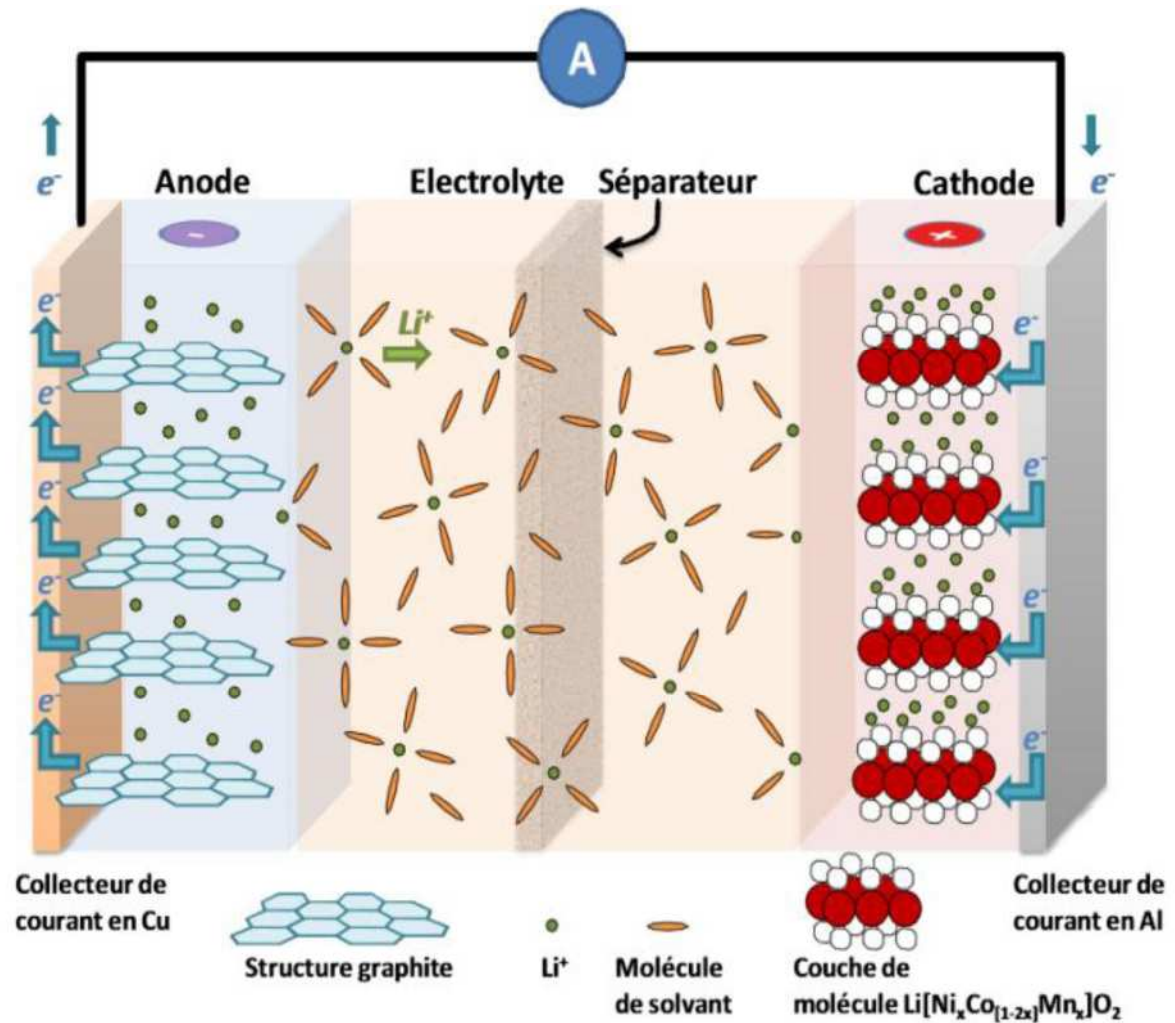


Figure 6:Structure d'accumulateur lithium ion. [8]

**II.4.2. Technologie lithium-ion**

Les batteries lithium-ion actuelles sont constituées d'une électrode négative au carbone (graphite), d'un électrolyte à solvant organique (généralement des carbonates d'alkyles) dans lequel on dissout des sels de lithium et d'une électrode positive à base d'oxyde de métal constituée de composés d'insertion. On distingue les batteries lithium-ion et les batteries lithium-ion polymère. Les batteries lithium-ion polymère ont la particularité d'être composées d'un électrolyte en gel de polymère (oxyde de polyéthylène ou poly-acrylonitrile) contenant des sels de lithium ce qui limite les fuites d'électrolyte. Elles sont plus résistantes à la surcharge et ont un plus long cycle de vie. Néanmoins, pour une température équivalente, leur conductivité ionique est inférieure à celle d'un électrolyte liquide. Dans le cas des batteries lithium-ion, l'électrolyte le plus largement utilisé est constitué de sel  $\text{LiPF}_6$  dissout dans un solvant, généralement issu d'un mélange de carbonate d'éthylène (EC), de carbonate de propylène (PC) et de carbonate d'éthyle méthyle (EMC). L'appellation lithium-ion ou Li-ion provient du fait que la technologie est basée sur l'insertion et la désinsertion des ions lithium des deux électrodes dans les deux sens selon l'état de charge ou de décharge. Pendant la décharge, un électron est libéré à l'électrode négative (anode) et est acheminé par l'intermédiaire du circuit externe vers l'électrode positive (cathode). Simultanément, un ion  $\text{Li}^+$  est intercalé dans le matériau de la cathode et un ion lithium est libéré de l'anode pour préserver l'électro-neutralité de l'électrolyte. Ce principe de fonctionnement est illustré par la figure 7. dans le cas d'une cathode lamellaire type NMC.



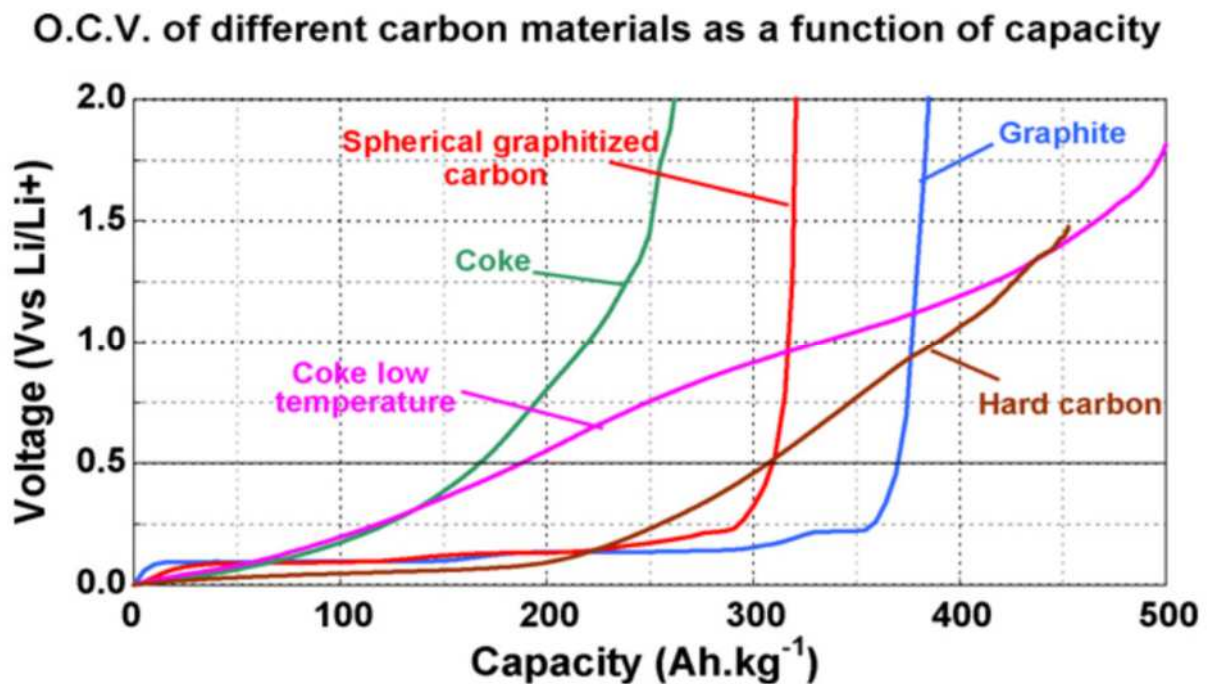
**Figure 7:** Structure et principe de fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion

Le coût élevé dû à la matière première et à la fabrication, reste un des principaux inconvénients de la technologie lithium, même si une production à grande échelle pourrait permettre d'abaisser sensiblement le prix. Compte tenu de l'augmentation des besoins en stockage d'énergie dans un grand nombre d'applications, le marché actuel présente différentes technologies de batteries lithium-ion distinguées par leur taille, leur chimie (composition des anodes et cathodes) et leur forme. Le développement de matériaux et composants moins chers conduisant à des batteries plus performantes est donc essentiel.[9]

## II.4.5. Description tituants internes des batteries Li-ion

### II.4.5.1. Electrode négative

Les matériaux d'électrode négative des batteries lithium-ion fonctionnent à bas potentiel (proche de 0 V vs Li/Li+). Ce sont des composés d'insertion à base de carbone sous forme graphite ou dopés par de l'étain ou du silicium, ou à base d'oxydes de métaux. La figure 8. représente les tensions à vide des différents types de carbone utilisables pour l'électrode négative.



**Figure 8 :** Tension à vide des différentes électrodes négatives existantesxiv

Les électrodes les plus répandues sont les électrodes de carbone sous forme de graphite. Grâce à sa structure lamellaire, le graphite possède des propriétés de conductivité électronique intéressante notamment lorsque l'on dope celui-ci par des accepteurs d'électron. De plus, il se prête à l'insertion de différents atomes, ions et mêmes molécules. Dans le cas du lithium, au maximum un atome de lithium pour six atomes de carbone peut être intercalé à pression atmosphérique, ce qui donne la composition  $\text{Li}_x\text{C}_6$  avec  $x=1$ .

Lors de l'intercalation du lithium dans le graphite, un motif régulier de couches remplies et faiblement remplies de lithium est obtenu. Ce mode d'insertion est un processus thermodynamique qui consiste à remplir peu d'espaces interplans, mais de les remplir entièrement.

### II.4.5.2. Electrode positive

L'électrode positive des batteries au lithium est composée généralement d'un matériau d'insertion. Pour les générateurs lithium-ion utilisant un électrolyte liquide ou polymère, les oxydes de métaux de structure hexagonale  $\text{LiMO}_2$  avec M pouvant être du cobalt ou du nickel, ou de structure cubique (spinel) tel que  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , pour lesquels l'insertion et la désinsertion du lithium se produit autour de 4 V vs Li/Li+. Le cobalt tend à être remplacé partiellement ou complètement pour des raisons d'approvisionnement et de coût. En effet, la production annuelle de cobalt est de 60000 tonnes. Son prix élevé est expliqué pour des raisons géopolitiques. C'est un matériau historique utilisé notamment dans les applications portables .

et de coût. En effet, la production annuelle de cobalt est de 60000 tonnes. Son prix élevé est expliqué pour des raisons géopolitiques. C'est un matériau historique utilisé notamment dans les applications portables .

### II.4.5.3.L'électrolyte

L'électrolyte est composé d'un solvant dans lequel on ajoute un sel (milieu ionisé). Plusieurs combinaisons sel-solvant sont possibles et des maxima de conductivités ont été observés pour des solutions de sels de lithium (le plus souvent fluoré) dans l'acetonitrile (AN), la butyrolactone ( $\gamma$ BL), le carbonate de diméthyle (DMC), le carbonate d'éthylène (EC), le carbonate de propylène(PC). Souvent ces solvants sont utilisés en combinaison, car un seul solvant présente rarement toutes les propriétés requises. Les sels les plus utilisés dans les électrolytes pour les batteries au lithium sont le lithium hexafluorophosphate ( $\text{LiPF}_6$ ) et le lithium tétrafluoroborate ( $\text{LiPF}_4$ ). Il existe d'autres sels tels que le perchlorate de lithium ( $\text{LiClO}_4$ ), ( $\text{LiAsF}_6$ ), le tétrafluoroborate de lithium ( $\text{LiBF}_4$ ) ou encore ( $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ ), mais ces sels présentent des inconvénients de stabilité ainsi que des risques d'explosivité et de conductivité. La présence de fluor (ou de chlore) induit la nécessité d'envisager un risque d'émission d'halogénure d'hydrogène (HF principalement) en cas de décomposition thermique.

Il est important de comprendre que la batterie de puissance pour l'application automobile est en cours d'industrialisation et est une stratégie scientifique récente. Cependant, le saut technologique pour la commercialisation est actuellement en cours. Les avancées dans le domaine des batteries à base de lithium ont été nombreuses dans les vingt dernières années. L'intérêt majeur de cette technologie est de proposer des densités d'énergie plus élevées que les autres technologies. Cette grande densité énergétique vient du fait que le potentiel de l'électrode positive est de l'ordre de 2 à 5 V vs Li/Li+. Les batteries au lithium peuvent être composées d'une large gamme de matériaux ; la figure 9.regroupe les potentiels électriques des différentes électrodes susceptibles d'être utilisées dans ces batteries : de nombreuses

configurations sont possibles. Cependant, la différence de potentiel entre les deux électrodes ne doit pas être trop élevée pour que l'électrolyte soit suffisamment stable.

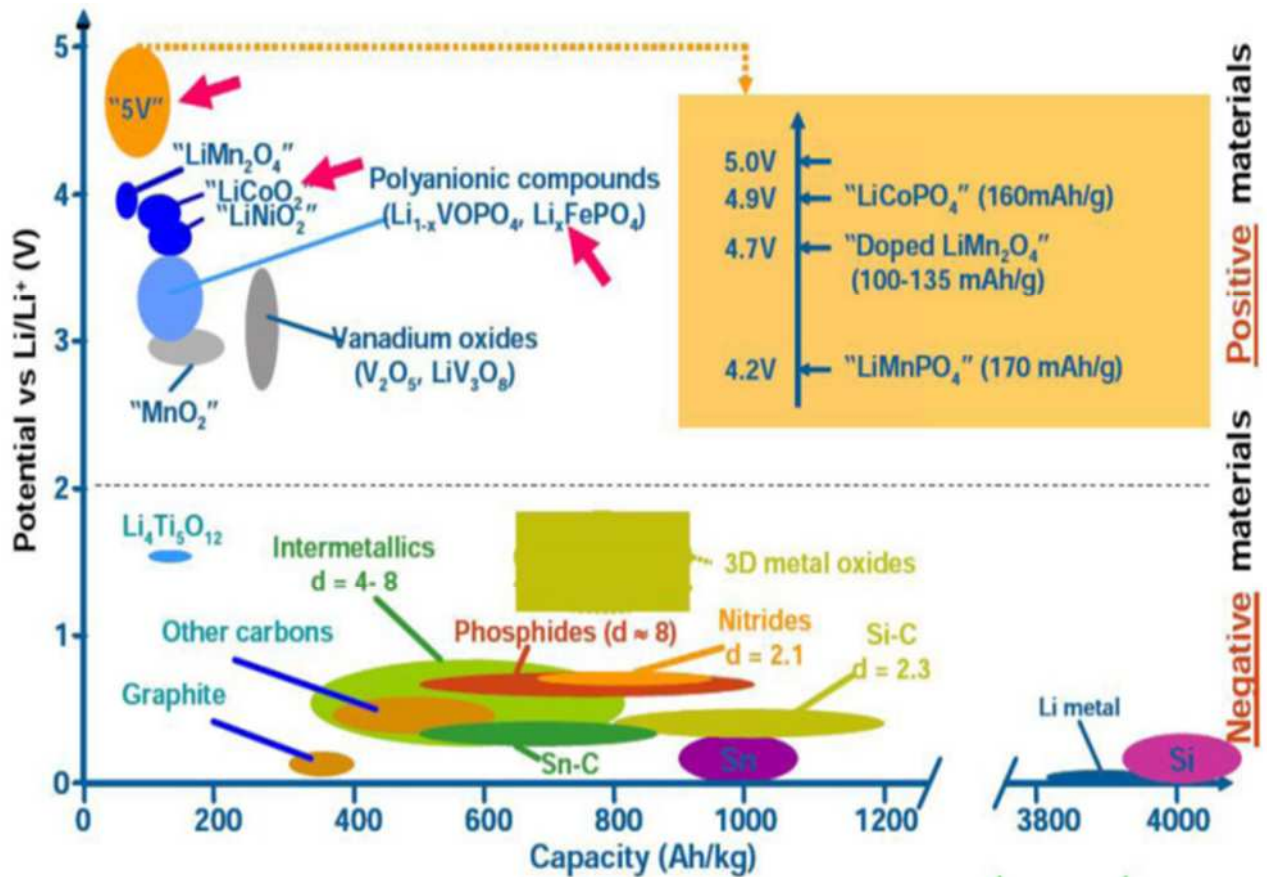
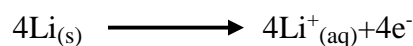


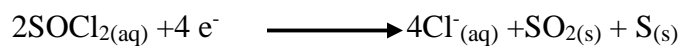
Figure 9: présentation des électrodes positives et négatives des batteries Li-ion selon leur potentiel électrique vs Li/Li+ et leur capacité de stockage par unité de masse. [10]

## II .4.6.Mécanisme Chimique

Demi-équation d'oxydation :



Demi-équation de la réduction :



Réaction globale:



### II.4.7. Les grandeurs caractéristiques

Les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur au Li-ion sont résumés dans le tableau

**Tableau 8** : caractéristiques d'un accumulateur au Li-ion.[5]

Caractéristiques de l'accumulateur Lithium-ion (Li-ion)	
Electrode positive	LiCoO <sub>2</sub>
Electrode négative	C <sub>6</sub>
Tension (V)	3,6
Densité d'énergie massique ( Wh/kg)	120-250
Densité d'énergie volumique ( Wh/L)	300-600
Nombre de cycles	500-2000
Température de fonctionnement	-20à 60°C
Coûts (€.KWh)	1000-2000
Autodécharge / %	10

### II.4.7. Avantages et Inconvénients

#### II.4.7.1 .Avantages

- Haute densité d'énergie pour un poids très bas, grâce aux propriétés physiques du lithium.
- Aucune effet mémoire.
- Faible autodécharge (10% par mois).

#### II.4.7.2. Inconvénients

- Danger si fuite de l'électrolyte.
- Manipulation nécessitant une extrême précaution .[3]

## CHAPITRE III

## ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES BATTERIES

## III.1.Éléments de comparaison entre les différents types d'accumulateurs

Pour mesurer les progrès accomplis en un demi siècle il convient de poser quelques éléments techniques de comparaison.

## III.1.1.Densité d'énergie

La densité d'énergie d'une batterie permet de déterminer la quantité d'énergie électrique qu'elle contient dans un volume ou par unité de poids.

2 unités de mesure sont employées : le Watt heure par litre (Wh/L) ou le Watt heure par kilogramme (Wh/kg).

Wh / litre

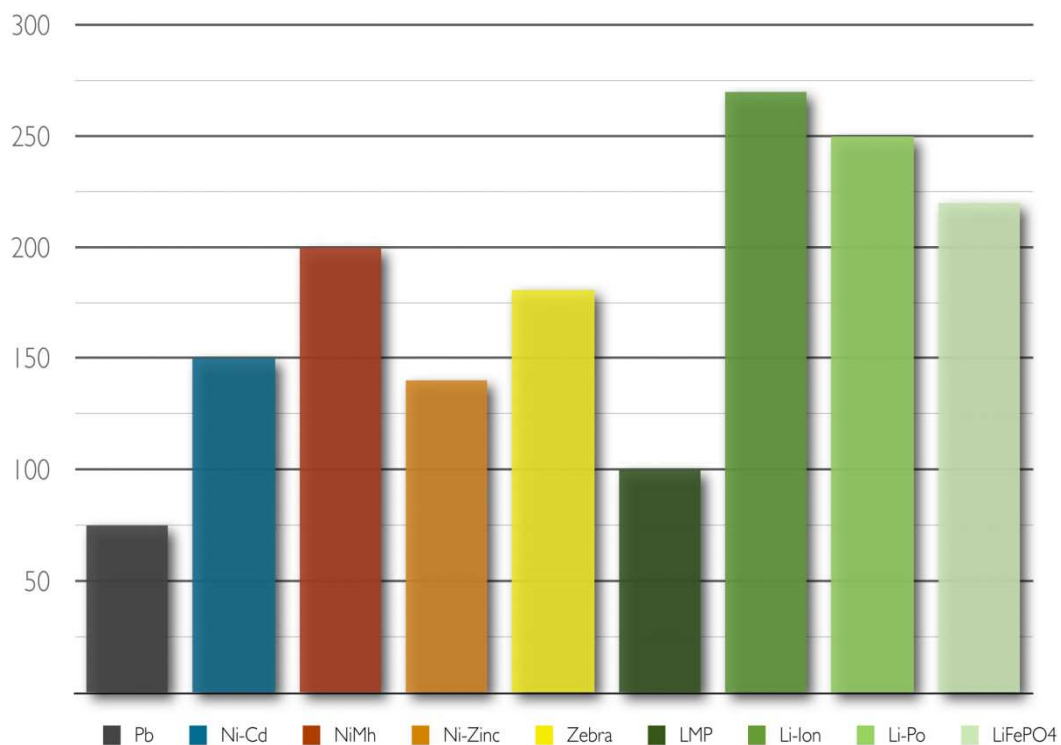
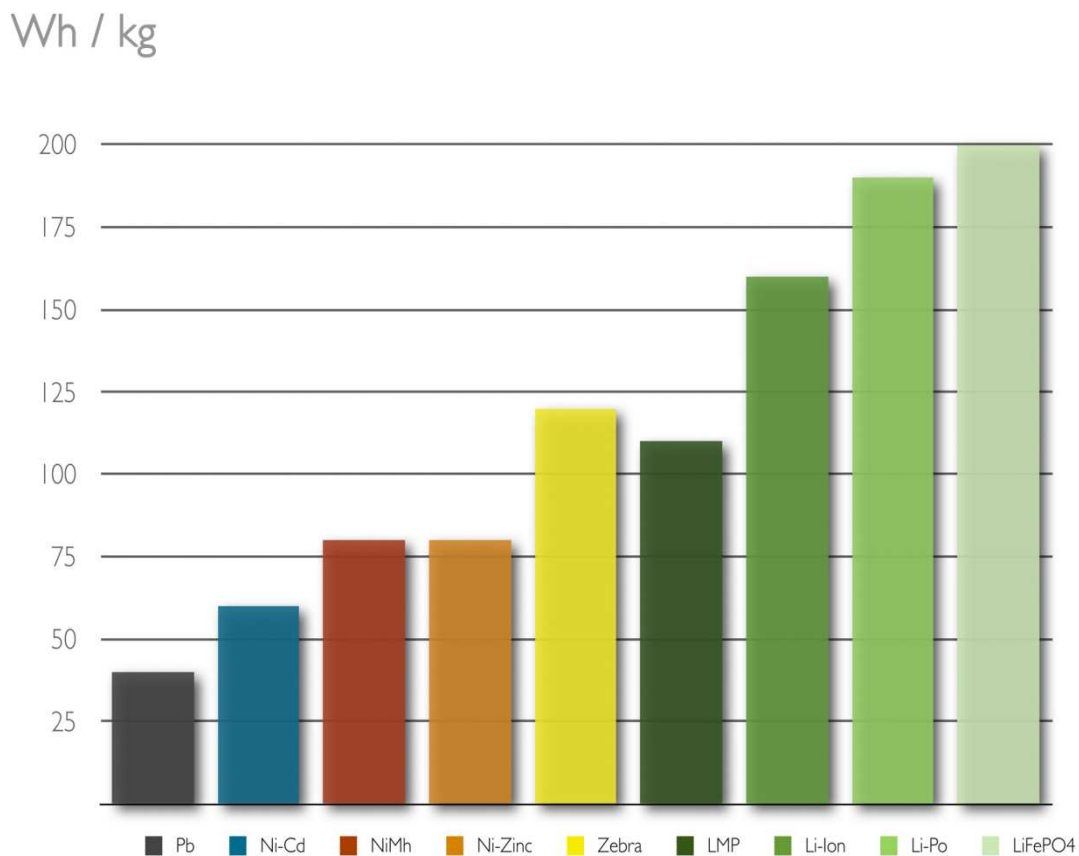


Figure10:La densité d'énergie d'une batterie en watt heure par litre



**Figure11:**La densité d'énergie d'une batterie en watt heure par kilogramme

### III.1.2.Durée de vie

La durée de vie des accumulateurs est également un critère déterminant pour les comparer. En effet, leurs performances se dégradent avec le temps et certaines technologies sont beaucoup plus endurantes que d'autres. Le critère utilisé est le nombre de cycles de charge et décharge. En quelque sorte le nombre de fois où l'on va pouvoir "faire le plein" avant d'avoir à remplacer les batteries.

La durée de vie, un facteur essentiel, atteint ou dépasse 1500 cycles pour cinq des technologies disponibles.

Traduction en terme pratique pour les utilisateurs : les packs de batteries permettent de parcourir des kilométrages conséquents avant d'être remplacés. Dans l'hypothèse où un pack de batteries a été dimensionné pour effectuer 100 km sur une charge, un chiffre réaliste avec les technologies actuelles, le remplacement du pack sera effectué à 150 000 km si sa durée de vie est de 1500 cycles.

Nombre de cycles de charge et décharge

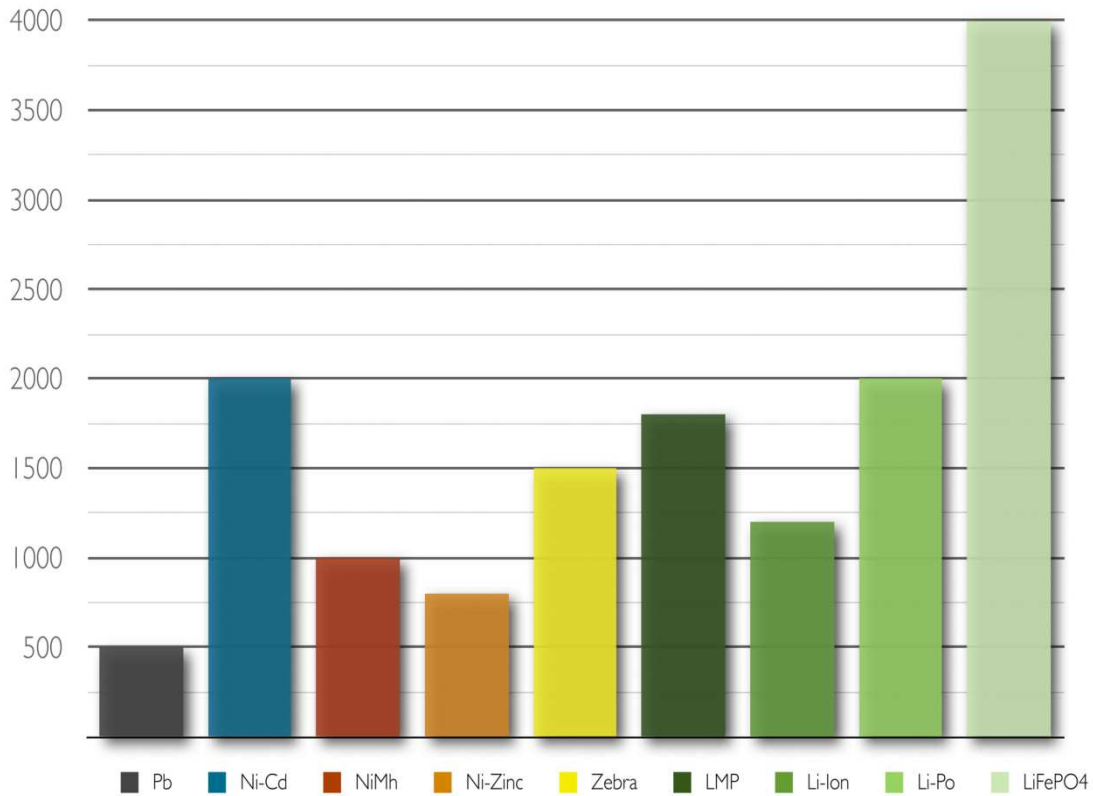


Figure12: Nombre de cycles charge et décharge d'une batterie

III.1.3. Rapidité de charge

Dans les applications liées à la mobilité ce facteur prend de plus en plus d'importance. Les technologies les plus avancées acceptent des courants de charge de plus en plus élevés permettant de réduire les temps d'immobilisation des véhicules. Le temps de charge est exprimé en heures ou minutes pour les technologies les plus rapides à alimenter.

Temps de charge en heures

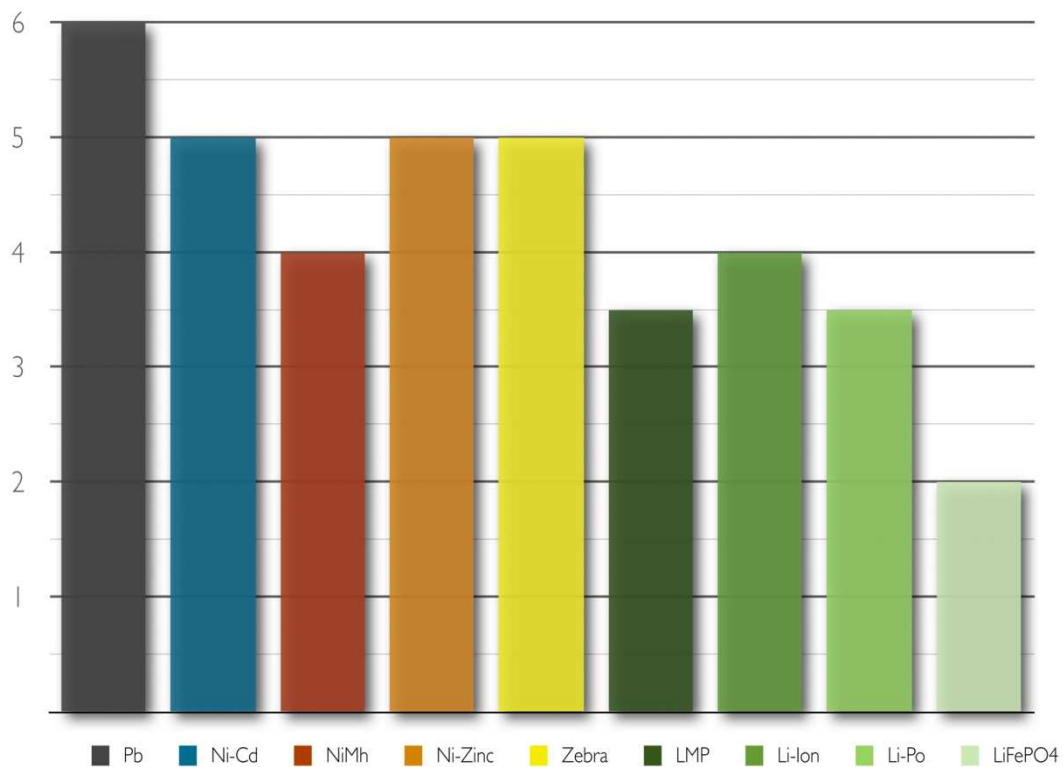


Figure13:Temps de charge en heures d’une batterie

III.2.Etude Comparative

III.2.1.Quantité d’énergie électrique par volume (Wh/l )

La figure 10 schématisé l’énergie spécifique type d’accumulateur on que l’accumulateur Li-ion présente la meilleur caractéristique, en suite le Li-Po puis le LiFePO4

III.2.2.Quantité d’énergie électrique par masse (Wh/kg )

La figure 11 représente la variation de l’énergie par chaque type d’accumulateur L’accumulateur LiFePO4 arrivé en premier en suite Li-Po puis Li-ion

### III.2.3.durée de vie

La figure 12 représente le volume de cycle charge –décharge en fonction de la technologie .on observe que l’accumulateur  $\text{LiFeO}_4$  présente la meilleur durée de vie , ensuite arrivé l’accumulateur Ni-Cd et Li-Po qui présente du cycle et enfin l’accumulateur LMP.

### III.2.4.Temps de charge en heure

La variation du temps de charge pour chaque technologie d’accumulateurs représente sur la figure 13

L’accumulateur au plomb présente les meilleure caractéristique, puis arrivé en même temps les technologies Ni-Cd , Ni-Zn et zèbre.

### CONCLUSION GENERALE

La croissance grandissante de la miniaturisation des téléphones portable, de l'appareillage ménager et des microordinateurs portables, entraîne de facto la miniaturisation des accumulateurs d'énergie. A ce titre plusieurs technologies existent sur le marché. Notre étude a résumé l'importance des différents technologie .Dans le chapitre premier, nous avons détaillé les grandeurs caractéristiques d'un accumulateur dont dépend le dure du vie .il s'agit des accumulateurs :

-Plomb-acide

-Ni-Cd

-Ni-MH

-Li-ion

Dans le deuxième chapitre ,nous avons mis en exergue les technologies existantes en présentant l'historique ,les réactions électrochimiques ayant lieu et les caractéristiques électriques pour chaque technologie.

Enfin, le troisième et dernier chapitre , nous avons présente les comparaisons entre les accumulateurs et ce pour la densité d'énergie volumique , la densité d'énergie massique et enfin la dure de vie .

Nous pouvons dire a présent que les accumulateurs Li-ion ,Li-Po et LiFePO<sub>4</sub> présentent les meilleures caractéristiques électriques .

## **Bibliographique**

[1] Prof .Dag Noréus.

Substitution of rechargeable Ni-Cd batteries, MateriaJapan Vol.38 N 6 (1999)

[2]Dillenseger G.

Caractérisation de nouveaux mondes en charge pour batteries stationnaires de secours . Thèse de doctorat ;Montpllier, Université de Montpellier II (2004)

[3] DRIAI .S

Mémoire de licence, stockage de l'énergie dans les Piles et accumulateurs ;Université de Bordj Bou Arréridj.(2013)

[4] SAADALLAH .N

Thèse doctorat en sciences ;Etude du mécanisme de réduction de  $PbO_2$  :Application de l'électrode à microcavité. Université Farhat Abbas-Sétif. (2013)

[5] BARCHASZ.S

Thèse doctorat ,Développement d'accumulateurs lithuim/soufre,Université GRENOBIE ,2011.

[6] STIEVANO .L

Mémoire de Master, convertisseurs électrochimiques de l'énergie :Batteries, accumulateurs ,supercapacités, Université de Montpellier 2.

[7] Théo DONDEL

Projet d'étude et réalisation, chargeur de batterie au plomb 48V, Institut universitaire de technologie de tours, 2006

[8] DINH VINHDO

Thèse doctorat, diagnostic de batteries lithuim ion dans des applications embarquées, Université de Technologie de campiène, 2010

[9]EDDAHECH ,A

Thèse doctorat, Modelisation du Viellissement et de termination de l'état de batteries lithuim -ion pour appliction vehicule électrique hybrid,Université Bordeaux 1, 2013

[10] G.MARLAIR, L .DUPONT et J. LEJOSNE

Rapport d'étude DRA-10-111085-07180A,donnees de base sur les differents technologies de stockagies de d'energie ,INERIS 2010

[11] [www .france-mobilite-electrique.org /les-technologies-utilisees-dans-les batteries-d'accmclateure](http://www.france-mobilite-electrique.org/les-technologies-utilisees-dans-les-batteries-d'accmclateure), le 24 Mai à 10.32