



INSTITUT  
NATIONAL  
des SCIENCES  
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3  
STPI/P6-3/2009 – 11



Nom des étudiants

Dominique ZAROD

François COURTOIS

Gregory HAIRAPETIAN

Guillaume LECLERC

Nicolas PELLISSIER

Enseignant(s)-responsable(s) du projet

François GUILLOTIN



## STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE



À TAILLE  
HUMAINE  
À L'ECHELLE  
DU MONDE



Date de remise du rapport : **18/06/09**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2008 – 11**

Intitulé du projet : **Stockage de l'énergie électrique: condensateurs, piles et batteries.**

Type de projet : **expérimental et documentation**

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est de s'intéresser aux différents types de batteries existant sur le marché. Nous allons de ce fait recueillir les caractéristiques techniques des différentes batteries afin de les comparer pour comprendre dans quelles situations elles sont le plus utilisées et pourquoi. Nous nous intéresserons également à la charge et à la décharge théorique de ces batteries tout en analysant les courbes de tensions d'un point de vue électrique mais aussi chimique.

La partie expérimentale de ce projet à pour but de tracer expérimentalement les courbes de charge et de décharge d'une batterie spécifique pour pouvoir les comparer à la théorie et ainsi mettre en évidence les différents facteurs qui influent sur la capacité de cette batterie. Nous avons choisi d'utiliser une batterie au plomb pour nos expériences puisque que c'est la plus facile à obtenir étant donné que le laboratoire possède déjà plusieurs batteries de ce type.

## TABLE DES MATIERES

1 Introduction .....	7
2 Méthodologie / Organisation du travail .....	8
3 Travail réalisé et résultats.....	9
3.1 Les différents types de batteries .....	9
3.1.1 Les batteries au plomb (Pb) .....	9
3.1.2 Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) .....	10
3.1.3 Les batteries Nickel Métal-Hydrure (Nimh) .....	10
3.1.4 Les batteries Lithium .....	11
3.1.5 Conclusion sur les différentes batteries .....	12
3.2 Étude du chargeur de batterie.....	13
3.2.1 Étude théorique: Les batteries au plomb .....	13
3.2.1.1 Comment recharger une batterie ?.....	13
3.2.1.2 Quand doit-on arrêter la charge ? .....	13
1.1.1 Les Batteries Nickel/Cadmium et Nickel/Metal Hybride .....	13
3.2.2 Les batteries Li-Ion.....	14
3.2.3 Le Contrôleur de charge de batterie .....	15
3.2.3.1 Le Redressement.....	15
3.2.3.2 Comparateur .....	15
3.2.3.3 Régulateur ajustable en courant et en tension .....	15
3.3 Étude de la charge/décharge d'une batterie.....	16
3.3.1 La charge .....	16
3.3.1.1 Augmentation de la concentration de l'électrolyte.....	16
3.3.1.2 Charge typique d'un accumulateur au plomb : principales étapes.....	17
3.3.1.3 Charges complètes théoriques et pratiques. ....	19
3.3.1.4 Homogénéisation de l'électrolyte en fin de charge. ....	19
3.3.1.5 3.3.1.5. La charge expérimentale .....	20
3.3.2 La décharge .....	21
3.3.2.1 Composition d'une batterie au plomb .....	21
3.3.2.2 La décharge .....	22

3.3.2.3	Les différents phénomènes de dégradation d'une batterie au plomb.....	23
4	Conclusions et perspectives .....	25
5	Bibliographie .....	26
6	Annexes .....	27
6.1	Courbes expérimentales .....	27
6.1.1	Courbe expérimentale de décharge d'une batterie de voiture.....	28
6.1.2	Courbe expérimentale de décharge d'une batterie de scooter.....	29
6.1.3	Courbe expérimentale de charge d'une batterie de voiture.....	30

## NOTATIONS, ACRONYMES

• <b>Pb</b>	Plomb
• <b>Ni-Cd</b>	Nickel-Cadmium
• <b>Nimh</b>	Nickel Métal-Hydride
• <b>Li-po</b>	Lithium-polymère
• <b>Li-ion</b>	Lithium-ion

• <b>B.M.S.</b>	(Battery Management System) : gère la charge et la décharge de la batterie (Lithium)
• <b>P.C.M.</b>	(Protection Circuit Module) : c'est un module lié à chaque cellule qui contrôle en permanence sa tension(Pour le batteries Lithium)

## 1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, il suffit d'être privé d'électricité pendant une journée complète pour se rendre compte de l'importance de ce vecteur énergétique dans l'utilisation des appareils qui nous entourent. L'énergie électrique est omniprésente dans les pays développés, que ce soit pour un usage domestique ou industriel. Par conséquent, il nous semble impossible d'envisager notre quotidien sans batteries ou accumulateurs, en effet indispensables au démarrage de nos voitures, ou encore au fonctionnement de nos téléphones portables, éclairages, ordinateurs portables..., d'où l'importance de son stockage.

Notre projet porte ainsi sur différentes formes existantes destinées au « stockage de l'énergie électrique ». Nos activités nous poussent en effet à devenir de plus en plus mobiles, différents types de batteries ont été conçus au fil des années pour répondre à cette demande croissante, à commencer par la batterie au plomb, inventée en 1859 par le français Gaston PLANTE.

Dans la première partie de notre analyse, nous étudierons donc les différents types de batteries utilisées. Toutefois, nous nous contenterons des plus courantes, à savoir les batteries au plomb, les batteries Nickel-Cadmium, les batteries Nickel Métal-Hydrure ou encore les batteries Lithium, qui représentent plus de 98% de l'ensemble des batteries utilisées.

Ensuite, nous étudierons de manière théorique un chargeur de batterie sous différents aspects. Pour cela, nous nous intéresserons à la manière de recharger une batterie, puis la détection de fin de charge dans le cas des différents types de batteries citées précédemment.

Enfin, nous nous intéresserons à la charge et décharge même d'une batterie, que ce soit d'un point de vue théorique et expérimental.



## 2 METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Notre sujet a donc pour but l'étude du stockage de l'énergie grâce aux batteries ainsi que l'étude de la charge et de la décharge d'une batterie.

Tout d'abord nous avons réfléchi tous ensemble au projet et effectué des pré-recherches pour mieux cerner le sujet. Ensuite nous avons élaboré le plan et réparti les différentes tâches entre chacun afin de rendre le travail plus efficace. Pendant le créneau de P6-3 chacun a travaillé sur la tâche à laquelle il a été affecté et a effectué des recherches complémentaires chez soi.

Ainsi nous avons mis en évidence trois points principaux : l'étude théorique des batteries, l'étude de la charge/décharge d'une batterie et l'étude du chargeur de batterie en lui-même.

Le premier point a été l'étude théorique des batteries qui a consisté à rechercher les différents types de batteries courantes et à rendre compte de leurs caractéristiques, avantages et désavantages. Ce travail a été effectué par Guillaume et Dominique.

Le deuxième point a été l'étude de la charge/décharge d'une batterie. Il s'agissait de créer un montage permettant de mesurer les courbes de charge et décharge d'une batterie. Cette tâche a été faite par Gregory, François et Nicolas. Ensuite Gregory et François se sont chargés de l'étude théorique et ont comparé les résultats théoriques et les courbes des mesures.

Enfin le dernier point a été l'étude d'un chargeur de batterie, afin de déterminer son fonctionnement. Nicolas s'est chargé de ce point.

Bien sur le travail n'a pas été totalement cloisonné, à chaque séance nous faisons un point ensemble et déterminons ce qu'il restait à effectuer. Une fois l'étude terminée nous sommes passés à la rédaction à proprement parler du dossier. Là encore chaque personne a travaillé sur une partie du rapport et nous avons mis en commun les parties de chacun lors des dernières séances.

### 3 TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

#### 3.1 Les différents types de batteries

##### 3.1.1 Les batteries au plomb (Pb)

La batterie au plomb est aujourd'hui l'accumulateur le plus utilisé dans l'industrie automobile, du fait de ses nombreux avantages, dont sa capacité à fournir des courants élevés. Cet accumulateur fut inventé en 1859 par le français Gaston PLANTE et est souvent considéré comme la première batterie rechargeable de l'histoire. Son coût, très intéressant, lui donne un excellent rapport prix/durée de vie (qui s'élève souvent à 3/4 ans). C'est en effet la batterie la moins chère du marché. De plus, cette batterie ne pollue pas si elle est bien recyclée, malgré la toxicité de son élément principal, le plomb. Mais son recyclage est de plus en plus réglementé ce qui augmente son coût et diminue la rentabilité du recyclage.



La batterie au plomb est constituée d'éléments standards trouvables n'importe où dans le commerce. De plus, c'est un accumulateur sans effet mémoire, c'est à dire que l'on peut la recharger quand on veut, à n'importe quel niveau de décharge.

Toutefois, ce type de batterie est sensible aux températures négatives, ce qui peut entraîner une perte d'autonomie allant jusqu'à -25% à -10°C. De plus, il peut y avoir un risque de cristallisation de sulfate de plomb si elle est laissée trop longtemps déchargée et peut alors perdre de sa capacité. La durée de vie d'une batterie au plomb dépende fortement de l'utilisation que l'on en fait. Ainsi, on a vu des batteries rendre l'âme après seulement 50 cycles alors que d'autres du même type ont tenu plus de 1000 cycles. Cette forte disparité est en partie due au fait que ces batteries sont influencées par le type de cycle charge/décharge qu'on leur impose, supportent très mal les décharges profondes et nécessitent un système embarqué de contrôle très poussé afin de fournir les meilleures performances possibles. Son poids peut aussi apparaître comme un désavantage car cela empêche son utilisation sur certaines applications destinées à être plus mobiles.

Chaque batterie au plomb est constituée de plusieurs cellules d'une tension nominale de 2,1V. Les batteries de voitures sont ainsi composées de six cellules pour leur conférer une tension d'environ 12V.

Voici les principales caractéristiques d'une batterie au plomb:

Temps de charge (heure)	Tension d'une cellule (V)	Capacité moyenne (Wh/kg)	Auto décharge	Intensité à la fin de la charge (A)	Nombre de cycles moyens
6 à 12	2,1	30 à 50	1% / jour	360	400 à 1200

### 3.1.2 Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

Les batteries Nickel-Cadmium sont principalement utilisées pour le fonctionnement des ordinateurs portables, l'outillage portatif ainsi que l'éclairage de sécurité. Mais elles sont aussi parfois utilisées pour certaines voitures électriques, telles que la Peugeot 106, le Partner, ou la Kangoo.

Un des grands avantages des batteries Nickel-Cadmium réside dans leur capacité à supporter de grands courants de charge et décharge grâce à leurs faibles résistances internes. Par ailleurs, elles présentent une solidité mécanique et électrique très intéressante, et offrent une facilité de recharge. Elles possèdent aussi une durée de vie très importante (1000 cycles de charge-décharge), allée à un faible coût. Enfin, le Ni-Cd peut supporter des pointes de courant en décharge de presque dix fois supérieures aux batteries Nimh, que nous allons détailler dans la partie suivante.



Néanmoins, les batteries Ni-Cd accusent un désavantage environnemental à cause du cadmium, un métal lourd et polluant, compliqué à recycler. De plus, elles sont de plus pénalisées par leur effet mémoire.

Le tableau suivant récapitule six caractéristiques des batteries Ni-Cd.

Temps de charge (heure)	Tension d'une cellule (V)	Capacité moyenne (Wh/kg)	Auto décharge	Tension à la fin de la charge (V)	Nombre de cycles moyens
1/4 à 14, dépend du chargeur	1,2	40 à 55	20% / mois	1,4/ élément	1000 à 2000

### 3.1.3 Les batteries Nickel Métal-Hydrure (Nimh)

Les batteries Nimh sont principalement utilisées dans l'automobile : elles équipent les véhicules hybrides (moteur à combustion + moteur électrique) tels que la Prius ou Honda Civic ainsi que les scooters.

Il s'agit tout d'abord d'un type de batterie favorable à l'environnement et ne polluant pas si elles sont bien recyclées. Elles ne contiennent en effet ni cadmium, ni plomb, ni autre composant toxique... Leurs fabrication et recyclage doivent néanmoins être effectués très soigneusement. Par exemple l'hydroxyde de potassium réagit violemment avec l'eau et est corrosif pour la peau, les yeux, les voies respiratoires et digestives. Par contre, elles sont capables de fournir beaucoup d'énergie en un temps très court et sont simples à stocker et à transporter.



Elles sont donc idéales pour les

flashes et les appareils photos numériques. Elles offrent aussi une longue durée de vie puisqu'elles sont rechargeables jusqu'à 1000 fois.

Leur inconvénient principal est leur fragilité concernant la surcharge. En effet ce type de batteries à une détection de fin de charge difficile, nécessitant par conséquent l'usage de chargeurs automatiques beaucoup plus performants et coûteux que les Ni-cd. De plus, elles présentent une autodécharge très importante, puisqu'elle atteint jusqu'à 30% par mois.

Il faut noter qu'aujourd'hui cette technologie est plus plutôt remplacée par le lithium, qui offre entre autre un poids moins lourd.

Voici différentes caractéristiques des batteries Nickel Métal-Hydride

Temps de charge (heure)	Tension d'une cellule (V)	Capacité moyenne (Wh/kg)	Auto décharge	Tension à la fin de la charge (V)	Nombre de cycles moyens
1 à 14, dépend du chargeur	1,2	60 à 120	30% / mois	1,4/ élément	500 à 1500

### 3.1.4 Les batteries Lithium

Les batteries au lithium, quant à elles, sont principalement destinées pour les appareils portables, tels que les ordinateurs portables, les téléphones... Ces différentes utilisations sont principalement dues à leur capacité à allier haute performance et faible poids. De plus, contrairement à certaines batteries vues précédemment, telles que la batterie au plomb ou la batterie nickel-Cadmium, ses composant ne sont pas néfastes pour l'environnement, tout en possédant une densité énergétique très élevée, grâce aux propriétés physiques du Lithium. Il est important de noter que ce type de batteries accepte un nombre de cycles important (jusqu'à 1500 pour les meilleures). Enfin, les batteries Lithium ont une autodécharge très faible (5% par mois) et ne sont pas concernées par l'effet mémoire.



Il existe deux principaux types de batteries au Lithium. Les batteries Lithium-ion (Li-ion) et les batteries Lithium-polymère (Li-po). Ces dernières sont plus sûres et plus robuste que les batteries au Li-ion. Elles sont en effet plus sûres par le fait qu'elles sont plus résistantes à la surcharge et aux fuites d'électrolytes. Elles sont aussi plus légères que les Li-ion, de par leur capacité à éliminer l'enveloppe de métal lourde du Li-Ion. Toutefois, il ne faut pas oublier que la batterie Li-po est plus chère que la batterie Li-ion et délivre un peu plus d'énergie. Enfin, les deux peuvent prendre des formes fines et variées pouvant ainsi être déposées sur un support flexible.

Le principal inconvénient est que la technologie Lithium s'use même quand on ne s'en sert pas, due à une corrosion interne et une augmentation de la résistance interne. De plus, son prix est souvent un peu plus élevé, car elle nécessite un circuit de protection sérieux (B.M.S. et P.C.M.) pour gérer la charge et la décharge afin d'éviter la destruction des éléments.

Il est aussi important de relever qu'il existe une différence de qualité très importante entre l'ensemble des batteries lithium, en particulier pour batteries téléphone portable.

Voici les principales caractéristiques d'une batterie au Lithium.

Temps de charge (heure)	Tension d'une cellule (V)		Capacité moyenne (Wh/kg)		Auto décharge		Tension à la fin de la charge (V)	Nombre de cycles moyens	
	Li-ion	Li-po	Li-ion	Li-po	Li-ion	Li-po		Li-ion	Li-po
2 à 4	3,6	3,7	90 à 160	100 à 130	10% / mois	5% / mois	4,2	500 à 1500	300 à 500

### 3.1.5 Conclusion sur les différentes batteries

Nous venons donc d'énumérer les principaux types de batteries et de voir que chacune possède ses propres caractéristiques. Toutefois, nous ne pouvons pas dire que telle ou telle batterie est mieux qu'une autre. En effet, leurs caractéristiques leur confèrent des avantages propres dans certains domaines précis. Ainsi, les batteries Lithium seront très souvent utilisées pour les batteries de téléphones portable, ordinateurs portables..., de part leur capacité à allier haute performance et faible poids. Toutefois, elles ne seraient pas efficaces pour le démarrage d'une voiture. En revanche, une batterie au plomb se révèle l'outil de stockage idéal pour le fonctionnement d'une voiture. En revanche, sa taille et son poids ne lui permettraient pas d'être utilisée sur un appareil mobile. Enfin, comme dernier exemple, si nous prenons le cas d'un flash pour appareil photo, nous avons pu remarquer que les batteries Nickel Métal-Hydrure se révèlent le moyen de stockage idéal. Elles sont en effet capables de fournir beaucoup d'énergie en un temps très court et sont simples à stocker et transporter, contrairement aux autres types principaux de batteries.

Ainsi, les différences entre les batteries énumérés ci-dessus (temps de charges, tension d'une cellule, capacité moyenne, autodécharge, nombre de cycles moyens...), permettent des usages différents. Nous trouverons ainsi souvent la batterie qui convient le mieux à notre utilisation, suivant les critères énumérés précédemment, comme la taille, le poids, la capacité à fournir une charge rapidement ou non, et bien d'autre encore...

Toutefois, pour certaines utilisations plus précises, d'autres types de batteries ont été conçues au cours des années. C'est par exemple le cas des batteries zinc – argent, inventées en 2007, et possédant une capacité moyenne de 200 Wh/kg. Nous pouvons aussi relever la batterie manganèse - lithium – ion (aussi appelée lithium – manganèse) fournissant une énergie massique de 300 Wh/kg.

La batterie lithium – vanadium permet quant à elle de délivrer une capacité moyenne supérieure à 300 Wh/kg. Elle a été présentée par Subaru en 2007 pour équiper le moteur de sa nouvelle voiture électrique : la G4e. Le développement des voitures électriques poussent en effet les recherches de nouvelles batteries, alliant l'autonomie à la puissance.

## 3.2 Étude du chargeur de batterie

### 3.2.1 Étude théorique: Les batteries au plomb

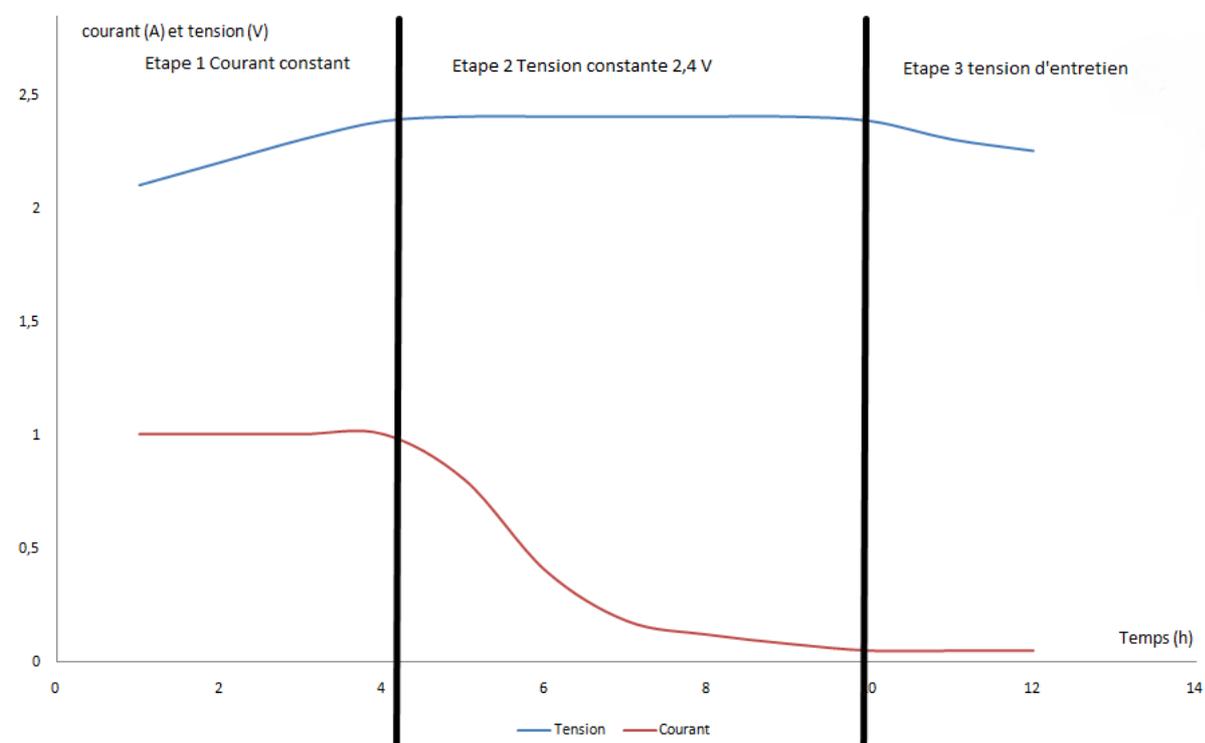
#### 3.2.1.1 Comment recharger une batterie ?

On met une batterie à charger quand la tension aux bornes de ses cellules est de 2,1 V. Quand on recharge une batterie au plomb, il faut choisir le régime de charge (en ampère) à appliquer aux accumulateurs. Normalement, on devrait la recharger à 10 % de sa capacité maximale (exemple : s'il s'agit d'une batterie de 50 ampères-heures devra se charger au maximum à cinq ampères).

Cependant, il est possible de recharger à un régime de plus ou moins 25 % de celui conseillé en fonction de l'usage de la batterie. Il faut tout de même savoir que plus le régime de la charge est faible, et meilleure sera la charge. De plus, l'accumulateur préfère une charge répétée et coupée par des intervalles de repos plutôt qu'une charge à fort régime sans arrêt. Si ces conditions sont respectées, la durée de vie de la batterie sera maximale. En effet, du point de vue chimique les actions lentes, d'oxydation (sur la plaque positive) et de réduction (sur la plaque négative), sont les meilleures.

#### 3.2.1.2 Quand doit-on arrêter la charge ?

Il y a différents repères de fin de charge chimique ou électrique, il est possible de voir la fin de charge quand il se produit un dégagement gazeux autour des plaques on pourrait utiliser ce repère. Cependant, il est compliqué à mettre en œuvre sur une batterie opaque dans laquelle on ne voit pas l'intérieur de la batterie. On peut surveiller la fin de la charge en fonction de la tension aux bornes des cellules qui doit atteindre entre 2,4 et 2,6 V lorsque la charge est atteinte



Exemple de processus de charge d'une batterie au plomb

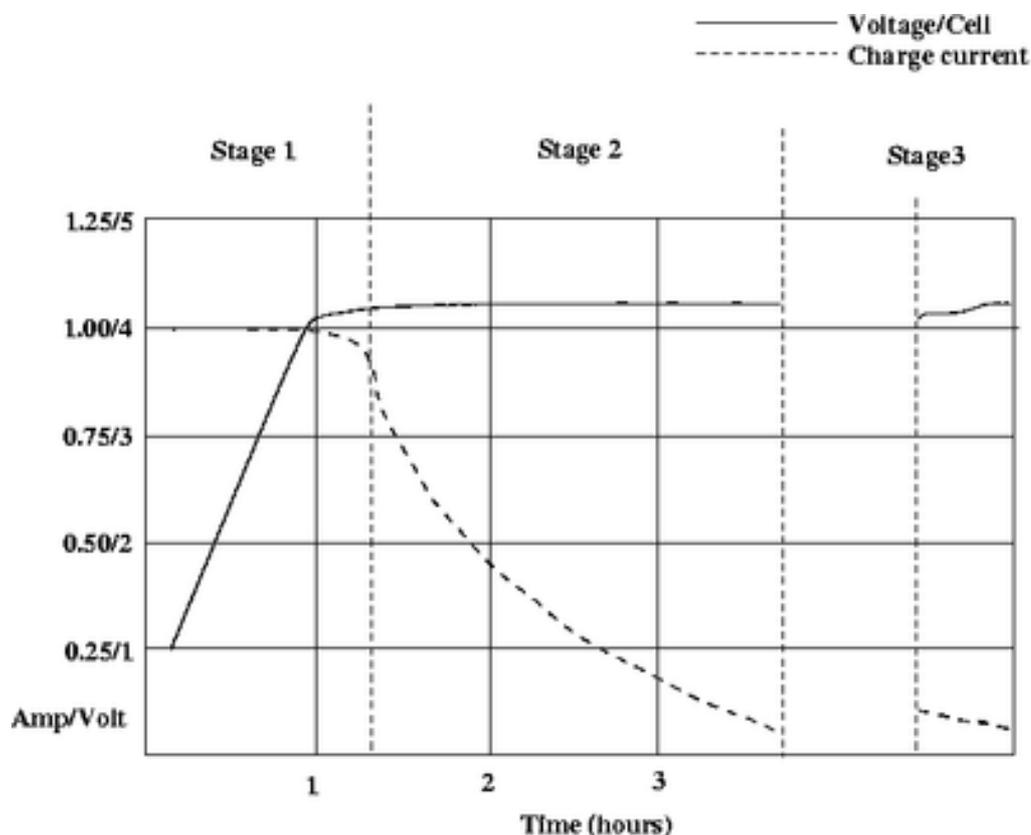
Les accumulateurs au nickel-cadmium, comme pour les accumulateurs au plomb, sont composés d'éléments de tension nominale 1,2 V. La batterie atteint l'état déchargé à 1 V. L'état chargé est atteint à 1,44 V. Généralement, on recharge une batterie nickel cadmium lentement à X/10 de la capacité de la batterie X soit pendant 10 heures. Les chargeurs ne sont pas parfaits leur rendement étant de 60% donc on ajoutera 40 %\*X/10 à la capacité calculée pour charger réellement en 10 heures (donc, une batterie de X Ampère/heure sera chargée à X/10 (1+ 40 %)).

On peut aussi recharger ce type de batterie de capacité X Ampère/heure à 2X soit un rechargement rapide en une demi-heure. Cependant, il faudra utiliser des batteries avec un orifice permettant une évacuation de gaz suffisante, car la réaction due au rechargement rapide des batteries nickel cadmium dégage une grande quantité de gaz et peut engendrer un risque d'explosion si le gaz s'évacue mal.

Le chargement des batteries NI-MH est sensiblement le même que pour les batteries NI-Cd, car son fonctionnement est semblable à l'exception que le NI-MH est 3 fois moins dense donc pour un même volume la capacité d'une batterie NI-MH est 3 fois plus élevée que la capacité d'une batterie NI-Cd.

### 3.2.2 Les batteries Li-Ion

Chaque batterie li-ion est composé d'éléments qui ont une tension de 3,6 V chacun. Les éléments sont souvent groupés trois par trois en parallèle. Les éléments chargés font 4,2 V et 2,6 V en fin de décharge. La batterie d'une tension nominale de 10,8 V varie donc de 12,6 V à pleine charge à 7,8 V en fin de décharge.



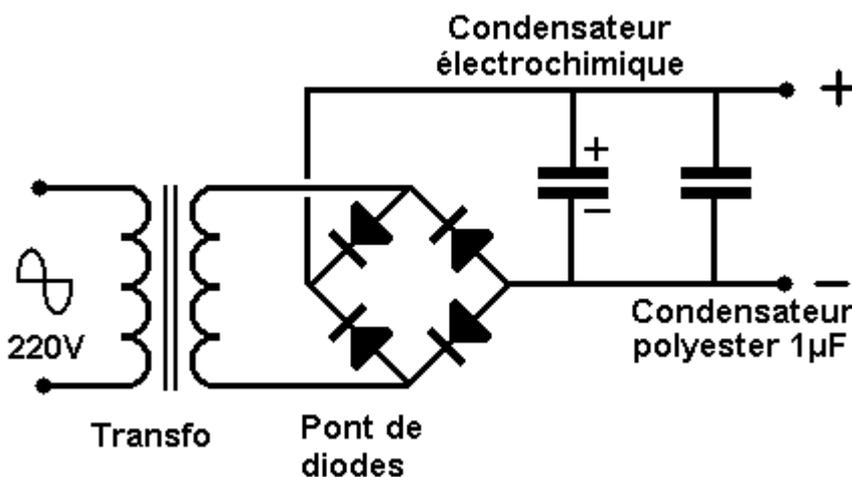
**NB :** les batteries alcalines sont impossibles à recharger.

### 3.2.3 Le Contrôleur de charge de batterie

#### 3.2.3.1 Le Redressement

Un chargeur est généralement alimenté par le courant EDF 230 V alternatif. Or les batteries de voiture sont en courant continu 12 V. Pour réaliser la charge, il faudra alors rendre la tension continue

- 1 : Le transformateur transforme la tension en 12 V.
- 2 : Le pont de diode assure le Redressement de la tension.
- 3 : Le condensateur pour filtrer la tension.



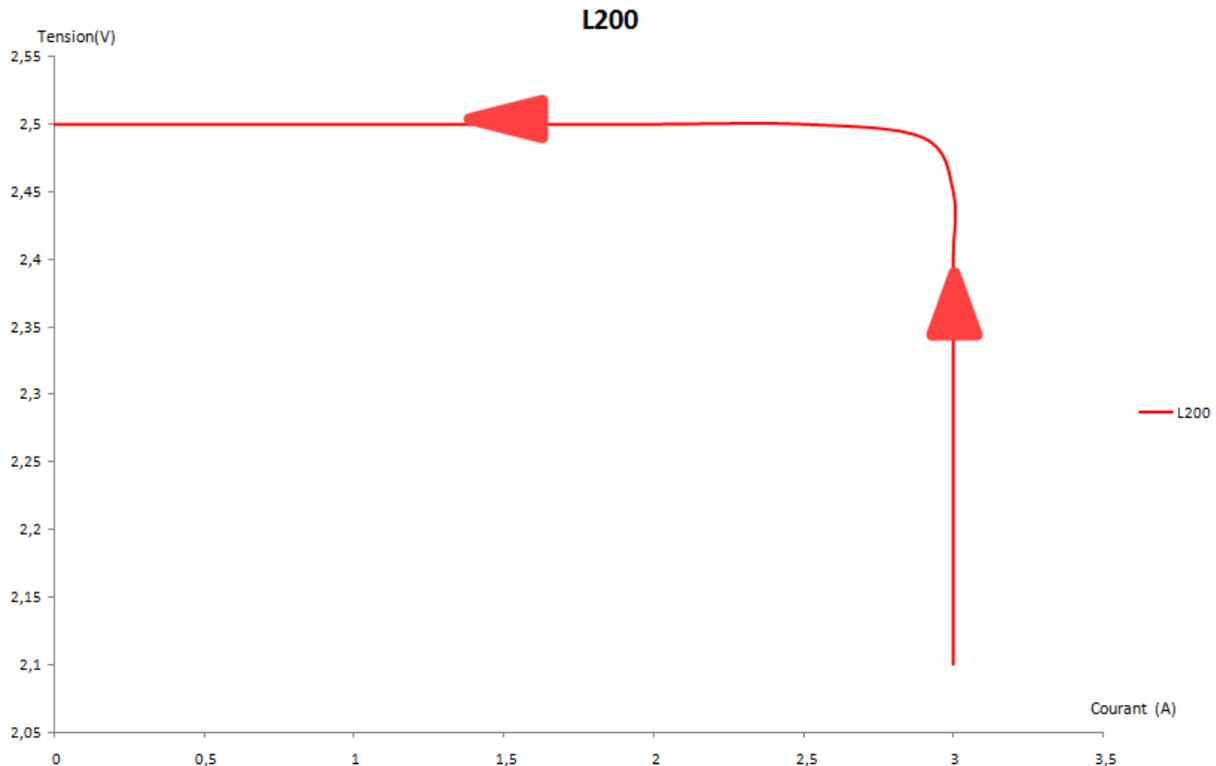
#### 3.2.3.2 Comparateur

Grâce à un amplificateur (AOP), on va couper la charge lorsque la batterie aura atteint la tension voulue, généralement comprise entre 13,5 et 13,8, est réglée à partir d'un potentiomètre. Cependant, le potentiomètre ne permet pas de réguler parfaitement la charge de la batterie. En effet, le montage ne protégera pas la batterie, si jamais elle est chargée en sens inverse due à un mauvais branchement. Cependant, il pourra indiquer la fin de charge de la batterie

#### 3.2.3.3 Régulateur ajustable en courant et en tension

Comme on l'a remarqué lorsque l'on charge une batterie, on la charge avec un générateur de courant limité par une tension limite (souvent 13,8) et un courant de charge 2 ou 3 Ampères au plus pour éviter les surchauffes. Grâce au régulateur ajustable de courant (L200), on met une batterie à charger et il s'occupera de réguler la tension et le courant nécessaire au bon chargement de la batterie (et donc, lui assurer une plus longue vie). Selon la documentation technique 2 résistances (R1 et R2 un potentiomètre monté en pont diviseur à la borne 4 du régulateur détermine la charge finale de la batterie en V. Une résistance à la borne 5 qui se dirige vers la batterie détermine le courant de charge initial une diode est ajoutée pour éviter une éventuelle décharge dans le régulateur. Une autre résistance branchée à la borne 3 qui limite le courant entrant dans le régulateur dans le cas où le chargeur aurait été branché à l'envers sur la batterie. On peut notamment mettre ce

dernier en série avec un buzzer pour alerter l'utilisateur d'un mauvais branchement et ainsi préserver le chargeur et la batterie.



### 3.3 Étude de la charge/décharge d'une batterie

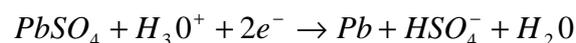
#### 3.3.1 La charge

##### 3.3.1.1 Augmentation de la concentration de l'électrolyte.

À l'électrode positive, en charge, les ions  $Pb^{2+}$  (sulfate de plomb) sont oxydés en ions  $Pb^{4+}$  (dioxyde de plomb) :

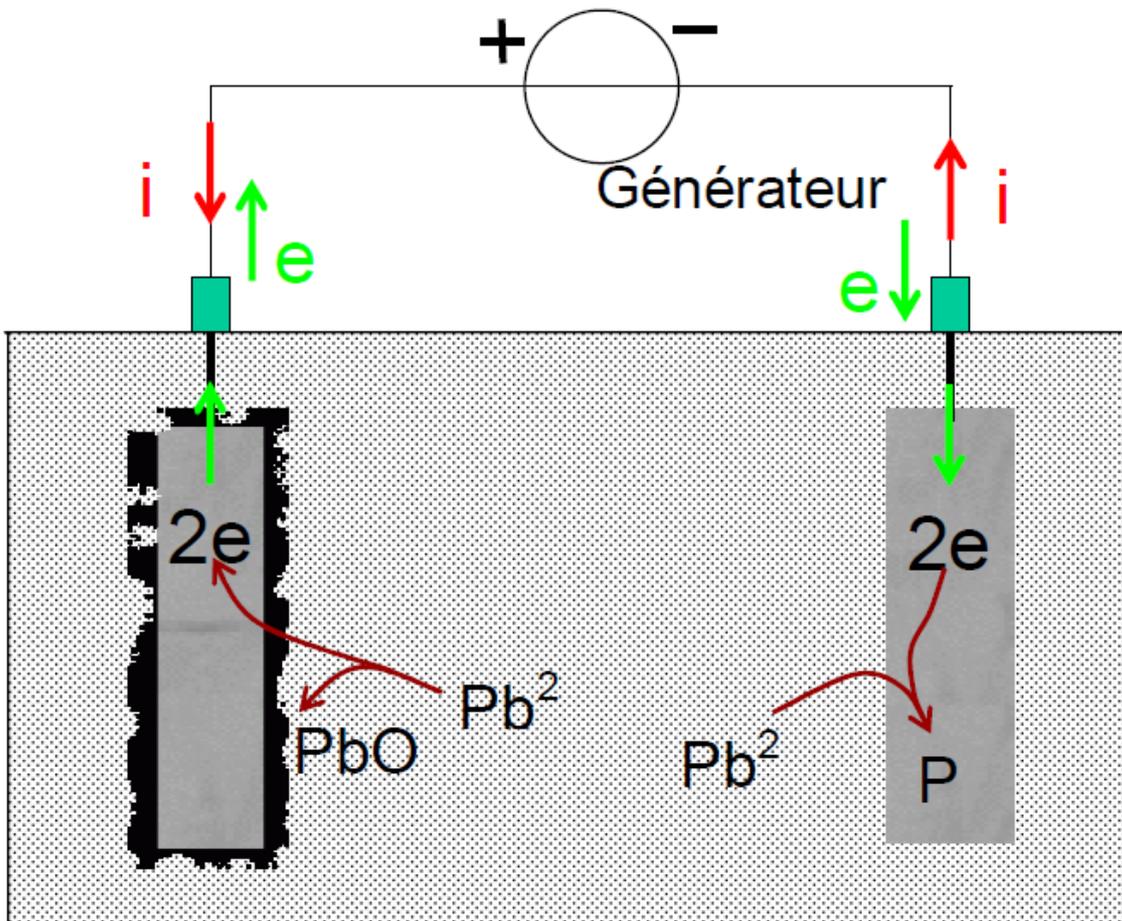


À l'électrode négative, dans le même temps, le  $Pb^{2+}$  du sulfate de plomb est réduit en plomb métal :



Pendant la charge, les ions sulfates, du sulfate de plomb, sont progressivement libérés sous forme d'ions  $HSO_4^-$  dans l'électrolyte. Il en résulte une augmentation de la concentration d'acide sulfurique dans l'électrolyte.

La concentration d'acide croît rapidement à proximité de l'interface réactionnelle. Ce phénomène est amplifié, coté positif, par une consommation d'eau.



### 3.3.1.2 Charge typique d'un accumulateur au plomb : principales étapes.

En début de charge des accumulateurs au plomb, la résistance interne est très faible. En pratique, dans cette première phase, le courant est limité par le chargeur (*phase 1, Figure Charge*).

Pendant la charge, les phénomènes de diffusion associés à la libération des ions  $\text{HSO}_4^-$  dans l'électrolyte développent des surtensions de polarisation qui s'ajoutent aux surtensions d'origine ohmiques. Ces phénomènes de diffusion deviennent en fin d'opération les processus limitant la cinétique de façon prépondérante. On observe alors une augmentation de la tension, associée à un début de dégagement gazeux. Pour conserver un rendement faradique acceptable, c'est-à-dire limiter ce dégagement gazeux à une valeur négligeable, on diminue progressivement le régime de charge. En pratique, pour ce faire, on impose généralement une phase à tension constante (*phase 2, Figure Charge*).

Pour décrire l'évolution du courant obtenu au cours de cette deuxième phase, on introduit parfois la notion de « courant d'acceptance », défini comme le courant maximum de charge effective d'une batterie au-delà du quel se produit la réaction d'électrolyse de l'eau. Ce courant d'acceptance décroît avec l'état de recharge. Remarquons cependant que l'électrolyse de l'eau de l'électrolyte est une réaction qui a lieu en permanence et que les accumulateurs au plomb sont donc en permanence le siège d'un dégagement gazeux,

même si ce dernier est, en dehors des périodes de fin de charge, suffisamment faible pour être pratiquement inappréciable. En conséquence, lorsqu'on définit le courant d'acceptance comme frontière entre charge effective et dégagement gazeux par électrolyse de l'eau, on doit considérer qu'il s'agit d'un dégagement gazeux « sensible » et que l'appréciation de cette frontière est subjective et peut dépendre de l'opérateur. La phase trois, au cours de laquelle est imposé un courant constant (phase 3, Figure Charge), sans limitation de tension, a pour but d'homogénéiser la concentration de l'électrolyte dans les volumes interélectrodes.

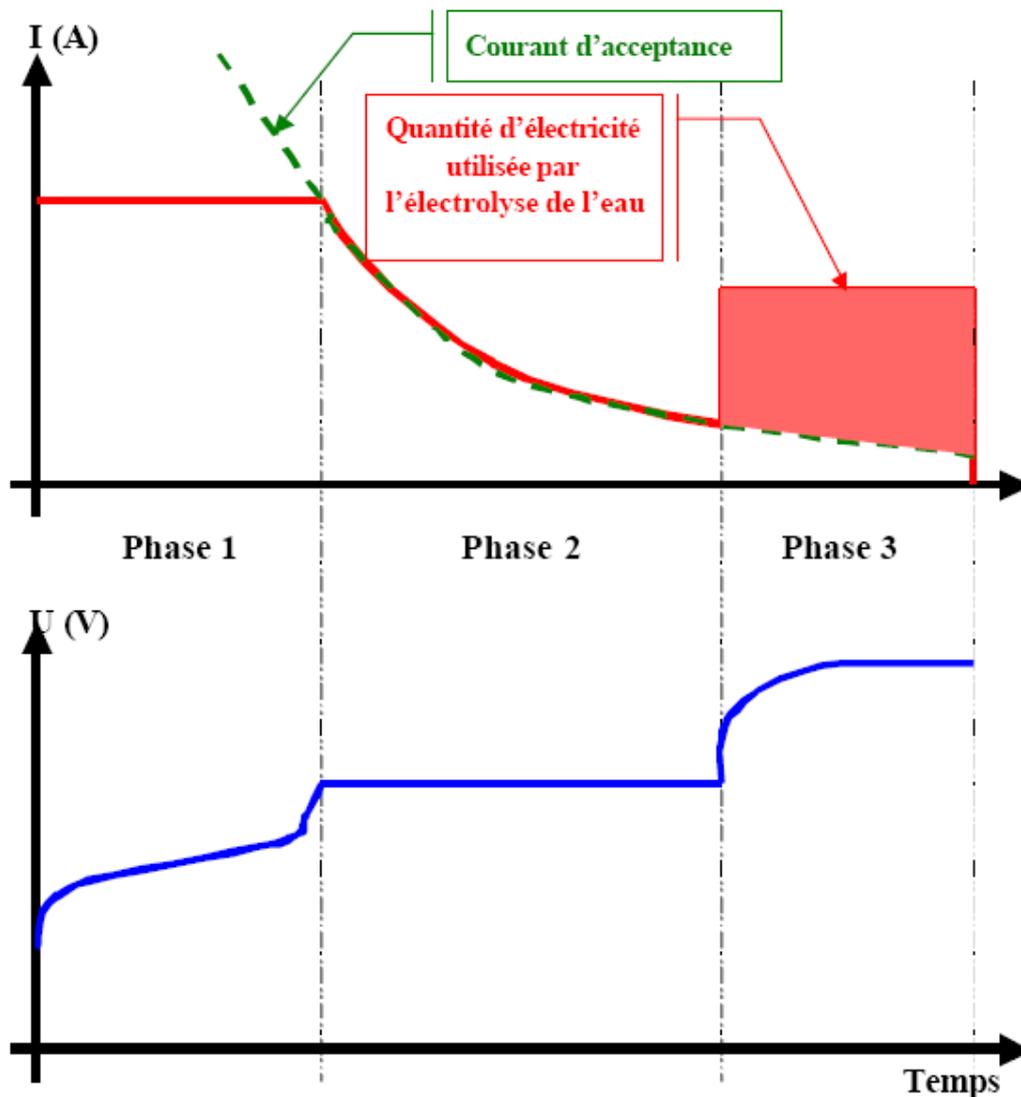


Figure Charge : Profils types courant et tension au cours d'une charge IU.

Phase 1 : charge à courant ( $I$ ) constant.

Phase 2 : charge à tension ( $U$ ) constante.

Phase 3 : charge à courant imposé ( $i$ ) sans limitation de tension permettant le dégagement gazeux.

### **3.3.1.3 Charges complètes théoriques et pratiques.**

Les précautions à prendre vis à vis de la notion de courant d'acceptance ayant été exposées, il n'en reste pas moins que la représentation de la cinétique de charge effective sous la forme d'une fonction décroissante tendant asymptotiquement vers zéro est qualitativement juste. Elle entraîne que la notion de « charge complète » est --stricto sensu-- un état asymptotique, c'est-à-dire que l'on n'atteint jamais.

La définition de la charge complète pratique résulte d'un compromis entre temps qu'on accepte d'y consacrer et proximité de l'asymptote définissant la charge complète théorique.

Les normes évoquent généralement pour définir une charge complète, une période de l'ordre de une à deux heures, en fin de charge, pendant laquelle les paramètres de surveillance de la batterie, tels que sa tension et la densité de son électrolyte n'évoluent plus. Ce critère de fin de charge est flou dans la mesure où la constatation d'une non-évolution dépend de la sensibilité des appareils de mesure utilisés. Qui plus est, en fin de charge, l'élévation de la température résultant des pertes inéluctables entraîne une baisse progressive de la résistance de l'électrolyte et par conséquent de la tension de la batterie. Cette baisse peut masquer la hausse de tension associée à la recharge effective, de plus en plus faible mais jamais nulle.

L'association de ces deux processus se traduit au niveau de l'évolution de la tension de la batterie par l'apparition d'un maximum qui peut être très plat, mais qui est, généralement détectable avec un effort raisonnable sur les mesures. Un phénomène analogue se produit au niveau de l'évolution de la densité de l'électrolyte. La zone du maximum ainsi que ce qui suit sont alors classés, en pratique, comme période de non-évolution des paramètres de surveillance, autorisant la validation du critère de fin de charge. Il apparaît donc, comme on ne peut se permettre de rester indéfiniment en charge, que les critères de fin de charge complète pratique constituent des compromis entre durées acceptables et qualité de l'état de charge final, l'état de charge complète réel n'étant jamais atteint. On sait d'ailleurs qu'une analyse des matériaux actifs, après charge complète au sens des normes, fait apparaître une teneur en sulfate de plomb toujours sensible, par exemple de l'ordre de 2 %, traduisant ainsi, indirectement et sous forme chimique, l'écart à l'état théorique de charge complète.

### **3.3.1.4 Homogénéisation de l'électrolyte en fin de charge.**

Dans les accumulateurs au plomb, on sait que l'électrolyte participe aux réactions de charge/décharge. Sa concentration baisse en décharge et augmente durant la charge. Si l'on excepte les zones proches des interfaces réactionnelles qui sont soumises à des variations transitoires de concentration, parfois importantes mais concernant une faible part du volume de l'électrolyte, la baisse de concentration en décharge est relativement homogène sur l'ensemble de l'électrolyte. En charge, par contre, l'électrolyte est soumis, jusqu'à l'apparition de la phase finale de surcharge, à un phénomène d'hétérogénéisation de sa concentration appelé en jargon de métier « stratification ». La phase finale dite de surcharge, pendant laquelle le courant total se partage en un courant de charge proprement dit et un courant d'électrolyse produisant de l'oxygène aux électrodes positives et de l'hydrogène aux négatives a dans ce cas deux fonctions : continuer à se rapprocher de l'état de charge complète et, grâce au dégagement gazeux, ré-homogénéiser la concentration de l'électrolyte.

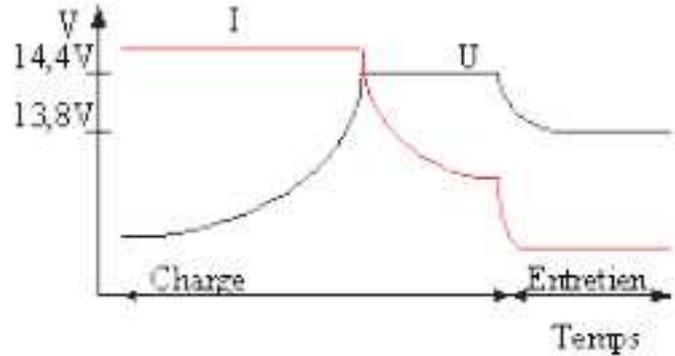
Cette ré-homogénéisation de l'électrolyte est la principale fonction à assurer en fin de charge. Elle est nécessaire à chaque charge, sous peine d'entraîner un fonctionnement hétérogène des électrodes menant à une réduction importante de leur durée de vie.

### 3.3.1.5 La charge expérimentale

Il existe trois types de charge différents :

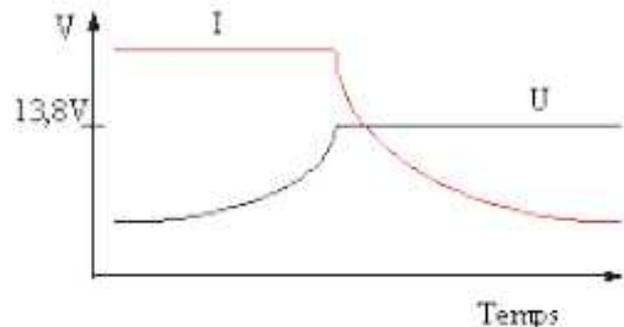
- Courbe de charge de type 3 états :
  - Boost
  - Egalisation
  - Entretien

En fonction du type de batteries, la charge boost peut être de 14,4V à 15V avec un courant maximum fourni par le chargeur, la charge d'égalisation se fait à ces mêmes seuils avec un courant moindre, la charge d'entretien est de 13,8V avec un courant faible.



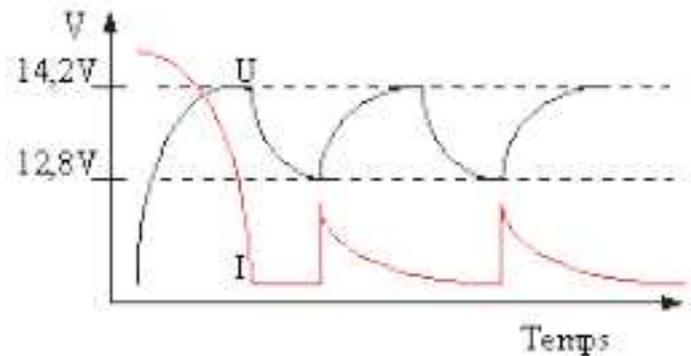
- Courbe de charge de type 2 états :

On a une pleine charge jusqu'à 13,8V, puis charge d'entretien. Le courant est au maximum en début de charge et diminue lorsque le témoin de la batterie approche 13,8V.



- Courbe de charge de type floating :

Le courant débité par le chargeur diminue en même temps que la tension aux bornes de la batterie augmente. Un dispositif arrête la charge dès qu'une tension prédéterminée est atteinte et la remet en route dès que le seuil bas est atteint.



Nous avons donc effectué une charge de batterie de voiture Acide-Plomb (cf. annexe 3) et on peut voir que cette charge se rapproche de la charge de type 2 états. On peut voir des paliers qui montrent la charge de chaque cellule de la batterie. La batterie a été chargée de 1,45V jusque 14,1V. Elle est dorénavant utilisable au maximum de sa capacité.

Tension de la batterie ( U ) :	Etat de la batterie :
> 12,4 V :	Bon état
12,1 V < U < 12,4 V :	Recharge conseillée, utilisable
11 V < U < 12,1 V :	Recharge conseillée, ne pas l'utiliser (sauf si le chargeur peut couvrir la recharge de la batterie et la consommation des utilisations).
< 11 V :	Non utilisable



Montage expérimentale de décharge

### 3.3.2 La décharge

#### 3.3.2.1 Composition d'une batterie au plomb

Une batterie au plomb est un générateur électrique qui utilise les propriétés électrochimiques du couple oxydo-réducteur peroxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) – plomb, en solution aqueuse d'acide sulfurique.



Une batterie au plomb est constituée de plusieurs accumulateurs. Chaque accumulateur est composé d'un ensemble de couples d'électrodes positives et négatives montés en parallèle, au milieu de chaque couple est placé un séparateur.

- **Électrodes positives**

Les électrodes positives sont 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  $\text{PbO}_2$  (matériau actif aux électrodes positives). Les éléments d'alliage permettent d'améliorer les propriétés mécaniques des grilles et ont une influence sur les performances des batteries.

- **Électrodes négatives**

Les électrodes négatives comparables aux grilles positives, sont remplies de plomb métallique très poreux (matériau actif aux électrodes négatives) : on parle d'éponge de plomb métallique.

Les électrodes sont souvent appelées « plaques » en raison de leur forme.

- **Séparateurs**

Les séparateurs sont généralement des feuilles rectangulaires, intercalées entre les plaques positives et les plaques négatives, et qui doivent posséder des qualités remarquables :

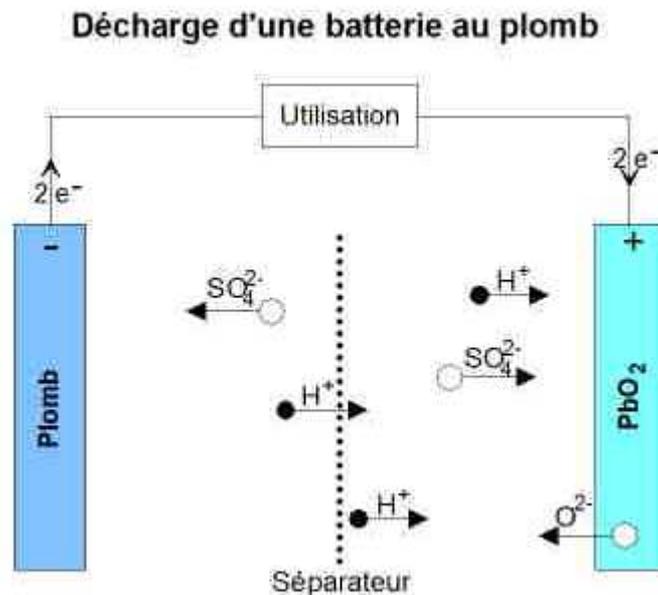
- isolant électrique parfait
- très grande perméabilité aux ions porteurs de charges électriques
- barrière pour les particules de matières
- porosité élevée
- excellente tenue à l'acide sulfurique

Les séparateurs sont le plus souvent constitués par un feutre de fibres cellulosiques protégées par une résine ou encore par du chlorure de polyvinyle fritté ou des feutres en fibre de verre.

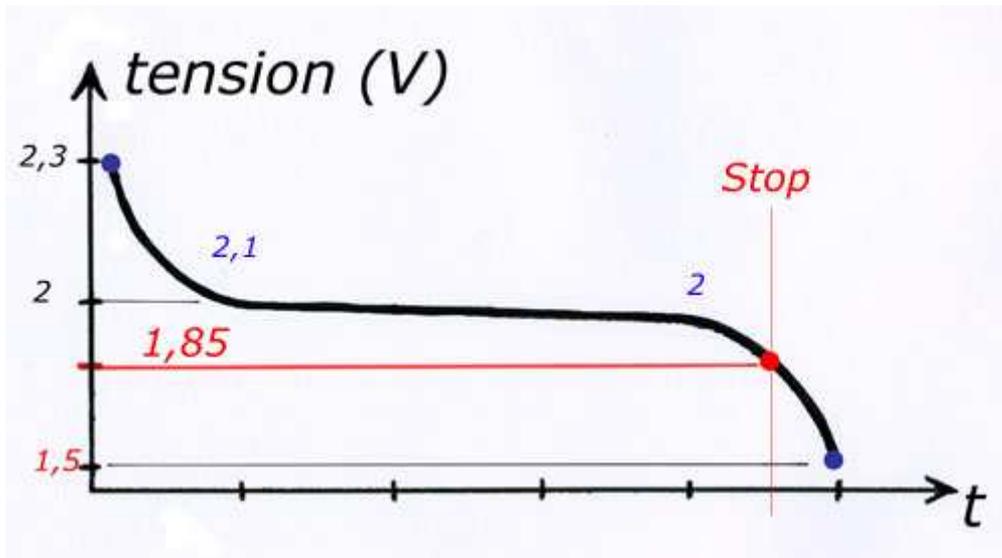
- **Électrolyte**

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

### 3.3.2.2 La décharge



Lors de la décharge, les deux polarités se sulfatent, l'électrolyte est consommé (les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  vont sur les électrodes). L'oxygène libéré par l'électrode positive s'unit aux ions  $\text{H}^+$  en solution pour former de l'eau. Si la décharge est totale, l'électrolyte ne sera plus composé que d'eau distillée.



**Courbe de décharge d'une batterie au plomb**

Pendant la phase de décharge, la tension va rester assez constante puis va baisser rapidement en fin de décharge. Si le circuit électrique n'est pas ouvert, la tension va tendre rapidement vers zéro en même temps que des processus chimiques complexes vont conduire à une destruction des électrodes de la batterie.

Pour conserver une batterie en bon état, il est impératif d'arrêter la décharge quand la tension par élément **arrive à 1,85 V**.

Une batterie se décharge lentement même si on ne s'en sert pas : c'est l'autodécharge.

Le taux d'autodécharge dépend principalement du type d'alliage qui est utilisé pour les grilles : le taux de décharge est particulièrement élevé pour les alliages Pb-Sb où il atteint 5% par mois pour des batteries neuves à 25°C.

Le taux d'autodécharge augmente rapidement avec la température et quand la batterie vieillit : il peut atteindre 1% par jour pour une batterie Pb-Sb en fin de vie.

### **3.3.2.3 Les différents phénomènes de dégradation d'une batterie au plomb**

- **La profondeur de décharge et la durée de vie des batteries**

La profondeur de décharge est la quantité d'énergie qui a été déchargée de la batterie. Elle est donnée en pourcentage de sa capacité. Une profondeur de décharge de 80% indique une décharge profonde (la capacité d'une batterie est la quantité totale d'électricité qu'une batterie peut fournir après avoir été complètement chargée. Elle s'exprime en Ampère/Heure (Ah).

Une batterie ne doit pas subir de décharges profondes car sa durée de vie diminue rapidement avec la profondeur moyenne de décharge. En effet, quand une batterie est fortement déchargée, des phénomènes « nocifs » comme la sulfatation, le gel et la stratification de l'électrolyte se produisent plus rapidement que lorsque la profondeur de décharge est plus faible. Ces phénomènes seront abordés plus loin.

- **Le courant de décharge**

Pendant la décharge, la tension  $E$  aux bornes de la batterie est :

$$E = U - r I$$

$U$ , est la force électromotrice à circuit ouvert, soit 2.10 V

$r$ , la résistance interne de l'accumulateur

$I$ , le courant de décharge.

Au cours de la décharge,  $r$  augmente par suite de la diminution de la concentration de l'électrolyte dans les pores des électrodes. On a donc une chute progressive de la tension  $E$ , chute d'autant plus rapide que  $I$  est élevé : la capacité d'une batterie diminue d'autant plus que la décharge est rapide.

Par conséquent, le courant de décharge ne doit pas être trop fort. Une batterie ne devrait pas être déchargée en moins de dix heures.

**NB** : Remarquons que la tension de 1,8V correspond à des profondeurs de décharge très différentes selon que la décharge est lente ou rapide : pour une même tension, la batterie est en fait beaucoup plus déchargée avec une décharge lente.

- **La Sulfatation**

Durant la décharge, des cristaux de sulfate de plomb ( $PbSO_4$ ) se forment sur les électrodes positives et négatives. Si la batterie reste longtemps déchargée, ces cristaux de sulfate de plomb grossissent et coalescent. Ils peuvent alors déformer les électrodes et provoqués des courts-circuits en perforant les séparateurs.

Si la batterie reste déchargée trop longtemps, la transformation des matériaux actifs ( $Pb$  et  $PbO_2$ ) en sulfate peut devenir irréversible, ce qui réduit la capacité effective de la batterie. De plus, les sulfates augmentent la résistance interne des batteries car ils ne sont pas de bons conducteurs électriques.

L'occurrence de la sulfatation dépend :

- du taux de décharge
- du temps de maintien de la batterie sous un taux de décharge donné. L'influence de ces deux derniers paramètres est représentée sur le diagramme suivant.
- du type de batterie plomb/acide, en particulier des alliages de plomb utilisés.

## 4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet nous a permis d'enrichir nos connaissances dans plusieurs domaines.

Tout d'abord ce projet a été enrichissant évidemment sur un point de vue scientifique et technique. En effet nous avons étudié les différents types de batteries et déterminé leurs caractéristiques et leurs usages. Nous avons examiné, théoriquement et pratiquement, les phases de charge et décharge d'une batterie d'automobile et de moto. Et enfin nous nous sommes intéressés au fonctionnement d'un chargeur de batterie. De plus, ce projet a été l'occasion d'améliorer nos capacités de recherches d'informations sur internet et dans les livres.

Ensuite, l'apport de ce projet a aussi été sur notable sur le plan humain. Il est clair que savoir travailler en groupe est indispensable pour un ingénieur et ce projet nous a permis de développer nos capacités de gestion de projet et de travail à plusieurs. L'autonomie laissée au groupe est aussi un élément appréciable même si la présence d'un enseignant référant reste importante pour guider le projet.

Enfin pour revenir a un point plus scientifique, les perspectives pour la poursuite de ce projet sont nombreuses. Il nous a été possible de faire que quelques mesures sur un seul type de batterie. Une étude pratique de plusieurs de types de batteries aurait été intéressante, notamment de nouvelles technologies telles que les condensateurs. De plus les technologies de stockage de l'électricité évoluent rapidement du fait du besoin de les rendre plus performantes, propres et économiques.

## 5 BIBLIOGRAPHIE

[1] Alfred Soulier, "Les Accumulateurs électriques 6ème édition", *Paris Librairie Garnier Frères*, Janvier 1947.

[2] lien internet : <http://www.akkinfo.ch/index.php?seite=akkutypen&langue=fr> (valide à la date du 23/04/2009).

[3] lien internet : <http://fr.wikibooks.org/wiki/Batterie-autre> (valide à la date du 23/04/2009).

[4] lien internet : <http://robroller.free.fr/chargeur.htm> (valide à la date du 05/06/2009).

[5] lien internet : <http://pilesadomicile.unblog.fr/les-differentes-types-de-batteries/> (valide à la date du 05/06/2009).

[6] lien internet : <http://www.velo-electrique.com/Pages/batteries.htm> (valide à la date du 05/06/2009).

[7] lien internet : [http://www.clean-auto.com/rubrique.php3?id\\_rubrique=516](http://www.clean-auto.com/rubrique.php3?id_rubrique=516) (valide à la date du 23/04/2009).

[8] lien internet : <http://www.avem.fr/index.php?page=batterie#pb> (valide à la date du 05/06/2009).

[9] lien internet : <http://www.ni-cd.net/accusphp/chargeur/realisation/plomb.php> (valide à la date du 05/06/2009).

[10] lien internet : <http://www.clubsnautiques.com/batteries/> (valide à la date du 05/06/2009).

[11] lien internet : <http://serge.bertorello.free.fr/chargeur/chargeur.html> construire le chargeur de batterie au plomb (valide à la date du 05/06/2009).

[12] lien internet : <http://www.bls.fr/amatech/electronique/Chargeur/Chargeur.html> (valide à la date du 23/04/2009).

[13] lien internet : [http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_ion\\_battery#Charging\\_procedure](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_ion_battery#Charging_procedure) (valide à la date du 23/04/2009).

[14] lien internet : <http://vol.libre38.free.fr/technique/TrucsetAstuces/Accus/Chargement%20des%20Batteries.pdf> (valide à la date du 23/04/2009).

[15] lien internet : <http://www.commentcamarche.net/forum/affich-594324-batteries-ni-cd-li-mh-et-li-ion-de-portables> (valide à la date du 07/05/2009).

[16] lien internet : <http://www.batteryuniversity.com/partone-12.htm> (valide à la date du 07/05/2009).

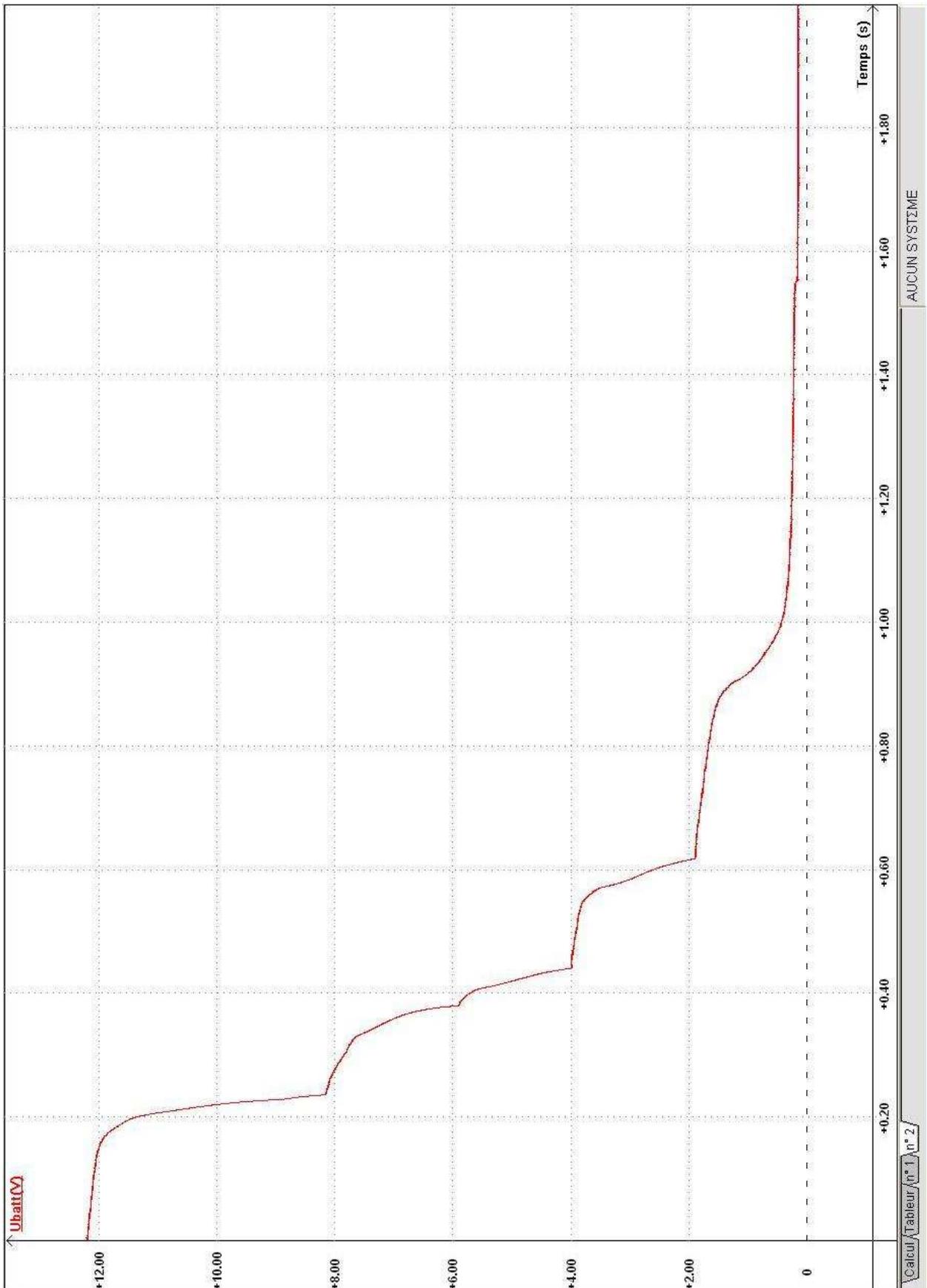
[17] lien internet : <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3109> (valide à la date du 07/05/2009).

## **6 ANNEXES**

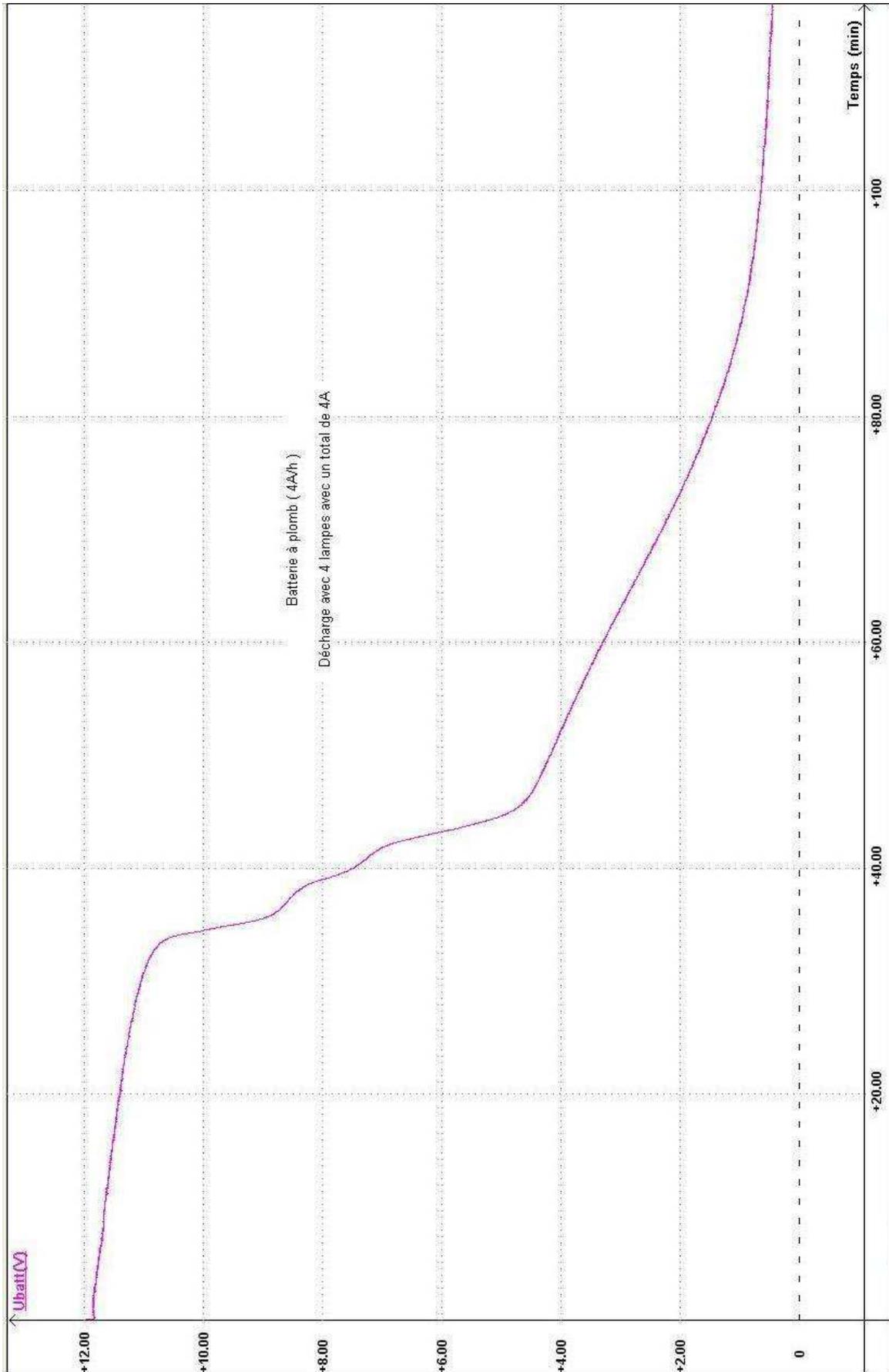
### **6.1 Courbes expérimentales**

- Courbe expérimentale de décharge d'une batterie de voiture
- Courbe expérimentale de décharge d'une batterie de scooter
- Courbe expérimentale de charge d'une batterie de voiture

### 6.1.1 Courbe expérimentale de décharge d'une batterie de voiture



### 6.1.2 Courbe expérimentale de décharge d'une batterie de scooter



### 6.1.3 Courbe expérimentale de charge d'une batterie de voiture

