

## Table des matières

Résumé .....	ii
Avant-propos .....	iv
Table des matières .....	v
Liste des tableaux .....	viii
Liste des figures.....	ix
Liste des symboles.....	xii
Chapitre 1 - Introduction .....	1
1.1 Problématique de recherche.....	2
1.2 Objectif .....	3
1.3 Méthodologie .....	4
Chapitre 2 - État de la recherche sur la détermination de l'état de charge des batteries d'accumulateur .....	7
Chapitre 3 - Batteries d'accumulateur .....	13
3.1 Fonctions des batteries.....	13
3.2 Caractéristiques des batteries.....	13
3.3 Exemple de dimensionnement.....	15
3.4 Types de batteries .....	16

3.5	Recyclage .....	18
3.6	Normes et guides.....	18
Chapitre 4 - Modélisation des batteries .....		25
4.1	Courbe de décharge.....	25
4.2	Modèle physico-chimique.....	32
4.3	Modèle Électrique .....	37
4.4	Utilisation des modèles .....	42
Chapitre 5 - Méthode à deux impulsions.....		52
5.1	Méthode à deux impulsions .....	52
5.2	Montage réalisé.....	59
5.3	Fonctionnement.....	61
5.4	Travail Préliminaire .....	62
Chapitre 6 - Étude expérimentale .....		72
6.1	Résultats préliminaires.....	72
6.2	Résultats avec 3 batteries 200Ah .....	74
6.2.1	Analyse préliminaire .....	76
6.3	Résultats avec batteries individuelles .....	77
6.3.1	Analyse préliminaire .....	84
Chapitre 7 - Analyses et discussions .....		87

7.1 Hypothèses .....	87
7.2 Facilité d'application .....	88
7.3 Rapidité .....	88
7.4 Précision.....	90
Chapitre 8 - Conclusion.....	93
Bibliographie et références.....	95

## Liste des tableaux

Tableau 5.1 Liste du matériel expérimental .....	61
Tableau 5.2 Compilation des résultats de $\Delta V_2$ en fonction de $C_R$ .....	65
Table 6.1 Résultats obtenus par W.G. Hurley et C.K. Lee.....	72
Table 6.2 Synthèse des équations .....	84
Table 6.3 Calculs des écarts des valeurs des pentes et ordonnées pour les équations 4.10.....	85
Table 6.4 Calculs des écarts des valeurs de pentes et ordonnées pour les équations 4.12.....	86

## Liste des figures

Figure 3.1 Types de batteries en fonction des caractéristiques [9].....	16
Figure 4.1 Fiche technique d'une batterie plomb acide typique .....	27
Figure 4.2 Courbe de décharge typique [10] .....	28
Figure 4.3 Exemple de système de commande de batteries. ....	31
Figure 4.4 Modèle physico-chimique d'une batterie plomb acide typique.....	32
Figure 4.5 Modèle de Randle .....	39
Figure 4.6 Modèle de batterie proposé par Kroeze et Krein [13].....	40
Figure 4.7 Modèle de batterie proposé par Zhai et al. [14] .....	41
Figure 4.8 Modèle de batterie proposé par Yuan et al. [15].....	41
Figure 4.9 Méthode de décharge à CC. ....	44
Figure 4.10 Méthode de conductance à ca. ....	45
Figure 4.11 Méthode Spectro <sup>TM</sup> . ....	46
Figure 4.12 Capacité de Réserve (RC) de 24 batteries avec une matrice spécifique par modèle.....	47
Figure 4.13 Intensité à froid (CCA) en fonction de la Capacité de réserve (RC).....	48
Figure 5.1 Méthode à deux impulsions .....	53
Figure 5.2 Diagramme du protocole des essais. ....	58
Figure 5.3 Montage expérimentale.....	60
Figure 5.4 Décharge complète, 3 batteries 200Ah .....	67
Figure 5.5 Décharge complète, batterie7-1.....	67
Figure 5.6 Décharge complète, batterie7-2.....	68
Figure 5.7 Décharge complète, batterie7-3.....	68

Figure 5.8 Décharge complète, batterie 7-4.....	68
Figure 5.9 Décharge cyclique, 50A, impulsion 10s et stabilisation de 30s.....	70
Figure 5.10 Décharge cyclique, 50A, impulsion 10s-30s, 180s-30s.....	70
Figure 5.11 Décharge cyclique sur les Batteries 200-1, -2 et -3, 50A – 10s-30s, 10s-30s, 180s-30s.....	71
Figure 6.1 Reproduction de la Figure 3 de la référence [4].....	73
Figure 6.2 Reproduction de la Figure 4 de la référence [4].....	73
Figure 6.3 Décharge cyclique 10-180.....	74
Figure 6.4 Décharge cyclique 10-10-60.....	74
Figure 6.5 Décharge cyclique 10-10.....	75
Figure 6.6 Mise en graphique de l'équation 4.10, 3 batteries, petite impulsion.....	75
Figure 6.7 Mise en graphique de l'équation 4.10, 3 batteries, grande impulsion.....	76
Figure 6.8 Mise en graphique de l'équation 4.12, 3 batteries.....	76
Figure 6.9 Mise en graphique de l'équation 4.10, batterie 200-1.....	78
Figure 6.10 Mise en graphique de l'équation 4.10, batterie 200-2.....	78
Figure 6.11 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 200-3.....	78
Figure 6.12 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-1.....	79
Figure 6.13 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-2.....	79
Figure 6.14 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-3.....	80
Figure 6.15 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-4.....	80
Figure 6.16 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 200-1.....	81
Figure 6.17 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 200-2.....	81
Figure 6.18 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 200-3.....	81
Figure 6.19 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-1.....	82
Figure 6.20 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-2.....	82
Figure 6.21 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-3.....	83

Figure 6.22 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-4 ..... 83

Rapport-Gratuit.com

## Liste des symboles

- $AHC_{Nom}$  : Capacité nominale d'une batterie (ampère-heure)
- $C_R$  : Intensité de charge (Charge rate)
- $C_N$  : Courant de décharge continu nécessaire pour décharger une batterie sur une période de N heures
- EMF: Force électromotrice
- $EMF_{Min}$  : Force électromotrice à un état de charge de 0% (volt)
- $V_{EMF}$  : Tension de la force électromotrice interne selon le modèle de Thevenin de la batterie (volt)
- $V_{Max}$  : Tension maximale en circuit ouvert (volt)
- $V_{I_{max}}$  : Tension maximale en circuit ouvert atteinte après l'application de première impulsion et avant l'application de la deuxième impulsion (volt)
- $\Delta V_2$  : Écart de tension entre la tension maximale atteinte en circuit ouvert après l'application de deuxième impulsion et la tension minimale atteinte à la fin de l'application de la deuxième impulsion (volt)
- $R\Omega$ : Résistance ohmique (ohm)
- $R_{ct}$ : Résistance de transfert de charge, modèle de Thevenin d'une batterie (ohm)
- $C_{ct}$ : Capacitance de transfert de charge, modèle de Thevenin d'une batterie (farad)
- $\alpha$  et  $\beta$  : Paramètres empiriques de la pente et ordonnée des graphiques  $V_{I_{max}}$  vs SOC

$\delta$ et $\gamma$ :	Paramètres empiriques de la pente et ordonnée des graphiques $A_{cap}$ vs $\Delta V^2$
SOC :	State of Charge, état de charge (pourcentage)
SOH :	State of Health, état de santé (pourcentage)
CC :	Courant constant
CA :	Courant alternatif
Ri :	Résistance interne de la batterie (ohm)
C <sub>p</sub> :	Capacitance de polarisation (farad)
E <sub>PC</sub> :	Chute de tension due à la capacitance de polarisation (volt)
V <sub>OC</sub> :	Tension à circuit ouvert (volt)
RB :	Résistance de la borne de batterie (ohm)
EtB :	Tension à la borne de batterie (volt)
Ci :	Capacitance de rupture de la borne (farad)
ItB :	Courant de décharge de la batterie (ampères)
K :	Constante de batterie
RC:	Capacité de réserve (Reserve capacity)
CCA :	Intensité de démarrage à froid (Cold cranking amps)

## Chapitre 1 - Introduction

Les batteries d'accumulateur de type plomb-acide sont très utilisées dans les applications de type auto producteur. Malgré leur faible densité d'énergie, elles sont peu dispendieuses, fiables et facilement disponibles. En plus, elles se recyclent facilement et totalement. D'après une étude d'Environnement Canada en 2009 [1], 99.2% des batteries Plomb Acide sont recyclées chaque année.

Un système auto producteur peut comprendre une ou plusieurs sources d'énergie. Habituellement on y retrouve des panneaux solaires et/ou une éolienne. La particularité de ces systèmes est que l'apport d'énergie ainsi que les charges varient constamment et de manière imprévisible. Cela contraste avec les applications en télécommunications où la consommation des charges est prévisible, voir quasi constante. Dans le cas des voitures électriques la consommation peut être considérée comme quasi cyclique et la charge prédictible. La gestion d'une installation auto producteur est donc plus difficile à réaliser que celles des télécommunications et voitures électriques. Une commande électronique est donc de mise.

Le composant central d'un système auto producteur est la batterie d'accumulateur. C'est là où est stocké le surplus instantané de production d'énergie. Ce surplus servira par la suite de source lorsque les sources habituelles ne suffissent plus à la demande. Étant donné l'importance de leur rôle dans la continuité de fonctionnement des systèmes qu'elles supportent, l'état des batteries d'accumulateur devient une information importante dans la

gestion du système. Il est reconnu, dans l'état de l'art [2], [3], [5], que les batteries d'accumulateur sont bien caractérisées lorsque nous pouvons connaître, à un moment donné, les paramètres suivants :

- La capacité en ampère-heures (AHC - Amp Hour Capacity)
- L'état de charge (SOC – State of Charge)
- L'état de santé (SOH – State of Health)

### **1.1 Problématique de recherche**

Les plus récents développements pour contrer les changements climatiques ont accentué les recherches en énergies renouvelables. Parmi les pistes les plus intéressantes, l'énergie provenant du soleil et du vent semble avoir une acceptation générale comme étant renouvelable, efficace, écologique et durable.

La conception d'un tel système d'énergie alternative tient compte de la charge à alimenter, mais aussi de la capacité des apports d'énergie ainsi que leur disponibilité avec le temps. Dans une résidence privée par exemple, la charge est grandement variable avec le temps. De plus, l'apport de sources d'énergie solaire et éolienne fluctue selon les conditions atmosphériques. Les accumulateurs permettent de stocker l'énergie lorsque la demande est plus faible et de fournir l'énergie au moment opportun. Ils sont donc une partie essentielle des systèmes d'énergie solaire et éolienne et nous les retrouvons d'emblée dans la conception de systèmes d'énergie alternative.

Dans la majorité des applications un contrôle précis de plusieurs facteurs est nécessaire afin d'augmenter l'efficacité du système. Parmi ces facteurs, l'état de charge des accumulateurs est un facteur important. Connaissant l'état de charge et les besoins

énergétiques ponctuels, un système de commande pourrait effectuer un délestage de certaines charges pour assurer l'alimentation des charges prioritaires. Les besoins particuliers seront alors toujours satisfaits.

Il est donc primordial dans un tel système de connaître l'état de charge des accumulateurs. Cependant, la détermination rapide et avec une bonne précision de l'état de charge des batteries reste une tâche difficile. La référence [2] présente plusieurs méthodes pour déterminer l'état de charge des accumulateurs. L'efficacité de chaque méthode varie avec le type d'accumulateur ainsi que le type de contrôle utilisé. Une manière innovatrice et pertinente à l'application de résidence privée a été proposée dans l'article [3] par Coleman, Hurley and Lee. Cette méthode promet de réaliser la mesure de l'état de charge en moins de 5 minutes et avec une précision de moins de 3%.

## **1.2 Objectif**

Ce mémoire propose une méthode de détermination de l'état de charge et de l'état de santé de batteries de type plomb-acide dans des applications de systèmes d'énergies auto producteur et des véhicules électriques. L'objectif ultime étant de réaliser une méthode rapide et assez précise de détermination de l'état de charge, de la capacité ampérométrique et de l'état de santé des batteries. La méthode proposée devrait se réaliser en moins de 5 minutes et perturber le moins possible le fonctionnement de l'application.

L'étude est basée sur une méthode établie par le professeur W.G. Hurley du National University of Ireland, Galway [4].

### 1.3 Méthodologie

La méthode propose d'appliquer une série de deux impulsions en courant, sur une courte période, sur une batterie tout en notant les variations de la tension aux bornes de cette même batterie. Ces décharges sont alors représentées en forme d'impulsion de courant. Une analyse des tensions permet ensuite de mesurer les tensions maximales et minimales causées par les impulsions durant cette période. L'expérimentation a été réalisée sur trois batteries identiques, soit le même modèle provenant d'un même manufacturier. D'abord, des séries de mesures sont prises sur chaque batterie, individuellement, ensuite des séries de mesures sont prises sur un ensemble de ces trois batteries reliées en série.

Une expérimentation préliminaire a permis de déterminer le niveau de courant approprié pour le type de batterie utilisé. Les batteries ont donc été soumises à des impulsions de décharges de courant de diverses amplitudes. On y notait les différences entre les tensions maximales, avant l'impulsion, et minimal à la fin de l'impulsion. Le compromis recherché est celui de réduire l'amplitude des impulsions tout en assurant une différence de tension assez grande.

Par la suite, les batteries ont été soumises à des combinaisons de deux impulsions de durées différentes et séparées par des temps de repos différents. Cela ressemble à une variation sur différents rapports cycliques. On y détermine le rapport cyclique optimal, c'est-à-dire la durée des impulsions pour avoir des effets mesurables et des temps de temporisation minimales entre les deux impulsions.

Les premiers essais sont effectués sur des batteries plus ou moins bien chargées. Les résultats étant de déterminer des valeurs empiriques approximatives. Par la suite, les

impulsions d'amplitude et de durées fixées, sont appliquées sur les batteries jusqu'à épuisement.

Les données recueillies, sous forme de chiffrier, sont ensuite analysés afin de déterminer les paramètres requis pour la mise en graphique, et éventuellement la mise en formule, des résultats pertinents. Il s'agit en fait des tensions minimales et maximales induites par les décharges. Cette analyse s'est avérée assez ardue car il n'y a pas de fonction ou autre moyen rapide de retirer ces informations directement du chiffrier.

Deux relations quasi-linéaires sont obtenues suite à cette analyse. La première est celle entre la tension maximale après la première impulsion et l'état de charge, soit la capacité résiduelle de la charge contenue dans la batterie. La deuxième est entre la différence des tensions minimales et maximales induites par la deuxième impulsion et l'amplitude de courant requise pour obtenir cette différence.

Étant donné la quasi-linéarité de ces relations, il est possible de déterminer l'état de charge et l'état de santé d'une batterie de même type à partir de mesures de la différence de tension obtenue en appliquant deux impulsions successives à une batterie similaire de charge et santé inconnue.

Le mémoire comprend six chapitres. Le premier chapitre décrit l'environnement, la problématique et l'objectif visé. Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse d'une batterie d'accumulateur. On y verra ses fonctions, caractéristiques et types les plus communs. On finira par discuter de son recyclage en fin de vie.

Le troisième chapitre présentera les efforts de modélisation des batteries. Nous cherchons à établir des modèles qui permettront de mieux utiliser les outils de simulation et

de calculs afin de prédire les caractéristiques des batteries. Ces modèles servent non seulement à simplifier l'analyse du phénomène, mais aussi à réduire nos efforts de calculs.

Les modèles les plus connus et les plus utilisés, se regroupent en modèles empirique, électrique et physico-chimique. Ce chapitre servira aussi à rendre compte de l'état de l'art en matière de modélisation en général et de détermination de l'état de charge et de santé des batteries. En fait, nous présenterons les recherches les plus récentes dans le domaine de chaque type de modèle.

Le quatrième chapitre donne un résumé des normes et guides appliqués au domaine de la fabrication, utilisation, caractérisation et disposition des batteries.

Le chapitre 5 présentera en détail la méthode ainsi que les expériences réalisées. On y retrouve une description narrative de la méthode et une présentation sous forme de logigramme. Le montage expérimental, son fonctionnement et l'interprétation des résultats sont aussi présentés. Les résultats obtenus, ainsi que l'analyse sommaire de ceux-ci, sont présentés dans le chapitre 6.

Le chapitre 7 fera une analyse plus détaillée des résultats en rapport avec les objectifs. Le mémoire se terminera avec une conclusion et des recommandations.

## **Chapitre 2 - État de la recherche sur la détermination de l'état de charge des batteries d'accumulateur**

Plusieurs articles traitent de l'évaluation de la capacité des batteries d'accumulateur. En fait, l'utilisation des batteries est chose commune dans plusieurs domaines et elles sont toutes sujettes au même problème d'évaluation de la capacité.

La raison principale qui justifie les recherches continues est que l'évaluation précise de la capacité résiduelle est nécessaire dans l'opération de tous les jours des systèmes. De manière simpliste, elle permet de connaître à quel moment le système ne pourrait continuer de fonctionner. Encore mieux, elle aide à définir à quel moment on doit assurer la recharge. Dans une vision à plus long terme, elle permet d'évaluer l'état de santé de la batterie et à quel moment on doit considérer que sa vie utile est terminée.

L'état de charge est une entité dynamique qui dépend de plusieurs variables qui sont elles-mêmes dynamiques. Une batterie fonctionne grâce à une réaction chimique réversible dont les vitesses de réaction sont déterminées par les concentrations des liquides, porosité des bornes, la température ambiante, etc.

Dans leur article de 1998, Kawamura et Yanagihara [2] proposent une méthode basée sur l'équivalent électrique. Ils ont développé une méthode qui combine deux approches existantes, c'est à dire la variation de la résistance interne et de la force électromotrice d'une batterie plomb-acide avec la charge résiduelle. Les approches précédentes considéraient ces deux paramètres séparément. À partir d'une série d'expériences, ils peuvent établir une

relation quasi linéaire entre la capacité résiduelle  $C_n$ , la force électromotrice  $V_n$ , la résistance interne  $r_n$  et la résistance des connexions  $R'$  de la batterie. Cette approche est décrite par l'équation:

$$C_n = AV_n + Br_n + GR'_n + cte \quad (2.1)$$

Les auteurs ont réalisé une série d'expériences pour déterminer les valeurs des coefficients A, B, G et cte. La précision obtenue est de  $\pm 10\%$ . Même si cette méthode est valable, la précision est insuffisante pour permettre son utilisation comme gauge dans les applications de véhicules électriques. De plus, elle requière une importante accumulation de données expérimentales et un grand nombre de calculs pour être pratique.

Le modèle chimique utilisé par Caumont, Le Moigne, Rombaut Muneret et Lenain [5] a l'avantage de tenir compte du dynamisme des paramètres des batteries. En fait, les processus chimiques de charge et de décharge varient avec l'état de charge de la batterie. Dans les faits, les concentrations des ions et leurs distributions autour des borniers dépendent de l'état de charge de la batterie. L'évaluation de ce dernier est donc un processus dynamique en soit.

Une version modifiée de comptage par Coulomb est utilisée en ce sens que des coefficients sont attribués à chaque intensité de courant. Par exemple, si une batterie est déchargée à 100A, elle aura moins de capacité que si elle est déchargée à 20A. L'introduction d'une série de coefficients permet de tenir compte de ce phénomène bien connu. Leurs recherches utilisent les courants de charge et de décharge comme indicateur de l'état de la batterie. Ils ont entrepris une série de mesures sur une batterie de voiture électrique lors de déplacements réels. Une analyse statistique est nécessaire pour déterminer

les coefficients. Dans leurs études, ils ont évalué des coefficients pour 4 intensités de courant sur une seule batterie. Cependant, ils n'ont pas été en mesure de tenir compte du vieillissement de la batterie. Pour donner un outil valable, il faudrait déterminer des coefficients pour une dizaine d'intensités de courant. Cela demanderait une expérimentation plus élaborée, mais une fois réalisé, elle devrait être valable pour toutes les batteries de même modèle. Il restera toujours à intégrer le vieillissement.

En 2001, Sauradip, Sinha et Muthakumar [6] proposent de déterminer l'état de charge des batteries en intégrant un système d'apprentissage basé sur des calculs effectués avec la Radial Basis Function. Les auteurs effectuent une série d'évaluations à partir de données initiales fournies par le fabricant. À chaque série de mesures, le comptage par Coulomb sert de référence pour modifier les coefficients obtenus par les Radial Basis Functions. Chaque série d'expériences a donc pour objectif de réduire l'erreur à un niveau acceptable.

Cette approche est assez complexe du point de vue mathématique. Par contre, ses résultats sont indéniables. Son défaut réside dans le temps requis pour réaliser les expériences et obtenir des coefficients appropriés. Il faut aussi tenir compte que cette méthode dépend en partie de la méthode de comptage par Coulombs qui est assez imprécise et ne tient pas compte des variations en température et état de santé des batteries.

Les auteurs Zhu, Coleman et Hurley [3] ont réalisé un excellent résumé de l'état de la recherche dans leur article publié en 2004. On y présente la méthode de Kawamura et Yanagihara [2] ainsi que l'existence de méthodes de spectrographie en impédances, réseaux neuronaux, logique floue, etc. La méthode exposée est le précurseur de leur proposition de méthode à deux impulsions repris dans ce mémoire.

Ils ont réalisé que le comptage par Coulomb peut être intéressant pour des états de charge de faible ou moyenne capacité. D'un autre côté, l'évaluation de la force électromotrice est une bonne méthode mais qui ne peut être efficace dans des évaluations sous charge. À partir de leurs observations, ils ont déterminé que l'utilisation des batteries pouvait se diviser en 7 états différents : initial, décharge à courant variable, décharge à courant constant, pause dans la décharge, charge à courant variable, charge à courant constant et pause dans la charge.

L'état de charge des batteries est évalué selon l'une ou l'autre des méthodes proposées; comptage par Coulomb ou algorithme de la force électromotrice (FÉM), selon l'état d'activité de la batterie. Si la méthode de comptage par Coulomb est bien connue, celle proposée pour l'algorithme EMF nécessite d'être présentée. En fait, elle nécessite l'évaluation de plusieurs paramètres, dont la résistance interne, EMF et constantes de temps de récupération de tension après l'application d'impulsions de courant de décharge. Cette méthode, comme bien d'autres, nécessite un éventail d'expériences et de calculs afin de déterminer des coefficients à remettre dans une ou plusieurs formules.

Les réseaux neuroniques ont été utilisés par Morita, Yamamoto, Kakogawa et Mizuno [7] en 2007. Ils ont réalisé que les approches précédentes ne pouvaient donner de bons résultats pour de batteries vieillissantes. De plus, les mesures sur les batteries n'étaient effectuées qu'avec un seul détecteur, habituellement la tension aux bornes des batteries. En introduisant plus de détecteurs, et avec la puissance analytique des réseaux neuroniques, ils espéraient améliorer la précision dans leurs mesures et par conséquent, la précision de l'évaluation de l'état de charge des batteries.

Comme le résultat de l'analyse par réseaux neuroniques est la tension, ils ont développé un algorithme qui combine des mesures de tension, courant et puissance afin d'évaluer la tension aux bornes des batteries, en charge, comme indicateur de l'état de charge. Se basant sur une série de batteries d'état de santé différent, ils ont laissé les réseaux neuroniques apprendre à reconnaître l'état de charge dans diverses conditions d'opération. C'est à dire diverses intensités de courant de charge et décharge. En finale, ils obtiennent des précisions de l'ordre de 10%.

L'avantage de cette méthode est qu'elle s'applique à toutes les technologies de batteries. En fait, le réseau neuronique n'est pas spécifiquement adapté à une technologie de batterie et peut être utilisé dans un système d'évaluation en continu. Son application pratique se limite seulement par la complexité de l'électronique et le nombre de détecteurs requis pour obtenir la précision voulue.

Dans leur article de 2007, Moo, Ng, Chen et Hsieh [8] tiennent compte de la variation de la tension aux bornes de la batterie avec l'intensité du courant de décharge. En fait, ils remarquent que la tension d'équilibre de la batterie en circuit ouvert, demeure essentiellement stable si l'on permet à la batterie de se stabiliser assez longtemps. Ils appliquent une série de décharges impulsionnelles d'intensité de courant différentes et laissent la batterie se stabiliser. Après 40 minutes, la tension à circuit ouvert de la batterie revient au même point, et ce malgré l'intensité du courant.

Ils remarquent aussi que la tension en circuit ouvert, après stabilisation a une relation linéaire avec l'état de charge de la batterie. Cette remarque est importante car elle donne un moyen assez facile de valider l'état de charge d'une batterie. En appliquant une intensité de

décharge impulsionnelle de courte durée, et en attendant la stabilisation, on peut déterminer l'état de charge avec une bonne précision. Ils réclament une précision de 5% lorsque la stabilisation est d'au moins 10 minutes.

Cette méthode exige de connaître l'intensité du courant au moment de l'essai. Dans une évaluation continue de l'état de charge, cela n'est pas toujours connu car nous ne contrôlons pas l'opération du dispositif ou véhicule en question. De plus, il n'est pas possible, toujours en évaluation continue de prendre plus de 10 minutes pour déterminer l'état de charge.

L'article présente aussi un grand intérêt du point de vue modélisation électrique car leurs résultats intermédiaires donnent des graphiques de la variation des résistances et de la capacitance interne de la batterie. Même sans aboutir à une méthode précise, ces graphiques sont des résultats pertinents et utiles.

Le prochain chapitre se veut un sommaire des aspects pratiques des batteries accumulateurs. On y retrouvera donc un résumé des fonctions que remplissent les batteries, leurs principales caractéristiques ainsi que les normes qui les régissent. Cela a un objectif de familiarisation pour le lecteur avant d'entrer dans les détails des modèles utilisés pour les décrire et analyser.

## Chapitre 3 - Batteries d'accumulateur

### 3.1 Fonctions des batteries

Les batteries d'accumulateur sont une partie essentielle d'une grande variété de systèmes d'énergie. Dans la majorité des cas, les batteries servent de réservoir de stockage d'énergie. Dans un système typique, des sources d'énergie chargent des batteries qui sont branchées aussi aux charges. Lorsque les sources d'énergie sont en production, l'énergie est alors accumulée dans les batteries. Les charges puisent l'énergie directement des batteries lorsque les sources ne sont plus en production.

Dans ce type d'application, il est important de dimensionner les batteries afin que l'énergie accumulée soit suffisante pour alimenter les charges durant la totalité des périodes de non production des sources.

### 3.2 Caractéristiques des batteries

Avant d'entreprendre un exemple de dimensionnement de batteries, il est important de connaître les caractéristiques que nous cherchons à mettre en évidence dans ces modèles.

Ces caractéristiques sont :

**Tension de la batterie** : tension électrique entre les bornes d'un élément ou d'une batterie pendant la décharge.

**Tension en circuit ouvert** : tension électrique aux bornes d'un élément ou d'une batterie quand le courant de décharge est nul.

**Décharge:** opération pendant laquelle un accumulateur fournit du courant à un circuit extérieur par la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique.

**Courant de décharge :** le courant débité par la batterie lors de la décharge.

**Régime de charge :** courant électrique auquel on charge un accumulateur ou une batterie d'accumulateur.

**Cycle d'utilisation :** ensemble d'une décharge et d'une charge ultérieure destinée à rétablir l'accumulateur dans son état initial.

**Capacité de stockage :** quantité d'électricité (charge électrique), généralement exprimée en ampères-heures (Ah), qu'une batterie complètement chargée peut débiter dans des conditions spécifiées.

**Profondeur de décharge :** la quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui peut être retirée d'une batterie sans réduire sa durée de vie.

**État de charge :** la quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui reste accumulée dans la batterie.

**État de santé :** facteur entre la capacité de charge actuelle d'une batterie par rapport à sa capacité initiale de charge. On reconnaît qu'une batterie a atteint sa durée de vie lorsque ce rapport est plus faible que 80%.

**Durée de vie :** durée totale de la vie active d'un élément ou d'une batterie en fonctionnement.

**Température :** Température de l'électrolyte causant la réaction chimique.

**Vie de tablette :** Période de temps entre la fin de la fabrication et la mise en service.

### 3.3 Exemple de dimensionnement

Prenons un système simple d'alimentation d'un site de télécommunications autonome. Dans cet exemple, le site est alimenté par des panneaux solaires de 3kW et une éolienne de 1kW. Nous identifions la charge comme étant de 400W en continu sur 24Vcc.

Considérant que :

- La durée moyenne de production du panneau solaire est un équivalent de 4kWh/jr.
- La durée moyenne de production de l'éolienne est un équivalent de 8kWh/jr.
- Nous avons donc un apport d'énergie moyenne de 12kWh/jr.
- La charge est de 400W en continu donc 9,6kWh/jr.

En théorie, nous avons un surplus d'énergie et le système est autonome.

En pratique, il y aura des périodes où la production des énergies solaire et éolienne sera moindre que la moyenne. Dans le dimensionnement des batteries nous devons estimer cette période. Sans aller plus loin dans les calculs, estimons que la période la plus longue où il n'y aura aucune production d'énergie est de 32 heures.

Les batteries doivent donc être en mesure de fournir cette énergie à la charge, soit 12,8kWh à une tension de 24Vcc, cela représente une réserve de 533Ah.

Le dernier facteur à introduire est la profondeur de décharge. Habituellement elle est de 50% ou 80%. À 50% il faut plus de capacité en réserve (dimensionnement plus grand), mais elles ont une durée de vie plus longue.

Admettons que nous avons choisi 80% de profondeur de charge, alors la capacité de réserve requise pour les batteries est de 667Ah (533Ah/80%).

## Dimensionnement final

Les batteries doivent avoir une capacité de 667Ah à 24Vcc.

### 3.4 Types de batteries

Dans la littérature, il y a une multitude de types de batteries. Dans les faits, il y a moins d'une douzaine de types qui servent au stockage d'énergie pour des capacités de plus de 200Ah.

La figure 3.1, tirée de [9], montre ces types de batteries en fonction de deux caractéristiques importantes : la quantité d'énergie emmagasinée par volume, et la quantité d'énergie emmagasinée par poids.

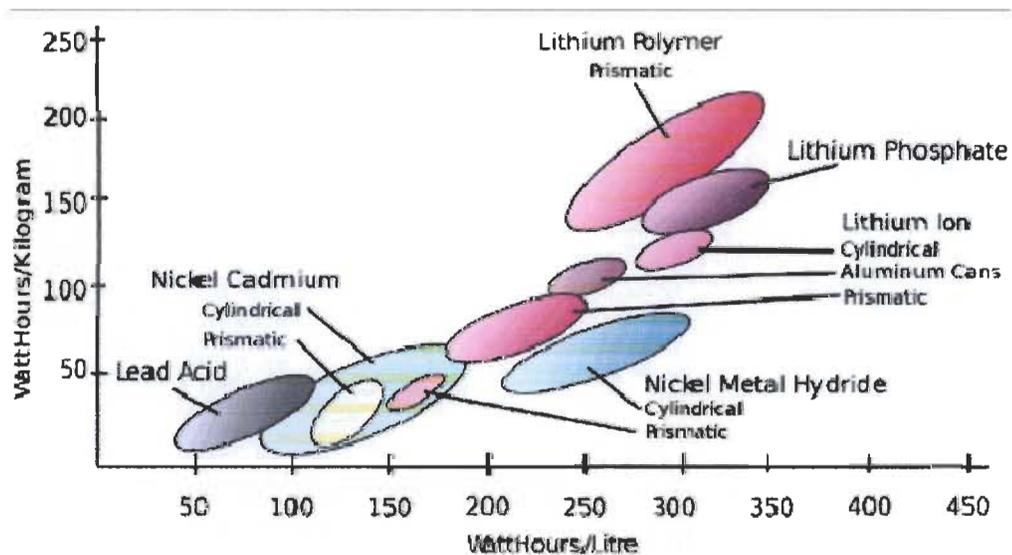


Figure 3.1 Types de batteries en fonction des caractéristiques [9]

Parmi les technologies en production, nous reconnaissons :

- plomb-acide,
- Nickel-Cadmium,
- Alcaline,
- Lithium-Ion, et
- Lithium polymère.

Parmi les technologies en émergence, nous reconnaissons :

- Lithium-Métal,
- Lithium-Ion, (nouvelle génération)
- Lithium polymère, (nouvelle génération)
- Zinc-Air,
- Lithium-Air, et
- Aluminium-Air.

Malgré sa position défavorable, étant la plus lourde et la plus volumineuse, les batteries plomb-acide sont actuellement les plus courantes dans l'industrie. Citons les applications suivantes comme exemples de l'utilisation à grande échelle des batteries plomb-acide;

- Batteries de démarrage de voitures, camions et autres véhicules etc.,
- Batteries d'accumulation de charge dans les sites de télécommunications,
- Batteries de fonctionnement des panneaux d'éclairage d'urgence, et
- Batteries de fonctionnement des systèmes d'alarme.

### 3.5 Recyclage

Deux des caractéristiques importantes pour l'utilisation des batteries à grande échelle sont les coûts cumulés pendant toute leur vie utile et leur capacité à être recyclé. Présentement, les batteries plomb-acide sont peu dispendieuses à l'achat et comparables en frais d'entretien aux autres technologies. De plus, elles sont récupérables à plus de 99%.

« Les batteries au plomb-acide provenant du secteur de l'automobile et d'autres sources ont une valeur appréciable sur le marché et il existe déjà une infrastructure efficace de collecte et de recyclage. Battery Council International a déclaré en 2005 un taux de recyclage combiné des batteries au plomb-acide de 99,2 % pour la période quinquennale 1999-2003 aux États-Unis. » [1].

Selon ce même rapport, il y a eu 16 millions de batteries d'accumulateur de vendues au Canada en 2007 dont 10,5 millions étaient au plomb-acide. Il faut comprendre que cela représente 40% des unités et plus de 209000 tonnes en poids.

### 3.6 Normes et guides

Selon Santé Canada [1], la principale norme concernant les batteries est la norme CEI-60095-1. Cette norme est conforme au Règlement sur les produits chimiques et contenants de consommation (2001), publiée dans la Gazette du Canada, Partie II le 15 août, 2001. «La norme CEI 60095-1 comporte des exigences de sécurité et de rendement liées notamment au pouvoir de démarrage, à la capacité, à l'acceptation de charge, à la conservation de charge, à l'endurance en cycles, à la consommation d'eau, à la résistance aux vibrations, à la rétention d'électrolyte (fuite) et à l'étiquetage sécuritaire.».

Une recherche à travers les organismes qui sont l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) et la Society of Automobile Engineers (SAE) a relevé la liste suivante de normes, guides et documents pertinents.

### 3.6.1 Normes internationales

Les normes internationales sont le cœur même des normes, méthodes et applications des batteries. Elles sont de type "générique" donc indépendantes des technologies utilisées. De plus, elles renferment les définitions et vocabulaire commun du domaine des batteries. Les dernières normes se préoccupent de l'assurance qualité, la modélisation et la normalisation des batteries.

IEC 60050 International electrotechnical vocabulary. Chapter 486: Secondary cells and batteries.

Comme son titre l'indique, cette norme contient les définitions des termes les plus courants dans tous les domaines de l'Électrotechnique. Plus spécifiquement, elle est la source des définitions présentées dans la section 3.2.

IEC 60086-1, BS 387 Primary Batteries – General

IEC 60086-2, BS Batteries – General

Ces deux normes sont destinées à normaliser les piles électriques en ce qui concerne les points suivants: système électrochimique, dimensions, nomenclature, configurations des organes de connexion, marquages, méthodes d'essai, caractéristiques types de fonctionnement, sécurité et aspects environnementaux.

USNEC Article 480 Storage Batteries

Cette norme provient du Code de l'Électricité des États Unis. Elle définit plus précisément les définitions et caractéristiques des batteries que l'on considère comme étant de grande capacité en application de stockage.

ISO 9000	<p>Désigne un ensemble de normes relatives à la gestion de la qualité publiées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO).</p> <p>Elle peut servir de guide pour s'assurer à ce que les méthodes de productions soient normalisées et suivies par le fabricant.</p>
ISO 9001 2008	<p>La norme ISO 9001 fait partie de la série des normes ISO 9000, relatives aux systèmes de gestion de la qualité. Elle définit des exigences concernant l'organisation d'un système de gestion de la qualité.</p> <p>En tant que liste d'exigences, elle sert de base à la certification de conformité de l'organisme. Les autres normes de la série 9000 : vocabulaire (ISO 9000), lignes directrices (ISO 9004)... ne contenant pas d'exigences, ne peuvent servir de base à la certification.</p>
ISO 14000	<p>Désigne l'ensemble des normes qui concernent la gestion environnementale. C'est une sorte de preuve que les utilisateurs des batteries respectent l'environnement et que les batteries seront traitées et recyclées avec soin.</p>
ISO/IEC/EN 17025	<p>General Requirements for the Competence of Calibration and Testing Laboratories</p> <p>Cette norme internationale est édictée par l'ISO et par la CEI en 2005 qui spécifie les exigences de qualité et de compétence propres aux laboratoires d'essais et d'analyses. Elle permet de s'assurer que les essais soient effectués avec des appareils et les méthodes éprouvées et valides.</p>

### 3.6.2 Normes IEEE

Les normes IEEE, dans le domaine des batteries, sont des normes axées sur des objectifs pratiques. Par exemple, méthodes d'entretien et de vérification, méthodes d'installation, protection et surveillance. Elles sont très utilisées dans l'industrie car elles s'appliquent à des systèmes de batteries d'accumulateur de grande capacité dans les sites d'énergie d'appoint.

Ces normes reprennent, en partie, les définitions publiées par les normes ISO. Par contre, elles vont plus loin et proposant des méthodes d'utilisation, installation et d'entretien des batteries. Vous remarquerez que les normes IEEE se réfèrent à un type de batterie particulier, soit en fonction de sa fabrication et/ou son utilisation.

IEEE 450 - Vented Lead-Acid Maintenance & Testing

Décrit l'entretien et les procédures d'essais à utiliser afin d'optimiser la durée de vie et les performances des batteries de type VLA dans une application de batteries d'urgence. Identifie aussi les conditions requises pour remplacer des batteries.

IEEE 484 - VLA Battery Installation

Décrit la méthode d'installation des batteries VLA dans une application de batteries de stockage.

IEEE 485 - Vented Lead-Acid Battery Sizing

Décrit la méthode de dimensionnement des batteries VLA dans une application de batteries de stockage.

IEEE 535 - Nuclear Battery Qualification

Décrit la méthode de qualification des batteries VLA dans une application de batteries dans une centrale nucléaire.

IEEE 1106 - Ni-Cd Installation, Maintenance & Testing

Décrit la méthode d'installation, l'entretien et les procédures d'essais à utiliser afin d'optimiser la durée de vie et les performances des batteries de type Nickel cadmium (Ni-Cd) dans une application de batteries d'urgence.

IEEE 1115 - Ni-Cd Battery Sizing

Décrit la méthode de dimensionnement des batteries Ni-Cd dans une application de batteries de stockage.

#### IEEE 1184 - UPS Batteries

Décrit les divers systèmes de batteries pour que l'utilisateur puisse prendre des décisions informées sur la méthode d'installation, l'entretien et les procédures d'essais des batteries pour onduleur UPS.

#### IEEE 1188 - VRLA Maintenance & Testing

Décrit l'entretien et les procédures d'essais à utiliser afin d'optimiser la durée de vie et les performances des batteries de type VLA dans une application de batteries de stockage. Identifie aussi les conditions requises pour remplacer des batteries.

#### IEEE 1189 - VRLA Battery Selection

Décrit la méthode de sélection des batteries VLA dans une application de batteries de stockage.

#### IEEE 1375 - Battery Protection

Guide pour concevoir la première protection des batteries en aval des terminaux. Présente les diverses options disponibles pour des systèmes d'onduleurs UPS.

#### IEEE 1491 - Battery Monitoring

Décrit les paramètres opérationnels qui peuvent être observés dans une application de batterie stationnaire. Sert à déterminer les spécifications d'un système de surveillance des batteries.

#### IEEE 1578 - Battery Spill Containment

Décrit les produits, méthodes et procédures relative aux batteries stationnaires, mécanismes de déversement d'électrolytes, méthodes de contrôle et de maîtrise et les facteurs affectant la protection d'incendie.

#### IEEE 1625 - Battery; Portable Computing

Guide pour les fabricants dans la conception et implantation des contrôles de batteries Li-ion (Lithium Ion) et Li-ion polymère (Lithium ion polymère) pour des batteries multi-cellules de dispositifs portables.

### IEEE 1725 - Cell Phone Batteries

Établit les critères de la qualité de l'analyse de la conception et de la fiabilité de batteries Lithium Ion (Li-ion) et Lithium ion polymère (Li-ion polymère) pour des batteries dispositifs cellulaires.

Dans ce mémoire, nous avons utilisés des batteries de types VRLA. Nos études se sont donc inspirées des normes correspondantes, soient IEEE 484, 496, 1188, 1189 et 1491. Nous n'avons pas eu à recourir à la norme IEEE 1578. Par exemple, les méthodes de charge et décharge sont décrites dans la norme IEEE 1188. IEEE 485 nous donne les définitions des capacités, état de charge etc.

### 3.6.3 SAE Standards

Les normes Society of Automobile Engineers (SAE) concernent le domaine plus pointu que sont les batteries d'automobile. D'une certaine manière elles sont le prolongement des normes internationales et de l'IEEE, mais spécifiquement pour les batteries d'automobiles.

En fait, elles couvrent aussi bien des aspects plus généraux, comme des définitions et vocabulaire, mais aussi des aspects plus pratiques tel les essais, performance et connectivité.

#### J1127\_201003 Low Voltage Battery Cable

Décrit les caractéristiques des câbles basse tension, moins 60Vcc, pour les systèmes électriques des véhicules routiers.

#### J2464\_200911 Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing

Décrit les procédures d'essais des batteries automobiles électriques et hybrides dans des conditions ou cas d'abus hors de l'utilisation normale.

J2380\_200903 Vibration Testing of Electric Vehicle Batteries

Décrit les essais de vibration des batteries automobiles électriques et hybrides.

J1798\_200807 Recommended Practice for Performance Rating of Electric Vehicle Battery Modules

Décrit les méthodes et procédures d'essais et validation de la performance des batteries automobile.

J2801\_200704 Comprehensive Life Test for 12 V Automotive Storage Batteries

Méthode pour déterminer la durée de vie des batteries de moins de 180 minutes de capacité et moins de 200 ampères de courant de démarrage.

J240\_200704 Life Test for Automotive Storage Batteries

Méthode pour déterminer la durée de vie des batteries de moins de 180 minutes de capacité lorsque la batterie est soumise à un système de recharge contrôlé en tension.

J2185\_199709 Life Test for Heavy-Duty Storage Batteries

Méthode pour déterminer la durée de vie des batteries soumise à un système de recharge contrôlé en tension et lors de cycles de décharge profonde.

Le présent chapitre a permis d'avoir une meilleure idée de l'utilisation pratique des batteries d'accumulateur. L'utilisateur moyen sera plus apte à choisir la solution la plus appropriée selon les usages prévus.

Le chapitre 4 passera au niveau de la recherche en présentant les divers modèles qui servent à caractériser les batteries pour une analyse plus théorique.

## Chapitre 4 - Modélisation des batteries

Il existe plusieurs méthodes de modélisation des batteries. Les plus utilisées dans la littérature se regroupent en quatre thèmes :

- Courbe de décharge [2], [6],
- physico-chimique [5],
- Électrique [2], [3], [4], [7], [8], et
- Autres modèles [15].

### 4.1 Courbe de décharge

La courbe de décharge est la plus utilisée dans l'industrie. D'ailleurs, c'est celle qui est utilisée par les fabricants pour présenter les spécifications des batteries. On obtient la courbe de décharge en mesurant la tension de la batterie en fonction du temps pour un courant de décharge donné. La procédure acceptée par l'industrie est d'effectuer la décharge complète de la batterie en appliquant une charge équivalente à sa capacité ampérométrique sur la période spécifiée.

Il faut se référer à une fiche technique pour bien présenter cette méthode de modélisation. Ces fiches techniques sont disponibles sur les sites Web des fournisseurs. Celle utilisée ci-après provient du site de BB Battery Company Ltd. ([bb-battery.com](http://bb-battery.com)).

## Exemple de spécifications



### Maintenance-Free Rechargeable Sealed Lead-Acid Battery



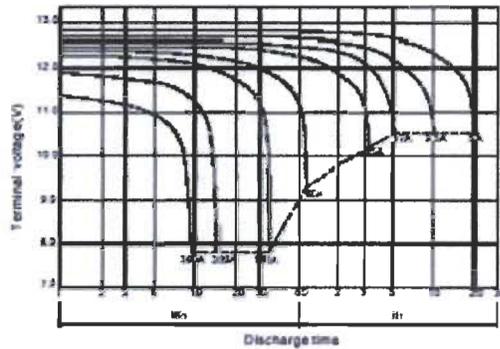
## EP100-12

The battery is constructed by plates, separators, safety valves, flame arrestors and container. Since the electrolyte is held by a glass-mat separator and plates, the battery can use in any direction and position without leakage.

### PERFORMANCE SPECIFICATIONS

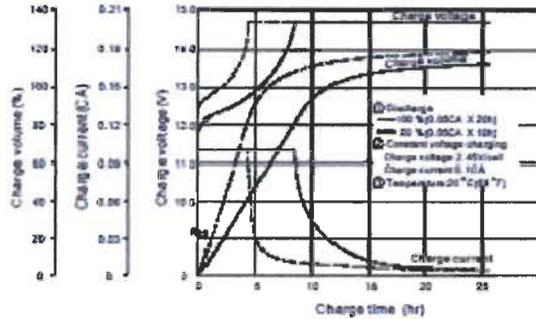
Nominal Voltage(V)	.....	12 volts(6cells in series)
Nominal Capacity(AH)		
20 Hour rate F.V.(1.75V/cell) (5.00A to 10.50volts)	.....	100A.H.
10 Hour rate F.V.(1.75V/cell) (9.50A to 10.50volts)	.....	95A.H.
5 Hour rate F.V.(1.75V/cell) (17.0A to 10.50volts)	.....	85A.H.
30 Min rate F.V.(1.30V/cell) (100.0A to 7.80volts)	.....	50A.H.
Approximate Weight	.....	40.0kg(88.2lbs.)
Terminal		
Standard	.....	Type B4
Internal Resistance (Fully Charged Battery)	.....	<4m $\Omega$
Maximum Discharge Current For 5 sec.(A)	.....	1000A
Maximum Charge Current(A)	.....	30A
Ambient Temperature		
Charge	.....	0°C(32°F)~40°C(104°F)
Discharge	.....	-20°C(-4°F)~50°C(122°F)
Storage	.....	-20°C(-4°F)~40°C(104°F)
Case	.....	ABS
Dimension(mm/inch)		
Length	±2mm.....	407/16.02
Width	±2mm.....	173/6.81
Container Height	±2mm.....	210/8.27
Total Height	±2mm.....	239/9.41
Application	.....	EV, TELCOM, Golf-Cars.

EP100-12 Battery discharge characteristics (25°C/77°F)



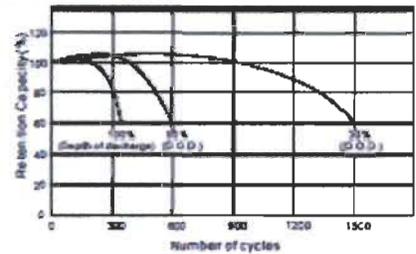
BATTERY CHARGING CHARACTERISTICS

(Typical example of the charge characteristics for the standby use)



Battery Life Characteristics of Cyclic Use

Testing Condition: Discharge Current: 0.25C Amp (V: 1 Trickle)  
 Charging Current: 0.1C Amp  
 Charging Voltage: 120% of Discharge Capacity  
 Ambient Temperature: 20°C(68°F)



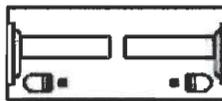
Charging Procedure

Application	Charging method	Charging voltage at 25°C (V/Cell)	Temperature compensation coefficient of charging voltage (mV/°C/Cell)	Max. charging current (CA)	Charging time @ 10A, 25°C (%)		Temp. Coefficient
					100% Discharge	50% Discharge	
For standby power source	Constant voltage & Constant current (CVCC) charging (with current restriction)	2.25~2.30	-3	0.3	24	20	0.5~0.6
For cyclic service		2.40~2.55	-4	0.3	10	10	

\*Temperature compensation of charging voltage is not needed when using the battery within 5°C to 35°C range.

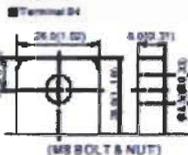
OUTER DIMENSIONS

mm(Inch)



TERMINAL TYPE

mm(Inch)



(M8 BOLT & NUT)



Constant power discharge characteristics at 25°C/77°F

Final Voltage	Discharge time								
	20hr	100hr	1000hr	3000hr	50hr	30hr	20hr	10hr	20hr
13.0V	3207	3448.0	1962.0	1182.0	681.4	291.4	201.4	112.26	58.71
10.0V	3771	2480.0	2075.7	1238.6	711.4	287.1	204.3	114.00	59.00
10.20V	4000	2748.0	2134.8	1268.7	724.3	300.0	205.7	114.57	60.28
9.50V	4166	2814.0	2188.8	1284.3	734.3	302.8	207.1	114.66	59.45
9.00V	4314	2870.0	2211.4	1297.1	741.4	304.3	207.1	114.66	59.43

TERMINAL POSITION



**B.B. BATTERY CO., LTD.** Web Site: <http://www.bb-battery.com>

**USA:**  
 B & B BATTERY (USA) INC.  
 6415 RANDOLPH ST. COMMERCE, CA, 90040 U.S.A.  
 TEL: 1-323-278-1000 1-800-278-8599  
 FAX: 1-323-278-1268

**UK:**  
 B & B BATTERY (UK) CO., LTD.  
 TEL: 44-181-328-9452  
 FAX: 44-181-343-7030

**JAPAN:**  
 B & B BATTERY (JAPAN) CO., LTD.  
 TEL: 81-425-256-0327  
 FAX: 81-425-256-5377

**CHINA FACTORY:**  
 CHENG DONG TRIAL AREA, HUANG GANG, RAOPIING GUANG DONG, CHINA, 515700  
 TEL: 86-768-7601001-2  
 FAX: 86-768-7601469

**HONG KONG:**  
 NATIONAL TRADING LTD.  
 TEL: 852-2301-3800  
 FAX: 852-2739-1182

**TAIWAN:**  
 B & B BATTERY CO., LTD.  
 TEL: 886-6-5888081~3  
 FAX: 886-6-5888087



Figure 4.1 Fiche technique d'une batterie plomb acide typique

Cette fiche technique, à sa première page, nous donne les spécifications de base nécessaires pour l'utilisation de la batterie. On y apprend que la capacité totale varie de 50Ah à 100Ah selon le régime de décharge. Le premier graphique de la seconde page présente plusieurs informations avec une variation temporelle. Il sert donc de guide pour déterminer et extrapoler la capacité de la batterie selon le régime de décharge. Par exemple, on y retrouve plusieurs courbes représentant la variation de la tension en fonction du temps selon le régime de décharge.

EP100-12 Battery discharge characteristics (25 °C/77 °F)

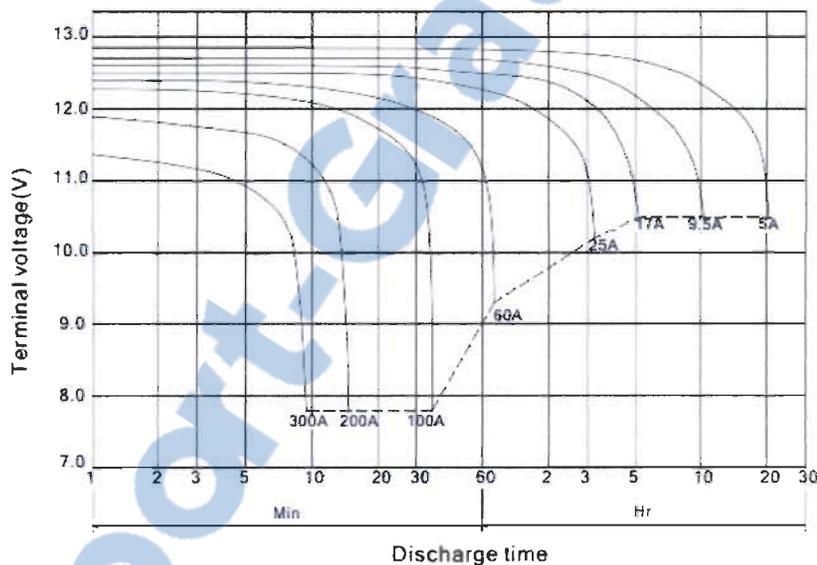


Figure 4.2 Courbe de décharge typique [10]

L'interprétation de cette courbe est assez simple. La tension nominale en circuit ouvert est obtenue par la lecture du point de l'intersection de l'axe des Y lorsque  $t = 0$ .

On observe ensuite que chaque courbe correspond à un courant de décharge. Dans l'exemple ci haut, nous avons les courbes pour 5A, 9,5A, 17A, 25A, 60A, 100A, 200A et

300A. En se référant à l'axe du temps, on constate que ces courbes représentent les capacités  $C_N$  des batteries avec  $N = 20\text{hrs}$ ,  $10\text{hrs}$  et  $5\text{hrs}$  respectivement pour atteindre une tension de  $10,5\text{V}$  aux bornes de la batterie. Les trois dernières courbes représentent respectivement des  $N$  de  $35\text{min}$ ,  $18\text{min}$  et  $9\text{min}$  pour atteindre une tension nominale de  $7,8\text{V}$ .

L'allure générale des courbes est semblable pour la majorité des types de batteries. Une des caractéristiques importantes de cette courbe est qu'elle montre que la baisse de tension passe de linéaire horizontale à une baisse rapide en fin de charge. Cela représente le moment où il faut cesser de décharger la batterie afin d'éviter la sulfatation et autres causes de dégradation.

En pratique, nous déterminons une tension en deçà de laquelle on considère que la batterie peut être endommagée. Selon le schéma de contrôle, on pourrait alors délester les charges afin de maintenir un bon état de santé des batteries. Le choix de cette tension n'est pas unique et varie selon l'application. Elle détermine le cycle de décharge et recharge, aussi appelé profondeur de décharge ou "Régime" de la batterie. Les trois régimes les plus communs sont:

- Flottant: la batterie est maintenue à sa capacité maximale en compensant toute décharge par une recharge immédiate,
- Décharge 50%: on laisse la capacité de la batterie baisser de 50% avant d'appliquer une recharge complète,
- Décharge 80%: on laisse la capacité de la batterie baisser de 80% avant d'appliquer une recharge complète.

Le nombre de reprises par lesquelles les batteries passent de décharge à recharge est appelé le nombre de cycles de charge. La durée de vie d'une batterie dépend fortement du régime de charge (profondeur de décharge) et du nombre de cycles subits. En régime flottant, il n'y a pas de cycles à proprement dire et la durée de vie de la batterie est maximale. En régime à 50%, le nombre de cycles possibles est plus qu'en régime 80%. L'enjeu du régime réside dans le dimensionnement du système. Par exemple, pour atteindre la même capacité, un régime de 50% exige plus d'unités de batteries qu'un régime à 80% car il ne peut puiser autant dans la capacité de chaque batterie. Par contre, le nombre de cycles possibles dans un régime de 50% est plus élevé qu'en régime 80%.

Le second graphique représente le régime de charge, incluant les tensions recommandées par le fabricant. On y retrouve la tension de charge, la durée de la recharge ainsi que la tension considérée comme étant la tension minimale permise.

### **Utilisation du modèle**

Ce modèle est utilisé dans un grand nombre d'applications. Citons les sites de télécommunications comme exemple pertinent. Dans ces sites, les batteries sont branchées à un système de surveillance et de contrôle de charge. Une entreprise québécoise, Multitel a une offre intéressante de tels systèmes.

Le système Mirador® utilise des capteurs de courant afin de déterminer la capacité de la batterie et des capteurs de tension afin de déterminer l'état de charge de la batterie. Selon la lecture des capteurs, il informe l'utilisateur de la condition du banc de batteries. La Figure 4.3 montre des mesures prises par le Mirador.

**Mirador**  
Site manager

Logout

Alarms | Views | Cards Channels | Derived Channels | File Transfer | System Information | Links

**Multitel**

**Multitel CPU III**

**All Active Alarms**

Mnemonic	Channel Name	Severity	Occurrence Counter
<a href="#">TH5</a>	BOD (Battery On Discharge)	Critical	5
<a href="#">TH4</a>	VLV Very Low Voltage	Major	5
<a href="#">TH3</a>	LV Low Voltage	Minor	5
<a href="#">TH8</a>	HI Rectifier Cap.	Minor	5
<a href="#">TH12</a>	LO Batt. Room Temp	Minor	3
<a href="#">TH103</a>	LO CAB1 PH.A-B Volt	Minor	5
<a href="#">TH104</a>	LO CAB1 PH.B-C Volt	Minor	5
<a href="#">TH105</a>	LO CAB1 PH.C-A Volt	Minor	5
<a href="#">USER1</a>	supervisor	Informational	11
<a href="#">USER3</a>	admin	Informational	6
<a href="#">G3</a>	Out of Float LED	Informational	5
<a href="#">G16</a>	HI/LO AC Voltage LED	Informational	5
<a href="#">G43</a>	LO AC #1	Informational	5

**Menu**

- [All Active Alarms](#)
- [Criticals](#)
- [Majors](#)
- [Minors](#)
- [Informationals](#)

Figure 4.3 Exemple de système de commande de batteries.

Ces mesures servent alors de guide pour l'opération du système. Une partie commande et contrôle est aussi reliée aux sondes. Par exemple, on peut commander la charge des batteries seulement au moment où la tension tombe en bas d'un certain niveau; la profondeur de charge.

De plus, on peut déterminer le courant de charge qui sera alors appliqué aux batteries. Cela limitera la production interne de gaz et assurera une meilleure durée de vie.

Des sondes de température donneront une bonne indication de l'état de santé des batteries. Une batterie qui chauffe indique un problème probable dans la réaction chimique.

Il est important de noter que ce type de système de surveillance et de commande utilise les données du fabricant pour déterminer les valeurs des points de contrôle. Par exemple, si nous voulons que la batterie ait une profondeur de décharge de 80%, alors la fiche du fabricant nous indique la tension en circuit ouvert associée à ce paramètre.

Ce type de moniteur a l'avantage d'être simple à utiliser et présente les informations en format graphique. La navigation à travers les écrans est calquée sur les sites Web et donc convivial pour les techniciens qui l'utilisent. De plus, des alarmes peuvent être envoyées lorsque certains paramètres atteignent des niveaux prédéterminés.

Son désavantage est que les paramètres sont programmés selon des modèles simples. Cela n'offre pas une bonne précision. Les charges et décharges ne sont donc pas optimisées selon les caractéristiques dynamiques des batteries.

#### 4.2 Modèle physico-chimique

La méthode physico-chimique de modélisation des batteries est basée sur une bonne connaissance des principes électrochimiques qui se passent à l'intérieur de la batterie. Les batteries plomb-acide sont bien connues.

La Figure 4.4 nous montre les composants les plus reconnus.

- Cathode (borne positive),
- Anode (borne négative), et
- Électrolyte.

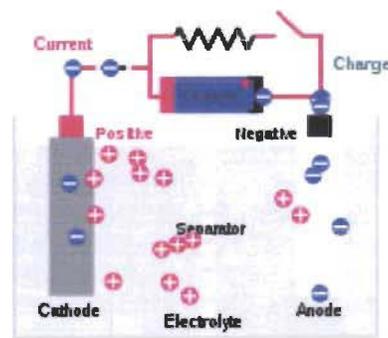


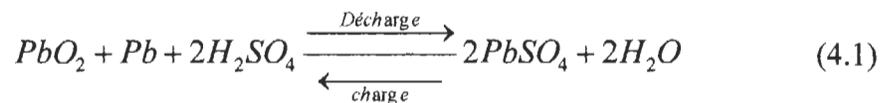
Figure 4.4 Modèle physico-chimique d'une batterie plomb acide typique

« Les batteries, ou les cellules de batteries, sont des composantes électrochimiques. Chaque cellule est composée d'électrodes, positive et négative. Les plaques qui composent ces électrodes sont faites de matériaux actifs dissemblables. Ces cellules sont encapsulées dans un bac contenant un électrolyte. Le bac est scellé ou est muni d'un bouchon de remplissage et un évent.

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge.

Lorsqu'elle n'est pas branchée à une charge ou un chargeur, la tension à circuit ouvert d'une batterie représente son taux de charge. Complètement chargée, cette tension peut être différente dépendamment du type de batterie - par exemple, chaque cellule d'une batterie acide-plomb a une tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  de 2.10 VCC.» [11]

La réaction chimique présente dans les batteries plomb-acide est



Pour arriver à compléter ce modèle, il faut être en mesure d'évaluer plusieurs caractéristiques de cette réaction chimique.

## **Caractéristiques**

Toute réaction chimique peut être caractérisée par les paramètres suivants :

- Vitesse de réaction,
- Concentration des réactifs,
- Concentration de certains produits intermédiaires, et
- Température à laquelle la réaction a lieu.

Dans le cas des batteries, et plusieurs autres produits basés sur des réactions chimiques, on peut ajouter certaines caractéristiques qui ne sont pas reliées à la réaction chimique proprement dite. Ces caractéristiques sont reliées au vieillissement des batteries;

- Sulfatation des bornes lorsque l'état de charge est faible,
- Oxydation des bornes,
- Dégradation de la plaque positive, modification du Pb en  $\text{PbO}_x$ , et
- Dégradation de la matière active,  $\text{PbO}_2$  vis-à-vis le  $\text{PbSO}_4$ .

## **Modélisation**

Pour arriver à modéliser la batterie, il faut donc trouver des moyens de déterminer les caractéristiques citées ci-dessus. Un bon résumé des équations qui permettent de décrire de fonctionnement des batteries se retrouve sur le site de Thermo Analytics [12]. On y décrit les modèles suivants.

### Équation de Peukert

L'équation de Peukert indique que le courant de décharge d'une batterie décroît lorsque le temps de décharge, à courant constant, augmente. Cette relation est de la forme :

$$I^n * T_i = cte \quad (4.2)$$

où;

I = courant de décharge en ampères,

n = constante dépendante de la batterie (n = 1,36 pour le plomb-acide),

T = temps de décharge au courant de décharge, en secondes.

Cette relation peut aussi être exprimée en fonction des capacités ampérométriques :

$$C_1 = C_2 * \left[ \frac{I_2}{I_1} \right]^{(n-1)} \quad (4.3)$$

Cela démontre bien la relation non linéaire entre la capacité ampérométrique basée sur deux temps de décharge différents et ce pour une même batterie.

En modifiant cette relation, nous obtenons la relation linéaire de la courbe de décharge, soit :

$$SOC = 1 - (I * T) / C \quad (4.4)$$

### Équation de Shepherd

L'équation de Shepherd est une réécriture de Peukert. Elle a l'avantage d'utiliser les variables de tension et courant.

$$E_t = E_0 - R_i * I - K_i * (1 / (1 - f)) \quad (4.5)$$

où;

$E_t$  = Tension aux bornes de la batterie, en volts.

$E_0$  = Tension en circuit ouvert aux bornes de la batterie, en volts.

$R_i$  = Résistance interne de la batterie, en ohms.

$K_i$  = Résistance de polarisation de la batterie, en ohms.

$f$  = État de charge de la batterie.

### **Modèle Universel d'Unnenwehr**

Ce modèle est une simplification des deux premiers pour tenir compte du fait que les véhicules électriques n'opèrent pas dans la zone de décharge profonde. En fait, la batterie est maintenue, dans les conditions normales, à un état de charge de 80% ou mieux. Cette simplification permet d'écrire que :

$$E_t = E_0 - R_i * I - K_i * f \quad (4.6)$$

### **Utilisation des modèles**

Les modèles physico-chimiques ont d'abord été utilisés dans l'étude préliminaire d'une batterie. Les fabricants utiliseront ces modèles pour simuler l'effet de certaines modifications dans la conception des batteries.

Ces modifications peuvent être faites sur :

- La géométrie des bornes,
- L'électrolyte, et
- Ajout de catalyseurs.

Par la suite, ces modèles ont servi à mieux estimer l'état de charge d'une batterie dans des applications où le comptage ampérométrique pouvait donner de bons résultats. Dans le cas des études sur des véhicules hybrides, le comptage ampérométrique semble effectivement une méthode appropriée pour déterminer l'état de charge des batteries.

Si l'application semble adéquate, il faut bien comprendre que le système de surveillance et de contrôle doit maintenir en mémoire des valeurs cumulées. Sinon, l'évaluation est corrompue. C'est-à-dire, l'évaluation de l'état de charge est dépendante d'un cumul d'information. Une analogie serait de calculer la réserve d'essence en calculant la consommation à fur et à mesure.

### **4.3 Modèle Électrique**

Comme dans la majorité des systèmes que nous voulons analyser, il y a une forte ressemblance avec des systèmes électriques. L'analyse des batteries n'est pas une exception. La littérature démontre un intérêt particulier pour ce type d'analyse basé sur un rapprochement avec les systèmes électriques.

Les avantages de l'utilisation d'un modèle électrique reposent sur la vaste connaissance que nous avons sur le sujet, une aussi vaste théorisation du domaine électrique et la disponibilité d'outils d'analyse et de simulation.

L'objectif est donc de pouvoir utiliser les outils d'analyse et de simulation des circuits électriques pour caractériser les batteries. Tout comme dans le modèle physico-chimique, nous tentons de déterminer;

- Vitesse de réaction,

- Concentration des réactifs,
- Concentration de certains produits intermédiaires,
- Température à laquelle la réaction a lieu.
- Sulfatation des bornes lorsque l'état de charge est faible,
- Oxydation des bornes,
- Dégradation de la plaque positive, modification du Pb en  $PbO_x$ , et
- Dégradation de la matière active,  $PbO_2$  vis-à-vis le  $PbSO_4$ .

### Caractéristiques

Dans un modèle électrique, nous trouvons habituellement l'équivalent en résistances, capacités et en inductances des divers mécanismes d'un système. Dans le cas de batteries, aucun équivalent à l'inductance n'est nécessaire.

Nous y retrouvons aussi des sources de tensions et de courants.

Habituellement, les composants suivants sont utilisés pour représenter;

- Source de tension :
  - Tension présente aux bornes des batteries,
- Source de courant :
  - Courant débité par la batterie,
- Résistances :
  - Résistance des bornes,

- Résistance reliée à la sulfatation,
- Résistance reliée à la vitesse de réaction,
- Capacitance :
  - Capacité de la batterie à stocker de l'énergie,
  - Capacitance entre les plaques formant les bornes.
- Circuit RC parallèle :
  - Constante de temps.

### Modélisation

Le modèle de base avec lequel on commence à travailler est celui basé sur l'équivalent de Thevenin. La recherche récente sur les véhicules hybrides a mis l'accent sur le développement de modèles mieux adaptés à ces voitures électriques. Plusieurs auteurs proposent des modèles appropriés à cette application. Le modèle de Thevenin est aussi appelé le modèle de Randle [12], dont voici la description.

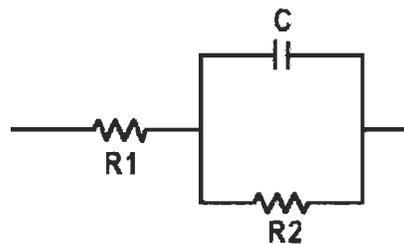


Figure 4.5 Modèle de Randle

Ce modèle comprend une résistance purement ohmique ainsi que des réactances capacitives. Les valeurs de celles-ci seront différentes pour chaque batterie.

On s'attend à des valeurs de résistance de l'ordre des milli ohms et des capacitances de l'ordre de 1,5F par 100Ah de capacité ampérométrique.

D'autres auteurs ont proposé des modifications au modèle de Randle. La plus commune est une amélioration obtenue en ajoutant une source de courant au modèle de base. Par la suite, il y a eu des modifications aux détails des composants afin de mieux rendre compte de leur fonctionnement. Par exemple, une meilleure modélisation des bornes pour tenir compte du vieillissement, etc.

Dans les modèles électriques, nous retrouvons, tel que décrit plus haut, une série de résistances et de capacitances qui représentent le fonctionnement des batteries.

R.C. Kroeze et P.T. Krein [13] proposent un modèle pour la simulation de batteries utilisées dans des véhicules électriques.

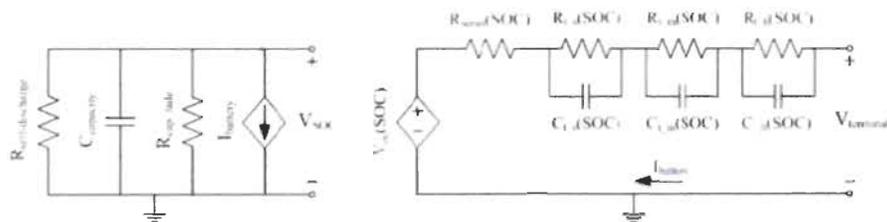


Figure 4.6 Modèle de batterie proposé par Kroeze et Krein [13]

On y voit que les composants sont en parallèle devant la source de tension.

Aussi, N S Zhai, M W Li, W L Wang, D L Zhang et D G Xu [14] offrent une autre modification afin de mieux s'adapter à la technologie de spectrographie d'impédance électrochimique (EIS).



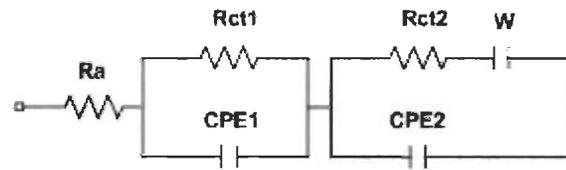


Figure 4.7 Modèle de batterie proposé par Zhai et al. [14]

Finalement, une méthode basée sur les filtres de Kalman étendus est proposée par Shifei Yuan, Hongjie Wu et Chengliang Yin [15]. Leurs études partent d'un modèle de Randle auquel ils ajoutent des étages de circuits RC en parallèle afin d'augmenter l'ordre des équations. Leur modèle est montré à la Figure 4.8.

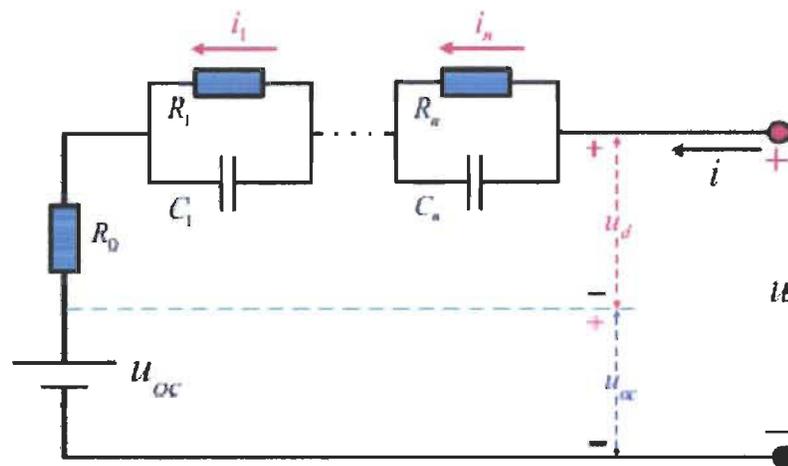


Figure 4.8 Modèle de batterie proposé par Yuan et al. [15]

Ce modèle est représenté par les équations suivantes:

$$R_i * C_P \frac{\Delta E_{PC}}{\Delta t} = V_{OC} + \frac{R_1}{R_B * E_{tB}} - \frac{(R_B + R_i)}{R_B * E_{PC}} \quad (4.7)$$

$$R_B * C_i \frac{\Delta E_{tB}}{\Delta t} = E_{PC} - R_B * I_{tB} - E_{tB} \quad (4.8)$$

$$E_{tB} = V_{OC} - R_B + \frac{K}{SOC} * I_{tB} \quad (4.9)$$

Ils ont montré qu'un modèle auto régressif exogène (Auto Regressive Exogenous: ARX) est un modèle approprié pour une batterie de type Li-ion. La modélisation par ARX est utilisée dans le domaine du contrôle industriel et permet de tenir compte de la non-linéarité des systèmes.. Dans cette méthode il faut déterminer l'ordre approprié du modèle à appliquer aux batteries. Le modèle est alors soumis à un filtre de Kalman étendu afin d'améliorer la linéarisation du système.

#### **4.4 Utilisation des modèles**

La majorité des modèles électriques servent dans les simulations. Tel que décrit en début de cette section, la majorité des systèmes qui sont modélisés en circuits électriques permettent d'utiliser les outils informatisés de simulation. Les objectifs des simulations sont aussi variés qu'il y a de pistes de recherche à analyser.

Dans le cas du modèle électrique d'une batterie, il y a un lien très étroit entre les composants électriques du modèle et ceux de la batterie réelle. La résistance interne de la batterie, dans le modèle, est aussi une résistance ohmique en réalité. Par contre, la capacité de charge du modèle ne se mesure pas en farads, mais en Ah.

Outre cette simple mise au point en ce qui concerne les unités de mesures entre modèle et réalité, les modèles électriques peuvent être appliqués à l'analyse des batteries tout comme les équations des mailles et de nœuds sont appliquées aux systèmes purement électriques.

La meilleure manière de montrer l'utilisation des modèles électriques est de présenter un instrument de mesure qui est basé sur les équations du modèle. Par contre, la majorité

des dispositifs de vérification ne sont pas très complets, c'est-à-dire qu'ils se contentent de prendre des mesures de  $R_i$ .

La section suivante est reproduite du site de Regenbatt [16].

### **Méthodes de test rapide d'une batterie et comment elles fonctionnent**

Jetons un œil désormais sur les différentes méthodes de test d'une batterie et évaluons les points forts et les limitations. Il est important de savoir que chaque méthode fournit une lecture de résistance interne différente lorsqu'on mesure la même batterie. Aucune de ces lectures n'est bonne ou mauvaise. Par exemple, un accumulateur peut très bien donner des lectures de résistance plus élevées avec la méthode de décharge à courant continu (cc) qu'avec un signal de courant alternatif (ca) de 1 000 hertz. Ceci conclut simplement qu'une batterie fonctionne mieux sur une décharge à ca que sur une décharge à cc. Les fabricants acceptent toutes les variations à condition que les lectures soient prises sur le même type d'instrument.

Méthode de décharge à cc : La mesure de la résistance pure en ohms est l'une des méthodes de test des plus anciennes et des plus fiables. L'instrument applique une décharge durant quelques secondes. Le courant de décharge varie de 25 à 70 ampères, suivant la taille de la batterie. La chute de tension divisée par le courant donne la valeur de la résistance. Les lectures sont très précises et reproductibles. Les fabricants déclarent des lectures de résistance allant jusqu'à la plage des 10 microhms. Pendant le test, l'appareil chauffe et un refroidissement sera nécessaire entre les mesures si elles sont effectuées de façon continue.

Le modèle de décharge à cc de la Figure 4.9 fusionne R1 et R2 du modèle Randle en une seule résistance combinée et ignore la capacité. La capacité C est un composant très important d'une batterie et représente 1,5 farad par capacité d'accumulateur de 100 Ah.

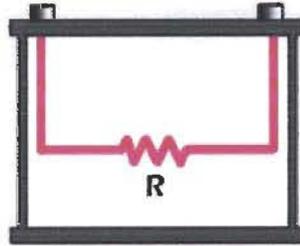


Figure 4.9 Méthode de décharge à CC.

Méthode de conductance à ca : Au lieu de la décharge à cc, l'instrument injecte un signal de ca dans la batterie. Une fréquence entre 80 et 100 hertz est choisie pour minimiser la réactance. À cette fréquence, les réactances inductive et capacitive convergent, entraînant un léger " retard " de la tension. Les fabricants d'équipements basés sur la conductance à ca déclarent des lectures de résistance de batterie allant jusqu'à la plage des 50 microhms. La conductance à ca a gagné de l'élan en 1992 ; les instruments sont petits et ne chauffent pas lors de leur utilisation.

La technologie à simple fréquence voit les composants du modèle de Randle comme une impédance complexe, appelée le module de Z. La majorité de la contribution provient de la conductance de la première résistance tel que montré dans la Figure 4.10.

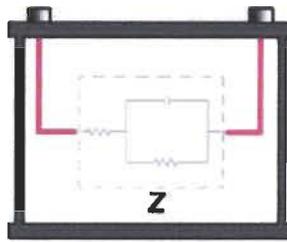
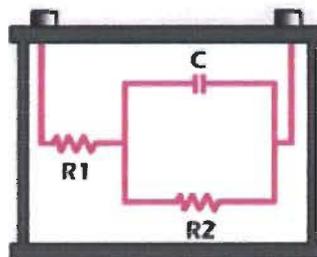


Figure 4.10 Méthode de conductance à ca.

Les composants séparés du modèle de Randle ne peuvent pas être distingués et apparaissent comme un " flou ". Par contre, ils peuvent être identifiés par différentes méthodes.

Spectroscopie électrochimique d'impédance (EIS) à multifréquences : Cadex Electronics a développé une méthode de test rapide basée sur l'EIS. Appelée Spectro™, l'instrument injecte 24 fréquences d'excitation allant de 20 à 2000 hertz. Les signaux sinusoïdaux sont réglés à 10 mVac pour rester dans les limites de la portion linéaire de la batterie (thermal batterie voltage) du couple acide-plomb. Ceci permet des lectures fidèles pour les petites et les grosses batteries.

Avec la spectroscopie d'impédance à multifréquences, les trois valeurs des "composants" du modèle de Randle peuvent être établies. R1, R2 et C peuvent ainsi être mesurés séparément, permettant ainsi l'estimation de la conductibilité et de la capacité de la batterie.



### Figure 4.11 Méthode Spectro™.

Un processus breveté évalue ensuite les nuances fines entre chaque fréquence pour permettre une analyse approfondie de la batterie.

Spectro™ est la plus complexe des trois méthodes citées ci-haut. Le test dure 30 secondes et traite 40 millions de données. L'instrument est capable d'effectuer la lecture jusqu'à un niveau très bas en microhms. Mais plus important encore, Spectro™ est capable de fournir la capacité de la batterie en Ah, la conductibilité et l'état de charge.

Le concept EIS n'est pas nouveau. Dans le passé, les systèmes EIS étaient raccordés à des ordinateurs réservés et divers équipements de laboratoire. Les électro-chimistes formés devaient interpréter les données. Des progrès dans le domaine de l'analyse des données ont automatisé ce processus et des processeurs de signaux ultrarapides ont concentré la technologie dans un dispositif portable à la main.

Mesures de capacité : La décharge à courant constant et la conductance à courant alternatif ont une limitation majeure dans la mesure où ces méthodes ne mesurent pas directement la capacité de charge de la batterie mais la résistance instantanée. Avec la demande croissante d'énergie électrique dans les voitures et camions (pour les accessoires) et le besoin d'évaluer la performance des batteries stationnaires d'une façon non perturbante, on a besoin de testeurs qui peuvent estimer directement la capacité de la batterie. Cadex a réussi à effectuer cette tâche pour les batteries automobiles. La société est en train de travailler pour appliquer cette technologie aux batteries stationnaires.

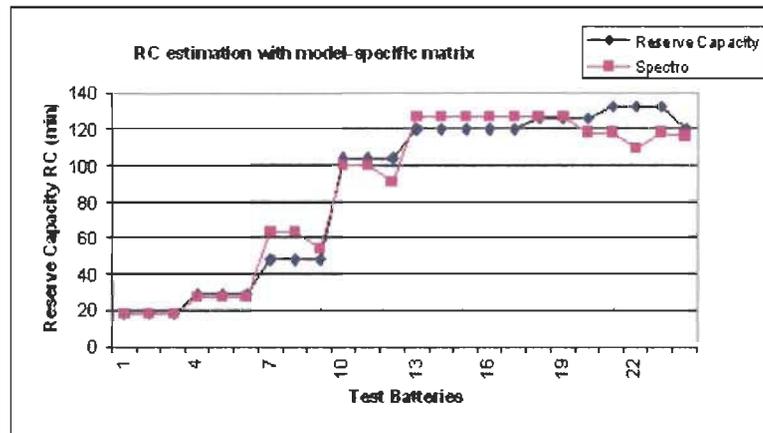


Figure 4.12 Capacité de Réserve (RC) de 24 batteries avec une matrice spécifique par modèle.

La Figure 4.12 révèle les lectures de la Capacité de Réserve (RC) de 24 batteries automobiles, disposées du numéro le plus bas au plus haut suivant l'axe horizontal. Il faut noter que la Capacité de Réserve est une autre manière de décrire l'État de charge. Les batteries ont d'abord été testées suivant la norme SAE J537, qui comprend une pleine charge, une période de repos et une décharge à 25 A jusqu'à 1,75 V/accumulateur pendant laquelle la réserve de capacité a été mesurée (losanges noirs). Les tests ont ensuite été répétés avec Spectro™ (carrés mauves) à l'aide de matrices spécifiques aux batteries. Les résultats qui en dérivent s'approchent des normes de laboratoire, comme le graphique l'indique.

La courbe avec les losanges noirs montre les lectures de capacité dérivées d'une décharge à 25 A. Celle avec les carrés mauves représente les lectures à l'aide de Spectro™.

Comme nous pouvons constater par les modèles présentés ci-haut, certains modèles se basent sur une relation étroite entre la résistance, ou conductance, de la batterie et sa capacité. D'autres références passent par d'autres artifices car elles constatent que la

résistance, ou conductance, n'est qu'un des facteurs d'intérêt pratique et qu'il n'y a pas de relation directe avec la capacité. La vérité se trouve sans doute entre les deux. Une analogie peut être faite avec un médecin qui non seulement prend la température du corps pour déterminer la santé d'un patient mais qui relève également la tension, les niveaux de glucose et les taux de cholestérol. En prenant plus d'une mesure, de meilleures évaluations de la santé peuvent être effectuées.

Pour démontrer la relation entre la résistance et la capacité, Cadex Electronics a effectué des tests approfondis impliquant 175 batteries automobiles, dans lesquels l'intensité à froid « Cold Cranking Amps » (CCA) a été comparée aux lectures de valeurs des résistances et de la capacitance du modèle de Randle. L'intensité à froid représente le courant débité par une batterie lors d'un premier démarrage, c'est-à-dire avant que la batterie ne se réchauffe. On croit alors que le CCA, qui représente alors la conductibilité de la batterie, est étroitement reliée à la capacité de réserve. La Figure 4.13 montre le résultat de ces tests. Les lectures de CCA sont tracées sur l'axe vertical (Y) et RC sur l'axe horizontal (X). Pour faciliter la lecture, l'axe des X est normalisé en pourcentage de la valeur nominale de RC, en %.

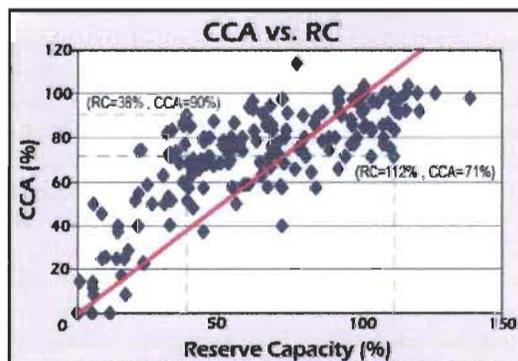


Figure 4.13 Intensité à froid (CCA) en fonction de la Capacité de réserve (RC).

Le résultat idéal est la ligne rouge qui passe par le point 100%, 100%. C'est-à-dire que lorsque la batterie a une Capacité de Réserve à 100%, le CCA est aussi à 100%. Comme la résistance interne (représentée par le paramètre CCA) et la capacité ne suivent pas le trait rouge, on peut conclure que les valeurs de résistance, à elles seules, ne fournissent pas des lectures précises de capacité.

Note : Les lectures de CCA et de RC ont été obtenues suivant les normes SAE J537.

Si la résistance interne, obtenue via les essais en CCA, était une fonction linéaire de la capacité, alors les losanges bleus seraient à proximité du trait rouge de référence. En réalité, les valeurs du CCA et RC s'écartent dans les deux directions. Par exemple, la batterie avec un CCA de 90% ne produit un RC que de 38%, alors que le CCA de 71% fournit une capacité énorme de 112% (trait vert en pointillés).

**Note importante:** Tel qu'écrit dans la légende de la Figure 4.13: La résistance interne (représentée par le paramètre CCA) et la capacité ne suivent pas le trait rouge. Les valeurs de résistance à elles seules ne fournissent pas des lectures précises de capacité. Une utilisation novatrice du modèle électrique a été proposée par certains auteurs [3]. Cela représente un compromis entre la méthode par courbe de décharge et celles qui utilisent la spectroscopie électrochimique d'impédance. Elle est basée sur la constatation que la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) peut donner une lecture précise de l'état de charge (SOC) à condition de prendre des mesures de  $V_{OC}$  vs SOC d'une manière ordonnée et préalable. Comme vous verrez dans le chapitre 5, cette méthode est basé sur les quatre équations 4.10 à 4.13.

$$SOC = \frac{V_{MAX} + \beta - EMF_{MIN}}{\alpha} \quad (4.10)$$

$$AHC = \frac{1}{C_R} \quad (4.11)$$

$$C_R = \delta\Delta V_2 + \gamma \quad (4.12)$$

$$SOH = \frac{AHC_{Actuel}}{AHC_{Nominal}} \quad (4.13)$$

Nous y retrouvons les variables définies dans la Liste de Symboles.

L'intérêt de cette méthode se révèle dans sa prestation rapide et presque sans intrusion.

De plus, elle permet d'obtenir les évaluations simultanées de SOC, AhC et SOH.

### **Autres modèles**

Deux autres modèles sont mentionnés dans le texte du site de Thermo Analytics [12].

Ils sont :

Hydrodynamique: Basé sur un transfert de liquides entre réservoirs. La batterie est modélisée comme étant un ensemble de deux réservoirs, l'une plus petite que l'autre. La batterie est connectée au monde extérieur par le plus petit des réservoirs. Si la batterie se décharge trop vite, le petit réservoir se vide plus vite que le plus grand peut le remplir. Cela représente bien l'incapacité d'une batterie à fournir un fort courant de décharge que sur une courte période.

Éléments finis: En découpant la batterie en petites cellules, il est possible de modéliser la batterie bien au-delà des effets macroscopiques des modèles précédents. Cela exige l'utilisation intensive de ressources informatiques. Par contre, une analyse par éléments finis peut tenir compte de plusieurs effets physico-chimiques tels la diffusion, passivation des surfaces etc.

Comme nous pouvons le constater, il y a une multitude de modèles permettant d'analyser les batteries d'accumulateurs. Chacun avec ses avantages et inconvénients.

Le chapitre 5 présente en détail la méthode à deux impulsions qui se base sur le modèle de Randle. Voir la figure 4.5.

L'intérêt de cette méthode est sa courte période d'application et relative précision.

## Chapitre 5 - Méthode à deux impulsions

### 5.1 Méthode à deux impulsions

Cette méthode proposée par M. Coleman, W.G. Hurley et C.K. Lee [4] s'inspire des méthodes par réponse impulsionnelle utilisée dans d'autres domaines, tels les télécommunications et l'automatisation. Le principe est simple, on applique une impulsion rapide d'amplitude connue sur un système et on observe la réaction sur ce système. On peut y obtenir des paramètres, tels que des constantes de temps, variation de consignes et autres qui caractérisent le système.

La méthode est basée sur un modèle de Randle, présenté la Figure 4,5.

Pour arriver à déterminer les paramètres des batteries d'accumulateur, les auteurs ont intégré le modèle de décharge et le modèle électrique de Randle avec la réponse impulsionnelle. En fait, ils utilisent une succession de deux impulsions pour évaluer certains paramètres des modèles électrique et de décharge. Ils appliquent une charge de valeur précise, de manière instantanée et la maintiennent sur une courte période. Ils la retirent aussi de manière instantanée pour ensuite laisser la batterie d'accumulateur se stabiliser pendant une période de temps assez courte aussi. Cette première impulsion sert à réduire les effets dits "historiques" des batteries d'accumulateur. En d'autres termes, on ne veut pas que le passé de la batterie influence les résultats. La première impulsion sert à déterminer la mesure de  $V_{I_{MAX}}$ . L'application d'une deuxième impulsion, identique à la

première, permet de prendre les mesures de  $V_{2_{MAX}}$  et de  $V_{2_{MIN}}$ . Ces valeurs sont indiquées sur la figure 5.1.

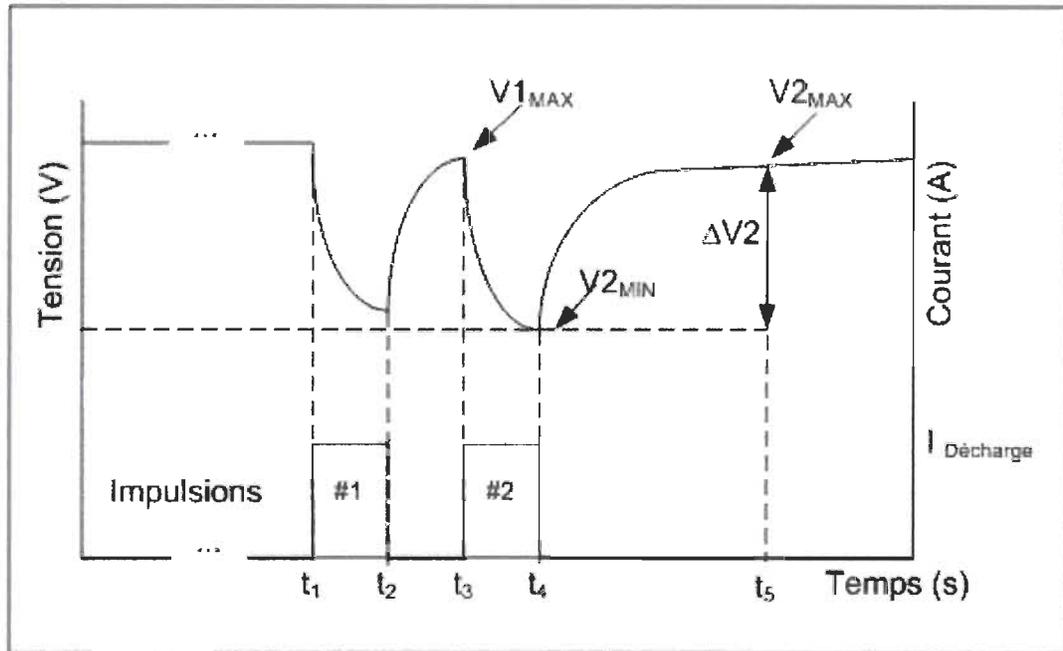


Figure 5.1 Méthode à deux impulsions

Dans la Figure 5.1 nous reconnaissons trois modes. Le Mode 1 est celui du passé inconnu de la batterie. Il est représenté par la période de  $t_0$  à  $t_1$ . Le Mode 2, la période entre  $t_1$  et  $t_3$ , représente la différence de la tension causée par la première impulsion. Le Mode 3, la période entre  $t_3$  et  $t_5$ , représente la différence de la tension causée par la deuxième impulsion.

Dans cette recherche, nous avons évalués deux types de batteries. Le premier type est à plomb acide. Avec une capacité nominale de 200Ah et une tension nominale de 8V, elle est souvent utilisée comme batterie d'accumulateur dans des systèmes de puissances moyennes, c'est-à-dire moins de 1000W. Elle doit être suivie par un entretien régulier car

ses gaz peuvent s'échapper. Des ouvertures sont prévues pour le remplissage en eau distillé le cas échéant.

Le deuxième type est aussi à plomb acide, mais dite scellé. Elle ne devrait pas perdre de ses gaz et ne peut donc pas être rempli. En fait, elle est du même type que celle représentée par la fiche technique de la Figure 4-1. Sa tension nominale est de 6V et sa capacité nominale est de 7,5Ah.

Avant de débiter les travaux, nous devons avoir une bonne évaluation de SOC et AHC préalables des batteries. Les informations fournies par le fabricant peuvent servir de point de départ mais il est aussi possible de les obtenir par une autre méthode, soit le comptage par Coulomb ou décharge complète. Comme dans toutes les recherches, nous avons établi un protocole de travail afin de s'assurer à ce que nos résultats soient les plus valables possibles.

### **État de Charge (SOC)**

Nous cherchons d'abord à valider la linéarité de l'équation 4.10 afin de déterminer les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  qui décriront le comportement de la batterie selon son état de charge. Cela nécessite la mise en graphique de  $V_{2_{MAX}}$  en fonction de SOC. Cela exige de connaître SOC initiale de la batterie ainsi que SOC à chaque moment où l'on prend la mesure de  $V_{2_{MAX}}$ .

Il y a deux méthodes pour obtenir cette capacité initiale:

1. Se fier à la fiche technique du fabricant, ou
2. Effectuer des décharges complètes sur les batteries.

De la première, nous obtenons pour la batterie de 200Ah, quatre capacités;

1.  $C_{20}$  (Capacité pour une décharge de 20 heures) de 183Ah, soit 5A,
2.  $C_{75A}$  (Capacité pour une décharge constante à 75A), de 95min, soit 119Ah
3.  $C_{56A}$  (Capacité pour une décharge constante à 56A), de 136min, soit 127Ah, et
4.  $C_{25A}$  (Capacité pour une décharge constante à 25A), de 345min, soit 143Ah.

Pour la batterie de 7,5Ah, nous avons aussi quatre capacités;

1.  $C_{20}$  (Capacité pour une décharge de 20 hrs) de 7,62Ah, soit 0,381A,
2.  $C_5$  (Capacité pour une décharge constante de 5 hrs) de 6,5Ah, soit 1.3A,
3.  $C_2$  (Capacité pour une décharge constante de 2 hrs) de 5,32Ah, soit 2,66A, et
4.  $C_1$  (Capacité pour une décharge constante de 1 hrs) de 4,88Ah, soit 4,88A.

De la deuxième, nous avons effectué une décharge complète des batteries. Avec les batteries 8V, nous avons testé 3 batteries branchées en série, cela représente une tension à vide de plus de 27.5V et une tension finale de 19V. Nous avons utilisé une charge de 50A. Les résultats sont présentés dans la prochaine section.

Par contre, pour les batteries de 6V, cela représente une tension à vide de 6,55V et une tension finale de 4,8V. Un courant de décharge de 5A est utilisé afin de valider les essais sur des décharges plus rapides qu'avec les batteries de plus forte capacité.

### **État de Santé (SOH)**

En vieillissant, la batterie ne sera pas en mesure de maintenir sa tension avec autant d'intensité. Cela veut dire que l'application des mêmes impulsions aura pour effet d'agrandir la différence de tension entre  $V_{2_{MIN}}$  et  $V_{2_{MAX}}$ . Par exemple; une batterie en bonne état

verra une différence de tension entre  $V_{2_{MIN}}$  et  $V_{2_{MAX}}$  de 2 volts pour l'application d'impulsions d'intensité de 50 ampères. La même batterie, vieillissante, verra une différence de tension entre  $V_{2_{MIN}}$  et  $V_{2_{MAX}}$  augmenter à 2,5V pour la même impulsion de 50A.

Cette augmentation de la différence de tension entre  $V_{2_{MIN}}$  et  $V_{2_{MAX}}$  avec le vieillissement est l'indication de la détérioration de l'état de santé de batterie.

Pour valider la linéarité de l'équation 4.12 et déterminer les valeurs des constantes de  $\delta$  et  $\gamma$  qui décriront le comportement de la batterie selon son état de santé nous devons réaliser la mise en graphique de  $V_{2_{MIN}}$  en fonction de  $V_{2_{MAX}}$  en fonction de  $C_R$ . Il faut se rappeler que  $C_R$  est une valeur de courant normalisé selon la capacité nominale de la batterie,  $AhC_{NOM}$ . Dans notre expérimentation nous avons choisi une capacité de  $C_{50A}$  pour les batteries à 8V et une capacité de  $C_{5A}$  de pour les batteries à 6V.

Les résultats sont présentés dans le Chapitre 6.

### **Étapes réalisées**

Voici une explication plus détaillée sur les étapes réalisées.

Étape 1 : Charge initiale des batteries.

- a. Charger les batteries à pleine capacité selon la méthode suggérée par le fabricant.
- b. Laisser les batteries se stabiliser pendant 5 minutes.

Étape 2 : Application d'une première impulsion.

- a. Mesure de la tension initiale de la batterie.
- b. Appliquer la charge le plus rapidement possible (relais).
- c. La charge doit représenter un faible pourcentage de la capacité totale de la batterie.
- d. Le temps d'application est de 10 secondes.

Étape 3 : Mesure des tensions.

- a. Mesure continu, avec une précision d'au moins 1mV, de la tension des batteries.
- b. Détermination des tensions  $V1_{MIN}$ ,  $V2_{MIN}$  et  $V2_{MAX}$ .

Étape 4 : Application d'une deuxième impulsion.

- a. La charge doit représenter un faible pourcentage de la capacité totale de la batterie.
- b. Pour une batterie de 200Ah de capacité, nous prévoyons une charge de 10A à 50A et pour une batterie de 7,5Ah un charge de 5A.
- c. Appliquer la charge le plus rapidement possible (relais).
- d. Le temps d'application est de 10 secondes.

Étape 5 : Mesure des tensions.

- a. Détermination des tensions  $V1_{MIN}$ ,  $V2_{MIN}$  et  $V2_{MAX}$ .
- b. Déterminer l'écart  $\Delta V2$ .

Étape 6 : Décharge des batteries

- a. Appliquer une charge équivalente à 5% de la capacité initiale de la batterie.
- b. Pour une batterie de 200Ah de capacité, nous prévoyons une charge de 10A à 50A d'une durée de 1 heure à 10 minutes.
- c. Pour une batterie de 7,5Ah de capacité, nous prévoyons une charge de 5A d'une durée de moins d'une heure.

Répétition des étapes 2 à 6.

- a. Répéter les étapes 2 à 6 jusqu'à ce la capacité restante de la batterie soit de 95%.

Étape 7 : Analyse des résultats

- a. Mise en graphique.
- b. Déterminer les valeurs des paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$ .
- c. Calcul de la précision.

Une autre manière de visualiser cette méthode est sous forme de diagramme du protocole, soit la Figure 5.2.

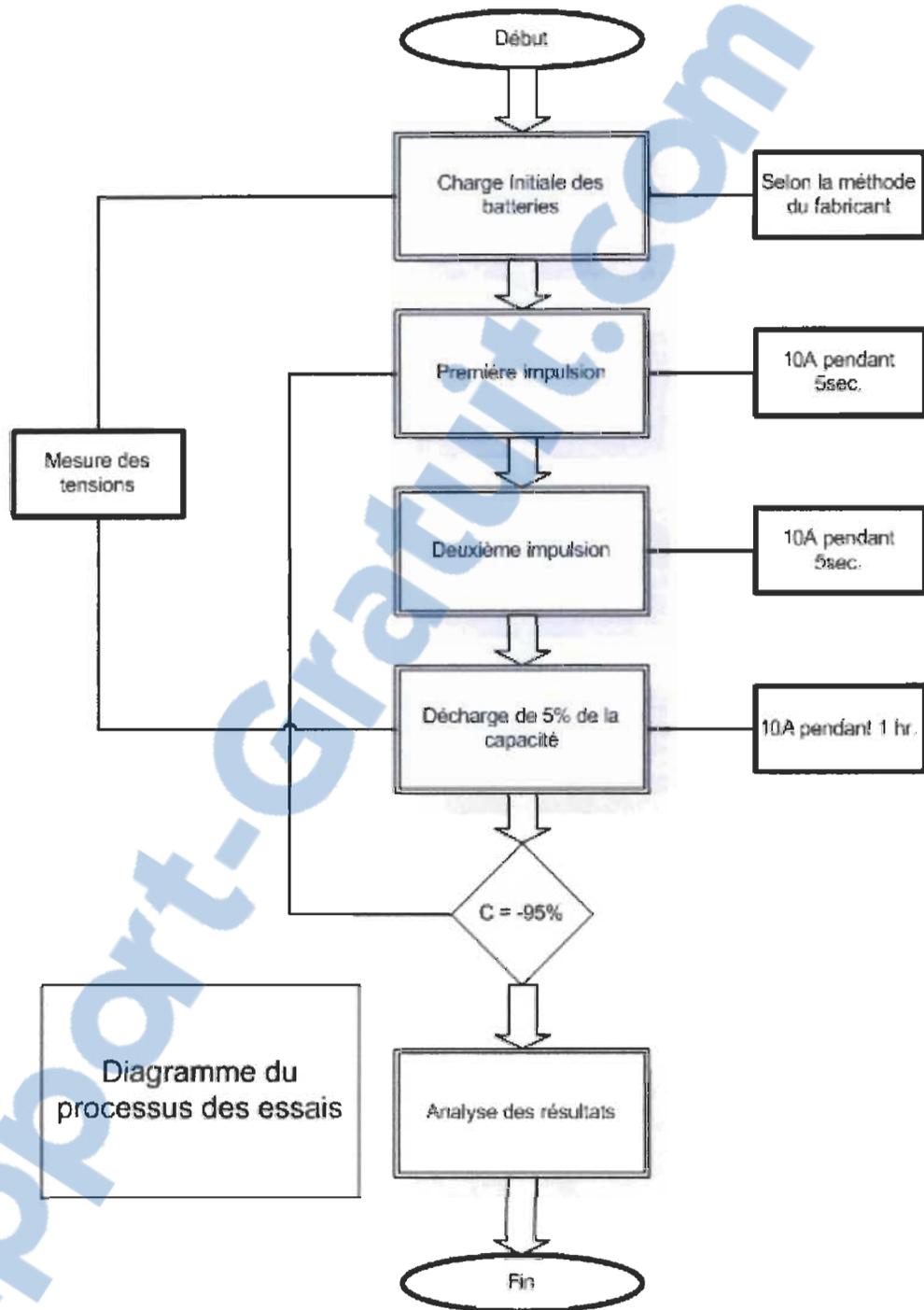


Figure 5.2 Diagramme du protocole des essais.

## 5.2 Montage réalisé

La réalisation des expériences s'est faite en utilisant le banc d'essais des batteries accumulateur de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène.

À toutes fins pratiques, le système de surveillance et contrôle sera un montage qui permettra de brancher/débrancher une charge spécifique sur une batterie. Les fonctionnalités du système sont les suivantes :

- Charges de valeurs connues, et assez précises,
- Mécanismes de branchement/débranchement de charges,
- Sondes de mesure de la tension aux bornes des batteries,
- Sondes de mesure du courant débité par les batteries,
- Carte d'acquisition pour les sondes de tension et de courant,
- Carte d'acquisition pour brancher/débrancher des relais, et
- Relais de sortie entre une carte d'acquisition et les charges.

Tout ce système est intégré dans un banc d'essais à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH), Figure 5.3. La mise en œuvre est assurée par l'utilisation d'un "Instrument Virtuel" sous LabView®.

## Labview virtual instrument

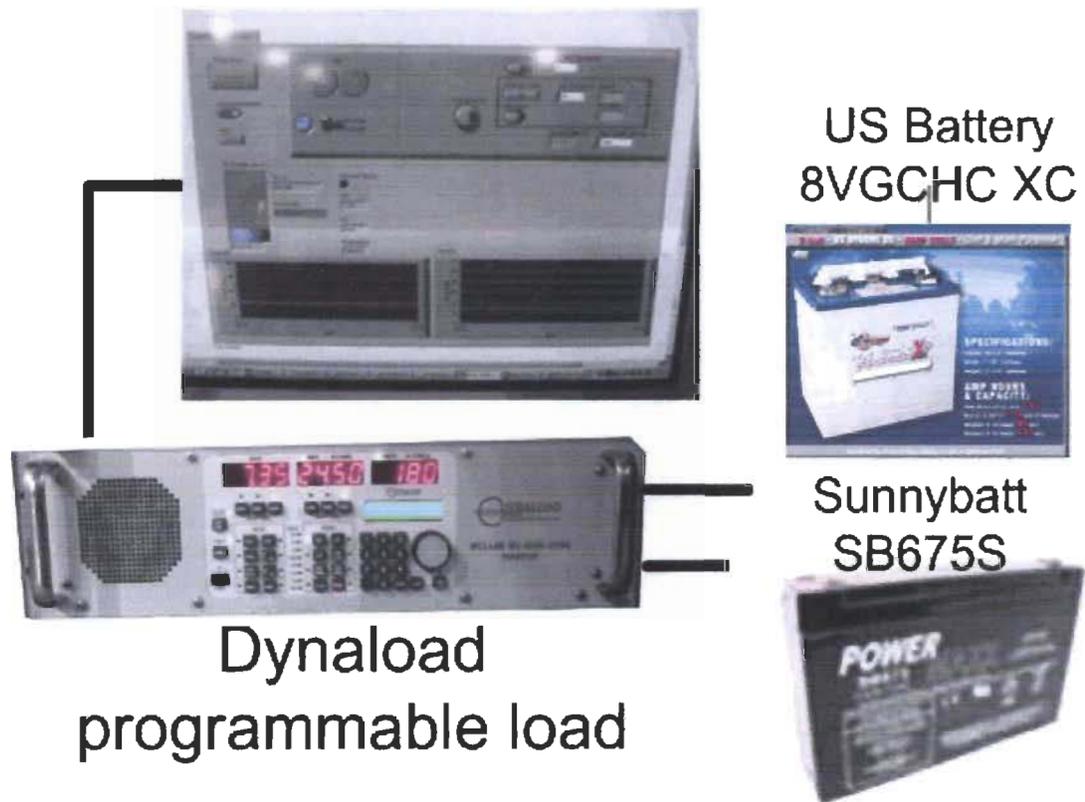


Figure 5.3 Montage expérimentale

La liste du matériel expérimental utilisé est donnée dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Liste du matériel expérimental

No.	Qté.	Modèle	Description
1	1	Ordinateur	Écran, clavier etc.
2	1	LabView®	Logiciel de commande sous Windows®
3	1	PCle-6321	Carte d'acquisition National Instruments®
4	3	US 8VGCHC-XC	Batteries à décharge profonde
5	1	WCL-88	Dynaload charge programmable
6	1	Accessoires	Borniers, câbles etc.

### 5.3 Fonctionnement

Le PC sert de base pour le système de surveillance et de contrôle. La carte d'acquisition PCle-6321 permettra d'effectuer les lectures des tensions et courants des batteries. L'instrument Dynaload® permet d'ajuster la charge. Sa capacité dépasse les 100A.

La programmation sur LabView® donne un instrument virtuel autonome. Il assure le contrôle du Dynaload®, c'est-à-dire les branchements et débranchements des charges. En conjonction avec la carte PCle, elle assure aussi la prise de mesure des courants et tensions. Les données accumulées seront enregistrées dans un fichier « Feuille de Calcul » pour traitement ultérieur.

L'intérêt particulier du banc d'essais est l'automatisation de l'application d'une charge ainsi que la prise de mesures des tensions. Le tout étant contrôlé par un instrument virtuel programmé sur l'application LabView®. L'interface graphique est conçue pour effectuer le paramétrage des décharges et recharges de batteries. Par exemple, l'interface offre des espaces pour indiquer:

- Le niveau de courant,
- Période d'échantillonnage,
- Nombre d'échantillons,
- Précision sur les mesures de tension, et
- Tension minimale à laquelle il faut terminer l'expérience.

Une fonctionnalité "cyclique" est prévue afin de pouvoir préprogrammer une séquence d'événements. Cela a été conçu afin de pouvoir établir une séquence d'application de charges qui simule les paramètres de conduite d'un véhicule électrique. Par exemple, on peut appliquer une séquence de décharge et recharge d'un véhicule qui effectue une variété de parcours.

#### **5.4 Travail Préliminaire**

Cette méthode requiert un travail préalable sur une batterie ou une série de batteries d'accumulateur. Ce travail préliminaire se réalise en plusieurs étapes. Étant donné que les travaux antérieurs ont été réalisés avec des batteries de faible capacité, moins de 100Ah, nous avons besoin de déterminer quels sont les paramètres de décharge qui seront appropriés pour des batteries de capacité de plus de 200Ah. Nous avons fait de même pour les batteries de 7,5Ah. Les fiches techniques sont reproduites en Annexe A.

L'objectif étant de déterminer les paramètres appropriés pour réaliser les expériences. Voici les paramètres à déterminer:

- Nombre de batteries à mettre en série,
- Charge à appliquer pour obtenir une différence de tension assez grande pour être mesurée,

- Durée des impulsions, et
- Temps de stabilisation après chaque impulsion.

### **Nombre de batteries**

La grande majorité des expériences réalisées dans le laboratoire utilise des séries de 3 batteries de 8V, tel que présenté ci-haut. Cela représente une tension nominale de 24V que l'on retrouve souvent dans les camions et systèmes d'énergie solaire

Par contre, les batteries de 6V sont souvent utilisées dans des systèmes d'alarmes incendies et éclairage d'urgence. Chaque batterie est donc testée seule.

### **Charge à appliquer**

Les travaux antérieurs ont été réalisés avec des batteries de capacités de 100Ah et moins. Les impulsions étaient de 10A pendant 10 secondes avec un temps de stabilisation de moins de 30 secondes. Étant donné la capacité plus grande des batteries à notre disposition, nous avons décidé d'effectuer des mesures un  $\Delta V_2$  à différentes conditions. La charge appropriée sera un compromis entre plusieurs paramètres:

- Un courant et une durée d'impulsion assez forts pour engendrer une tension minimum bien mesurable,
- Un courant et une durée d'impulsion assez faibles pour représenter moins de 1% de la capacité totale de la batterie, et
- Une période de stabilisation assez longue pour engendrer une tension maximum bien mesurable mais assez courte pour ne pas prolonger la durée totale de l'expérience.

- La durée totale de l'ensemble des impulsions et période de stabilisation doit être la plus courte possible.
- On voudrait être en mesure de réaliser une session d'expérience de 8-10hrs.

Des essais ont été réalisés à plusieurs niveaux de charge, durées d'impulsion etc. Les premiers essais ont été réalisés avec un courant de charge de 25A. Cette valeur a été choisie à cause du facteur de 2,5 entre la capacité des batteries des travaux antérieurs et celles à notre disposition et le courant utilisé dans les travaux antérieurs, soit 10A.

La durée d'impulsion de 10 secondes, tout comme dans les travaux antérieurs, a été choisie. Elle a causé des changements de tension de l'ordre d'un volt. Nous avons alors décidé de maintenir cette durée pour le reste des expériences.

Les batteries de 7,5Ah ont été testées avec un courant de décharge de 5A. Ce choix a été justifié par l'application typique de ce type de batterie, c'est-à-dire une batterie d'urgence qui doit débiter un fort courant pendant une courte période.

Pour faciliter la lecture des résultats nous avons nommé batteries selon leur capacité nominales et ensuite un numéro séquentiel. Donc, 200-1, 200-2, 200-3, 7-1, 7-2, 7-3 et 7-4.

### Résultats avec divers niveaux de courant

Le tableau suivant représente une compilation des résultats.

Tableau 5.2 Compilation des résultats de  $\Delta V_2$  en fonction de  $C_R$

<b>Charge A</b>	<b>Delta V2 V</b>	<b>Capacité Ah</b>
10	0,325	1,093
15	0,475	1,639
20	0,599	2,186
25	0,716	2,732
30	0,836	3,279
35	0,947	3,825
40	1,062	4,372
45	1,162	4,918
50	1,280	5,464
55	1,366	6,011
60	1,476	6,557
80	1,863	8,743
100	2,188	10,929

Les valeurs de  $\Delta V_2$  dans ce tableau sont les moyennes obtenues de la série d'expériences. Du point de vue théorique, des impulsions de 40 à 50A permettent d'effectuer les expériences en moins de 12 heures. Par contre, l'impulsion de 50A représente le meilleur compromis puisqu'elle donne aussi une différence de tension plus élevée. Avec cette impulsion, nous observerons une bonne différence de tension et on réalisera les expériences en moins de 12 heures.

La poursuite des expériences, pour les batteries de 200Ah, s'est donc faite avec un courant de charge de 50A, une durée d'impulsion de 10 secondes et une période de stabilisation de 30 secondes.

Nous avons utilisé un autre stratagème pour les batteries de 7,5Ah. Afin de varier les conditions de tests, nous avons utilisé un courant de décharge près du  $C_1$ . Cela respecte les conditions d'utilisation de ce type de batterie dans un rôle d'éclairage d'urgence. Dans ces cas, la batterie est sollicitée à plus grand courant pendant des temps plus courts. Le courant de décharge est donc de 5A.

### **Capacité réelle du système de batteries**

La mise en graphique, et les calculs subséquents, nécessitent l'évaluation de la capacité réelle des batteries. Cette capacité, souvent donnée en fonction du courant continu pouvant être tiré sur une période de 20 heures, est justement fonction du courant tiré. Par exemple, une batterie peut fournir 20A sur 20 heures pour un total de 400Ah, mais ne peut tirer que 40A sur une période de 7 heures pour une capacité de 280Ah.

Étant donné notre choix de tirer des impulsions de 50A et 5A respectivement, les fiches techniques nous permettent de conclure à une durée de plus de 136 minutes et moins d'une heure respectivement. Autrement dit, la batterie de 8V a une capacité de  $50A * 136min$  et celle de 6V a une capacité de  $5A * 60min$ .

Nous avons donc programmé notre Instrument Virtuel pour appliquer une charge de 50A et 5A en continue. Le paramètre d'arrêt est une tension aux bornes du système de batterie de moins de 19V et 4,8V. Cela est la recommandation du fabricant. En deçà de ces tensions les bornes de la batterie peuvent subir une sulfatation irréversible.

Les graphiques suivants montrent la décharge continue des batteries.

Notez que l'échelle du temps est en minutes dans la Figure 5.4.

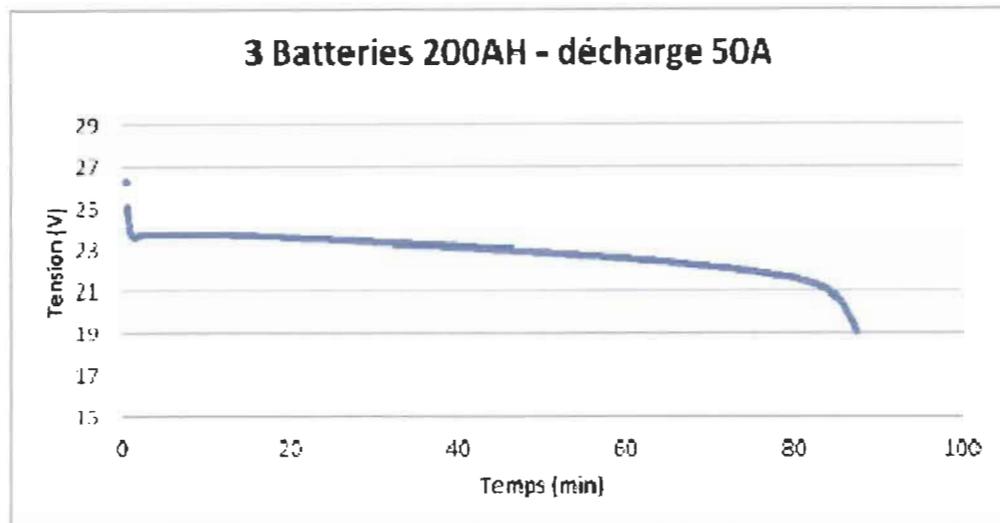


Figure 5.4 Décharge complète, 3 batteries 200Ah

Notez que la courbe rouge est la tension de la batterie et la courbe bleue est le courant de décharge. La capacité, en temps, est obtenue en notant le temps où la tension descend plus bas que 21V, soit 84min.

De la figure 5.4, la capacité  $C_{50A}$  obtenue est de l'ordre de 70Ah ( $50A \times 84min$ ). Cela est bien en deçà du 127Ah prévue dans la fiche technique.

Les figures 5.5 à 5.8 représentent la décharge complète des batteries 7.5Ah avec un courant de décharge de 5A.

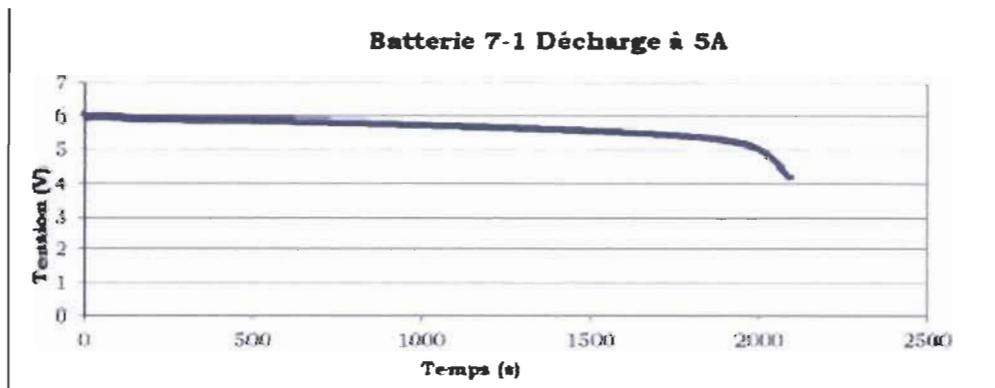


Figure 5.5 Décharge complète, batterie7-1

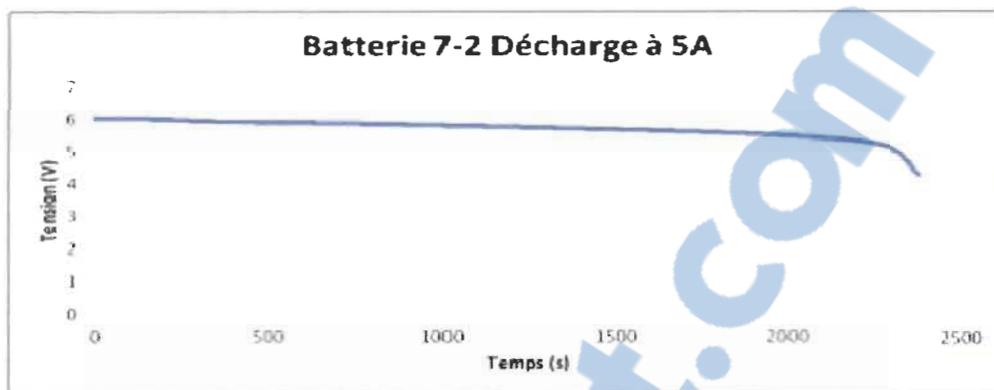


Figure 5.6 Décharge complète, batterie7-2

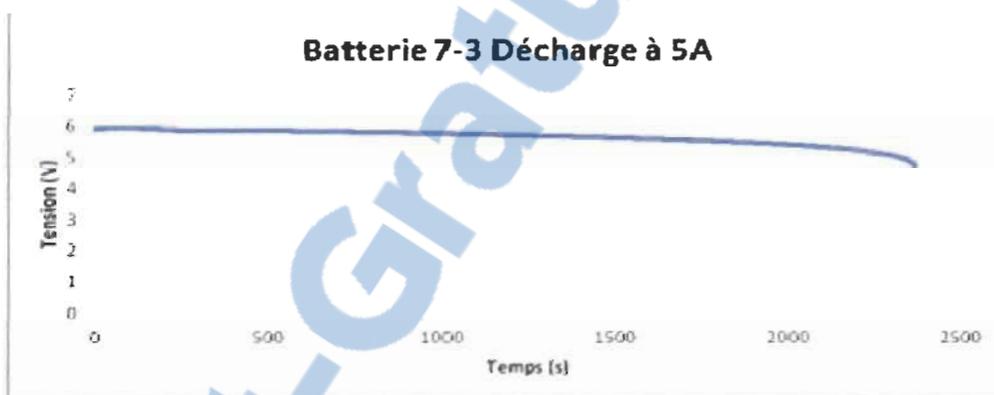


Figure 5.7 Décharge complète, batterie7-3

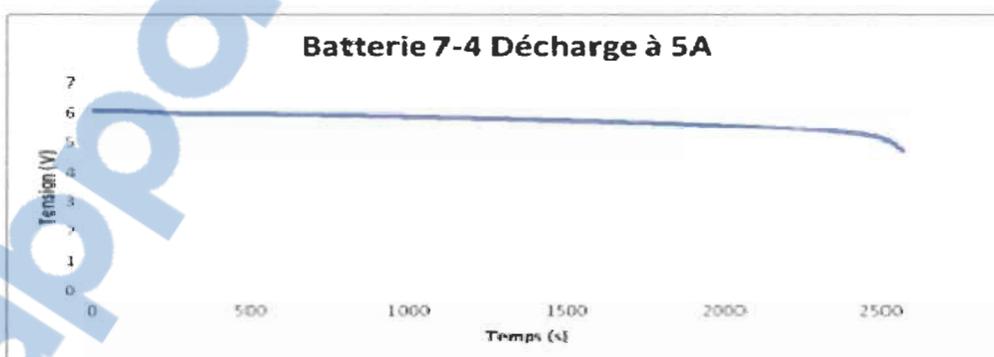


Figure 5.8 Décharge complète, batterie7-4

Dans les figures 5.5 à 5.8, on remarque que le temps requis pour atteindre 5V n'est pas le même pour toutes les batteries. Il est de 2000s, 2250s, 2250s et 2500s respectivement.

Considérant une moyenne de 2250s, les batteries ont une capacité initiale de 3,13Ah. Selon la fiche technique, le  $C_{60}$  à 4,88A est de 4,88Ah. À 3,13Ah à 5A, et tenant compte que la capacité maximale n'est pas encore atteinte, cette différence de 36% est tout de même acceptable.

### **Décharge par impulsions**

L'étape précédente a servi à confirmer la capacité maximale des batteries d'accumulateur. Pour compléter la mise en graphique de  $V_{MAX}$  en fonction de SOC et  $\Delta V_2$  en fonction de  $AHC_{NOM}$ , et nous permettre de déterminer les valeurs de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$  et  $EMF_{MIN}$  pour cette série de batteries d'accumulateur, nous devons décharger les batteries d'accumulateur par impulsion de paramètres prédéterminés.

Des impulsions régulières de 50A de durée de 10 secondes ont donc été appliquées à intervalles de 30 secondes. L'essai s'est terminé lorsque la tension minimale atteinte lors d'une impulsion est en deçà de 19V. Nous croyons que cela nous donnera des graphiques de  $V_{MAX}$  en fonction de SOC et  $\Delta V_2$  en fonction d' $AHC_{NOM}$ , avec assez de précision pour valider les paramètres. De plus, les impulsions utilisées déchargeront les batteries d'accumulateur de moins de 140mAh (50A pendant 10s). Cela représente une erreur de 0.11%, ce qui sera sans effet notable sur la précision des résultats.

Ces deux premiers types d'impulsions ont été appliqués au banc de 3 batteries. Le premier est une série d'impulsions de durée de 10 secondes suivie d'un temps de stabilisation de 30 secondes. Cela est montré dans la Figure 5.9.

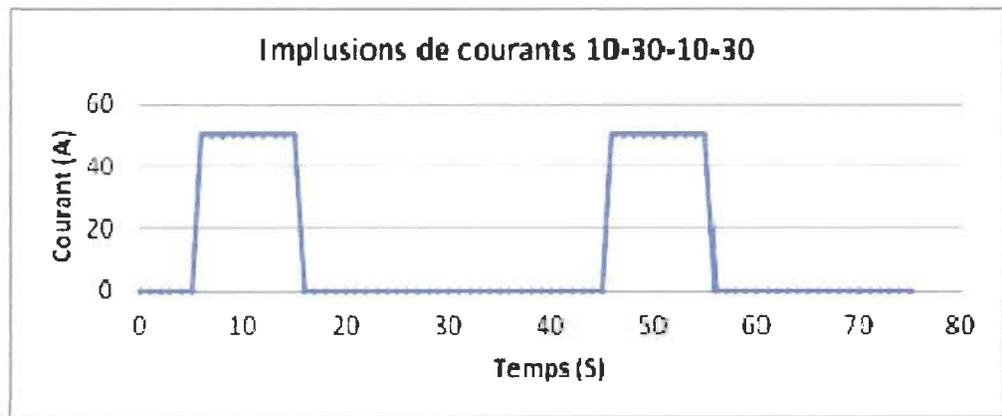


Figure 5.9 Décharge cyclique, 50A, impulsion 10s et stabilisation de 30s

La deuxième série consiste en une impulsion de durée de 10 secondes suivie d'un temps de stabilisation de 30 secondes et une seconde impulsion d'une durée de 180 secondes et un temps de stabilisation de 30 secondes. Cela est montré dans la Figure 5.10.

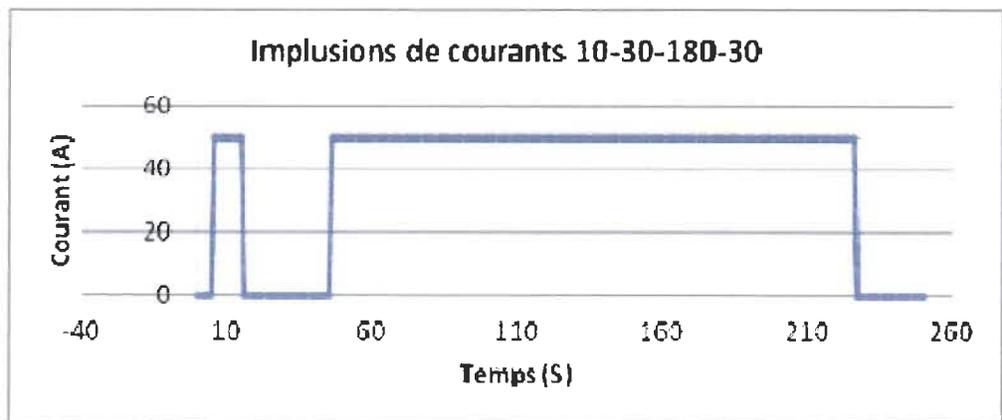


Figure 5.10 Décharge cyclique, 50A, impulsion 10s-30s, 180s-30s

L'idée derrière l'application de deux séries différentes est de valider si la première impulsion permet effectivement d'éliminer le facteur historique de la décharge. En effectuant ces deux séries, nous voulons observer si les deux courbes représentant l'équation 4.10 seront identiques ou pas.

L'expérimentation s'est ensuite poursuivie en appliquant une série d'impulsions différentes aux trois batteries individuelles. Le même courant de décharge a été utilisé mais une série différente d'impulsions a été appliquée. Dans cette série, les deux premières impulsions de durée de 10s avec une période de stabilisation de 30s servent à la méthode par deux impulsions alors que la troisième, de durée de 60 secondes et période de stabilisation de 30s sert à décharger la batterie d'une quantité connue de charge. Cela fait en sorte de raccourcir le temps de l'expérimentation tout en obtenant un nombre important de points pour réaliser la mise en graphique. Cela est représenté par la Figure 5.11.

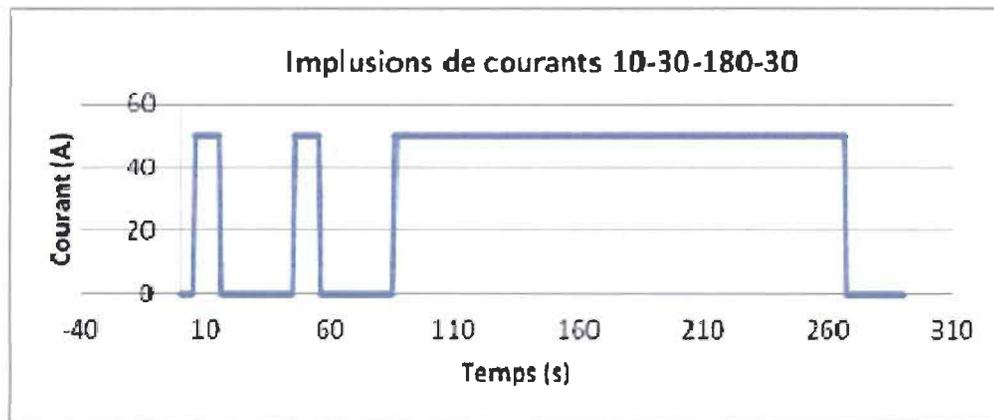


Figure 5.11 Décharge cyclique sur les Batteries 200-1, -2 et -3, 50A – 10s-30s, 10s-30s, 180s-30s.

Cette série d'impulsions a aussi été appliquée aux batteries individuelles 200-1, -2 et -3 ainsi qu'aux batteries de 7,5A (avec un courant de décharge de 5A).

Le chapitre 6 présentera les résultats obtenus avec cette méthode.

## Chapitre 6 - Étude expérimentale

### 6.1 Résultats préliminaires

Les résultats obtenus par M. Coleman, W.G. Hurley et C.K. Lee [4] démontrent que cette méthode permet de caractériser les batteries d'accumulateur avec une précision de 5% ou mieux. Dans leur étude, ils ont validé la méthode en utilisant des batteries d'accumulateur de diverses capacités initiales et divers état de charge.

Le Tableau 6.1 est la reproduction de la Table II de l'étude de M. Coleman, W.G. Hurley et C.K. Lee [4].

Table 6.1 Résultats obtenus par W.G. Hurley et C.K. Lee

Batterie		Décharge complet		Méthode à deux impulsions			
#	AHC New	AHC (Ah)	SOH (%)	$\Delta V$	I(A)	AHC	SOH (%)
1	10	8.4	84	0.464	5	8.1	81
2	17.2	14.52	84	0.4814	10	15.4	89
3	17.2	14.62	85	0.5174	10	13.9	81
4	17.2	8.77	51	0.5926	10	11.6	67
5	17.2	10.06	58	0.6012	10	11.4	66
6	38	33	87	0.565	20	35.3	93
7	100	99	99	0.245	20	95.7	99

Il faut noter que ce tableau a été établi avec des batteries de capacités différentes. Notre expérimentation utilise deux séries de batteries de même capacité théorique. Les graphiques des Figures 6.1 et 6.2 sont la reproduction des Figures 3 et 4 de l'étude par M. Coleman,

W.G. Hurley et C.K. Lee [4] en ce qui concerne leur mise en graphique des équations 4.10 et 4.12.

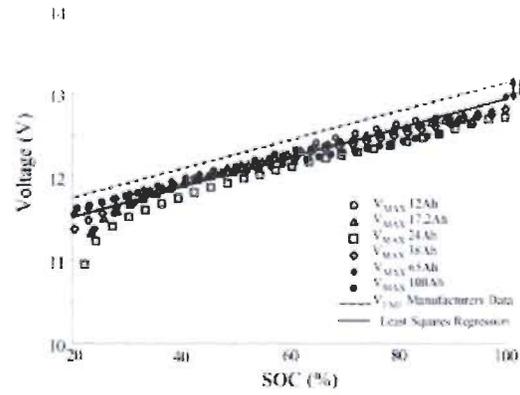


Fig. 3.  $V_{MAX}$  of different AHC batteries with 20-A pulse.

Figure 6.1 Reproduction de la Figure 3 de la référence [4]

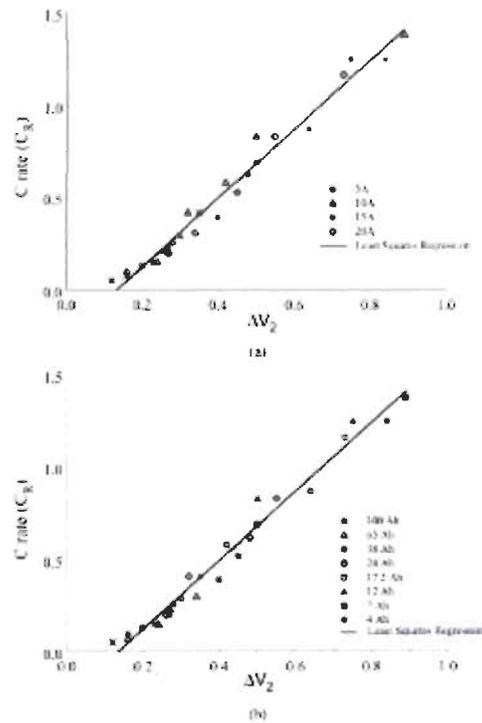


Fig. 4.  $C_R$  vs  $\Delta V_2$ . (a) Under variable current. (b) Under variable battery capacity.

Figure 6.2 Reproduction de la Figure 4 de la référence [4]

## 6.2 Résultats avec 3 batteries 200Ah

Lors de nos essais de décharge impulsionnelle sur l'ensemble de trois batteries 200Ah, nous avons deux impulsions de largeurs différentes, soit 10s et 180s (Figure 5.10). Nous avons donc cru intéressant de considérer chacune de ces impulsions comme étant la première de la série de deux impulsions. Ceci a l'avantage de nous donner deux séries de résultats par un essai de décharge.

Les Figures 6.3, 6.4 et 6.5 montrent les graphiques du courant et de la tension obtenus dans un cycle de recharge typique. Notez qu'il y a eu plus de cent cycles pendant ces décharges.

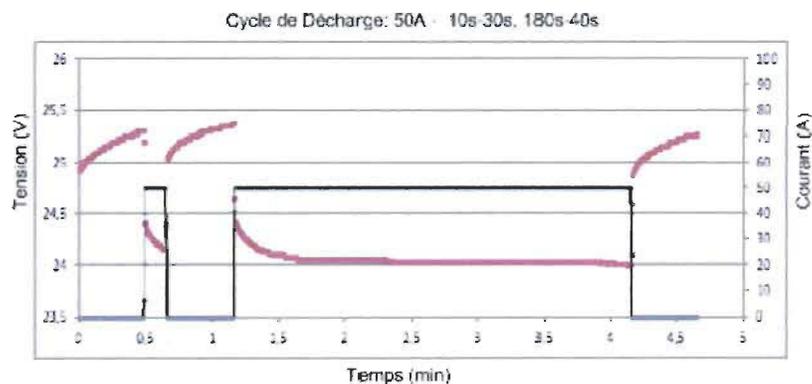


Figure 6.3 Décharge cyclique 10-180

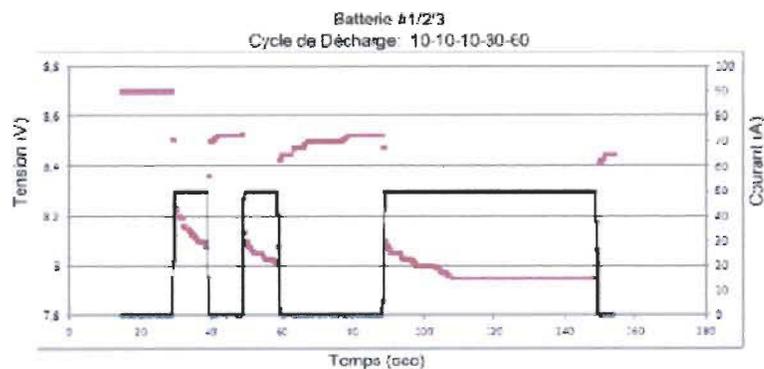


Figure 6.4 Décharge cyclique 10-10-60

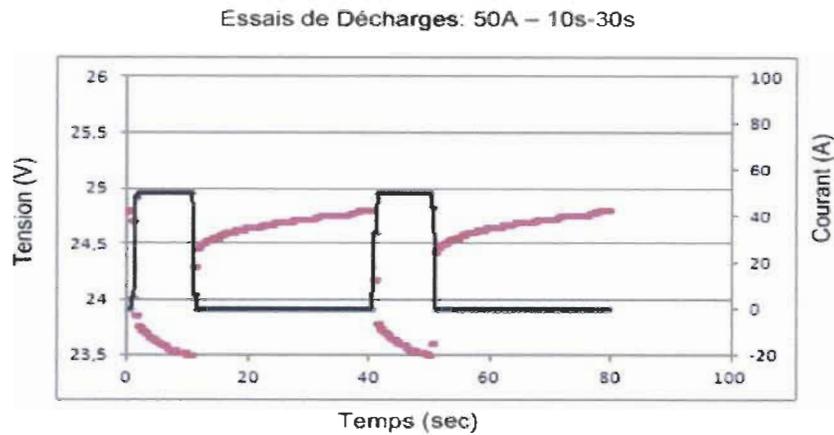


Figure 6.5 Décharge cyclique 10-10

Les graphiques suivants (Figures 6.6 et 6.7) représentent donc  $V1_{MAX}$  en fonction de SOC pour ces deux largeurs d'impulsion pour l'ensemble des 3 batteries de 200Ah. . Le graphique de la Figure 6.8 représente  $C_R$  en fonction de  $\Delta V2$ . Notez que la mise en graphique de la tension de la batterie avec le temps n'a pas été reproduite ici. Ayant durée plus de 5 heures dans le cas de batteries à 200Ah les graphiques n'ont pas de détails pertinents à montrer.

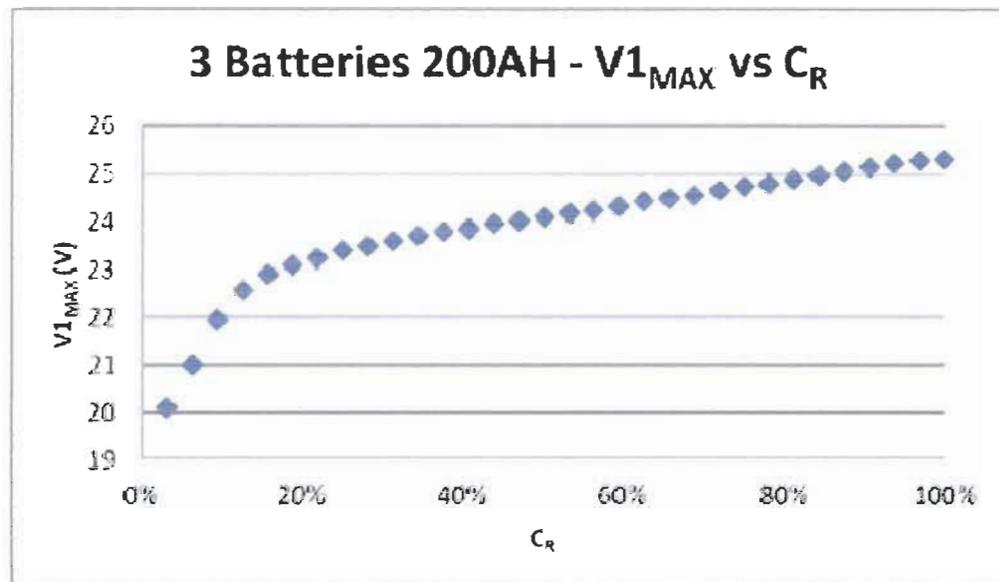


Figure 6.6 Mise en graphique de l'équation 4.10, 3 batteries, petite impulsion

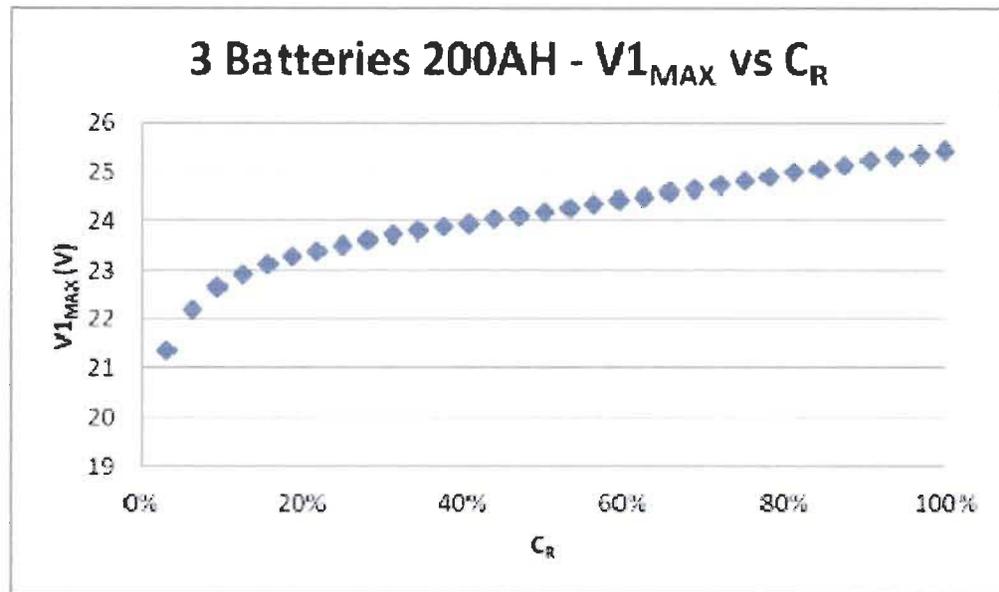


Figure 6.7 Mise en graphique de l'équation 4.10, 3 batteries, grande impulsion

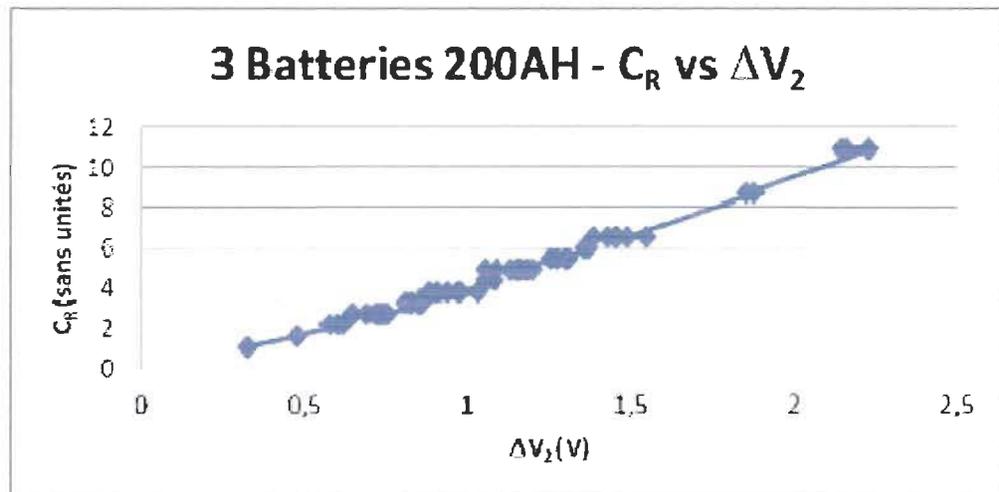


Figure 6.8 Mise en graphique de l'équation 4.12, 3 batteries

### 6.2.1 Analyse préliminaire

Nous remarquons que les deux graphiques (Figures 6.6 et 6.7) ont sensiblement la même allure. En fait, la partie linéaire est surtout limitée entre les valeurs de  $C_R$  de 20%-100%.

En utilisant la fonction d'Excel de trouver la courbe de tendance linéaire des figures 6.6 et 6.7, nous obtenons les équations 6.1 et 6.2.

$$y = 2,5414x + 22,819 \quad (6.1)$$

$$y = 2,557x + 22,916 \quad (6.2)$$

Cela nous permet de conclure que l'effet d'effacement de l'historique est réel. Cette première hypothèse de la méthode par deux impulsions est donc valable.

De la figure 6.5, nous observons aussi que la relation de l'équation 4.12 pour notre ensemble de 3 batteries est linéaire. Son équation, obtenue avec la fonction tendance d'Excel, est la suivante:

$$y = 5,2945x + 1,0886 \quad (6.3)$$

Cette deuxième hypothèse de la méthode par deux impulsions est donc valable.

Forts de ces résultats, nous avons poursuivi l'expérimentation avec les batteries individuelles.

### **6.3 Résultats avec batteries individuelles**

Lors de nos essais de décharge impulsionnelle sur les batteries individuelles de 200Ah, nous avons deux petites impulsions de même largeurs suivies par une grande impulsion de décharge, soit 10s et 60s (Figure 6.4). Les résultats sont donc les données obtenues avec les deux premières impulsions.

Les graphiques suivants, (Figures 6.9 à 6.15) représentent donc  $V_{1MAX}$  en fonction de  $C_R$ , donc SOC pour les batteries individuelles.

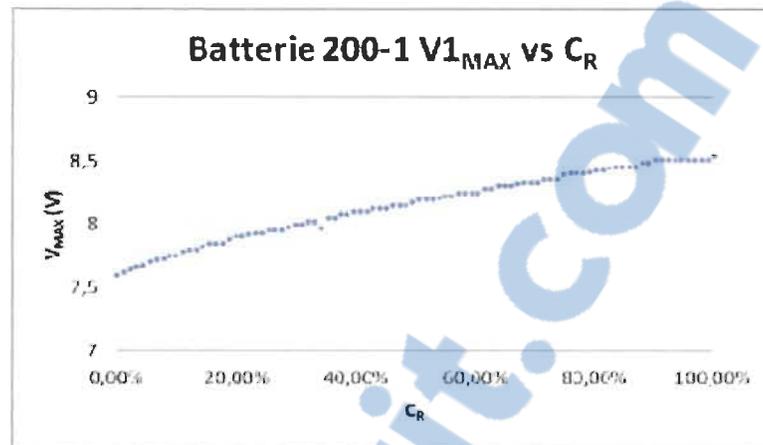


Figure 6.9 Mise en graphique de l'équation 4.10, batterie 200-1

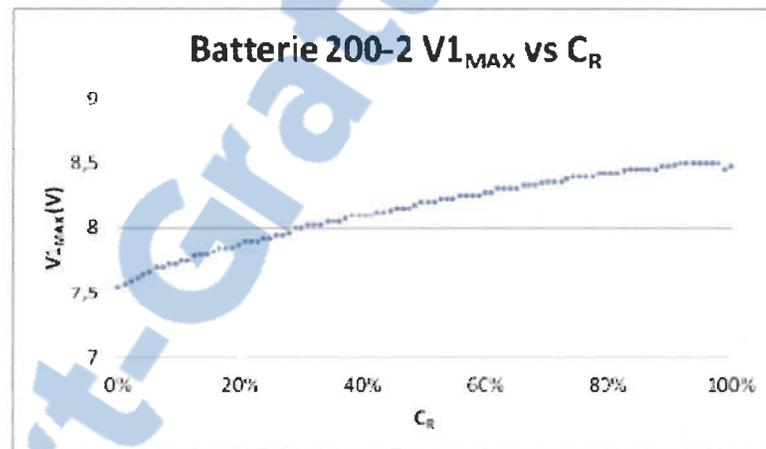


Figure 6.10 Mise en graphique de l'équation 4.10, batterie 200-2

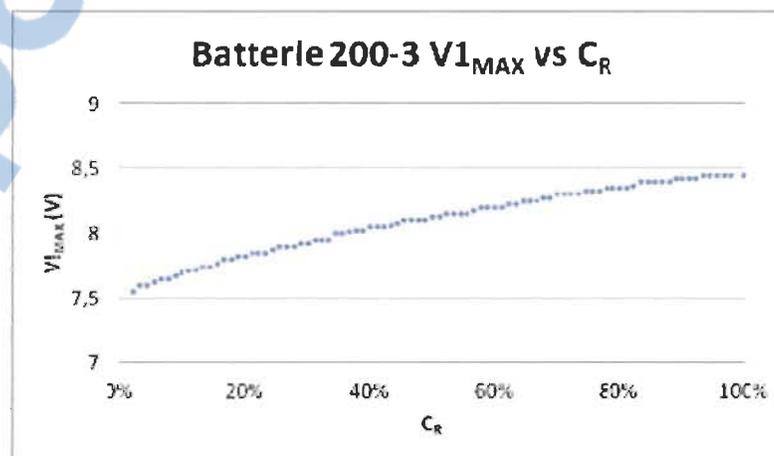


Figure 6.11 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 200-3

À partir des figures 6.9, 6.10 et 6.11 nous obtenons les équations 6.4, 6.5 et 6.6.

$$y = 0,8934x + 7,7007 \quad (6.4)$$

$$y = 0,9123x + 7,6908 \quad (6.5)$$

$$y = 0,8940x + 7,6441 \quad (6.6)$$

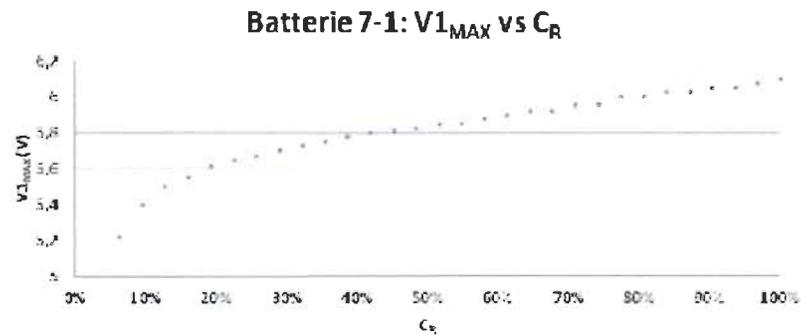


Figure 6.12 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-1

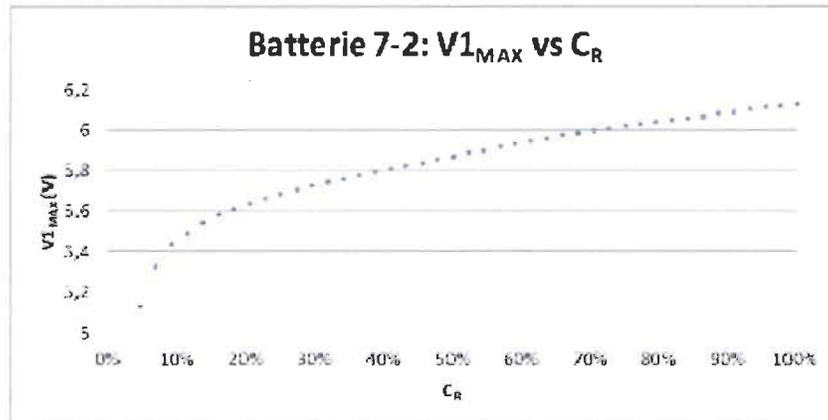


Figure 6.13 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-2

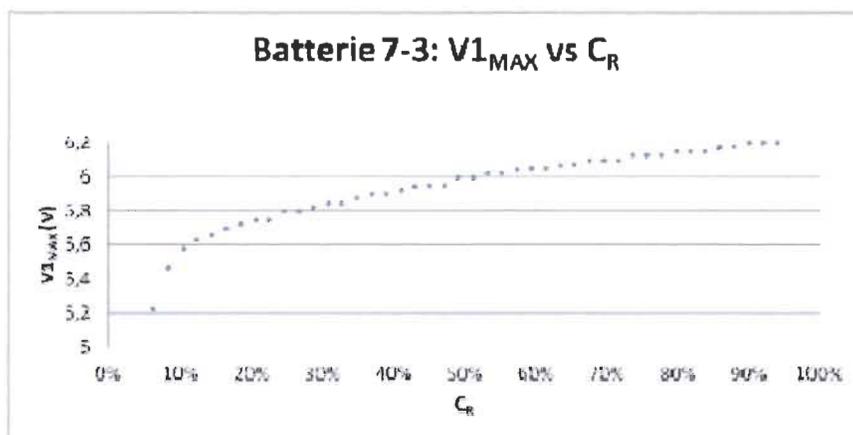


Figure 6.14 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-3

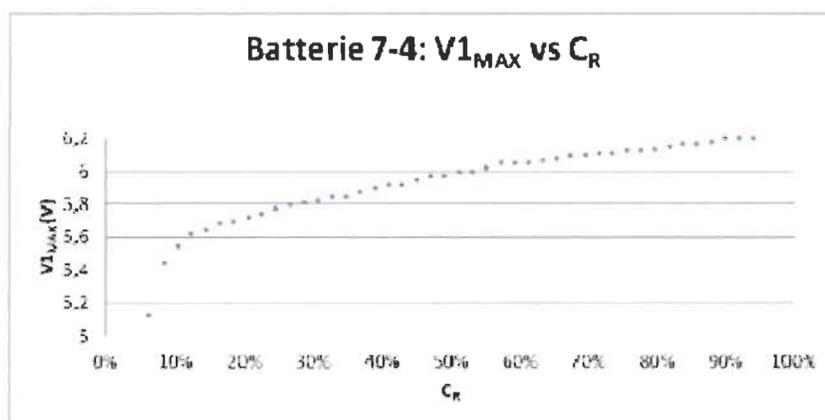


Figure 6.15 Mise en graphique l'équation 4.10, batterie 7-4

À partir des figures 6.12 à 6.15 nous obtenons les équations 6.7 à 6.10.

$$y = 0,5557x + 5,5509 \quad (6.7)$$

$$y = 0,6017x + 5,5548 \quad (6.8)$$

$$y = 0,5906x + 5,6737 \quad (6.9)$$

$$y = 0,5916x + 5,6358 \quad (6.10)$$

Les graphiques suivants, (Figures 6.16, à 6.22) représentent  $C_R$  en fonction de  $\Delta V_2$  pour les batteries individuelles.

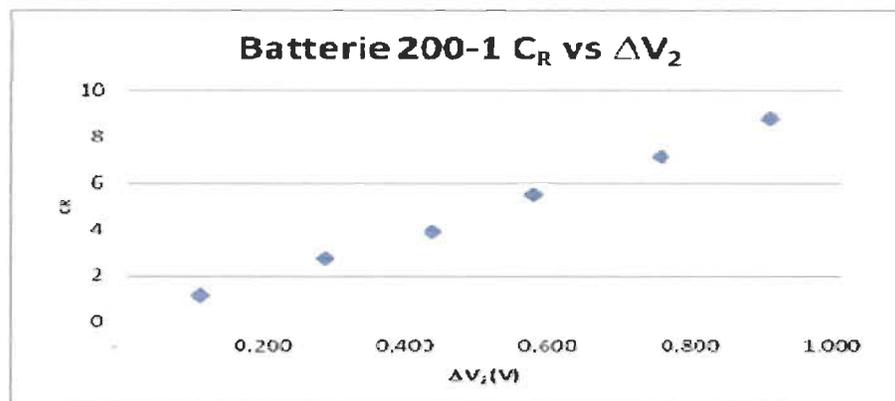


Figure 6.16 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 200-1

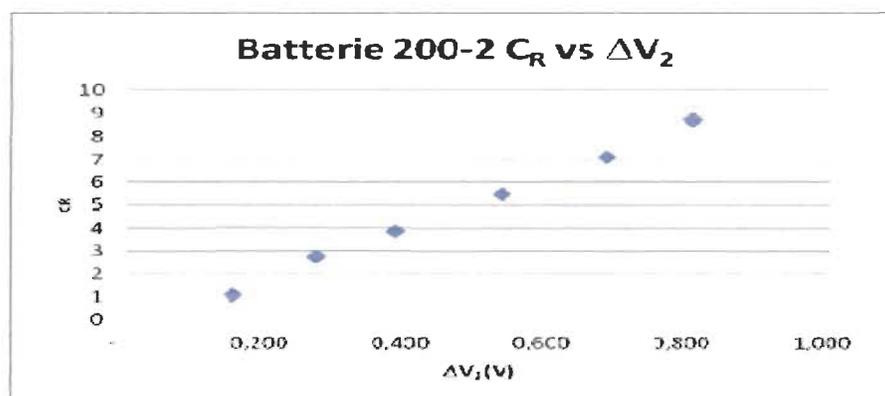


Figure 6.17 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 200-2

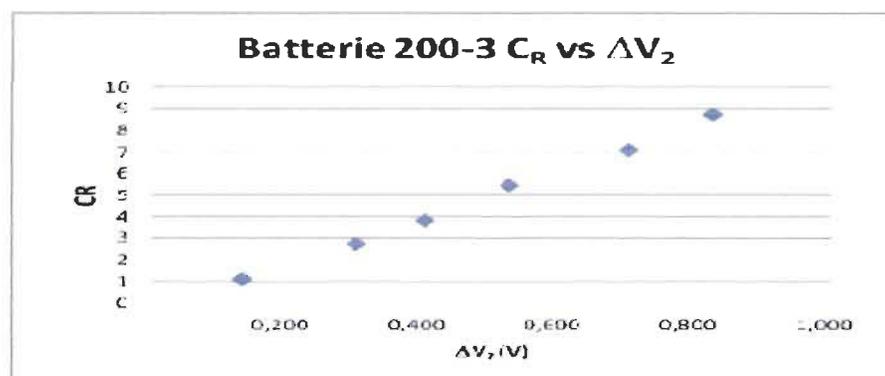


Figure 6.18 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 200-3

À partir des figures 6.16, 6.17 et 6.18 nous obtenons les équations 6.11, 6.12 et 6.13.

$$y = 9,5284x + 0,456 \quad (6.11)$$

$$y = 11,384x - 0,4988 \quad (6.12)$$

$$y = 11,053x - 0,473 \quad (6.13)$$

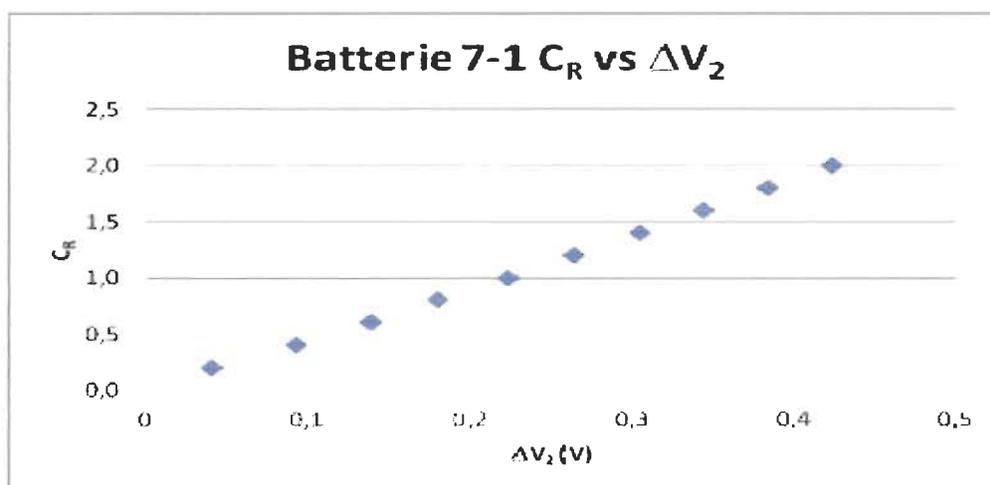


Figure 6.19 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-1

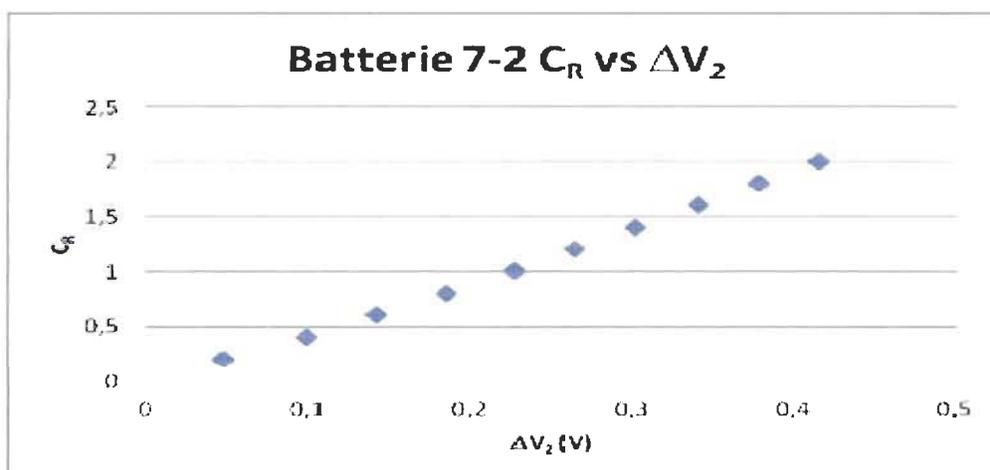


Figure 6.20 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-2

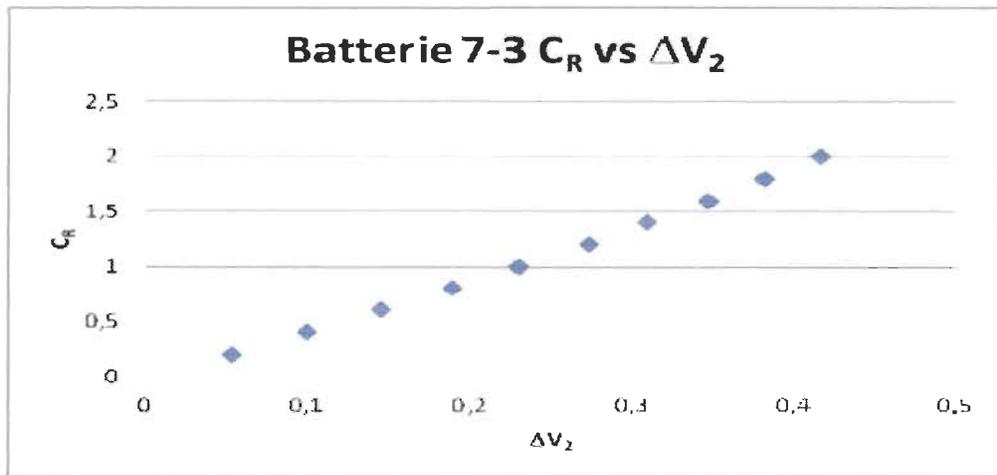


Figure 6.21 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-3

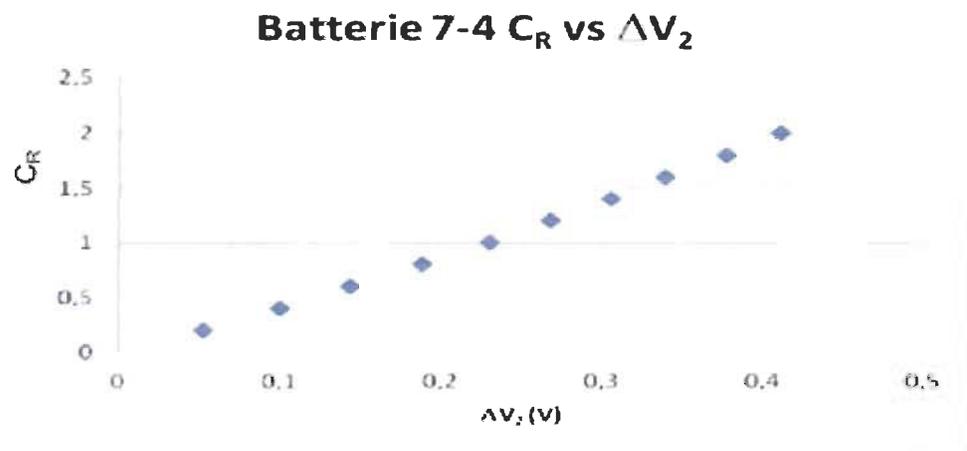


Figure 6.22 Mise en graphique de l'équation 4.12, batterie 7-4

À partir des figures 6.19 à 6.22 nous obtenons les équations 6.14 à 6.17.

$$y = 4,763x - 0,0938 \quad (6.14)$$

$$y = 4,9677x - 0,0937 \quad (6.15)$$

$$y = 4,9506x - 0,1094 \quad (6.16)$$

$$y = 5,0289x - 0,114 \quad (6.17)$$

### 6.3.1 Analyse préliminaire

Pour faciliter l'analyse, regroupons les équations pour les deux types de batteries dans un tableau synthèse. Dans le tableau 6.2 nous présentons l'équation 4.10 sous la forme de  $V_{MAX}$  vs SOC.

L'équation 4.10 a donc été réécrite sous la forme:

$$V_{MAX} = \alpha SOC - (\beta - EMF_{MIN}) \quad (6.18)$$

Table 6.2 Synthèse des équations

Batterie	Équation 4.10	Équation 4.12
	$V_{MAX} = \alpha SOC - (\beta - EMF_{MIN})$	$C_R = \delta \Delta V_2 + \gamma$
3 batteries 200Ah	$y = 2,5414x + 22,819$ $y = 2,5570x + 22,916$	$y = 5,2945x + 1,0886$
Batterie 200-1	$y = 0,8934x + 7,7007$	$y = 9,5284x + 0,456$
Batterie 200-2	$y = 0,9123x + 7,6908$	$y = 11,384x - 0,4988$
Batterie 200-3	$y = 0,8940x + 7,6441$	$y = 11,053x - 0,473$
Batterie 7-1	$y = 0,5557x + 5,5509$	$y = 4,763x - 0,0938$
Batterie 7-2	$y = 0,6017x + 5,5548$	$y = 4,9677x - 0,0937$
Batterie 7-3	$y = 0,5906x + 5,6737$	$y = 4,9506x - 0,1094$
Batterie 7-4	$y = 0,5916x + 5,6358$	$y = 5,0289x - 0,114$

Nous remarquons que l'allure des graphiques est effectivement linéaire. En se comparant avec la forme générale d'une droite:

$$y = mx + b \quad (6.19)$$

Où

m est la pente et b l'ordonnée,

Nous pouvons comparer ces droites entre elles pour chaque série d'essai. Par exemples, comparer m et b dans les équations du même type et pour des batteries semblables. Cette comparaison peut se faire en comparant les valeurs de m et de b de chaque équation avec la valeur moyenne respective de m et b. Le tableau 6.3 reprend les valeurs des pentes et ordonnée de chaque équation et présente l'écart par rapport à la moyenne des valeurs.

Table 6.3 Calculs des écarts des valeurs des pentes et ordonnés pour les équations 4.10

<b>Batterie</b>	<b>Pentes : m</b>	<b>Écart avec la moyenne %</b>	<b>Ordonnés : b</b>	<b>Écart avec la moyenne %</b>
3 batteries 200Ah	2,541	0,31%	22,819	0,21%
	2,557	0,31%	22,916	0,21%
Batteries 200Ah	0,8934	0,72%	7,7007	0,29%
	0,9123	1,38%	7,6908	0,16%
	0,8940	0,66%	7,6441	0,45%
Batterie 7Ah	0,5557	4,99%	5,5509	0,94%
	0,6017	2,87%	5,5548	0,87%
	0,5906	0,97%	5,6737	1,25%
	0,5916	1,15%	5,6358	0,57%

Table 6.4 Calculs des écarts des valeurs de pentes et ordonnées pour les équations 4.12

Batterie	Pentes : m	Écart avec la moyenne %	Ordonnés : b	Écart avec la moyenne %
Batteries 200Ah	9,5294	10,57%	0,456	4,19%
	11,384	6,84%	0,4988	4,8%
	11,053	3,73%	,0473	0,62%
Batterie 7Ah	4,763	3,34%	0,0938	8,69%
	4,9677	0,81%	0,0937	8,79%
	4,9506	0,47%	0,1094	6,5%
	5,0289	2,06%	0,114	10,98%

Rappelons que la pente et l'ordonnée des équations 6.18 et 4.12 sont respectivement  $\alpha - \delta$  et  $\beta - \gamma$ . On les retrouve dans les équations 6.20 et 6.21.

De l'équation 6.18 nous obtenons;

$$m = \frac{V_{MAX}}{\alpha} \quad \text{et} \quad b = \frac{\beta - EMF_{MIN}}{\alpha} \quad (6.20)$$

De l'équation 4.12 nous obtenons;

$$m = \delta \quad \text{et} \quad b = \gamma \quad (6.21)$$

Pour que les résultats soient probants, il ne suffit pas que les relations soient linéaires mais que les valeurs des pentes et ordonnées soient identiques.

## Chapitre 7 - Analyses et discussions

Il est important de se rappeler que les objectifs de cette étude sont de déterminer une méthode rapide de validation de l'état de charge et l'état de santé de batteries par une méthode rapide et précise.

### 7.1 Hypothèses

La méthode proposée, par deux impulsions, est basée sur des hypothèses qui se sont avérées vraies. C'est-à-dire :

- La relation de l'équation 4.10 est valable et linéaire
- La relation de l'équation 4.12 est valable et linéaire
- L'application de deux impulsions permet de négliger l'historique des batteries

Ces constatations sont importantes mais insuffisantes pour conclure que la méthode peut s'appliquer en pratique. C'est-à-dire dans une application réelle. Il reste donc à confirmer sa facilité d'application, sa rapidité d'exécution et sa précision.

Il faut noter que le SOC et SOH des batteries sous essais ne sont d'une grande importance. C'est-à-dire que l'objectif est de valider la méthode et non pas d'obtenir des résultats concrets.

## 7.2 Facilité d'application

On peut facilement comprendre qu'une fois mise en graphique, les équations 4.10 et 4.12 sont très simples à utiliser dans une application pratique car elles ne comportent aucune difficulté à résoudre. En fait, elles sont des équations linéaires de premier degré. Les valeurs des coefficients peuvent être obtenues par diverses méthodes bien connues. Par exemple, lecture directe sur les graphiques, régression linéaire sur les données et analyse par logiciel spécialisé.

Une fois obtenu, les coefficients sont remplacés par leurs valeurs numériques dans les équations 4.10 et 4.12. Dans le cas de la détermination de l'état de charge, il suffit alors de mesurer la tension  $V_{MAX}$  pour en calculer sa valeur à partir de l'équation 4.10. Dans le cas de l'état de santé, il faut mesurer  $\Delta V_2$  et passer par le même processus mais en appliquant les équations 4.11 à 4.13.

## 7.3 Rapidité

Cette méthode, une fois les coefficients connus, est donc très rapide. En fait, il s'agit d'appliquer une série de deux impulsions, mesurer les écarts de tensions et résoudre une équation linéaire. Cela prendra moins de 2 minutes.

Par contre, l'obtention des coefficients requiert une expérimentation simple, mais de longue durée. Prenons en exemple un cas pratique. Pour obtenir les coefficients des équations 4.10 et 4.12 cela exige de prendre;

- La mesure réelle de la capacité de la batterie, soit une décharge complète qui dure au moins 8 heures.

- L'application d'une série de deux impulsions, à toutes les 3-5 minutes, et jusqu'à l'épuisement de la batterie. Puisque la décharge créée par les impulsions est minime, on peut prévoir une durée de plus de 36 heures. Une alternative plus rapide est d'effectuer une décharge de 5-10% entre les impulsions. Cela peut ramener l'expérimentation à moins de 8 heures.

Mais ceci ne tient pas compte du temps nécessaire pour analyser les données brutes obtenues pendant les expériences. En fait, chaque expérience génère plus de 180000 lignes de données, 10 lignes par secondes pendant 300 minutes. Même si le programme Labview est utilisé dans la réalisation des essais, il faut prendre ces données brutes, sous forme de fichier, les transférer dans un logiciel de traitement et les analyser afin d'en tirer des informations utiles.

Pour réaliser l'analyse, il faut retrouver les valeurs maximales et minimales à des intervalles réguliers. Si ces intervalles sont réguliers, on peut appliquer des fonctions existantes des chiffriers pour les trouver. En pratique les intervalles d'applications des impulsions ne sont pas constantes, il y a des variations, parfois de 0.2 secondes, dans la durée des impulsions, le moment de leur application etc. Cela a empêché donc l'utilisation des fonctions et méthodologies automatisées des chiffriers pour déterminer les valeurs de  $V_{MAX}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ , etc.

Une méthode manuelle, de révision ligne par ligne des données, a donc été utilisée. Cela comporte plusieurs heures d'analyse par essai.

Alors que la réalisation finale de la méthode ne dure que quelques minutes, le travail préliminaire est assez coûteux en temps. On parle de 30 à 40 heures d'expérimentation par

modèle de batterie. S'il faut effectuer plus d'une série de tests afin de confirmer une moyenne statistique, on parle alors de centaines d'heures d'expérimentation.

#### 7.4 Précision

Dans la table 6.3, nous avons relevé les écarts entre les valeurs des coefficients par rapport à leur moyenne. Ces écarts atteignent 10%, ce qui est loin d'être acceptable.

Cette expérimentation nous donne des valeurs de coefficients qui sont valables pour une capacité de charge donnée, soit celle de la batterie au moment de l'expérience. Dans nos expériences, nous savons déjà que cette capacité n'est pas constante à travers la durée de vie de la batterie. C'est pourquoi nous tenons aussi compte de l'état de santé de la batterie.

Ce qui complique l'application de la méthode est que la capacité de la batterie, en sortant de l'usine, n'est pas à son maximum mais peut prendre jusqu'à 70 cycles de charge - décharge avant de l'atteindre. Cela implique que les valeurs des coefficients changeront pendant cette période de rodage. De plus il y aura deux mesures de capacité possible pour une même lecture de  $\Delta V_2$ . Autrement dit, la courbe est symétrique par rapport au point maximum.

Tout système de détermination de l'état de charge et de santé des batteries doit donc tenir compte du changement de la capacité des batteries pendant la période de rodage.

Cela n'est pas une tâche facile car il n'existe aucun modèle pour représenter le changement de la capacité des batteries pendant la période de rodage. En fait, nous savons que la capacité change, que cela peut prendre jusqu'à 70 cycles de charges - décharges, mais aucune étude ne présente cette variation. Pour être applicable dans une application

concrète, il faudrait donc établir cette variation. Sans quoi, l'évaluation de l'état de santé et l'état de charge sera faussée, au moins pendant la période de rodage de la batterie.

Une manière de contourner cet inconvénient serait d'appliquer une autre méthode de détermination de l'état de charge et de santé de la batterie pendant la période de rodage. Il y a tout de même une difficulté à déterminer quelles sont les conditions qui permettent de conclure que la période de rodage est terminée. Si l'on tient compte que ces conditions sont aussi en relation avec le modèle d'utilisation de la batterie, cette méthode ne semble réalisables que dans des cas particuliers où les cycles de charges - décharges sont régulières et prévisibles. Par exemple, des systèmes alimentés par panneaux solaires avec batteries.

Une autre manière de tenir compte de la période de rodage des batteries est d'effectuer une série d'expériences sur des batteries neuves en appliquant des cycles de charges - décharges entre chaque série. Cela permettra d'obtenir un modèle de base des changements des coefficients pendant la période de rodage.

Finalement, on pourrait aussi demander aux fabricants d'inclure le rodage en usine afin que chaque batterie soit à capacité maximale dès sa première utilisation. Mais cela réduirait la durée de vie utile des batteries.

La précision des résultats est aussi dépendante de la précision des impulsions appliquées sur les batteries. Dans notre cas, les périodes d'application des impulsions et les périodes de repos sont sous la commande de l'application Labview et le contrôleur Dynaload. De plus, il y a un temps de montée des impulsions qui est non négligeable. On remarque, en analysant les données manuellement, qu'il peut avoir une différence de près de 0.25 secondes dans les périodes, incluant les et temps de montée, d'une impulsion à une

autre. Par rapport à la période la plus courte, 10 secondes, cela représente une erreur de 2.5%.

Dans le cas des batteries de 7,5Ah, la valeur du courant de décharge pouvait varier de 0,05A sur la période d'application de 10 s, ce qui représente 1% d'erreur.

Nous sommes loin de notre objectif d'une précision finale de 1%.

## Chapitre 8 - Conclusion

La majorité des modèles existants pour caractériser des batteries de type plomb-acide offre une manière de déterminer l'état de charge à partir de la lecture d'un paramètre qui lui soit relié. Habituellement, cela est en rapport avec la résistance interne de la batterie.

Que nous utilisions la Courbe de Décharge, un modèle physico-chimique, un modèle électrique ou autre, l'analyse subséquente est basée sur le rapprochement entre certaines caractéristiques électriques avec l'état de charge de la batterie. Ces caractéristiques sont mesurables par des sondes électriques mais demandent des heures d'essais ou des temps de simulation de plusieurs dizaines de minutes. Nous constatons aussi que la caractérisation de l'état de sante de batterie n'est pas mentionnée dans ces modèles.

La méthode d'évaluation de l'état de charge et de santé proposée par Coleman, Hurley et Lee [4] s'est avérée être juste à certains égards. En fait, nos résultats confirment que les batteries se conforment avec assez de justesse aux deux relations linéaires sur lesquelles est basée cette méthode. De plus, le temps de réalisation de la méthode est très court, soit moins de 5 minutes.

Par contre, la constance des valeurs des pentes et ordonnées entre batteries de même type est insatisfaisante. Pour être applicables dans des systèmes réels, il faudrait que ces valeurs soit à 1% l'un de l'autre.

La méthode proposée offre donc une solution d'application rapide pour l'évaluation de l'État de Charge et l'État de Santé d'une batterie. Cependant, la précision recherchée n'est

pas atteinte. Il faudrait réaliser des expériences avec des temps l'application des impulsions mieux contrôlés afin d'éliminer cette source d'erreur. En réduisant cette source d'erreur on peut prétendre à réduire l'erreur dans les différentes pentes et ainsi obtenir une équation unique pour chaque modèle de batterie.

En réalisant des essais de ce type directement en usine, nous pouvons espérer constater que chaque modèle de batterie produite pourrait être caractérisé par les deux graphiques présentées dans la section Résultats. Outre l'avantage temporel, cette méthode peut permettre de réaliser un système autonome ou un système intégré d'évaluation des paramètres des batteries. Par exemple, un système autonome, et portatif, pourrait être utilisé pour évaluer les paramètres de batteries de luminaires de rues alimentées au solaire lors d'une inspection annuelle. L'essai de 5 minutes permettant de déterminer si la batterie a atteint sa fin de vie ou pas.

Dans un système intégré, un processus d'évaluation pourrait être intégré au système de contrôle ou commande afin de faire connaître l'état des batteries de manière "presque continu". Prenons comme exemple un véhicule électrique. À chaque fois que le véhicule s'arrête, ou sur commande externe, le processus d'évaluation est mise en route et les résultats s'affichent sur le tableau de bords du véhicule au prochain démarrage.

Dans tous les cas, cette méthode est une alternative rapide, précise et valable pour l'évaluation des systèmes de batteries.

## Bibliographie et références

- [1] *Le Recyclage des piles au Canada* -mise à jour de 2009, Environnement Canada, préparé par Kelleher Environmental.
- [2] A. Kawamura, T. Yanagihara, "State of Charge Estimation of Sealed Lead-Acid Batteries used for Electric Vehicles", 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 98, 17-22 mai 1998, Vol. 1, pages 583-587.
- [3] C.B. Zhu, M. Coleman et W.G. Hurley, "State of Charge Determination in a Lead-Acid Battery : Combined EMF Estimation and Ah-balance Approach", 34th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'03, 20-25 juin 2004 Page(s): 1908 - 1914 Vol.3, Acapulco, Mexico.
- [4] M. Coleman, W.G. Hurley and C.K.Lee, "An Improved Battery Characterization Method Using a Two-Pulse Load Test", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 2, juin, 2008, pages 708-713.
- [5] O. Caumont, P. Le Moigne, C. Rombaut, X. Mureret, and P. Lenain, "Energy Gauge for Lead-Acid Batteries in Electric Vehicles", IEEE Transactions on energy conservation, Vol. 15, No. 3, sept. 2000, 7 pages.
- [6] M. Saurandip, S.K. Sinha, et K. Muthukumar, "Estimation of State of Charge of Lead Acid Battery using Radial Basis Function", Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE; 2001, Vol.1, pages 131-136.
- [7] Y. Morita, S. Yamamoto, S. Kakogawa et N. Mizuno, "On-Line Detection System of State-of-Charge in Lead Acid Battery Using Multiple Detectors", The 23th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 5-8 novembre 2007, Taipei, Taiwan.

- [8] C.S. Moo, K.S. Ng, Y.P. Chen et Y.C. Hsich, "State-of-Charge Estimation with Open-Circuit Voltage for Lead-Acid Batteries", 2nd Annual IEEE Power and Energy Conference, PECon, 1-3 décembre 2008, pages 972-976, Johor Baru, Malaisie.
- [9] Wikipédia: Batterie d'accumulateur,  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Secondary\\_cell\\_energy\\_density-fr.svg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Secondary_cell_energy_density-fr.svg), 12 octobre, 2012.
- [10] Fiche technique d'une batterie EP100-12, [www.powerstream.com/bb/ep100-12.pdf](http://www.powerstream.com/bb/ep100-12.pdf)
- [11] Énergie Douce, Tout savoir sur le fonctionnement et les différents types de batteries,  
<http://www.energiesdouce.com/content/24-conseils-faq-tout-savoir-sur-le-fonctionnement-et-les-differents-types-de-batteries>, © 2012 Energie Douce
- [12] Thermo Analytics, Battery Modeling, <http://www.thermoanalytics.com/docs/batteries.html>, © 2012 ThermoAnalytics, Inc.
- [13] R.C. Kroeze et P.T. Krein, « Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations » University of Illinois at Urbana-Champaign Department of Electrical and Computer Engineering, 2008.
- [14] N.S. Zhai, M.W.Li, W.L. Wang, D.L.Zhang et D.G. Xu, "The Application of the IES in Li-ion Batteries Measurement", Journal of Physics Conference Series 48, pages 1157 – 1161, 2006.
- [15] Shifei Yuan, Hongjie Wu et Chengliang Yin, " State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery ManagementSystems Based on the ARX Battery Model", Energies 2013, 6, pages 444-470.
- [16] Regenbatt inc., La résistance interne révèle-t-elle la capacité de la batterie?  
<http://www.regenebatt.com/batterie-world/techniques-batterie/la-resistance-interne-revele-t-elle-la-capacite-de-la-batterie.html>, © 2001
- [17] P.T Krein end R.Balog, "Life Extension Through Charge Equilization of Lead-Acid Batteries", INTELEC 2002, Paper 32.1. 29 sept. au 3 oct. 2002, Montréal, Canada.

- [18] K. Kutluay, Y. Çadırcı, Y.S. Özkazan and I. Çadırcı, “A New Online State-of-Charge Estimation and Monitoring System for Sealed Lead–Acid Batteries in Telecommunication Power Supplies”, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 52, No. 5, octobre 2005.
- [19] R.A. Jackey, “A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection”, Society of Automotive Engineers, Mathworks 2007. No. 2130, pages 17-26.
- [20] M.L. Doumbia, K. Agbossou, et E. Granger, “Modelling and Simulation of a Hydrogen Based Photovoltaic/Wind Energy System”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. Volume , Issue , 4-7 juin 2007,pages 2601 – 2606.
- [21] K.S. Ng, C.S. Moo, Y.P. Chen et Y.C. Hsich, “State-of-Charge Estimation for Lead-Acid Batteries Based in Dynamic Open-Circuit Voltage s”, 2nd Annual IEEE Power and Energy Conference, PECon, 1-3 décembre 2008, pages 972-976, Johor Baru, Malaisie.
- [22] XueZhe.Wei, XiaoPeng.Zhao,YongJun.Yuan, “Study of Equivalent Circuit Model for Lead-acid Batteries in Electric Vehicle”, International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation », 11-12 avril, 2009, Zhangjiajie, Hunan, Chine.
- [23] P.W. Appel and D.B. Edwards, “Understanding and Defeating the Physical Mechanisms Limiting the Capacity of Lead-Acid Batteries”, Advanced Performance Materials, 3, 43-55 (1996), Kluwer Academic Publishers, Boston
- [24] S. Zaamta\* et A. Dib, « *Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs* », Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 12 No1 (2009), pages137 – 147.
- [25] M. Urbain, « *Modélisation électrique et énergétique des accumulateur Lithium Ion, estimation en ligne du SOC et du SOH* », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 4 juin 2009, 164 pages.
- [26] E. Kuhn, C. Forgez, G. Friedrich, « *Modèle pour accumulateur Ni-mH en vue d'une application pour véhicule hybride électrique* », Génie Électrique-Vie et Qualité, Marseille, février 2002.

- [27] C. Ortega, ! Orozco, J. Pacheco, M. Cristin and A Rivera, "Charge-Control of Lead-Acid Batteries in Photovoltaic Applications", Proceedings of ISEC 2004, ASME International Solar Energy Conference, 11-14 juillet 2004, Portland, Oregon, USA.

Rapport-Gratuit.com