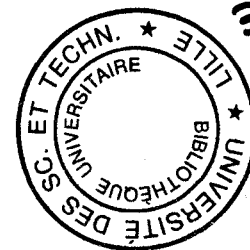


juin 2000 6725

50376
1997
347



THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : **GENIE ELECTRIQUE**

par

Olivier CAUMONT

**DETERMINATION DE L'ETAT DE CHARGE
D'UNE BATTERIE PLOMB ACIDE
EN UTILISATION VEHICULE ELECTRIQUE**

soutenue le 20 Novembre 1997 devant le jury :

G. SEGUIER	Professeur Emérite	L2EP- Université de Lille	<i>Président</i>
M. CRAPPE	Professeur Ordinaire	Faculté Polytechnique de Mons (B)	<i>Rapporteur</i>
J. P. YONNET	Directeur de Recherches CNRS	LEG - ENSIEG	<i>Rapporteur</i>
P. LENAIN	Directeur Technique	Oldham France S.A.	<i>Examineur</i>
G. MAY	Directeur Technique	Hawker Batteries	<i>Examineur</i>
P. LE MOIGNE	Maître de Conférence	L2EP - Ecole Centrale de Lille	<i>Examineur</i>
C. ROMBAUT	Professeur	L2EP - Ecole Centrale de Lille	<i>Directeur de thèse</i>

à mes Parents
à Benoît
à Valérie
à Chrystelle

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un contrat C.I.F.R.E. et donc d'une collaboration entre la société OLDHAM France S.A., fabricant de batteries plomb acide industrielles basé à Arras dans le Pas-de-Calais, et l'Ecole Centrale de Lille au travers du L2EP, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance. L'étude a par ailleurs été soutenue financièrement par la région Nord/Pas-de-Calais.

Je remercie, tout d'abord, Monsieur P. LENAIN, Directeur Technique de la division Batteries de la société OLDHAM France, de m'avoir accueilli, pour une grande majorité des travaux, au sein de l'équipe Recherche et Développement de son laboratoire, et d'avoir mis à ma disposition les moyens suffisants pour les mener à bien.

Monsieur le Professeur C. ROMBAUT, Directeur du L2EP, a dirigé la contribution universitaire à cette étude. Je le remercie de l'aide et de la confiance qu'il m'a témoignées durant ces trois années.

Je suis très reconnaissant à Monsieur G. SEGUIER, Professeur Emérite au L2EP de l'Université de Lille, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Messieurs M. CRAPPE, Professeur Ordinaire à la Faculté Polytechnique de Mons (B), et J. P. YONNET, Directeur de Recherches CNRS au LEG, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, ont accepté d'être rapporteurs de ces travaux. J'en suis très honoré et je les prie de trouver ici l'expression de ma gratitude.

Je remercie Monsieur G. MAY, Directeur Technique du groupe HAWKER BATTERIES, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je suis heureux de pouvoir exprimer ici toute ma reconnaissance envers Monsieur P. LE MOIGNE, Maître de Conférence au L2EP de l'Ecole Centrale de Lille, qui a encadré ces travaux. Par sa compétence et sa participation active, il a largement contribué à la réussite de cette étude pourtant très différente de ses recherches habituelles. Sans compter les heures, il m'a soutenu intellectuellement et moralement, notamment dans les nombreuses périodes de doutes qui ont jalonné ces trois années. Je lui dois beaucoup.

J'exprime également ma vive gratitude à Monsieur X. MUNERET, Ingénieur au service Recherche et Développement du Laboratoire Batteries de la société OLDHAM France, pour avoir accompli avec succès la lourde tâche de m'encadrer durant cette étude au sein de l'entreprise. Pour les heures passées à réfléchir sur ce difficile sujet mais aussi à conduire avec brio le véhicule électrique lors de nos expériences arrageoises et monégasques, Merci.

Je remercie également toute l'équipe du Laboratoire Batteries de la société OLDHAM France qui a contribué, plus ou moins directement, à cette étude, et plus particulièrement le service Recherche et Développement où J. P. SMAHA, C. BRISSAUD, M. COUX, J. P. DUHEM, D. COCU, M. MARCHAND ont su faire de ces trois années, une expérience humaine et professionnelle très enrichissante pour le débutant que j'étais. Ils m'ont aidé et soutenu sans retenue, je les en remercie.

Enfin, je n'oublie pas l'équipe du L2EP de l'Ecole Centrale de Lille et notamment A. PENNEQUIN, C. SAUDEMONT, F. GILLON, H. ROISSE, C. FORGEZ, H. MIDAVAINÉ, B. FRANCOIS, F. HEMBERT, P. BARTHOLOMEUS, B. SEMAIL, etc., qui ont contribué, par leurs convivialité, sympathie et compétence, à rendre mes journées à l'Ecole Centrale de Lille à la fois très agréables mais aussi très enrichissantes et qui me laisseront de bons souvenirs encore longtemps.

A eux tous, Merci.

Table des Matières

Table des Matières

Introduction générale.....11

Chapitre 1 : Véhicule Electrique et Batterie Plomb Acide.....17

I.1. Etat de l'art du Véhicule Electrique..... 19

I.1.1. L'histoire du V.E..... 19

I.1.2. Les avantages du VE sur son concurrent thermique..... 20

I.1.3. Le module de traction du V.E. 21

I.1.4. La source d'énergie du V.E..... 22

**I.2. La contribution des batteries plomb acide dans le marché actuel
du V.E..... 25**

I.2.1. Les leçons des premiers équipements plomb acide 25

I.2.1.i. une "faible autonomie" 25

I.2.1.ii. une autonomie "imprécise" 25

I.2.1.iii. un vieillissement mal maîtrisé..... 26

I.2.2. Le marché actuel du véhicule électrique 26

**I.3. L'avenir de la technologie plomb acide comme source d'énergie
pour le V.E. 29**

I.3.1. Le remplacement inéluctable du pétrole par l'électricité 29

I.3.2. Les avantages pour l'avenir des accumulateurs plomb acide sur les autres
technologies..... 29

I.3.2.i. un coût moindre et une industrialisation maîtrisée..... 29

I.3.2.ii. l'évolution des performances..... 30

I.3.2.iii. l'association à des organes de stockage rapide d'énergie..... 30

I.3.3. Les applications VE possibles pour les accumulateurs au plomb	30
I.3.3.i. les véhicules des particuliers	30
I.3.3.ii. les flottes captives	31
I.3.3.iii. le concept du véhicule hybride	31
I.3.3.iv. les transports en commun	31
I.4. La gestion intelligente de l'énergie embarquée : un développement clef de la société Oldham France dans son projet VE	33
I.4.1. L'implication de la société Oldham dans le VE	33
I.4.2. Cahier des charges du système nécessaire de gestion d'énergie embarqué à bord du V.E.	34
I.4.2.i. les principales fonctions du système de gestion	34
I.4.2.ii. détail des relations entre le système et son environnement	35
I.4.2.iii. les contraintes technologiques de réalisation	36
I.4.3. L'état de charge : un point clef du système de gestion	37
I.5. Conclusion.....	38

Chapitre 2 : L'Accumulateur Plomb Acide : Présentation et Définitions.....39

II.1. La pile électrochimique Pb/PbSO₄/PbO₂	41
II.1.1. Description	41
II.1.2. Réactions et équations	41
II.1.3. Potentiels d'électrode et tension de la pile à l'équilibre	42
II.1.4. Potentiels d'électrodes et tension de la pile traversées par un courant	43
II.1.5. Décharge, charge et surcharge	44
II.2. De la pile à la batterie plomb acide.....	46
II.2.1. Description et définitions	46
II.2.1.i. principe général	46
II.2.1.ii. les différents types de plaque	47
II.2.1.ii.a. la plaque "Planté"	47
II.2.1.ii.b. la plaque "plane empâtée"	47

II.2.1.ii.c. la plaque tubulaire	47
II.2.1.iii. les alliages des collecteurs de courant	48
II.2.2. Les batteries "plomb ouvert" et les batteries étanches.....	48
II.2.2.i. l'appellation "plomb ouvert"	48
II.2.2.ii. les batteries étanches à recombinaison de gaz	48
II.2.2.ii.a. le cycle de l'oxygène	49
II.2.2.ii.b. la mise en pratique.....	49
II.2.3. Les applications.....	50
II.2.3.i. les batteries S.L.I.	50
II.2.3.ii. les batteries stationnaires.....	50
II.2.3.iii. les batteries de traction.....	50
II.3. Profil de charge, Tension d'Arrêt et Capacité : définitions de trois standards des batteries plomb acide	52
II.3.1. Profil de Charge.....	52
II.3.2. Décharge et Tension d'Arrêt	52
II.3.3. Capacité	53
II.4. Description d'un modèle physico-chimique des transformations de la matière active positive en décharge.....	55
II.4.1. Le modèle de base	55
II.4.2. Description de la décharge.....	56
II.4.3. La variation de la capacité avec le courant de décharge.....	59
II.4.4. L'effet d'une pause dans une décharge.....	60
II.5. Les mécanismes de défaillance des batteries plomb-acide.....	61
II.5.1. Les dégradations "catastrophiques".....	61
II.5.2. Les dégradations « progressives irréversibles ».....	61
II.5.2.i. la dégradation de la plaque positive.....	62
II.5.2.ii. la dégradation de la plaque négative	63
II.5.2.iii. la dégradation du séparateur.....	63
II.5.2.iv. la stratification	64
II.5.2.v. la perte d'eau.....	64
II.5.2.vi. la réorganisation du sulfate de plomb en stockage.....	64
II.5.3. Les pertes de capacité réversibles.....	65
II.5.3.i. l'autodécharge en stockage.....	65

II.5.3.ii. l'"effet mémoire"	66
II.5.3.iii. les poches de gaz	66
II.5.4. Le vieillissement optimal standard des batteries plomb-acide	66
II.6. Conclusion	68

Chapitre 3 : Evaluation des Méthodes Actuelles de Détermination de l'Etat de Charge basées sur la Coulométrie.....69

III.1. Rappel des principales méthodes de détermination de l'état de charge d'une batterie plomb acide	71
III.1.1. Les modélisations de la batterie plomb-acide.....	71
III.1.1.i. la modélisation analytique.....	71
III.1.1.ii. la méthode dite par "éléments finis".....	73
III.1.1.iii. l'équivalence à un réseau de composants électriques	73
III.1.2. La caractérisation de l'état de charge d'une batterie de véhicule électrique par le suivi expérimental d'un paramètre représentatif.....	74
III.1.2.i. la densité de l'électrolyte et la tension à vide.....	74
III.1.2.ii. mesure de la tension instantanée en décharge	75
III.1.2.iii. méthode coulométrique.....	76
III.1.2.iv. l'impédancemétrie	76
III.1.3. Approche retenue pour notre étude	78
III.2. Le banc d'expérimentation.....	81
III.2.1. Les batteries étudiées	81
III.2.2. Le banc d'essais en laboratoire.....	82
III.2.3. Le véhicule électrique étudié.....	83
III.2.4. Les systèmes d'acquisition embarqués.....	84
III.2.5. Les logiciels de traitement de données	86

III.3. Evaluation quantitative des algorithmes actuels basés sur la Coulométrie.....	87
III.3.1. L'algorithme coulométrique basé sur le courant moyen de décharge.....	87
III.3.2. L'algorithme coulométrique basé sur une capacité fixe de référence de la batterie.....	88
III.3.3. Test de ces deux types d'algorithme d'état de charge.....	89
III.3.3.i. la vérification des programmes sur des décharges à courant constant.....	90
III.3.3.ii. les tests autour d'un cycle véhicule électrique standard : le JRC-TC69, communément appelé "TC69".....	91
III.3.3.iii. le test sur des décharges dynamiques en laboratoire.....	93
III.3.3.iv. les tests sur des décharges dynamiques réelles en véhicule électrique.....	94
III.3.4. Bilan des tests des deux types d'algorithme d'état de charge basés sur la coulométrie.....	97
III.4. Conclusion.....	99

Chapitre 4 : Algorithme d'Etat de Charge pour Batterie Plomb Acide Etanche en Véhicule Electrique.....101

IV.1. Définition de l'état de charge d'une batterie plomb acide en véhicule électrique.....	103
IV.2. Analyse statistique de décharges véhicule électrique.....	105
IV.2.1. La répartition des ampères-heures déchargés selon le courant de décharge...	105
IV.2.2. La répartition des temps de passage du courant selon les zones de valeurs...	108
IV.3. La détermination des coefficients d'équivalence liés aux gains et pertes de capacité aux courants différents du courant de référence.....	113
IV.3.1. La mise en condition des monoblocs.....	113
IV.3.2. La détermination expérimentale des coefficients d'équivalence.....	114
IV.3.2.i. coefficient d'équivalence à 150 A.....	116
IV.3.2.ii. coefficient d'équivalence à 50 A.....	117
IV.3.2.iii. coefficient d'équivalence à 250 A.....	117

IV.3.2.iv. coefficient d'équivalence à 20 A.....	119
IV.3.2.v. bilan sur les coefficients d'équivalence.....	120
IV.3.3. Introduction de ce coefficient dans l'algorithme d'état de charge et tests sur des décharges dynamiques reproduites en laboratoire, sans pause ni régénération..	121
IV.3.4. Test de cet algorithme sur d'autres décharges dynamiques contenant pauses et régénérations	123
IV.4. Etude de la récupération d'énergie de la batterie par freinage ou pendant les temps de pause.....	126
IV.4.1. Le freinage récupératif et les pauses fonctionnelles courtes.....	126
IV.4.2. Les pauses longues.....	130
IV.4.3. Insertion de ces coefficients dans l'algorithme et tests sur des décharges dynamiques avec freinages récupératifs et pauses	135
IV.5. Conclusion.....	137

Chapitre 5 : Adaptation de l'Algorithme Laboratoire aux Conditions Réelles d'Utilisation.....139

V.1. Evaluation de l'algorithme d'état de charge en conditions réelles d'utilisation, à bord d'un véhicule électrique.....	141
V.1.1. Le but et le principe d'essais embarqués.....	141
V.1.2. La mise en place matérielle des essais embarqués.....	141
V.1.3. La version testée de l'algorithme	143
V.1.4. Le déroulement des essais.....	144
V.1.5. Les résultats des essais	145
V.1.6. L'analyse des résultats.....	148
V.2. Evolution de la capacité de référence en fonction de la température ou des décharges précédentes.....	150

V.2.1. L'effet de la température	150
V.2.2. L'influence des décharges précédentes.....	152
V.2.3. Introduction des deux coefficients dans l'algorithme.....	155
V.3. Généralisation de l'algorithme d'état de charge.....	156
V.3.1. Le reste des contraintes non envisagées en laboratoire	156
V.3.2. La généralisation à N monoblocs en série.....	157
V.3.3. Le vieillissement irréversible de la batterie.....	157
V.3.3.i. l'utilisation d'abaques	158
V.3.3.ii. les contrôles périodiques de la capacité de référence.....	158
V.3.3.iii. l'utilisation de l'impédancemétrie	159
V.3.4. Les problèmes de recharge et de stockage de la batterie.....	159
V.3.4.i. recharge globale ou séparée	159
V.3.4.ii. la réinitialisation en fin de charge.....	160
V.3.4.iii. la recharge partielle encore appelée « biberonnage ».....	160
V.3.4.iv. l'amélioration du profil de charge	161
V.3.4.v. le stockage.....	161
V.3.5. Bilan.....	162
V.4. Conclusion	163

Conclusion générale.....	165
---------------------------------	------------

Bibliographie.....	171
---------------------------	------------

Introduction générale

Introduction générale

Technologie majeure employée de nos jours pour stocker l'énergie électrique, les **accumulateurs électrochimiques plomb acide** n'ont cessé de s'améliorer depuis leur invention par Sinsdeten en 1854, confirmée par les prototypes de Planté en 1860. Pourtant, si de nombreux travaux de caractérisation, d'identification, de modélisation et d'optimisation permettent aujourd'hui, aux chercheurs et aux industriels, d'expliquer et de contrôler la majeure partie des phénomènes électrochimiques ayant lieu dans ces accumulateurs encore appelés batteries, il subsiste un problème sur lequel de nombreux progrès restent à faire : la détermination précise de leur état de charge autrement dit de l'énergie disponible.

Une approche qualitative et grossièrement quantitative de la batterie plomb acide a suffi pendant de nombreuses années pour l'utiliser dans les applications diverses telles que les appareils autonomes du type lampe de mineur, les petits chariots électriques ou encore les soutiens des réseaux de transport d'énergie électrique. Comme les performances de ces accumulateurs en énergie et en puissance subvenaient largement aux besoins des applications, des techniques peu précises de détermination de l'état de charge suffisaient aux utilisateurs. Une fin de décharge non prévue n'entraînait pas de gros dommage pour l'application. Tout au plus fallait-il pousser le chariot jusqu'au poste de recharge ou remettre un accumulateur pleinement chargé dans l'appareil. Aussi se contentait-on de suivre, sans grande précision, l'évolution de la densité de l'électrolyte ou de la tension de la batterie, images chimique et physique brutes de l'énergie restante, pour détecter la fin de décharge.

Aujourd'hui, une nouvelle utilisation de ces accumulateurs plomb acide a vu le jour : le **véhicule électrique**. En effet, poussés par la pollution atmosphérique grandissante des villes, due aux rejets gazeux des véhicules thermiques, et devant la diminution inquiétante des réserves pétrolières mondiales, les chercheurs et industriels se sont remis à étudier, depuis quelques années, le concept de véhicule électrique pensé au début du siècle et abandonné pendant près de 100 ans.

Les nouvelles exigences de l'application véhicule électrique en termes de performances et de durée de vie des accumulateurs au plomb, totalement différentes de celles respectées jusqu'alors, remettent à l'ordre du jour le problème de l'état de charge de ces accumulateurs. L'utilisation d'un véhicule électrique requiert, en effet, une jauge d'énergie fiable et précise pour éviter, entre autres, les désagréments d'une panne sur route. Par ailleurs, si dans le cas du véhicule thermique, l'état de la jauge ne dépend pas des conditions d'utilisation, il n'en est pas de même pour le véhicule électrique. Il est donc nécessaire de bien connaître le fonctionnement

de l'accumulateur pour bien en informer le conducteur afin qu'il puisse le respecter et ne pas en abuser à ses dépens. La précision sur l'état de charge du réservoir est devenue l'une des conditions nécessaires à la réussite des batteries plomb acide en véhicule électrique surtout du fait de leur autonomie limitée.

C'est le sujet sur lequel nous avons travaillé durant ces trois années de recherche dans le cadre d'une collaboration entre la société **Oldham France** à Arras, fabricant de batteries industrielles au plomb acide, et le **L2EP**, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille. Le projet initial concernait la réalisation d'une "**intelligence batterie**", système de gestion de l'énergie embarquée, pour laquelle les partenaires ont bénéficié d'une aide de la région Nord - Pas de Calais. Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes lancés dans l'étude de la **détermination de l'état de charge d'une batterie plomb acide en véhicule électrique**, conduisant à l'indicateur jauge d'énergie du système de gestion.

Depuis un dizaine d'années, de nombreuses études ont été menées sur ce sujet. Les chercheurs ont tout d'abord tenté d'appliquer sur les batteries plomb acide étanches de véhicule électrique, les techniques de mesure de l'état de charge déjà connues et utilisées sur les batteries plomb acide ouvertes.

Des modélisations plus ou moins poussées de la batterie ont également été essayées afin de mieux comprendre les phénomènes électrochimiques internes de cette "boîte noire".

D'autres travaux ont porté sur les méthodes dites "coulométriques" consistant à cumuler les quantités d'électricité entrant et sortant de l'accumulateur, en les pondérant ou non de coefficients, et à comparer ce cumul à l'énergie initialement disponible.

Enfin, des études sur l'impédancemétrie ont été développées, approche plus électrique du phénomène basée sur des modélisations de la batterie sous forme de réseaux de composants électriques. On en extrait une impédance ou une conductance dont on suit l'évolution en fonction de l'état de charge.

Nous avons tout d'abord analysé toutes ces approches du problème afin de cibler notre étude en fonction notamment des conditions et des exigences de la thèse. Mais nous avons surtout, compte tenu de la localisation des travaux à l'usine d'Oldham (contrat CIFRE), tenté d'assimiler les connaissances et le savoir faire de l'industriel afin d'avoir une vision très physique des problèmes posés par cet accumulateur électrochimique. Aussi, en mêlant ces deux approches théorique et pratique, nous avons pu faire des choix tout au long de nos travaux qui nous ont permis de faire progresser notre connaissance globale du problème. Ainsi avons nous très vite opté pour l'utilisation de méthodes de type coulométrique.

Notre démarche a consisté ensuite à étudier les principaux algorithmes d'état de charge basés sur ce principe, afin de mettre en évidence d'éventuelles carences pour pouvoir essayer de les améliorer.

Les imprécisions rencontrées dans certains cas nous ont très vite fourni un travail conséquent car les algorithmes testés se montraient souvent défailants dans le type d'utilisation

le plus important : la circulation en ville. La plupart des études de ce type abordent, en effet, l'utilisation de la batterie en véhicule électrique à partir des performances de cette dernière en laboratoire sur des décharges à courant constant. Il nous a semblé plus logique d'étudier le comportement d'une batterie plomb acide soumise à des utilisations plus dynamiques, c'est à dire plus proches de l'utilisation réelle.

Une définition d'algorithme plus en rapport avec les conditions réelles d'utilisation qu'avec les uniques caractéristiques de l'accumulateur a alors été proposée. Ceci a pu être réalisé grâce à une étude statistique des profils de courant imposés aux batteries de véhicule électrique. A partir de cette analyse, des tests dynamiques représentatifs ont été mis au point, évaluant les performances de ces batteries avec des critères plus en rapport avec les conditions réelles : influence des courants forts, des courants faibles, des freinages récupératifs, des pauses, etc. Un nouvel algorithme a alors été proposé intégrant tous ces résultats obtenus à l'aide d'essais en laboratoire.

Pour clore l'étude, l'algorithme a été testé à bord d'un véhicule électrique. Sa précision et la stabilité de sa méthode de calcul ont été mises en évidence. Mais ces conditions réelles ont révélé d'autres paramètres à prendre en compte. Nous terminons le mémoire en proposant des voies d'explication ou d'investigation pour tenter de résoudre ces problèmes et d'améliorer encore la précision de l'algorithme d'état de charge.

Chapitre 1

Véhicule Electrique et Batterie Plomb Acide

Dans ce *premier chapitre* nous voulons amener le lecteur à comprendre les raisons et l'importance d'une étude sur le comportement électrique des batteries plomb acide dans leur application au Véhicule Electrique (VE).

Nous proposons, tout d'abord, une présentation générale du concept VE : son principe, son histoire, ses avantages sur le Véhicule Thermique et sa technologie.

Nous poursuivons par une analyse de l'état actuel du marché du VE dans le monde et plus particulièrement en France. Celle-ci met en évidence la contribution passée des accumulateurs d'énergie au Plomb Acide dans la situation présente du VE et les leçons tirées de ces années d'essais.

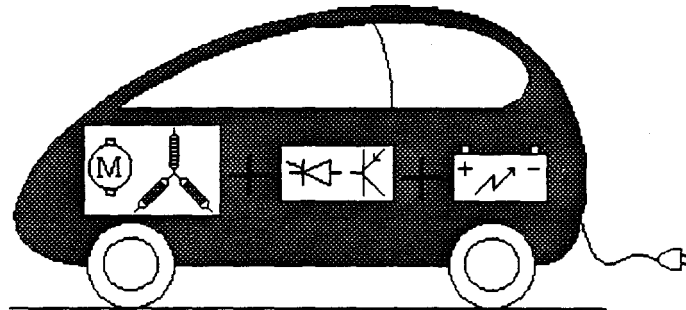
Un troisième paragraphe montre ensuite le rôle important que cette technologie d'accumulateurs sera amenée à jouer dans l'automobile de demain. Il liste les avantages, les évolutions et les débouchés possibles qui donnent à la batterie plomb acide un des principaux rôles, à court et moyen termes essentiellement, pour le stockage d'énergie dans les transports par traction électrique.

Ces deux derniers paragraphes mettent en évidence l'une des conditions nécessaires à la réussite du véhicule électrique équipé de batteries plomb acide : une gestion efficace de l'énergie embarquée.

Le chapitre conclut en décrivant l'implication de la société Oldham dans le projet du véhicule électrique qui, ayant bien senti ce besoin d'une meilleure gestion d'énergie, a donné naissance à cette thèse. L'analyse du problème nous permet de proposer un cahier des charges du système intelligent de gestion de l'énergie embarquée. Elle fait par ailleurs ressortir l'un des points les plus sensibles de l'étude : la jauge d'énergie.

I.1. Etat de l'art du Véhicule Electrique

On appelle véhicule électrique, une automobile dont la chaîne de traction est composée d'un **moteur électrique**, transmettant la puissance mécanique aux roues directement ou par boîte de vitesses, et d'un **réservoir d'énergie électrique**, la plupart du temps électrochimique, reliés entre eux par un **convertisseur d'énergie électrique appelé communément variateur de vitesse**, commandé principalement par la pédale d'accélérateur.



I.1.1. L'histoire du V.E.^{1,2}

L'utilisation de la propulsion électrique comme moyen de transport n'est pas récente. Les premiers véhicules électriques font leur apparition à la fin du XIX^e siècle. Destinés à remplacer les voitures à chevaux, on dénombre en 1900 une centaine de prototypes sur les autodromes d'Europe et des Etats Unis. Les performances étaient déjà bonnes. En 1899, la *Jamais Contente*, équipée de batteries plomb acide, est le premier véhicule à dépasser les 100 km/h. Munie d'une remorque de batteries, l'*Electromobile* disposait en 1903 d'une autonomie de 375 km.

Mais l'invention du moteur à combustion interne va modifier considérablement le paysage automobile.

Devant l'essor du véhicule thermique, dû surtout à de bien meilleures performances énergétiques du pétrole par rapport à l'accumulateur électrochimique principalement au plomb à l'époque (énergie massique du pétrole : 36000 kJ/kg contre énergie massique de l'accumulateur au plomb : 120 kJ/kg), les recherches sur le véhicule électrique cessent ; elles resteront "au point mort" pendant près de 50 ans.

Dans les années 1980, on assiste à un regain d'intérêt pour le véhicule électrique. On s'aperçoit « enfin » des avantages de la technologie et surtout du rôle important qu'elle risque de jouer dans les prochaines décennies pour notre société.

La législation californienne, en publiant en 1988 un "*California Clean Air Act*", relance aux Etats Unis les recherches sur le véhicule électrique. Dès son année de parution, ce texte impose au paysage automobile californien un quota de véhicules non polluants. Le but recherché à terme est l'interdiction des véhicules thermiques en centre ville.

La réaction des autres pays constructeurs de véhicules fut immédiate : la CEE relance l'AVERE (Association Européenne des Véhicules Electriques Routiers) et le Japon engage au travers du MITI (Ministry of International Trade and Industry) un plan de popularisation du véhicule électrique.

La France, quant à elle, instaure un regroupement des villes européennes intéressées par le véhicule électrique sous le nom de CITELEC, et se lance dans le projet au travers du GIVE (Groupe Interministériel du Véhicule Electrique).

Aidés pour certains par l'état, les constructeurs, petits et gros, se tournent vers le véhicule électrique. La plupart proposent dans un premier temps d'électrifier leurs véhicules thermiques et de prévoir, en cas de démarrage du marché, la conception et la fabrication optimisées de véhicules électriques complets.

Grâce aux efforts de tous les organismes engagés dans le projet, les véhicules électriques n'ont cessé de s'améliorer au fil du temps malgré un marché actuel encore timide.

I.1.2. Les avantages du véhicule électrique sur son concurrent thermique

L'absence de rejets gazeux du véhicule électrique

La pollution atmosphérique des villes est un des gros problèmes de notre société. En l'absence de vent, il n'est pas rare qu'un nuage de fumée recouvre les citadins des grosses métropoles et provoque nombre de problèmes respiratoires, surtout chez les plus faibles d'entre eux.

Les deux principales causes en sont les gaz rejetés par les usines implantées à l'intérieur ou à la périphérie des agglomérations et ceux émis par les voitures thermiques.

La limitation du nombre de véhicules en circulation par incitation des gens à utiliser les transports en commun, thermiques (bus, taxi) ou électriques (métro, tramway), est la principale mesure utilisée par les autorités gouvernementales pour minimiser la pollution par gaz d'échappement. Mais le manque d'infrastructure des transports en commun et la perte d'une certaine liberté de déplacement provoquent souvent l'échec de la démarche.

La seule solution semble être la mise en circulation de véhicules, particuliers ou communs, à faible émission en dioxydes de carbone ou d'azote voire même à émission nulle.

Le véhicule électrique convient parfaitement au besoin suscité. La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique au niveau de son moteur s'effectue par voie électromagnétique et ne provoque aucune émission de gaz ; le fonctionnement du véhicule ne pollue donc pas l'air environnant.

Il faut tout de même concéder que l'utilisation du véhicule électrique en ville constitue en fait une délocalisation de la pollution sur les centres de production de l'électricité.

Le silence du véhicule électrique

Le moteur à combustion interne est bruyant. Les constructeurs travaillent à réduire le plus possible les nuisances sonores du véhicule thermique, à la fois pour les personnes à l'intérieur et pour celles situées à l'extérieur du véhicule. Le dérèglement et le vieillissement du moteur au fil des ans ne font qu'augmenter le niveau de bruit.

Le véhicule électrique a le gros avantage d'être très silencieux. L'utilisation de champs magnétiques pour la transmission d'énergie réduit considérablement les nuisances sonores du véhicule. Les seuls bruits extérieurs détectables sont ceux du frottement des roues sur le sol et de la carrosserie dans l'air.

La maintenance réduite de la chaîne de traction

N'étant pas le siège d'explosions, les moteurs électriques sont très résistants à l'usure ; en comparaison, si un moteur thermique n'a une durée de vie que d'environ 200 000 kilomètres avec une maintenance régulière contraignante (vidanges, filtres, pots d'échappement, etc.), un moteur électrique pourra atteindre 1 000 000 de kilomètres sans pratiquement aucune maintenance.

I.1.3. Le module de traction du V.E.^{1,3,4}

Deux grands types de chaînes "moteur + variateur" ont été développées jusqu'ici :

■ **Le moteur à courant continu à excitation série ou séparée, associé à un (ou deux) hacheur(s)**

L'excitation séparée offre un plus grand contrôle sur le couple et la vitesse de rotation et permet d'éviter les boîtes de vitesses parfois nécessaires avec l'excitation série.

Le hacheur est commandé plus ou moins directement par l'angle de la pédale d'accélération au travers du rapport cyclique de son(ses) composant(s) commandable(s).

De plus, une bidirectionnalité en courant permet au moteur de fonctionner également en génératrice entraînée par l'inertie du véhicule au travers des roues. Cette conversion d'énergie mécanique en énergie électrique freine le véhicule ("frein moteur") tout en réinjectant du courant dans le réservoir. Ce fonctionnement est appelé communément « freinage récupératif ».

■ **Le moteur à courant alternatif, asynchrone ou synchrone, associé à un onduleur**

Ce type de moteur permet d'atteindre des puissances volumiques et massiques supérieures à celles du moteur à courant continu.

Le variateur est ici un onduleur, dont les interrupteurs électroniques sont commandés par la pédale d'accélérateur comme dans le cas du hacheur, bidirectionnel en courant pour rendre possible le freinage récupératif.

De ces deux grands types d'ensembles "moteur + variateur", le premier est le plus utilisé actuellement parce que le moins cher et le mieux maîtrisé. Il reste néanmoins limité quant aux puissances volumique et massique. De par l'alimentation mécanique de son rotor (transmission par balais collecteurs), le moteur à courant continu est limité dans le rapport couple/vitesse de rotation, ce qui justifie parfois l'utilisation d'une boîte de vitesses.

La technologie moteur asynchrone commence à être introduite par certains fabricants dans des séries en essai. Permettant d'atteindre des vitesses de rotation beaucoup plus importantes, il est associé simplement à un réducteur pour communiquer sa puissance aux roues. Si ce moteur est de principe plus simple que celui du moteur à courant continu, la difficulté se reporte sur sa commande et son alimentation, plus complexes, afin de conserver le comportement des moteurs précédents. L'inconvénient de ce type de moteur est le faible couple qu'il fournit aux bas régimes, défaut toutefois compensé aujourd'hui par des commandes évoluées de type vectoriel.

L'ensemble le plus prometteur pour les années à venir semble être, au vu des résultats obtenus en laboratoire^{5,6}, l'association d'un moteur synchrone à rotor bobiné ou encore mieux à aimants permanents et d'un onduleur.

Certains laboratoires travaillent par ailleurs sur la possibilité d'insérer ces moteurs alternatifs dans les roues du véhicule afin de gagner en compacité et en performance.

Les techniques de fabrication actuelles permettent déjà d'obtenir, pour un même volume, des moteurs électriques aussi puissants que les moteurs thermiques moyens et ce pour un poids souvent moindre. Contrairement à la technologie du moteur thermique qui a tendance à stagner aujourd'hui, de rapides évolutions des ensembles moteurs électriques - variateurs sont attendues pour l'avenir. Il suffit de constater les progrès effectués dans les transports ferroviaires pour s'imaginer les améliorations possibles du V.E..

Mais la rapidité d'évolution de la technologie du moteur dépendra du développement économique du véhicule électrique. Des productions en grandes quantités permettront d'abaisser les coûts et de rendre compétitive cette haute technologie.

I.1.4. La source d'énergie du V.E.

Le réservoir d'énergie est l'élément le plus critique de la chaîne de traction parce que le plus fragile et le plus limitatif en performances.

L'accumulateur électrochimique rechargeable, appelé la plupart du temps batterie, est le réservoir d'énergie le plus utilisé.

Le tableau ci-dessous (Tableau I.1) donne un aperçu des caractéristiques et performances des principaux types de batterie existants, correspondant chacun à un couple ou à une technique électrochimique développée ou en étude^{7,8}.

	Produits Développés			Produits en Développement				
	Pb-Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Pb bipolaire	Na-S	Na-NiCl ₂	Air-Zinc	Lithium
Energie massique (Wh/kg)	30-40	40-50	55	55	100	80-100	150-200	120-140
Puissance massique (W/kg)	80	100-120	100	100	150	130	80-100	160
Energie volumique (Wh/litre)	80-95	100	120	110	150	140	160	250
Durée de vie en cyclage (cycles)	800-1000	1000-1200	1000	800-1000	600	800	500	600
Degré d'industrialisation	excellent	moyen	moyen	faible	faible	faible	faible	faible
Degré de recyclage	total	partiel	faible	total	faible	faible	partiel	faible
Tension nominale par élément (V)	2	1.2	1.2	2	2.8	2.58	1.65	3.6-4.1

Tableau I.1 Performances et caractéristiques des principaux types de batteries

La technologie **Plomb Acide** est la plus ancienne de toutes. Son industrialisation est aujourd'hui parfaitement maîtrisée et continue de s'optimiser. Les unités actuelles de fabrication sont bien contrôlées et permettent de produire jusqu'à plus d'un million de batteries par an. Elles peuvent aisément subvenir rapidement à des besoins en grandes quantités. Les constructeurs de batteries de traction plomb acide ne manquent pas : citons les plus importants dans le monde, Hawker (H.E.P., Oldham, Varta), Exide (CEAC, Sonnenschein, Yuasa, Chloride), J.S.B. (Japan Storage Battery), Fiamm (Italie), Hagen (Allemagne) etc.

Les technologies **Nickel-Cadmium**⁹ et **Nickel-MétalHydru**^{10,11} ont connu ces derniers temps un développement remarquable. Des unités de fabrication en série de batteries Ni-Cd de grandes capacités commencent à voir le jour. Des lignes de batteries Ni-MH sont en prévision pour 1998. Parmi les constructeurs lancés dans ces technologies, citons l'entreprise Saft, très active en Europe et aux Etats-Unis.

La technologie **Plomb Bipolaire** devrait se retrouver rapidement sur le marché. Etudiée principalement par les constructeurs de batteries plomb acide, elle bénéficiera pour son développement final de toute l'infrastructure déjà en place. C'est une des voies de développement les plus prometteuses.

Les technologies **Sodium-Soufre**¹² (Na-S) et **Sodium-Chlorure de Nickel**¹³ (Na-NiCl₂, Batterie ZEBRA) ont étonné il y a quelques années par l'annonce de leurs bonnes performances. Contrairement aux autres technologies, elles nécessitent des températures de fonctionnement assez élevées (300°C), ce qui ralentit actuellement leur développement. Les aspects sécurité, fiabilité et consommation au repos font l'objet d'études sérieuses.

La technologie **Air-Zinc**^{14,15} ("Electric Fuel") connaît actuellement un bel essor. En phase d'essai et bientôt de développement en petite série, elle donne d'assez bons résultats.

La technologie d'accumulateurs au **Lithium**^{16,17} fournit actuellement les meilleures perspectives de performances. Les recherches sont très actives sur le sujet. Beaucoup de constructeurs d'autres technologies de batteries se sont lancés dans le lithium : citons les plus présents comme Saft en Europe et aux Etats-Unis ou Sony au Japon. Les résultats obtenus sont très encourageants.

Une autre technique de production d'énergie électrique à bord d'un véhicule électrique fait grand bruit actuellement^{18,19} : **la pile à combustible**. Contrairement à ses concurrents accumulateurs, elle ne se recharge pas sur le réseau électrique.

Son principe consiste à provoquer un déséquilibre ionique entre deux compartiments, l'un contenant de l'hydrogène, l'autre de l'oxygène. Dans le premier compartiment, l'hydrogène est ionisé à l'aide de catalyseurs souvent en platine, des protons (H^+) se forment et traversent une membrane solide pour se retrouver dans le compartiment à oxygène. Le déficit en protons dans un compartiment et leur accumulation dans l'autre provoquent une différence de potentiel et une circulation possible de courant de l'un vers l'autre, bref une fourniture d'énergie et de puissance. Un autre catalyseur de platine provoque dans le second compartiment une recombinaison entre les protons, les électrons circulant et l'oxygène, entraînant la formation d'eau.

En résumé, la pile consomme de l'hydrogène et de l'oxygène, et rejette de l'eau. Cette technique découverte pourtant il y a plus d'un siècle ne révèle ses avantages que depuis quelques années. Les prototypes récemment fabriqués permettent d'atteindre des puissance et énergie massiques de l'ordre de 200 W/kg et 300Wh/kg.

La pile récupère son énergie par le remplissage des réservoirs d'hydrogène et d'oxygène. Les principales difficultés techniques encore non résolues concernent les méthodes de stockage du comburant (oxygène) et surtout du combustible (hydrogène). Le vieillissement de la pile consiste en la détérioration des catalyseurs de platine ou de la membrane électrolytique solide.

Les accumulateurs d'énergie pour véhicule électrique ne manquent donc pas.

La technologie **plomb acide** reste encore aujourd'hui la référence en termes d'industrialisation et de recyclage ; elle présente des énergie et puissance spécifiques de l'ordre de 35 Wh/kg et 80 W/kg qui donnent aux dernières séries de véhicules électriques une autonomie de l'ordre de 100 km. Elle équipe encore aujourd'hui la majeure partie des véhicules électriques.

A l'opposé, les technologies **lithium** et **pile à combustible**, considérées largement comme les améliorations les plus prometteuses, prévoient des performances spécifiques de l'ordre 130 à 200 Wh/kg pour 160 à 300 W/kg qui permettront aux véhicules d'atteindre les 250 à 300 km d'autonomie avec des performances en vitesse et accélération comparables à celle des meilleurs véhicules thermiques actuels ; encore au stade prototype actuellement, leur industrialisation n'est prévue que pour les années 2010.

Les technologies Ni-Cd, Ni-MH, Na-S, Na-NiCl₂ et Air-Zinc, aux performances et niveaux d'industrialisation intermédiaires, équipent pour certaines des séries, pour d'autres des prototypes et tentent de contribuer à l'évolution du marché du véhicule électrique.

I.2. La contribution des batteries plomb acide dans le marché actuel du V.E.

I.2.1. Les leçons des premiers équipements plomb acide

A la fin des années 1980, le besoin en accumulateur d'énergie électrique rechargeable pousse tous les constructeurs de véhicules vers la seule technologie industriellement maîtrisée, la batterie plomb acide. Cette nouvelle application des batteries de traction intéresse les principaux fabricants.

Des batteries plomb acide vont équiper les premiers véhicules ou être testées en essai. Elles sont choisies dans des séries déjà existantes. La batterie spécialement conçue pour l'application véhicule électrique ne verra le jour que quelques années plus tard.

Les premières séries de véhicules vont mettre en évidence des problèmes liés à une méconnaissance profonde du comportement des batteries plomb acide dans un véhicule électrique et à la révélation de limites non envisagées dans les phases de développement de ces batteries.

I.2.1.i. une "faible autonomie"

Les premiers véhicules électriques ont, comparés à leurs homologues thermiques, des performances moindres. Avec une autonomie maximale de 80 km, une vitesse de pointe de 80 km/h et une accélération lente, on le prédestine rapidement à une utilisation citadine.

La "**faible autonomie**" devient vite la performance la plus limitative. Pourtant, dans de nombreux pays et notamment en France, beaucoup d'études ont démontré que 90% des déplacements journaliers des citadins en voiture ne dépassent pas 50 km et que 10% des conducteurs n'utilisent quotidiennement leur véhicule que pour des trajets courts. L'autonomie proposée pourrait donc suffire. Mais l'impact psychologique d'une liberté de déplacement bien inférieure à celle du véhicule thermique provoque vite un rejet de principe. Un gros travail psychologique apparaît indispensable pour l'avenir.

I.2.1.ii. une autonomie "imprécise"

L'"**imprécision sur l'autonomie**" disponible a largement contribué au manque d'assurance des premiers conducteurs. La batterie est un réservoir électrochimique évolutif dont il est difficile de connaître l'état exact. Le réservoir d'essence n'évolue, quant à lui, qu'au travers de son niveau, soit un seul paramètre. De plus, la précision souhaitée sur l'indication de l'énergie restante en véhicule électrique est beaucoup plus contraignante qu'en véhicule thermique, et ce du fait de la faible autonomie : la réserve de la jauge essence en véhicule thermique est de l'ordre 50 km pour une autonomie de 500 km, soit une imprécision de 10% ; pour une jauge de véhicule électrique, une réserve de 50 km sur 80 km possibles nous donnerait une imprécision inacceptable de 60% ; une imprécision de 10% entraîne une réserve de 8 à 10 km.

I.2.1.iii. un vieillissement mal maîtrisé

Le **vieillissement des batteries** est un autre problème important mis en évidence dans les premières séries de véhicule électrique. Alors qu'elles montrent des durées de vie de l'ordre de 800 à 1000 cycles de décharge/charge en laboratoire, les premières batterie installées dans les véhicules sont victimes de défaillances beaucoup plus tôt. Malgré de nombreux remplacements, le phénomène subsiste et entame vite la confiance des utilisateurs dans la fiabilité de cette source d'énergie.

Une analyse du problème montre vite que l'aspect aléatoire de l'utilisation du véhicule électrique et donc de la batterie est à l'origine de ces défaillances précoces. La batterie n'est pas assez surveillée. La prévention contre les abus d'utilisation n'est pas suffisante et l'une des raisons principales est le manque de connaissance du comportement des batteries dans cette application véhicule électrique, bien différente des autres applications du domaine de la traction. Une surveillance accrue et une meilleure approche du comportement de la batterie doivent permettre d'anticiper et de prévenir les utilisations destructrices.

Ces phénomènes non prévus en laboratoire ont provoqué de nombreux retours de batteries. Aussi, pour préserver les performances des batteries et la confiance du conducteur vis-à-vis de ce nouveau type de source d'énergie, les constructeurs ont du repenser le concept batterie.

En conclusion, les premiers équipements en batteries plomb acide ont clairement démontré qu'**une gestion fiable de l'énergie est nécessaire à bord du véhicule**.

I.2.2. Le marché actuel du véhicule électrique^{2,20}

A l'heure où s'écrit ce mémoire, le marché mondial du véhicule électrique stagne à un niveau relativement bas. Contrairement au grand nombre de recherches sur le sujet, les ventes ne décollent pas.

La France est l'un des pays les mieux dotés en véhicules électriques. Elle compte aujourd'hui 3118 V.E. en circulation (chiffre donné au 30/09/96).

En étude depuis les années 1960, il faut attendre le début des années 1990 pour voir une première évolution importante.

L'Etat Français, les grands constructeurs et Electricité De France officialisent, par un accord cadre en 1992, leur implication et leur partenariat dans le développement du véhicule électrique destiné dans un premier temps surtout aux collectivités. Ils se fixent alors un objectif

toujours de mise aujourd'hui : la circulation en France de 100 000 véhicules électriques pour la fin de l'année 1999. 22 villes pilotes sont désignées pour promouvoir le projet. Citons La Rochelle, Paris mais aussi Lyon, Grenoble, Bordeaux ou encore Douai.

Les petits constructeurs travaillent au même moment à l'électrification de leurs modèles thermiques.

Entre 500 et 1000 véhicules font rapidement leur apparition sur le sol français au début des années 1990. Tous ces véhicules sont équipés de batteries plomb acide. Malheureusement, comme expliqué précédemment, le manque de confiance dans une autonomie considérée souvent trop faible et l'absence de surveillance de la batterie ralentissent rapidement l'enthousiasme de la démarche.

En avril 1995, un nouvel accord cadre est signé entre l'Etat, Renault, P.S.A. et E.D.F., renforçant le premier. Il traite désormais de l'industrialisation des véhicules électriques pour les particuliers. Pour leurs nouvelles séries, Renault et P.S.A. se tournent vers la technologie d'accumulateurs au Nickel-Cadmium. Annoncée plus performante que la technologie plomb acide en termes de puissance massique et durée de vie, elle présente le gros désavantage d'un coût trois à quatre fois plus élevé. Des véhicules pour particuliers sont lancés sur le marché depuis fin 1995 avec des systèmes de location pour les batteries. Mais le coût pour l'instant trop important de cette nouvelle technologie automobile freine la transformation en achats des intérêts montrés par les Français.

Si le cas de la France est détaillé ci-dessus, c'est parce qu'il reflète ceux des autres pays qui s'intéressent au projet :

- les pays scandinaves montrent un grand intérêt pour le véhicule électrique. De nombreux partenariats se passent entre constructeurs, pouvoirs publics et producteurs d'énergie.
- les Etats Unis avec près de 3000 véhicules électriques en circulation s'intéressent aussi au projet, à l'image de la Californie. Mais contrairement à l'avancée française, aucune industrialisation n'est effective aujourd'hui sur le continent américain. Les objectifs fixés pour l'an 2003 nécessitent pourtant une autre dynamique.
- le Japon s'implique depuis peu dans l'étude du véhicule électrique, non pas pour leur propre parc automobile dans lequel cette technologie n'a pas encore convaincu, mais pour le marché potentiel américain.
- citons pour terminer le dynamisme de l'Italie avec Fiat, ou de la Suisse avec la commune active de Mendrisio et le développement timide en Allemagne où les avantages écologiques et économiques ne font pas l'unanimité.

Le marché évolue lentement mais sûrement dans la bonne direction, dans l'attente des progrès de la recherche, des baisses des coûts et surtout aussi d'un coup de pouce des pouvoirs publics pour imposer plus souvent des quotas de véhicules électriques, ce qui pourrait démontrer la réelle volonté de développement.

I.3. L'avenir de la technologie plomb acide comme source d'énergie pour le V.E.

I.3.1. Le remplacement inéluctable du pétrole par l'électricité

L'appauvrissement des nappes de pétrole accéléré par l'éveil industriel de certains pays en voie de développement comme la Chine ou les pays d'Afrique, rendra bientôt indispensables les énergies de substitution.

La voiture thermique est l'un des plus gros clients de la ressource fossile.

L'évolution croissante du degré de pollution atmosphérique des pays industrialisés, notamment celui de leurs grandes villes, associée à cette diminution inquiétante des réserves de pétrole, conduit clairement à envisager d'autres systèmes énergétiques.

Plus réaliste que les propositions de certains chercheurs concernant des carburants de substitution à base d'extraits végétaux, la technologie du véhicule électrique aura à jouer l'un des principaux rôles, aux côtés des véhicules au gaz ou à l'hydrogène, dans le remplacement de l'énergie pétrole pour l'automobile.

Dans cette optique, les systèmes de stockage d'énergie électrique vont être à terme fortement sollicités.

I.3.2. Les avantages pour l'avenir des accumulateurs plomb acide sur les autres technologies

Malgré l'évolution rapide de technologies prometteuses telles que les batteries au lithium ou les piles à combustible, la batterie plomb acide est destinée à jouer un rôle important dans l'automobile d'aujourd'hui et de demain, et ce pour plusieurs raisons.

I.3.2.i. un coût moindre et une industrialisation maîtrisée

La technologie plomb acide est actuellement la moins chère et la seule maîtrisée du point de vue industriel.

A titre indicatif, le tableau ci-dessous donne un ordre d'idée des coûts des technologies actuelles et d'avenir.

	Produits Développés			Produits en Développement				
	Pb-Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Pb bipolaire	Na-S	Na-NiCl ₂	Air-Zinc	Lithium
Coût estimé (F/kWh)	800	3200	3500	800	2600	2900	4600	4600

Tableau I.2 Coûts des principales technologies d'accumulateurs d'énergie pour VE

La comparaison entre toutes les technologies démontre bien les avantages de la technologie plomb acide.

Dans certains pays comme la France, les constructeurs de véhicule ont tendance à préférer, pour les court et moyen termes, les technologies nickel-cadmium et nickel-métalhydrure. L'augmentation de coût apportée par l'utilisation de ces nouvelles technologies ne justifie pourtant pas aujourd'hui le gain en performances.

I.3.2.ii. l'évolution des performances

La batterie plomb acide est la technologie la moins performante en terme de puissance et d'énergie massiques. Mais elle évolue. Les études actuelles laissent entrevoir pour l'avenir une amélioration des performances des batteries plomb de près de 50% ; celle-ci permettrait aux véhicules électriques d'atteindre aisément les 120/130 km au lieu des 80/90 km actuels.

Une technologie récente de fabrication à base de plomb pur a permis d'améliorer sensiblement les performances en puissance des batteries plomb acide.

La technologie plomb bipolaire fait l'objet actuellement de nombreuses recherches et commence à donner de bons résultats.

Des projets d'électrodes bipolaires à base de plastiques conducteurs laissent par ailleurs entrevoir de grands espoirs d'améliorations.

I.3.2.iii. l'association à des organes de stockage rapide d'énergie.

On assiste depuis quelques années à d'actives recherches dans les domaines des volants d'inertie^{21,22} et des supercapacités^{23,24}. Ces deux organes sont destinés à servir de tampon d'énergie entre le moteur et la batterie d'un véhicule électrique. Ils ont pour but d'encaisser ou de fournir rapidement les transferts d'énergie à forte puissance imposés par le véhicule. Une bonne gestion des transferts énergétiques entre ces organes et la batterie permettront une utilisation moins agressive et plus linéaire de celle-ci.

Cet adoucissement du profil de décharge pourrait permettre une meilleure estimation de l'état de charge de la batterie. Sa durée de vie n'en sera qu'améliorée. L'utilisation plus énergétique de la batterie permettra d'augmenter son énergie spécifique à bord du véhicule électrique et donc l'autonomie de ce dernier.

I.3.3. Les applications VE possibles pour les accumulateurs au plomb

I.3.3.i. les véhicules des particuliers

Le premier véhicule d'une famille constitue la plus grande part du marché possible pour le véhicule électrique. Mais cette orientation ne doit pas constituer aujourd'hui l'objectif à court et moyen termes des constructeurs de batteries au plomb et ce pour une raison très simple : toute famille, même résidant en ville, est amenée à effectuer de longs voyages pour lesquels l'autonomie procurée par les batteries plomb acide ne suffit pas.

Par contre, les deuxième, troisième et quatrième voitures familiales, aux déplacements souvent beaucoup moins longs, pourraient constituer à long terme un débouché pour un

véhicule électrique équipé de batteries plomb acide. Les inconvénients de ces voitures de second service au sein du foyer sont la fréquence moins importante et l'aspect plus aléatoire de leur utilisation. L'énergie plomb acide embarquée étant sensible aux abus d'utilisation, une bonne gestion de celle-ci sera nécessaire avant toute investigation.

I.3.3.ii. les flottes captives^{25,26}

Le débouché le plus réaliste, à court et moyen termes, pour les batteries plomb acide dans le marché du véhicule électrique ne réside pas dans le véhicule du particulier mais plutôt dans les flottes captives.

Bon nombre d'applications en ville nécessitent des autonomies quotidiennes inférieures à 100 km. Les batteries plomb acide conviennent parfaitement à ce type d'utilisation. L'équipement de flottes captives de petits véhicules électriques en ville est un des débouchés les plus prometteurs envisagé pour ces accumulateurs. Leur utilisation peut être mieux surveillée que dans le cas du conducteur particulier. Un système global de gestion de flottes peut effectuer une supervision efficace et permettre ainsi leur utilisation optimale.

I.3.3.iii. le concept du véhicule hybride^{27,28}

Pallier les déficiences du véhicule électrique en terme d'autonomie tout en conservant ses avantages écologiques est chose faite au travers du concept hybride. Considérés par beaucoup comme le passage intermédiaire obligé entre le véhicule tout thermique et le véhicule de demain tout électrique, le véhicule hybride associe ces deux technologies. L'idée principale est de pouvoir utiliser le mode électrique en ville tout en gardant le mode thermique et sa grande autonomie en dehors de la ville.

Dans ce nouveau type d'applications, les batteries sont soumises à de plus forts appels en puissance que dans le véhicule électrique pour des énergies moindres.

I.3.3.iv. les transports en commun

La pollution grandissante de l'atmosphère des villes incite les autorités à pousser les citoyens vers les transports en commun. Les métros et tramways électriques connaissent actuellement un succès incontestable. L'utilisation de transports en commun électriques est destinée à se développer et remplacera progressivement les machines thermiques actuelles. L'introduction d'accumulateurs pour remplacer temporairement l'apport d'énergie par le réseau (par caténaires ou par rails) permettra une traversée plus pratique et plus esthétique des centres villes. Cette application, en marge du concept VE, est un débouché très intéressant pour la technologie plomb acide car elle ne nécessite pas énormément d'énergie ni de puissance embarquée.

Conclusion

La technologie plomb acide a donc contribué, depuis la fin des années 1980, à l'avancée actuelle du véhicule électrique en mettant en évidence des problèmes non envisagés dans les premiers développements en laboratoire. Le manque d'expérience dans le comportement des batteries plomb acide dans l'utilisation très particulière du véhicule électrique provoque de nombreux échecs par défaillance de ces sources d'énergie.

Ces difficultés techniques liées à une autonomie jugée trop faible (80 km) créent un rejet psychologique chez les utilisateurs. Il pousse alors les constructeurs automobiles vers les technologies d'accumulateurs nickel-cadmium et nickel-métalhydrure plus performantes en énergie et puissance massiques. Mais ce gain théorique de 50% en performances s'accompagne vite d'un *triple*ment du coût. Les véhicules électriques déjà victimes de leur fabrication en petite série voient leur prix d'achat augmenter de 40%. Coûtant près d'une fois et demi le prix du même véhicule thermique et ne fournissant une autonomie que d'environ 100 km, le véhicule électrique actuel n'attire pour l'instant pas le particulier.

Les technologies futures d'accumulateurs, telles que les batteries lithium ou les piles à combustible, permettront aux véhicules électriques d'atteindre, à long terme, les performances des véhicules thermiques. Mais le surcoût technologique mettra du temps pour se résorber et dépendra pour cela du développement économique des prototypes actuels.

Si pour les véhicules de particuliers, la technologie nickel-cadmium semble devenue la source d'énergie de référence pour le véhicule électrique, les flottes d'entreprise restent une ouverture pour les nouvelles conceptions de batteries plomb acide. Plus performantes et mieux conçues que les premières, les nouvelles séries de batteries plomb acide étanches ont désormais toutes leurs chances dans les flottes d'utilitaires urbains, les transports en commun ou les véhicules hybrides liant les technologies thermiques et électriques.

Ces améliorations de performance doivent s'accompagner d'une meilleure gestion de l'énergie à bord du véhicule. Mieux surveillée et mieux contrôlée, la batterie n'en sera que mieux utilisée. La fiabilité du système en sera considérablement améliorée et donnera au conducteur la confiance nécessaire synonyme de succès.

I.4. La gestion intelligente de l'énergie embarquée : un développement clef de la société Oldham France dans son projet VE

I.4.1. L'implication de la société Oldham dans le VE

La société Oldham France est l'un des plus grands fabricants au monde de batteries plomb acide industrielles. Basée à Arras dans le Nord de la France, elle compte aujourd'hui un effectif de plus de 1100 personnes. Avec plus d'un million de batteries fabriquées par an, elle équipe en majorité la France mais exporte aussi dans le reste de l'Europe, aux Etats Unis ou en Asie. Elle fait partie du groupe Hawker, l'un des premiers groupes de fabricants de batteries industrielles. Ce groupe est l'une des branches les plus importantes de B.T.R. (British Tyre & Rubber), un conglomérat anglais de plus de 130 000 personnes.

C'est parce que la société Oldham France est bien consciente du marché possible que constitue le véhicule électrique pour ses batteries plomb acide qu'elle s'est lancée il y a 7 ans dans un programme de Recherche et Développement destiné à cette application.

Au début des années 1990, elle est contactée, comme beaucoup d'autres fabricants, par des constructeurs pour l'équipement d'une première série de véhicules électriques principalement en France mais aussi un peu à l'étranger. Elle adapte pour cela des séries de batteries initialement destinées à l'application traction et manutention.

Devant les nombreux retours de batteries ayant souffert d'une utilisation inhabituelle mais surtout incontrôlée, la société Oldham se lance dans le développement de nouvelles séries de batteries étanches spécialement conçues pour l'application véhicule électrique et dans l'étude de la gestion d'énergie embarquée.

En effet, elle prend vite conscience que l'une des conditions essentielles à la relance de sa technologie plomb acide comme source d'énergie dans le marché du véhicule électrique réside dans la surveillance et la protection de ses batteries vis à vis des abus d'utilisation. A cet effet, un système de gestion d'énergie embarqué est devenu, comme on l'a montré précédemment, indispensable.

La société Oldham décide donc en 1994 d'entamer une thèse en collaboration avec le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille sur le sujet de l'"intelligence batterie". L'objectif initial de cette collaboration est l'étude du comportement de la batterie plomb acide en utilisation véhicule électrique débouchant sur la réalisation d'un système intelligent de gestion d'énergie embarqué. Ce système est destiné à optimiser les performances instantanées et la durée de vie des accumulateurs dans le but de redonner confiance au conducteur dans cette nouvelle technologie d'automobile.

Nos premières analyses du sujet ont conduit à établir un cahier des charges général pour la réalisation d'un système intelligent embarqué.

I.4.2. Cahier des charges du système nécessaire de gestion d'énergie embarqué à bord du V.E.

L'objet de ce cahier des charges est de définir clairement les différentes fonctions que doit remplir un tel système et de rappeler les contraintes technologiques dans le but d'aider à sa conception et à sa réalisation.

I.4.2.i. les principales fonctions du système de gestion

Le système doit remplir les principales fonctions suivantes :

■ surveiller les monoblocs de la batterie

Une batterie de véhicule électrique est composée de plusieurs blocs indépendants reliés en série ou en parallèle et appelés "monoblocs". Dans le but de prévenir le conducteur d'une défaillance de la batterie, il est nécessaire d'effectuer un suivi des tensions monobloc par monobloc ; les écarts et les chutes de tension anormaux doivent être signalés le plus vite possible afin que le conducteur adapte son comportement et évite des situations d'arrêt souvent fort désagréables.

■ protéger la batterie contre les abus d'utilisation

La batterie est très sensible aux abus d'utilisation ; il est indispensable d'empêcher le conducteur de la mettre dans des situations de dégradation. Le système doit prévenir ces situations par des alarmes voire des actions sur certains organes du véhicule.

■ indiquer l'état de charge de la batterie

C'est l'une des fonctions les plus importantes du système de gestion de l'énergie. Indiquer au conducteur avec "précision" combien il lui reste d'énergie, c'est lui permettre d'optimiser ses déplacements et par la même l'utilisation et la durée de vie de sa batterie. C'est aussi et surtout lui éviter les désagréments des fins de déplacements à pied ou sur remorques dont l'effet psychologique constitue un adversaire de taille à la réussite du véhicule.

■ mémoriser l'historique de l'utilisation du véhicule

Un suivi des batteries au cours du temps est nécessaire pour comprendre et expliquer les causes de baisses de performances ou de défaillances. Le système doit donc pouvoir mémoriser les paramètres essentiels traduisant le plus justement le passé de la batterie.

Cette fonction, principalement destinée aux services après-vente des constructeurs de véhicules ou de batteries, peut également servir de base de données pour l'évolution du calcul de l'état de charge ou tout simplement pour des statistiques qu'effectuerait l'utilisateur.

I.4.2.ii. détail des relations entre le système et son environnement

Pour remplir les fonctions suscitées, le système de gestion doit communiquer avec les principaux éléments constituant et entourant le véhicule électrique (voir synoptique ci-dessous).

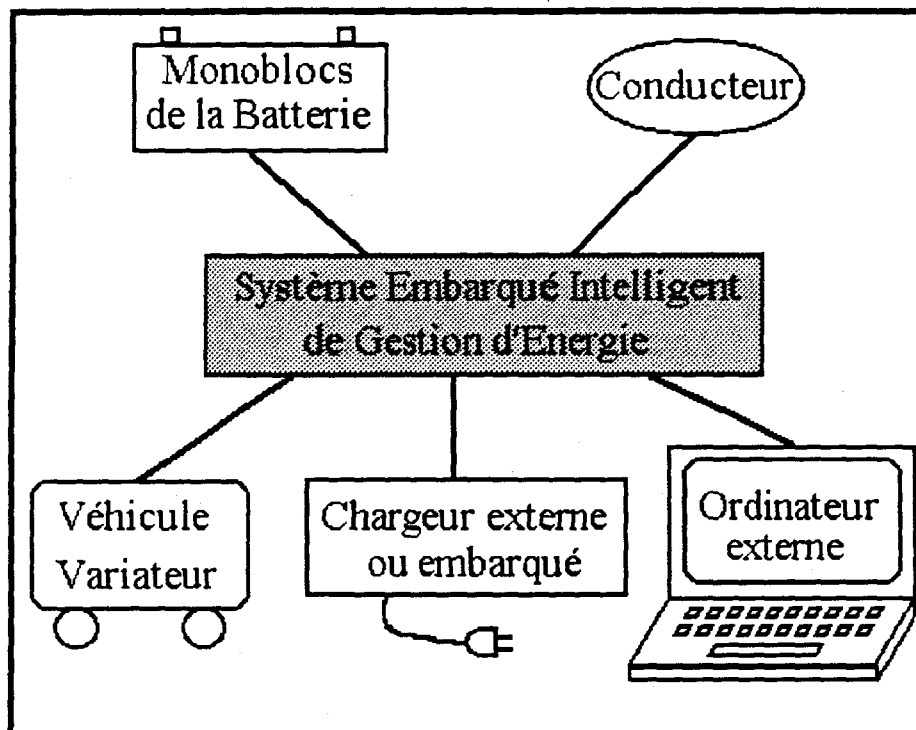


Figure I.1 Synoptique des relations entre le système de gestion d'énergie embarqué et son environnement

relation avec la batterie

Les informations provenant de la batterie constituent la base de travail du système de gestion d'énergie. Plus il capte de paramètres, plus son action sera précise et efficace.

Les principaux paramètres à capter sont a priori :

- la tension de chacun des monoblocs,
- le courant ou les courants si la batterie contient plusieurs branches en parallèle,
- la température paroi de chacun des monoblocs ou à défaut quelques températures paroi donnant par interpolations ou extrapolations une bonne approximation de celles-ci.
- la température ambiante du ou des caissons de batterie

relation avec le conducteur

Le système doit fournir au conducteur les informations suivantes :

- état de décharge de la batterie (Ah ou Wh restants, ou %)
- éventuellement, indication de l'autonomie restante (km)

- défaillances des monoblocs de la batterie de puissance et de la batterie auxiliaire servant à commander le variateur de vitesse et à fournir l'énergie des organes annexes (lumières, voyants, etc.)
- décharges avancées et abusives d'un monobloc :
- recharges nécessaires, incomplètes, anormales

Le conducteur peut également être amené à fournir des informations au système ou à demander des affichages ou des fonctionnements spéciaux.

relation avec le chargeur

Si le chargeur est "**maître**", i.e. indépendant, le système de gestion peut éventuellement lui communiquer les informations nécessaires sur la batterie du véhicule afin qu'il puisse adapter son profil de charge.

Si le chargeur est "**esclave**", le système de gestion pourra le piloter suivant la courbe de charge qu'il veut ; il peut gérer la charge complète et éventuellement l'adapter à l'état de la batterie.

relation avec le variateur de vitesse

Le système de gestion doit pouvoir contrôler les appels de puissance en fin de décharge afin de limiter la chute de tension des monoblocs les plus faibles. Dans tous les cas, il doit pouvoir empêcher le débit de courant si la chute de tension de la batterie est trop importante.

relation avec le reste du véhicule

Le système doit pouvoir capter la vitesse ou le kilométrage du véhicule afin d'indiquer au conducteur des estimations de consommation ou d'autonomie.

relation avec un ordinateur extérieur

Le système doit pouvoir transférer l'historique de la batterie, de sa mémoire vers un ordinateur extérieur (portable ou système de gestion de flotte).

Il pourrait éventuellement permettre de consulter l'état des batteries en instantané, à l'arrêt, en charge ou en décharge.

L'ordinateur extérieur doit pouvoir programmer le système, notamment donner accès à l'algorithme d'état de charge et aux divers paramètres et tables utilisés par l'algorithme.

I.4.2.iii. les contraintes technologiques de réalisation

les contraintes d'environnement

Le système doit résister aux vibrations élevées, à des températures de fonctionnement entre -30°C et 70°C, à des taux d'humidité de 90%, à des perturbations électromagnétiques, à la poussière.

les contraintes fonctionnelles

Le système doit être protégé contre les surintensités, l'inversion de polarité batterie lors des branchements, la perte des données par débranchement de l'alimentation principale

les contraintes d'alimentation

Le système sera autonome, alimenté soit par la batterie auxiliaire, soit par la batterie de puissance complète du véhicule. En aucun cas, il ne devra s'alimenter sur un ou deux monoblocs de la batterie principale au risque de la déséquilibrer. Il pourra contenir une option "mise en veille / éveil" afin de limiter les consommations.

I.4.3. L'état de charge : un point clef du système de gestion

Basée initialement sur le thème de la "batterie intelligente", il est vite apparu que la difficulté et l'importance du sujet ne tenait pas dans la manière de réaliser ce système "intelligent" de gestion mais dans la façon de traiter les données pour obtenir des informations fiables sur la batterie.

Celle qui nous a semblé fondamentale est la connaissance précise de l'état de charge des batteries permettant au conducteur d'évaluer l'autonomie restante du véhicule.

Aucune méthode connue au début de la thèse ne permettait d'évaluer de façon précise et fiable l'énergie restante dans une batterie plomb acide en utilisation véhicule électrique.

C'est à partir de ce constat que nos travaux se sont orientés essentiellement sur la batterie et son comportement vis à vis des contraintes externes et internes.

I.5. Conclusion

L'analyse de l'état de l'art et du marché actuel du véhicule électrique nous ont permis de montrer le rôle important que la technologie d'accumulateurs plomb acide est amenée à jouer, à court et moyen termes, comme source d'énergie de bon nombre d'applications de la traction électrique dans les transports de demain.

Son coût très compétitif et ses performances largement suffisantes pour des déplacements en zones urbaines lui permettent d'envisager l'équipement de flottes captives en ville mais aussi de servir de source d'énergie temporaire dans les transports en commun lors des traversées de centre ville.

Elle peut également s'associer à d'autres technologies complémentaires de stockage d'énergie, telles que les supercapacités ou les volants d'inertie, pour équiper des véhicules de technologie hybride.

Il est certain, en tout cas, que les applications de la traction électrique sont destinées à se multiplier à l'avenir pour faire face aux inconvénients des technologies thermiques actuelles en termes d'épuisement des réserves de carburant mais aussi d'accroissement inquiétant de la pollution.

Pour bon nombre de fabricants de batteries plomb acide industrielles, l'évolution prometteuse du marché du véhicule électrique constitue donc une opportunité de développement de leur produits.

La société Oldham France, leader dans ce domaine, s'est lancée il y a quelques années dans un programme de Recherche et Développement lié au concept Véhicule Electrique récemment remis à l'ordre du jour.

Un de ses axes de développement concerne l'élaboration d'un système de gestion de l'énergie embarquée, nécessaire à l'optimisation des performances des batteries. Cette thèse a été engagée dans le cadre de ce projet.

Une première analyse systématique nous a permis de dégager le point qui, à nos yeux, constitue l'une des plus grandes difficultés de l'étude : l'état de charge de la batterie plomb acide en véhicule électrique.

Aussi avons nous donc mené durant ces trois années des travaux de recherche pour déterminer cet état de charge le plus précisément possible. Ces travaux sont rapportés dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

L'Accumulateur Plomb Acide Présentation et Définitions

Pour bien aborder le problème de la gestion de l'énergie plomb acide embarquée à bord d'un véhicule électrique et plus particulièrement celui de son état de charge, il est indispensable de bien connaître le fonctionnement de ce type d'accumulateur. Ce *deuxième chapitre* propose à cet effet un rappel des principales caractéristiques de l'accumulateur plomb acide.

Après une introduction sur la théorie électrochimique de l'accumulateur considéré comme une pile rechargeable à deux électrodes, les différents types actuels de batterie sont décrits.

A l'aide d'un modèle microscopique simple, nous proposons ensuite au lecteur une explication des principaux phénomènes macroscopiques constatés lors des décharges de ces batteries.

Pour terminer, un paragraphe décrit les différents modes de dégradation des batteries plomb acide.



II.1. La pile électrochimique Pb/PbSO₄/PbO₂^{1,2}

II.1.1. Description

Le principe théorique de la batterie plomb acide est la cellule électrochimique rechargeable composée d'une électrode de plomb Pb et d'une électrode de dioxyde de plomb PbO₂ plongées dans une solution électrolytique d'acide sulfurique aqueux.

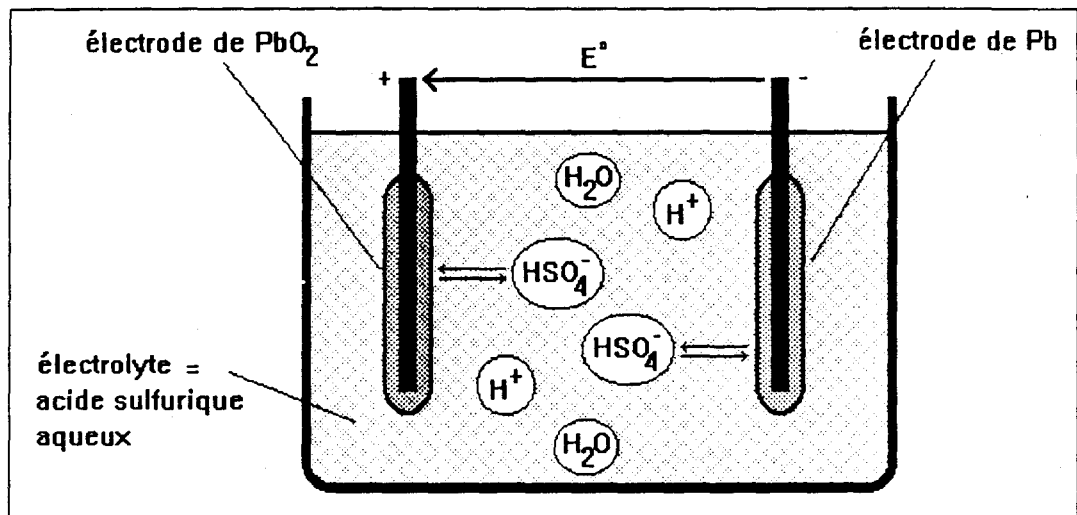
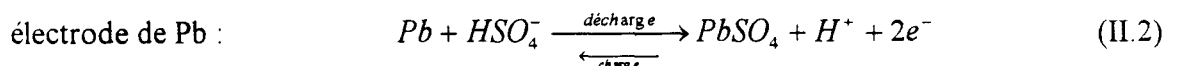
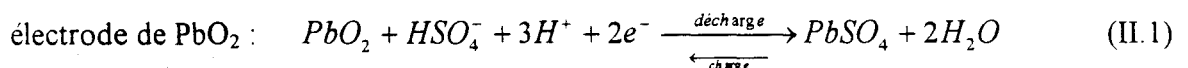


Figure II-1 Schéma de la pile électrochimique Pb/PbSO₄/PbO₂

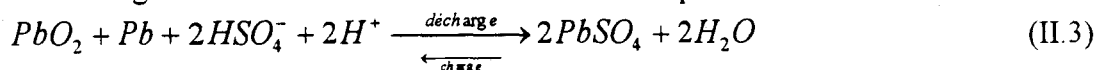
En décharge Pb et PbO₂ se transforment en PbSO₄ sur les électrodes.

II.1.2. Réactions et équations

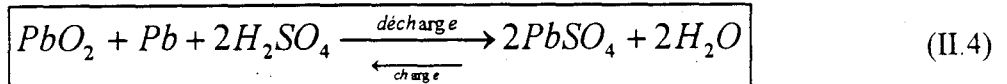
Ces transformations s'opèrent suivant les réactions d'oxydoréduction ci-dessous :



La réaction globale dite de « double sulfatation » de la pile est donc la suivante :



encore écrite par abus :



II.1.3. Potentiels d'électrode et tension de la pile à l'équilibre

On appelle potentiel d'une électrode, la différence de potentiel entre cette électrode et une électrode dite de référence.

Soit $E_{PbO_2}^0$ le potentiel d'équilibre de l'électrode de PbO_2 et E_{Pb}^0 celui de l'électrode de Pb. A l'état chargé on a $E_{PbO_2}^0 > E_{Pb}^0$; l'électrode de PbO_2 est appelée électrode « positive » et celle de Pb est appelée électrode « négative ».

La tension d'équilibre de la pile U^0 s'écrit alors : $U^0 = E_{PbO_2}^0 - E_{Pb}^0$ (II.5)

Traduisant l'équilibre des paramètres thermodynamiques d'un système électrochimique, l'équation de Nernst fournit la dépendance de U^0 vis à vis des activités des divers corps en présence ; à partir de l'équation générale de double sulfatation, elle donne dans notre cas :

$$U^0 = U^{0,S} - K \ln \left[\frac{(a(H_2SO_4))^2 (a(Pb))(a(PbO_2))}{(a(PbSO_4))^2 (a(H_2O))^2} \right] \quad (II.6)$$

avec : $U^{0,S}$: U^0 standard, i.e. dans les Conditions Normales de Température et de Pression (101325 Pa, 293 K)

$a(X)$: activité du corps X (produit de la concentration par un coefficient dit de fugacité)

K : constante dépendante de la température et du nombre d'électrons échangés dans la réaction

L'activité des corps solides est considérée égale à 1 ; l'équation ci-dessus se simplifie en :

$$U^0 = U^{0,S} - K' \ln \left[\frac{a(H_2SO_4)}{a(H_2O)} \right] \quad (II.7)$$

L'activité d'un liquide est étroitement liée à sa concentration. Le rapport entre l'activité de H_2SO_4 et l'activité de H_2O est par conséquent directement lié à la densité de l'acide. Il faut donc retenir de cette équation **que la tension d'équilibre de la pile (donc de l'accumulateur) plomb acide ne dépend, à température constante, que de la densité en H_2SO_4 .**

Dans les C.N.T.P., $E_{PbO_2}^0$ et E_{Pb}^0 , calculées à partir des équations de la thermodynamique, valent respectivement environ **+1.7 Volts** et **- 0.3 Volts** par rapport à une électrode de référence à hydrogène. $U^{0,S}$ vaut donc environ **2 Volts**.

Cette approximation de la tension d'équilibre à **2 Volts** est appelée **tension "nominale"** de la pile ou de la cellule électrochimique plomb acide.

L'évolution de U^0 avec la température est souvent donnée sous la forme d'un coefficient $\frac{dU^0}{dT}$ introduit dans l'équation du premier ordre :

$$U^0(T) = U^0(25^\circ C) + \frac{dU^0}{dT}(T - 25) \quad (\text{II.8})$$

$\frac{dU^0}{dT}$, estimé à partir de la thermodynamique du système, dépend de la concentration et de la température. Les calculs montrent qu'il est de l'ordre de $0.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. L'influence de la température sur U^0 peut donc être négligée.

II.1.4. Potentiels d'électrodes et tension de la pile traversées par un courant

On appelle « surtension » ou « polarisation » d'une électrode, la différence $\eta = E - E^0$ entre le potentiel de l'électrode traversée par un courant et son potentiel à l'équilibre.

L'expression de la tension U de la cellule s'exprime donc sous la forme:

$$U = E_{PbO_2} - E_{Pb} = [E_{PbO_2}^0 + \eta^{PbO_2}(I)] - [E_{Pb}^0 + \eta^{Pb}(I)] = U^0 + (\eta^{PbO_2}(I) - \eta^{Pb}(I)) \quad (\text{II.9})$$

■ $\eta^{PbO_2} = E_{PbO_2} - E_{PbO_2}^0$ est *négatif* en décharge et *positif* en charge.

■ $\eta^{Pb} = E_{Pb} - E_{Pb}^0$ est *positif* en décharge et *négatif* en charge.

On a donc : $U < U^0$ en décharge et $U > U^0$ en charge

η est souvent donnée sous la forme d'une somme de cinq surtensions :

$$\eta(I) = \eta_o(I) + \eta_t(I) + \eta_r(I) + \eta_d(I) + \eta_c(I) \quad (\text{II.10})$$

η_o traduit la surtension « **ohmique** » due à la résistance au passage des électrons dans l'électrode.

η_t représente la surtension de « **transfert de charge** » apparaissant lors de la libération ou le gain des électrons par le métal. ex : $Pb \Leftrightarrow Pb^{2+} + 2e^-$ et $Pb^{4+} + 2e^- \Leftrightarrow Pb^{2+}$

η_d traduit la surtension de « **diffusion** » provoquée par les variations importantes du gradient de concentration entre le milieu de l'électrolyte et la surface de l'électrode. Elle tient compte des mouvements ioniques dans l'électrolyte donc de la "résistivité" de ce dernier.

η_r représente une surtension de « **réaction** » pouvant apparaître lors des variations locales de concentrations dues aux transferts de charges. Cette surtension est souvent négligée dans l'étude des batteries au plomb.

η_c traduit une surtension de « **crystallisation** » apparaissant lors des changements de phase et de forme des cristaux réactifs.

Dans la pratique, seules les surtensions η_o, η_t et η_d des trois phénomènes prédominants sont pris en compte dans les calculs.

II.1.5. Décharge, charge et surcharge

Lors de la décharge de la pile, sa tension U baisse au cours du temps pour trois raisons principales :

- la **consommation de l'acide** (2 H_2SO_4 consommés pour 2 électrons produits) fait chuter U^0
- la transformation de Pb et PbO_2 en PbSO_4 augmente la surtension η_a : PbSO_4 occupe 260% du volume de Pb et 190% de celui de PbO_2 ; les **chemins d'accès de l'électrolyte vers la surface de l'électrode se "bouchent" et font obstacles à la diffusion** des ions vers le métal réactif.
- la transformation de Pb et PbO_2 en PbSO_4 augmente la surtension η_o : **PbSO_4 est beaucoup moins conducteur que Pb ou PbO_2**

Les transformations de la matière active en décharge sont détaillées plus loin à l'aide d'un modèle microscopique simple.

En charge, la tension d'une pile évolue de façon croissante au cours du temps par les phénomènes inverses de ceux de la décharge.

En fin de charge, les électrodes atteignent des potentiels suffisants pour provoquer une **décomposition électrolytique de l'eau**.

En théorie, la décomposition de l'eau en oxygène et hydrogène commence dès que la différence de potentiels entre les deux électrodes dépasse 1.23 Volts. Mais la vitesse d'évolution du phénomène n'est significative qu'à partir d'environ 2.1 Volts, comme le montre la figure ci-dessous qui donne, en ordonnée, la vitesse V d'évolution des dégagements gazeux en H_2 et O_2 , en fonction, en abscisse, des potentiels E des électrodes par rapport à une électrode de référence à hydrogène.

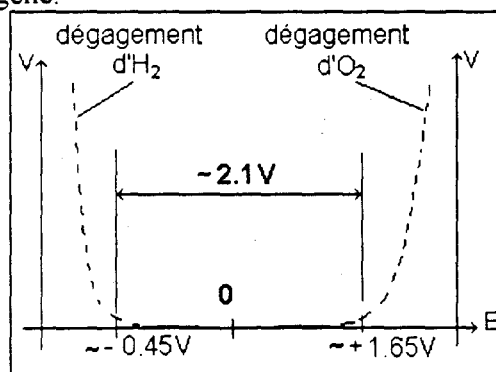
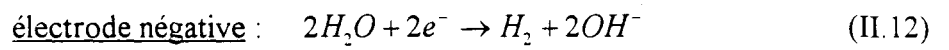
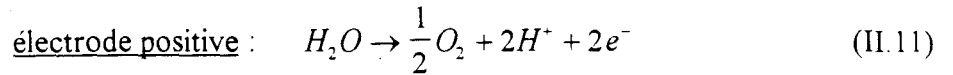
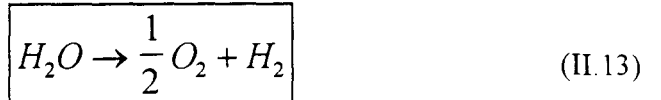


Figure II-2 Courbe d'évolution des dégagements en O_2 et en H_2 selon les potentiels des électrodes

La tension d'une pile atteignant plus de 2.1 Volts en fin de charge, on assiste alors à des dégagements importants d'O₂ sur l'électrode positive et d'H₂ sur l'électrode négative suivant les équations :



donnant l'équation de la réaction globale de dégagement gazeux :



II.2. De la pile à la batterie plomb acide^{3,4}

Augmenter, pour un courant de décharge donné, l'énergie disponible d'une pile, revient à ralentir la chute de sa tension ; il faut donc ralentir la baisse de densité de l'acide en augmentant le volume de ce dernier afin de jouer sur E° ; il faut en même temps augmenter la surface réactive des électrodes pour diminuer les surtensions ohmiques et de diffusion.

Ces considérations ont guidé de nombreuses recherches au fil des années et ont conduit aux piles rechargeables à forte énergie stockée appelées éléments, monoblocs, accumulateurs ou le plus souvent batteries.

II.2.1. Description et définitions

II.2.1.i. principe général

Les électrodes théoriques de la pile sont remplacées par des collecteurs de courant en alliages de plomb sur lesquels on vient coller la matière active. Cette matière réagit avec l'acide pour fournir les électrons qui transitent par les collecteurs vers les bornes de la batterie.

La **matière active « positive »** (i.e. de l'électrode positive) est une pâte poreuse à base de dioxyde de plomb. La porosité augmente sa surface de contact avec l'acide.

La **matière active « négative »** est une pâte à base de plomb spongieux pour les mêmes raisons.

L'ensemble collecteur - pâte forme l'**électrode** et est appelé « **plaque** ». Le collecteur est en alliage de plomb pour ses bonnes conductivité et tenue mécanique, et pour son adhérence satisfaisante avec les pâtes positives et négatives.

L'association d'une plaque positive et d'une plaque négative plongées dans de l'acide sulfurique aqueux redonne la cellule électrochimique de base.

Afin d'optimiser le volume pris par une cellule, on a rapproché fortement les plaques en insérant entre elles deux un séparateur, poreux à l'acide, destiné à éviter les courts-circuits.

Pour augmenter l'énergie disponible d'une cellule, on intercale un faisceau de plaques positives, reliées entre elles par une « barrette positive » de plomb allié, avec un faisceau de plaques négatives également connectées à une « barrette négative ». Chaque plaque est séparée de sa voisine par un séparateur poreux et résistant à l'acide.

L'ensemble est plongé dans l'acide et mis dans un bac solide résistant lui aussi à l'acide. Cet ensemble forme une « **cellule** » ou un « **élément** » ; sa tension nominale est celle de la pile correspondante, soit **2 Volts**.

Un « **monobloc** » est l'association en série de 1 à n élément(s) dans un même bac compartimenté. Les éléments y sont reliés par connexion voire soudure des barrettes au travers des parois du bac.

Les barrettes des cellules extrêmes font également office de bornes pour le monobloc.

L'association en série ou en parallèle de 1 à n monobloc(s) par connexions externes (câbles, barrettes, ...) est appelée "**batterie**".

II.2.1.ii. les différents types de plaque

II.2.1.ii.a. la plaque "Planté"

Du nom de son inventeur, son principe n'a pas changé depuis 1860. Elle est constituée d'un réseau de fines lamelles de plomb pur, à la surface desquelles après quelques décharges/charges successives se forment la couche poreuse de PbO_2 pour les plaques positives et une couche poreuse de Pb pour les plaques négatives.

Sa facile mise en oeuvre et l'"autoformation" de sa matière active constituent ses avantages principaux. Sa faible quantité d'énergie restituable par plaque limite son utilisation.

II.2.1.ii.b. la plaque "plane empâtée"

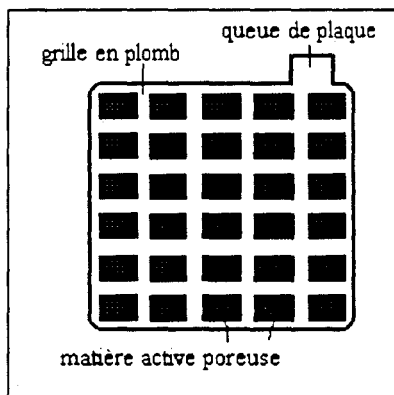


Figure II-3 Schéma d'une plaque plane « empâtée »

Elle est constituée d'une grille, plane et fine, en plomb allié sur laquelle on vient "empâter" la matière active poreuse.

L'importante surface de contact entre la plaque et l'acide, due à la géométrie de la grille et à la porosité de la pâte, est le principal avantage de cette technologie : elle permet d'atteindre de fortes puissances pour des quantités d'énergie restituable par plaque tout à fait intéressantes.

II.2.1.ii.c. la plaque tubulaire

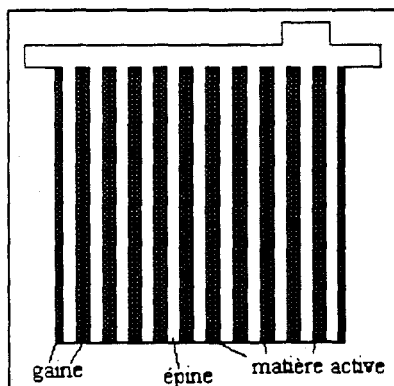


Figure II-4 Schéma d'une plaque tubulaire

Le collecteur de courant est constitué d'une rangée d'épines de plomb reliées entre elles à l'une de leurs extrémités sur une barrette de plomb ; ces épines sont entourées de matière active maintenue par des gaines cylindriques.

Cette technologie procure une bonne tenue, au cours du temps, de la matière active contre le collecteur de courant. De plus, elle permet d'utiliser d'importantes quantités de matière active par épine et donc de stocker de plus grandes quantités d'énergie.

Mais une épaisseur plus importante de matière active réduit la puissance disponible : les surtensions ohmique et de diffusion font chuter rapidement la tension aux forts courants de décharge.

De plus, l'utilisation d'épines comme collecteurs de courant rend les plaques plus sensibles aux chocs mécaniques externes.

II.2.1.iii. les alliages des collecteurs de courant

L'alliage conventionnel des collecteurs des batteries ouvertes de traction et stationnaires est le **plomb antimonieux (Pb-Sb)** ; l'antimoine accroît la résistance mécanique et facilite les opérations de moulage ; il est utilisé en plus "grande" quantité dans les collecteurs tubulaires (~10% du poids) que dans les grilles planes (~6%) pour les besoins de rigidité.

Mais l'antimoine diminue la surtension nécessaire au dégagement d'H₂ sur la plaque négative et accélère donc les pertes d'eau.

Pour limiter ce phénomène, les constructeurs tendent à minimiser leur taux d'antimoine.

Les batteries à plaque Planté sont, quant à elle, fabriquées en plomb pur.

Le **calcium** remplace l'antimoine chez certains constructeurs : il augmente la surtension nécessaire pour atteindre le dégagement d'H₂ et la conductivité électrique. Ses moins bonnes résistance à la corrosion et adhérence avec la matière active constituent ses désavantages principaux.

L'ajout d'**étain** permet d'améliorer la conductivité et l'adhérence à la matière active, au détriment de la vitesse de corrosion.

II.2.2. Les batteries "plomb ouvert" et les batteries étanches

II.2.2.i. l'appellation "plomb ouvert"

L'échappement des gaz produits en fin de charge nécessite l'ouverture à l'air libre des premières batteries au plomb.

La perte d'eau oblige les constructeurs à surdimensionner les volumes d'électrolyte ; elle entraîne une augmentation indésirée de la densité de l'acide qui doit être compensée régulièrement par des rajouts d'eau déminéralisée ; les plaques sont totalement immergées dans l'acide dont le niveau est surveillé par l'utilisateur.

II.2.2.ii. les batteries étanches à recombinaison de gaz⁴

Pour des besoins de confort et de sécurité, la recherche s'est vite penchée sur la possibilité d'étanchéifier les batteries plomb acide.

La formation des gaz en fin de charge, entraînant des pertes d'eau en cas d'évacuation, est le problème majeur posé par cette opération.

II.2.2.ii.a. le cycle de l'oxygène⁵

La seule technique pour contrôler le phénomène, ayant fait ses preuves, aussi bien du point de vue rentabilité que du point de vue des performances, est la recombinaison forcée sur l'électrode négative de l'oxygène formé à l'électrode positive.

L'idée est de jouer sur l'apparition différée de l'oxygène et de l'hydrogène en fin de charge. L'oxygène formé sur l'électrode positive est guidé vers l'électrode négative, au travers du séparateur, où il va se recombinaison avec le plomb Pb puis avec les protons H^+ pour redonner de l'eau. C'est le cycle interne de l'oxygène. Ces transformations de l'oxygène sur l'électrode négative vont retarder l'évolution du potentiel de cette dernière vers le potentiel suffisant à la formation d'hydrogène à sa surface.

La recombinaison de l'oxygène et l'inhibition du dégagement d'hydrogène vont limiter fortement les pertes en eau.

II.2.2.ii.b. la mise en pratique

Deux techniques sont utilisées aujourd'hui par les constructeurs pour mettre en pratique cette recombinaison. Il faut dans tous les cas "immobiliser" l'électrolyte pour guider les gaz d'une plaque vers l'autre en les empêchant de s'échapper librement.

le gel de silice

L'électrolyte est gélifié par des cristaux de silice (SiO_2) introduits en fabrication lors du remplissage en acide des accumulateurs. Le déplacement des ions (HSO_4^- , H^+ , ...) dans ce gel est facile mais la circulation des gaz y est rendue normalement impossible. Seule la présence de microfissures provoquées dans le gel permet le transfert de l'oxygène d'une plaque vers l'autre.

le séparateur "buvard" en microfibres de verre

L'électrolyte est absorbé dans un séparateur microporeux (95% de porosité minimum) en microfibres de verre résistantes à l'acide sulfurique. La compression du séparateur sur les plaques réduit fortement la mobilité des gaz et favorise le transfert de l'oxygène de la plaque positive vers la plaque négative (déplacement le plus court).

La recombinaison n'a pas en pratique un rendement unitaire. Des valves de dégazage sont nécessaires sur le couvercle de la batterie pour évacuer les gaz qui ne sont pas recombinaisonés et éviter ainsi les surpressions.

Avec une charge bien contrôlée, les rendements de recombinaison se situent aux alentours de 95%. Les pertes d'eau sont fortement diminuées.

II.2.3. Les applications

Il existe aujourd'hui trois grandes applications pour les batteries plomb acide :

- les batteries de "démarrage" ou S.L.I. ("Starting", "Lighting", "Ignition")
- les batteries industrielles de type "stationnaire"
- les batteries industrielles de type "traction"
-

II.2.3.i. les batteries S.L.I.

C'est l'application la plus répandue car directement en rapport avec les consommateurs.

Ces batteries servent aux démarrages des machines à combustion interne (ex : moteurs de voitures thermiques) et à l'alimentation des systèmes électriques entourant ces machines.

Le besoin en forte puissance et faible énergie favorise la technologie plaque plane pour cette application.

Leur utilisation standard consiste à :

- être en stockage en circuit ouvert pour la majeure partie du temps,
- être maintenue en pleine charge voire en surcharge par un alternateur relié au moteur à combustion,
- répondre à des appels de forte puissance pendant des temps brefs.

II.2.3.ii. les batteries stationnaires

Elles sont utilisées comme batteries "tampon" pour assurer la continuité de l'alimentation des réseaux électriques, de communication, informatiques, ou des éclairages d'urgence lors des coupures "secteur".

Le besoin d'importantes énergies pour des puissances plutôt faibles autorise les trois technologies de plaque.

En cours d'utilisation normale, les batteries stationnaires :

- sont maintenues, la majeure partie du temps, en pleine charge par application, par la source de puissance primaire (ex : réseau E.D.F.) d'une tension dite de "floating" (~2.25 V/élt) destinée à compenser l'autodécharge (c.f. I.4.),
- compensent les microcoupures "secteur" en fournissant l'énergie au travers de faibles décharges,
- subissent de temps à autre une décharge complète à faible courant lors des coupures prolongées.

II.2.3.iii. les batteries de traction

Elles servent en majeure partie à la propulsion de véhicules électriques (chariots de manutention, petits véhicules de ville, bennes à ordures, tramways...).

Elles sont également destinées, pour l'avenir, à servir comme tampon d'énergie dans le concept de "load-levelling". Le but est de diminuer les variations quotidiennes, trop brutales et trop importantes, de demande d'énergie au réseau ; les organes de production d'électricité ont

parfois de grandes difficultés à répondre rapidement aux besoins. Pour répartir la production sur 24 heures, des batteries installées chez les particuliers leur délivreront le surplus d'énergie pendant la journée et se rechargeront à régime constant pendant la nuit. De plus, le système pourra écrêter les appels de puissance.

Ces deux grands types d'utilisation exigent de bonnes réponses en puissance avec d'importantes quantités d'énergie à restituer. La technologie plaque plane s'impose même si les cahiers des charges permettent parfois l'utilisation de la technologie plaque tubulaire.

Pour ce type d'application, les batteries fonctionnent en "cyclage", c'est à dire qu'elles subissent des cycles successifs de décharge/charge entrecoupés de périodes courtes de stockage en circuit ouvert ou en floating.

II.3. Profil de charge, Tension d'Arrêt et Capacité : définitions de trois standards des batteries plomb acide

II.3.1. Profil de Charge

Pour limiter l'électrolyse de l'eau en fin de charge, la tension de charge d'une batterie plomb acide est régulée à une valeur empêchant les dégagements gazeux significatifs. Le profil d'une charge standard de batterie plomb acide (voir ci-dessous) est dit en "IU" ou en "WU" : il comporte une première phase de recharge à courant constant "I" ou puissance constante "W", suivie de la phase de recharge en régulation de tension "U".

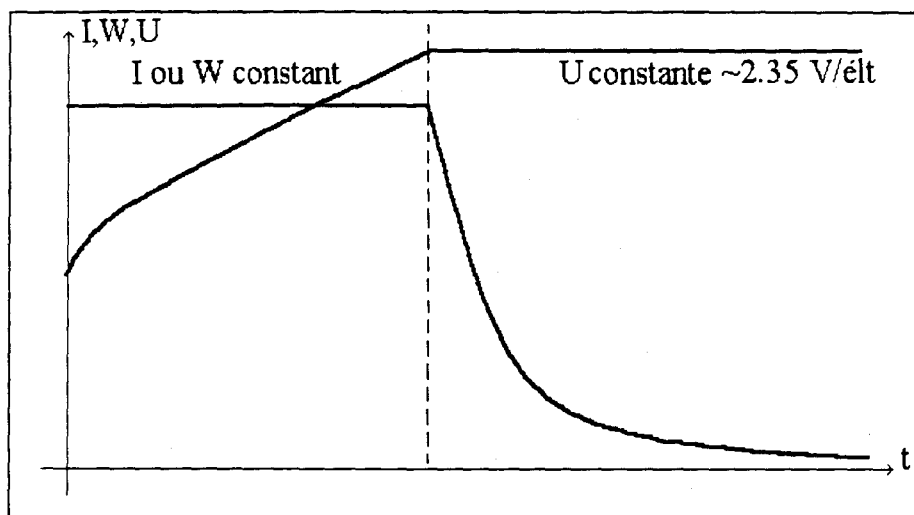


Figure II.5 Profil de recharge standard des batteries au plomb

La formation exothermique de gaz en fin de charge est alimentée par de l'énergie normalement destinée à la transformation de PbSO_4 en PbO_2 et Pb ; le rendement de charge, défini comme le rapport entre l'énergie électrique que l'on injecte dans la batterie et la part de cette énergie effectivement convertie en énergie chimique restituable, chute donc fortement en fin de charge ; à cause de ce phénomène, la charge complète (i.e. la transformation complète du sulfate de plomb) est retardée et nécessite un « facteur de recharge » (rapport entre l'énergie remise dans la batterie et l'énergie extraite avant la recharge) supérieur à 1.

L'apparition des gaz en fin de charge provoque une élévation de température à la surface des électrodes et une augmentation de densité de l'électrolyte par perte d'eau.

II.3.2. Décharge et Tension d'Arrêt

La tension d'arrêt est la tension, exprimée en Volts ou souvent en Volts par élément (V/élt), à laquelle on décrète qu'une décharge est terminée.

Considérons ci-dessous l'évolution type de la tension d'un élément au plomb au cours d'une décharge à courant constant.

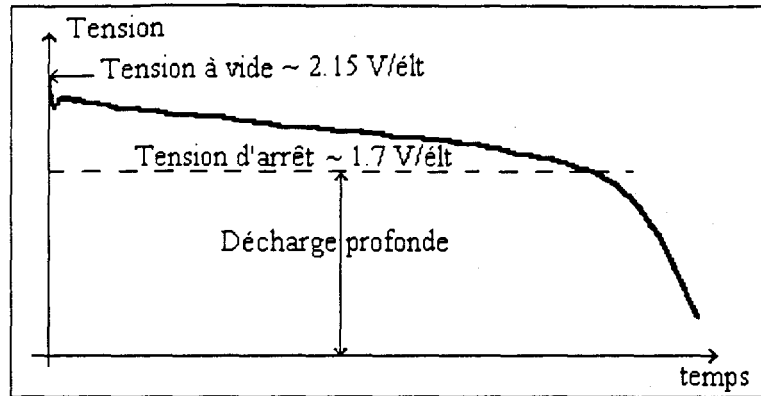


Figure II.6 Evolution de la tension d'un élément au plomb au cours d'une décharge à courant constant

En fin de décharge, la chute de la tension s'accélère brutalement : la transformation en PbSO_4 , jusqu'alors relativement homogène, se localise et forme de gros agglomérats. Ceux-ci augmentent fortement les surtensions η_d et η_o , appauvrissent en électrolyte l'intérieur de la plaque et font écrouler la tension.

De plus, cette agglomération peut devenir irréversible et provoquer une perte d'énergie disponible.

C'est pour éviter cette "dégradation" de la matière active que la tension d'arrêt a été définie. Elle correspond souvent au tout début de la chute brutale de la tension.

La tension d'arrêt dépend du courant de décharge : plus le courant est fort, plus on "autorise" une tension d'arrêt plus basse pour tenir compte notamment d'une surtension ohmique globale plus importante.

Au delà de cette tension d'arrêt c'est la "décharge profonde" de l'élément.

II.3.3. Capacité

C'est la quantité d'électricité exprimée en Ah que l'on peut extraire d'un élément, d'un monobloc ou d'une batterie après une charge complète. Notée C , elle se calcule par intégration temporelle du courant de décharge :

$$C = \int_0^t i(t) dt \quad (\text{II.14})$$

Les capacités les plus fréquemment rencontrées sont :

- La capacité *théorique* C_{th} : régie par la loi de Faraday et par la supposition d'un matière active utilisée à 100%, elle donne la quantité d'électricité maximale disponible.
- La capacité *réelle* C : donnée pour un profil de courant de décharge, elle représente la quantité d'énergie électrique débitée entre la pleine charge et

une fin de décharge choisie, correspondant souvent à une tension d'arrêt. Bien inférieure à la capacité théorique, elle traduit l'effet du coefficient α d'utilisation de la matière active (encore appelé rendement de la matière active), bien inférieur à 100% (entre 30% et 40% en pratique) :

$$C(i) = \alpha(i)C_{th}$$

- La capacité C_n : c'est la capacité réelle obtenue en « n » heures donc avec un courant de décharge égal à $\frac{1}{n}C_n$ jusqu'à la tension d'arrêt.

ex : la capacité C_5 est obtenue en 5 heures en déchargeant à un courant égal à $\frac{1}{5}C_5$ (souvent noté $0.2 C_5$) jusqu'à 1.7 V/élt.

En pratique, la capacité dépend des nombreux paramètres de fabrication et des conditions d'utilisation ; elle augmente, par exemple, avec une élévation de la température de la décharge (augmentation de la mobilité des ions HSO_4^- , diffusion améliorée au sein de la matière active, etc.)

II.4. Description d'un modèle physico-chimique des transformations de la matière active positive en décharge.

Nous proposons, dans ce paragraphe, un modèle et une description simples et originales des phénomènes physico-chimiques ayant lieu dans la matière active positive lors des décharges et charges. Nous expliquons notamment la chute de tension en fin de décharge, la variation de la capacité avec le courant de décharge ou encore l'effet d'une pause dans une décharge. Nous avons élaboré cette nouvelle représentation dans le but d'aider à la compréhension du fonctionnement de la batterie.

II.4.1. Le modèle de base

Partant de modèles proposés dans la littérature⁶, nous proposons de considérer la matière active positive comme un agglomérat de sphères en contact les unes avec les autres, troué par de grands pores créés pour la plupart lors de la fabrication. La figure ci-dessous montre une vue en coupe schématique d'une plaque positive accolée au séparateur qui nous servira de référence pour les explications qui suivent.

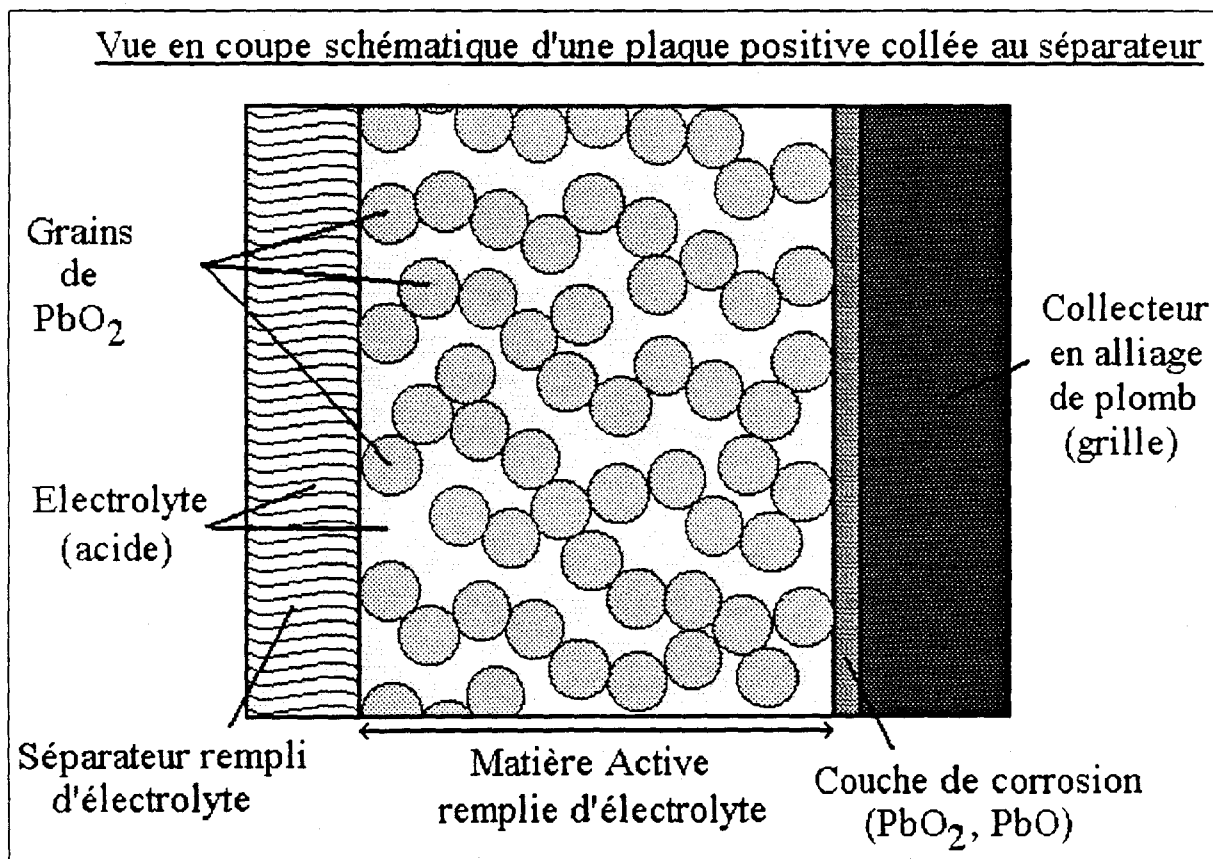


Figure II.7

Chaque sphère représente un grain (cristal ou amorphe) de PbO_2 , soit un agglomérat microporeux de molécules de PbO_2 (voir ci-dessous).

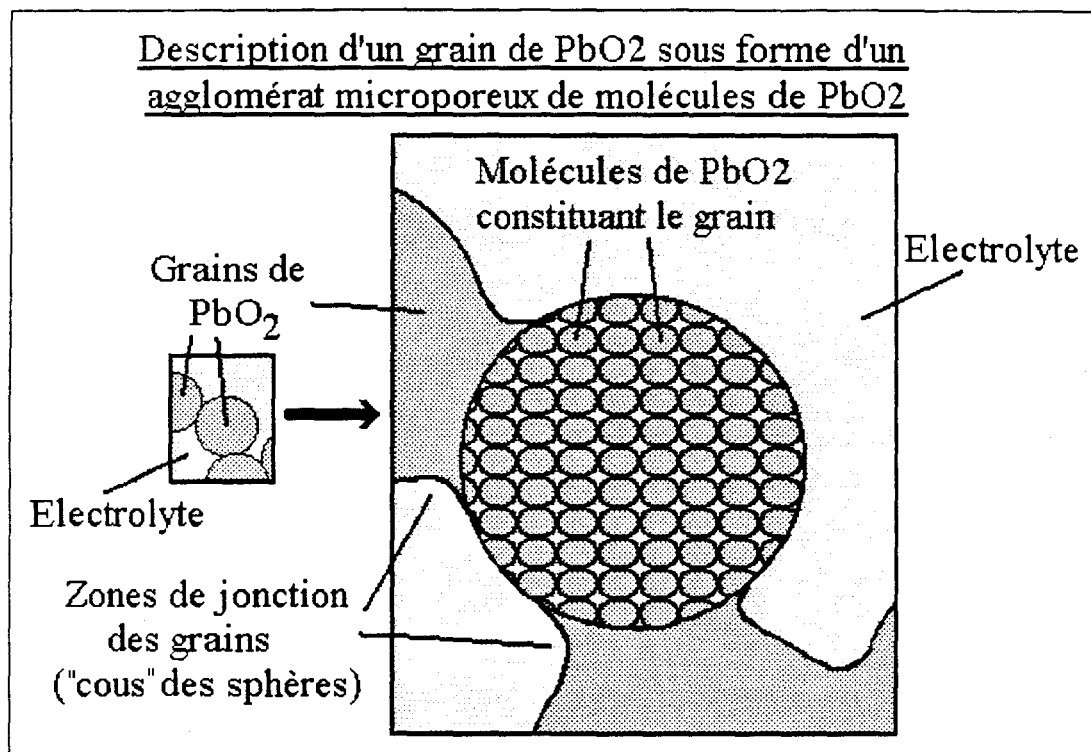
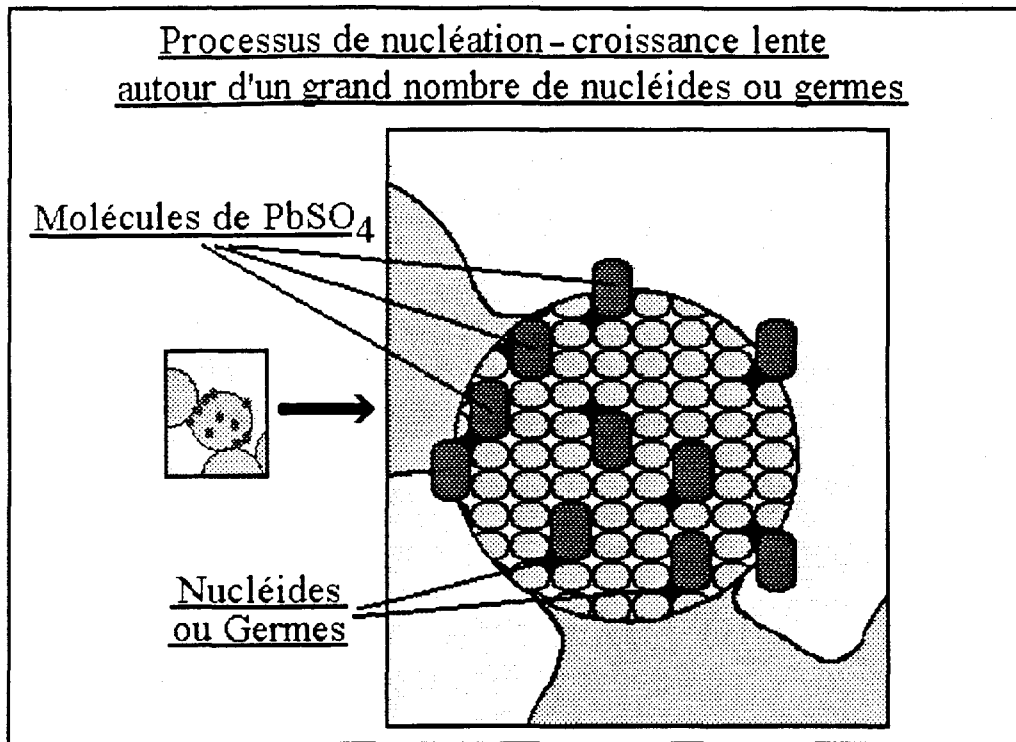


Figure II.8

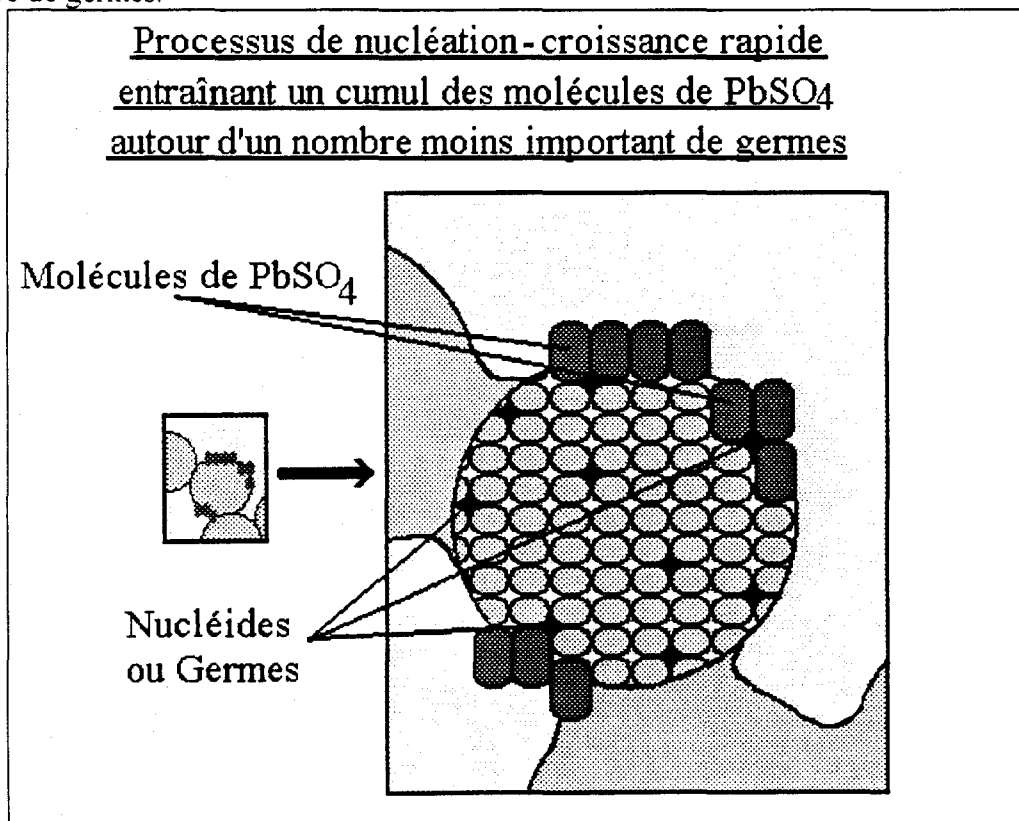
II.4.2. Description de la décharge

La décharge provoque la transformation des molécules de PbO_2 en molécules de PbSO_4 occupant un volume pratiquement double de celui des premières. Cette transformation s'effectue principalement par un processus appelé "**nucléation-croissance**" ou "**transformation métasomatique**".

Cette transformation consiste en un passage direct de PbO_2 en PbSO_4 autour de nucléides ou germes (défauts énergétiques créés notamment par des impuretés ou des défauts géométriques des particules microscopiques) présents dans le grain. Le nombre de germes utilisés et donc la répartition des zones de transformation dans le cristal dépendent de la vitesse de réaction donc du courant de décharge. Plus celui-ci est faible, plus les sites de transformation sont nombreux et donc plus la modification du grain est homogène (voir ci-dessous).



Par contre, pour des décharge à forts courants, la vitesse de réaction élevée provoque le regroupement des transformations autour de quelques germes principalement en surface du grain, les molécules de PbSO_4 apparaissent en formant des agglomérats autour d'un nombre moindre de germes.



Dans une plaque positive de batterie, ces deux phénomènes contribuent à la décharge de la matière active. Le PbSO_4 occupant un volume double de celui de PbO_2 , son apparition au fur et à mesure de la décharge remplit la surface des grains et bouche progressivement les pores de la matière active. L'accès de l'électrolyte aux molécules de PbO_2 s'en trouve réduit, les gradients de concentration augmentent au sein de cette matière active et provoquent une augmentation des surtensions de diffusion.

De plus, comme PbSO_4 est moins conducteur que PbO_2 , la résistance ohmique de la matière active augmente également. Ces deux phénomènes associés à la baisse de la tension à vide par consommation d' H_2SO_4 provoquent la chute de la tension au cours de la décharge. Ils entraînent en fin de décharge de forts gradients de concentration qui provoquent un emballement des surtensions et une chute brutale de la tension.

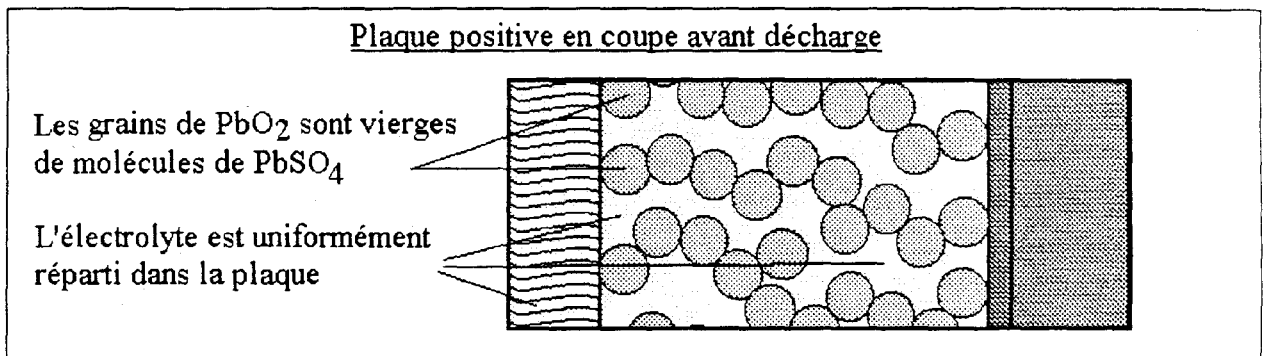


Figure II.11

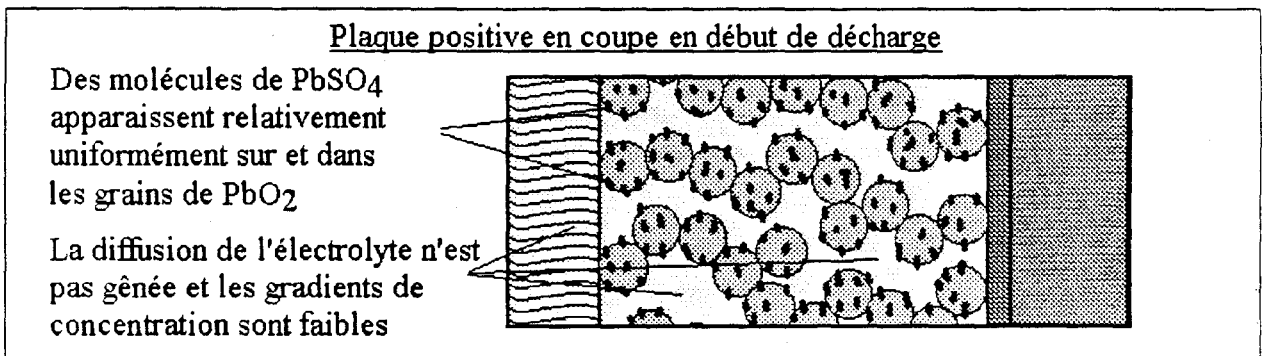


Figure II.12

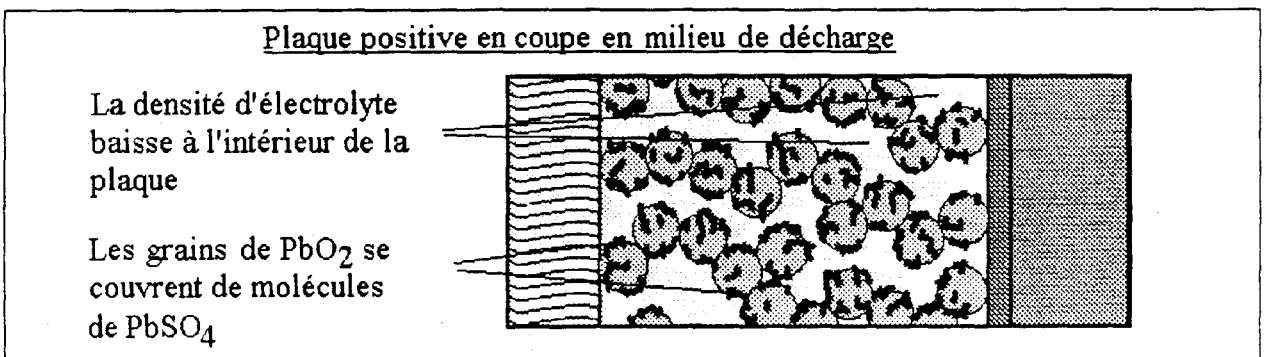


Figure II.13

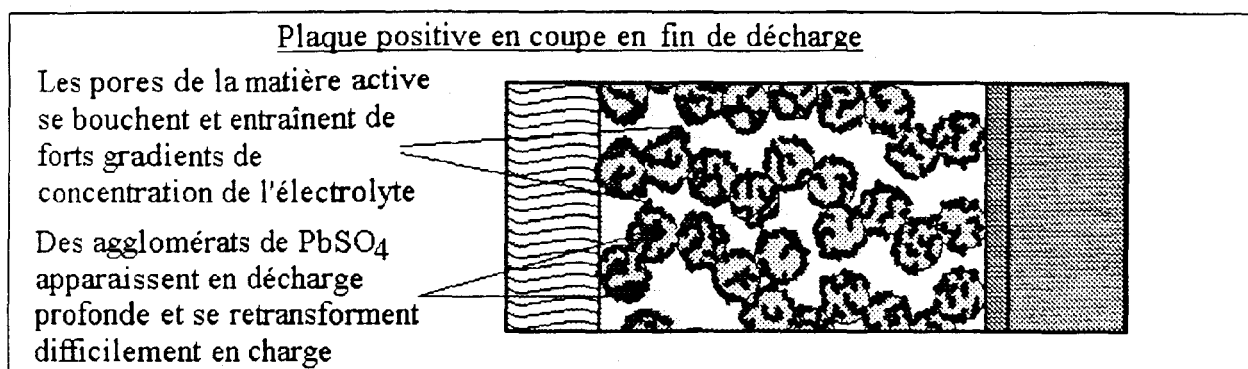


Figure II.14

II.4.3. La variation de la capacité avec le courant de décharge.

Plus on décharge à fort courant et moins on extrait d'électricité de la batterie. La vitesse de réaction élevée nécessitée par une décharge à fort courant provoque la transformation du $PbSO_4$ en agglomérats sur les grains (nucléation-croissance rapide). De plus, l'apparition de forts gradients de concentration déplace les zones de transformation vers la surface de la plaque. De ce fait, les pores en surface se bouchent plus rapidement alors que l'intérieur s'appauvrit plus vite en électrolyte.

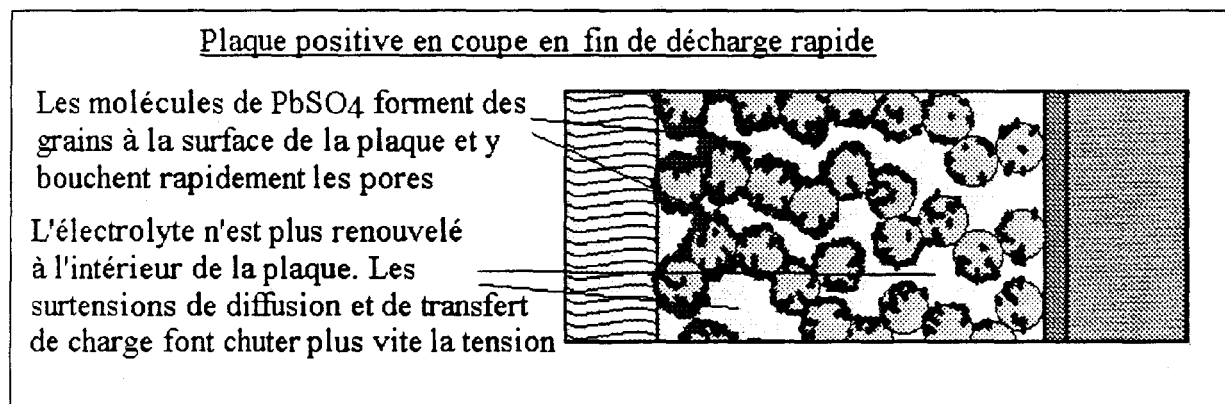


Figure II.15

Les surtensions ohmiques et de diffusion augmentent et font chuter brutalement la tension plus vite que pour une décharge à faible courant. Une décharge à fort courant transforme la matière plus en surface de la plaque. La capacité disponible diminue donc lors de décharges à forts courants. Le graphique ci-dessous montre la forme standard de la courbe de capacité d'une batterie plomb acide en fonction du courant.

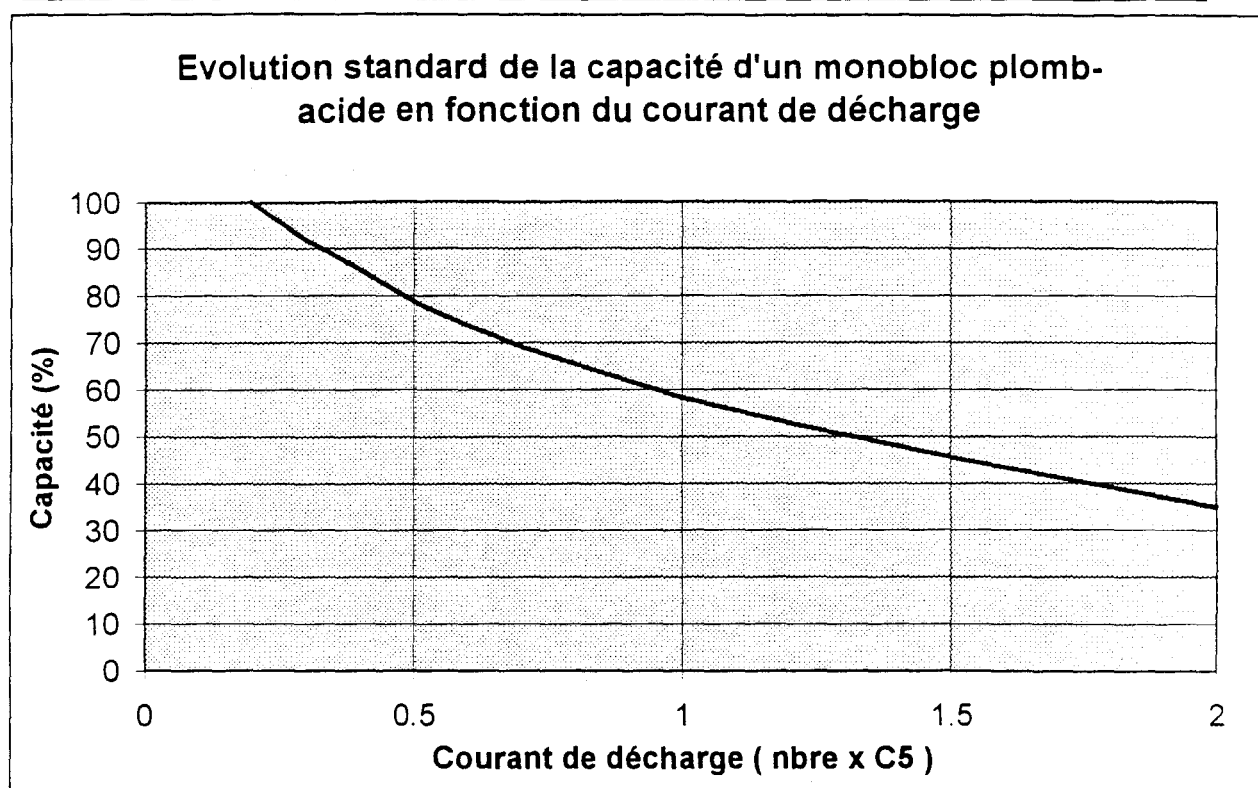


Figure II.16

II.4.4. L'effet d'une pause dans une décharge.

Une pause permet aux gradients de concentration de disparaître au profit de l'équilibre. L'électrolyte rentre, par diffusion au travers des pores, occuper les zones devenues inaccessibles et remplit, en quelque sorte, le réservoir poreux que constitue la plaque.

Dès la reprise de la décharge, les surtensions de diffusion ont diminué. Des molécules de PbO_2 qui sans la pause auraient été inaccessibles, peuvent à nouveau, par cet apport d'électrolyte, être transformées et procurent donc un gain énergétique sur la totalité de la décharge.

Une pause permet donc de gagner de la capacité.

Plus la pause arrive tard dans la décharge, plus le gain en capacité est appréciable. En effet, plus les phénomènes de diffusion sont critiques, plus le bénéfice de récupération par une pause est grand. Par ailleurs, plus la pause est longue, plus le gain en capacité est important. Bien sur, une fois l'homogénéité de l'électrolyte retrouvée, le gain en énergie stagne.

II.5. Les mécanismes de défaillance des batteries plomb-acide^{7.8.9}

Les phénomènes physiques et électrochimiques provoquant le vieillissement des batteries plomb-acide sont nombreux et complexes. Ce paragraphe propose un aperçu de ces mécanismes de dégradation irréversible et décrit quelques cas de pertes de capacité réversibles.

II.5.1. Les dégradations "catastrophiques"

Elles se traduisent, pour la batterie, par une soudaine impossibilité de se charger ou de délivrer de l'énergie électrique. Les causes de ces phénomènes irréversibles sont multiples :

- des défauts de conception ou de fabrication peuvent entraîner en cours d'utilisation des **courts-circuits entre les plaques** ou des **circuits ouverts par rupture des soudures inter-plaques ou inter-éléments**,
- des **chocs externes** peuvent parfois provoquer des fissures du bac, des fuites d'électrolyte ou des ruptures de liaisons internes,
- une **mauvaise utilisation** (manques de charge, surcharges, décharges profondes, stockages prolongés à l'état déchargé) est souvent à l'origine de pertes de capacité irréversibles, importantes et brutales.

II.5.2. Les dégradations « progressives irréversibles »

Elles se caractérisent par des changements des paramètres physiques et chimiques de la batterie à l'échelle microscopique et se traduisent par un déclin graduel irréversible de capacité. Les paramètres de fabrication (composition chimique et structure des plaques, de l'électrolyte et du séparateur) et les conditions d'utilisation (fréquences, courants et profondeurs des décharges, profils des recharges, durées des stockages, quantités de surcharge, conditions de température ou encore état de l'électrolyte) influencent fortement les types de dégradation.

De nombreuses expériences et études microscopiques ont mis en évidence différentes formes de dégradation ; les plus fréquentes et les plus limitatives pour la batterie concernent la plaque positive ; les dégradations de la plaque négative et du séparateur sont moins influentes et beaucoup mieux contrôlées.

II.5.2.i. la dégradation de la plaque positive

Plusieurs mécanismes de dégradation semblent affecter les performances de la plaque positive :

■ dégradation de la matière active positive

Les processus physico-chimiques de charge et décharge ayant lieu au sein de la matière active en cyclage ont tendance à modifier sa morphologie en créant et en isolant mécaniquement et électriquement des agglomérats de grains de PbO_2 . On observe, avec le nombre des cycles, un "amollissement" de la pâte et des augmentations importantes des surtensions par pertes de contact électrique dans la matière active.

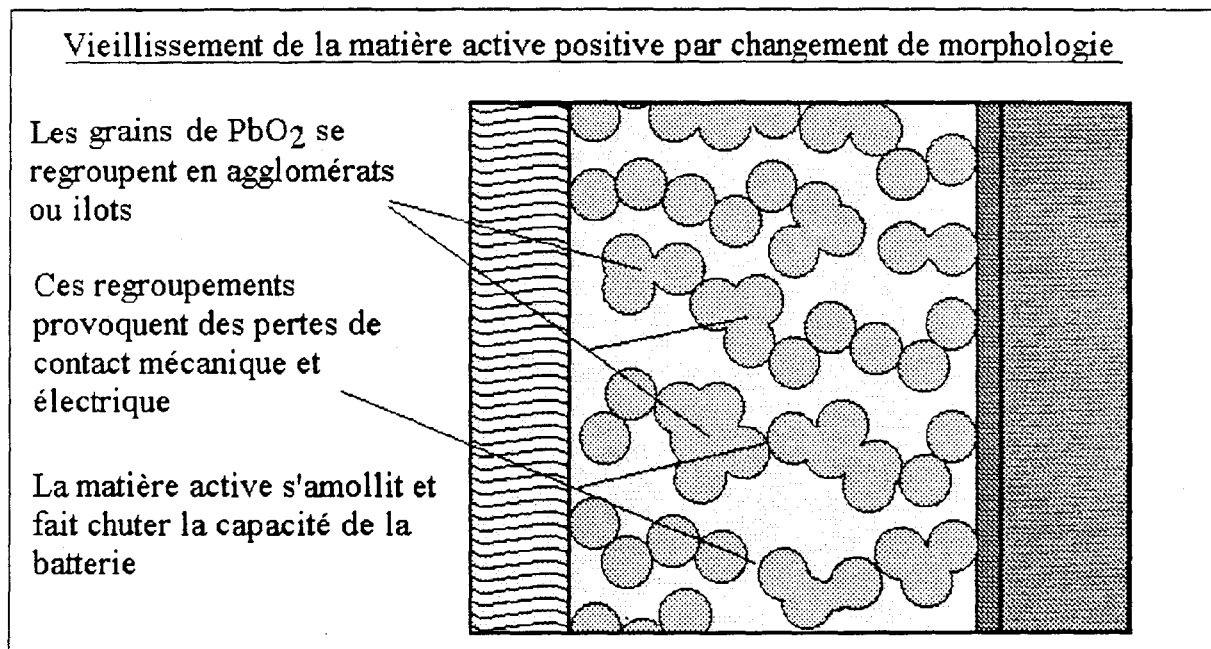


Figure II.17

Ce phénomène est en partie limité dans le cas des batteries étanches par la compression du séparateur sur les plaques qui maintient mécaniquement la matière active.

D'autres études¹⁰ avancent que la perte de capacité de la plaque positive est également due à une perte d'activité électrochimique des grains de PbO_2 encore appelée "amorphisation". Cette hypothèse est toutefois contestée¹¹.

■ corrosion et expansion du collecteur (grille ou épines)

Le plomb ou l'alliage de plomb du collecteur de la plaque positive est porté à des potentiels auxquels il est instable : il a tendance à se corroder à l'interface collecteur/matière active en formant du PbO ou du PbO_2 ¹² suivant le type d'alliage.

L'importance et la vitesse d'évolution de la couche de corrosion dépendent de l'alliage utilisé, du potentiel de l'électrode, de l'électrolyte et de la température ; pour certains types d'alliages, cette couche est isolante et provoque des pertes de capacité prématurées.

Les produits de corrosion provoquent également l'expansion du collecteur à cause de leur différence de volume avec le plomb ; cette expansion entraînerait des microfissures et des pertes de contact entre le collecteur et la matière active.

Les batteries de type plomb étanche sont plus touchées par ces deux phénomènes que les batteries de type plomb ouvert : en effet, leurs plaques négatives sont dépolarisées par la recombinaison des gaz qui limite l'augmentation de leurs potentiels. A tension de charge de la batterie égale, les plaques positives d'une batterie étanche sont donc portées à un potentiel plus élevé que celles d'une batterie ouverte. Il s'en suit une amplification de la corrosion et donc de l'expansion du collecteur positif.

Tout comme l'amollissement de la matière active, l'expansion est compensée par la compression des plaques entre elles sur les séparateurs.

II.5.2.ii. la dégradation de la plaque négative

La matière active négative contient des "expandeurs" (sulfate de baryum, noir de carbone, dérivés sulfonés de lignite, etc.) ; destinés à empêcher les grains de plomb de grossir, de se recombinaison pour former des agglomérats, ils évitent les pertes de capacité par diminution de la surface de contact entre le plomb et l'électrolyte en maintenant la présence de pores dans la matière active négative. Il arrive que ces expandeurs se dégradent par dissolution, décomposition thermique ou réaction chimique avec l'acide.

Dans le cas des batteries étanches, la dépolarisation de la plaque négative l'empêche théoriquement d'atteindre la pleine charge. La répétition du phénomène peut entraîner des pertes de capacité.

En pratique, ces cas de dégradation de la plaque négative sont rares ; leurs effets sont limités aujourd'hui en surdimensionnant la plaque négative par rapport à la plaque positive.

II.5.2.iii. la dégradation du séparateur

Le séparateur a un rôle double : il évite les courts circuits et aide à la tenue mécanique de la matière active sur le collecteur. Certains phénomènes peuvent l'altérer et faciliter ainsi la dégradation des plaques :

- il peut subir une dégradation thermique lors des montées de la batterie en température
- des impuretés introduites lors des rajouts d'eau peuvent l'attaquer
- des dendrites de plomb (accumulation des grains en forme d'aiguille), apparaissant sur l'électrode négative dans les moments de faible densité d'acide, peuvent venir le transpercer.

Les améliorations récentes sur les séparateurs limitent fortement aujourd'hui ces modes de dégradation.

Traversé par l'oxygène lors de la recombinaison, le séparateur d'une batterie étanche peut être sujet à oxydation ; l'emploi de séparateur en microfibres de verre, résistant à 100% à l'oxydation a résolu le problème.

Par ailleurs, la formation des dendrites est limitée par l'immobilisation de l'électrolyte ; les séparateurs résistent mieux aux contraintes mécaniques des éventuelles formations de ces "grains aiguilles".

En fait, il est devenu rare aujourd'hui de rencontrer des défaillances de batterie dues au séparateur.

II.5.2.iv. la stratification

L'usure des plaques n'est pas uniforme.

Plus lourd que l'eau, l'acide a tendance par gravité à s'accumuler vers le bas de l'élément. Au fil du temps, une "stratification" de l'électrolyte apparaît. Ainsi, l'hétérogénéité résultante entraîne une non uniformité, synonyme d'amplification, des dégradations le long de la plaque. Le brassage de l'électrolyte par les dégagements gazeux en surcharge ou par un système de pompe extérieur permet de réduire ce phénomène.

Plus lente que dans le cas du plomb ouvert du fait de l'immobilisation de l'électrolyte, la stratification des batteries étanches est en contre partie difficilement réversible ; elle peut entraîner des difficultés de réduction du sulfate de plomb en bas des plaques et déséquilibrer ces dernières. Pour limiter ce phénomène on utilise des séparateurs à porosité de plus en plus fine ; mais un minimum de stratification a quand même lieu dans la matière active au travers de ses nombreux pores; une installation couchée des batteries permet de limiter fortement le phénomène.

II.5.2.v. la perte d'eau

La perte d'eau des batteries ouvertes en surcharge peut être compensée par des rajouts réguliers.

Liée essentiellement à la recombinaison non complète des gaz, elle est beaucoup plus lente mais irréversible dans le cas des batteries étanches; prépondérante dans les applications cyclage, elle augmente la résistivité de l'acide (en augmentant sa densité) et du séparateur (en réduisant sa saturation).

II.5.2.vi. La réorganisation du sulfate de plomb en stockage

Les molécules de sulfate de plomb en contact dans les électrodes ont tendance avec le temps à se réorganiser en agglomérats très résistifs. Il devient ensuite très difficile de les retransformer en plomb ou en dioxyde de plomb lors de la charge.

Ce phénomène, observé pour les matières actives des deux électrodes, provoque des pertes d'énergie souvent irréversibles lors des stockages prolongés.

Plus les électrodes contiennent de sulfate de plomb, plus les formations d'agglomérats sont nombreuses ; autrement dit, plus la batterie est déchargée, plus le temps de stockage doit être court pour éviter de trop importantes pertes d'énergie.

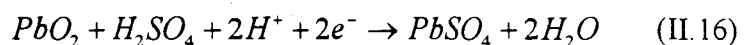
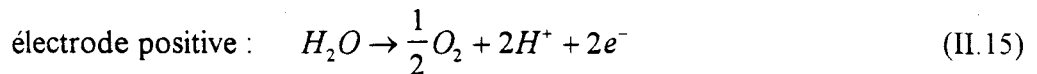
II.5.3. Les pertes de capacité réversibles

Il arrive, sous certaines conditions d'utilisation, qu'une batterie plomb-acide perde une partie de sa capacité et la récupère peu de temps après. Ces baisses de performances temporaires peuvent notamment être provoquées par les trois principaux phénomènes suivants :

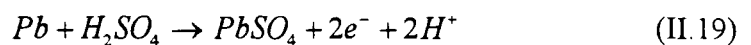
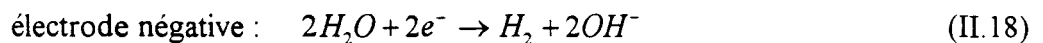
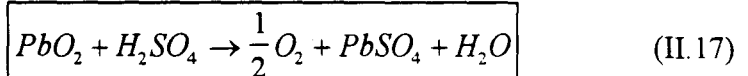
II.5.3.i. l'autodécharge en stockage

Lorsque un élément est en circuit ouvert, aucun courant ne circule ; pourtant, si sa tension est supérieure à 1.23 Volts la décomposition de l'eau a quand même lieu. Cette dernière provoque la transformation de Pb et de PbO₂ en PbSO₄ pour récupérer les électrons dont elle a besoin : c'est l'**autodécharge** de la batterie.

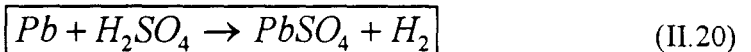
Elle s'effectue suivant les réactions suivantes :



soit la réaction globale d'autodécharge de l'électrode positive :



soit la réaction globale d'autodécharge de l'électrode négative :



Les potentiels d'équilibre des électrodes d'une batterie plomb-acide se situent dans un domaine où l'autodécharge reste relativement faible.

La vitesse d'évolution de ce phénomène dépend toutefois d'autres paramètres extérieurs; elle augmente, par exemple, avec une élévation de température ou diminue avec l'augmentation de la quantité de PbSO₄ sur les électrodes.

Le sulfate de plomb formé par l'autodécharge provoque une perte de capacité pour la batterie. Cette perte est réversible tant que le phénomène précédemment cité de réorganisation des grains de sulfate de plomb en agglomérats résistifs n'a pas lieu.

Elle est récupérable par des compléments de charge ou par quelques cycles de charge/décharge à faible courant.

II.5.3.ii. l'"effet mémoire"

La batterie plomb acide a tendance, en cyclage, à s'habituer à une utilisation répétitive ; ce phénomène appelé parfois "effet mémoire" n'est pas propre à la technologie plomb-acide ; il apparaît pour bon nombre d'accumulateurs électrochimiques. Vérifié dans toutes les expériences de laboratoire, il a été notamment mis en évidence quantitativement par l'équipe Voss¹³ pour les batteries plomb-acide.

Les comportements suivants sont constatés :

- lors de cyclages à courants forts, l'accumulateur perd un peu de capacité à courant faible,
- lors de cyclages à faible profondeur de décharge, il s'habitue à délivrer la quantité d'énergie qu'on lui demande à chaque cycle et n'arrive plus à fournir la capacité maximale initiale,
- lorsque ces deux types d'utilisation ne sont pas trop prolongés, il est possible de récupérer facilement la capacité perdue (hors vieillissement irréversible normal) en faisant subir à la batterie un cyclage comportant des décharges à 100% à courant faible (0.2 C₅ par exemple),
- ces phénomènes d'adaptation sont modérés pour la technologie plomb acide et difficilement expliqués.

II.5.3.iii. les poches de gaz

Afin de limiter le phénomène difficilement réversible de la stratification dans les accumulateurs étanches, les constructeurs diminuent de plus en plus la porosité de leurs séparateurs.

Ce gain en homogénéité s'effectue parfois au détriment de la qualité de recombinaison : les très faibles porosités rendent difficile la traversée de l'oxygène entre les deux plaques ; des poches de gaz se forment parfois à la surface de la plaque positive et entraînent des pertes de capacité en diminuant les surfaces d'échange entre la plaque et l'acide.

Une phase de repos après la charge de l'accumulateur laisse le temps à l'oxygène de diffuser, de se recombinaison ou de s'échapper, et permet de récupérer l'énergie temporairement perdue.

II.5.4. Le vieillissement optimal standard des batteries plomb-acide

Le vieillissement des batteries stationnaires s'exprime en années de service : une perte permanente de capacité nominale (souvent C₂₀, i.e. en 20 heures) d'environ 20% définit la fin de vie de ces batteries.

Dans leur utilisation standard, ces batteries sont soumises pour la majeure partie du temps à des tensions continues élevées (2.2 à 2.5 V/élt) avec de petites composantes alternatives ; elles ne subissent que quelques cycles importants de décharge/charge : leur

vieillessement est essentiellement dû à la dégradation de la plaque positive par corrosion/expansion du collecteur.

En laboratoire, les batteries sont maintenues en « floating » à 2.27 V/élt dans des bains ou des pièces thermostatées ; leurs durées de vie optimales sont de l'ordre de 15 à 20 ans pour les batteries ouvertes et 7 à 12 ans pour les batteries étanches. Pour réduire le temps nécessaire aux essais de vieillissement, la plupart des laboratoires provoquent des essais de floating à 2.27 V/élt à 55°C : les dégradations sont accélérées et une corrélation entre ce type d'essais et celui à 25°C permet d'interpréter les résultats obtenus plus rapidement.

Le vieillissement des batteries de traction s'exprime en nombre de cycles de décharge/charge: une perte permanente de capacité nominale (souvent C_5 , i.e. en 5 heures) d'environ 25% définit la fin de vie de ces accumulateurs.

La matière active de ces batteries travaille en "cyclage" (charge/décharge) : la plaque positive limite la durée de vie principalement par « passivation » (perte d'activité) et amollissement de la matière active mais un peu aussi par corrosion/expansion du collecteur.

Les essais de vieillissement en laboratoire consistent à "cycler" les batteries avec des charges complètes et des décharges à un régime de 0.2 C_5 jusqu'à une tension d'arrêt d'environ 1.7 V/élt ; les durées de vie optimales sont de l'ordre de 1500 cycles pour les batteries ouvertes et 1000 cycles pour les batteries étanches.

Le vieillissement des batteries S.L.I. est difficilement quantifiable car leur utilisation est aléatoire et ne peut être reproduite facilement en laboratoire.

Les progrès effectués au fil des jours par les constructeurs tendent à améliorer ces durées de vie notamment pour la technologie la plus récente, celle des batteries étanches.

II.6. Conclusion

Ce chapitre proposait la définition électrochimique et les principales caractéristiques des accumulateurs au plomb acide actuels.

Après un rappel du principe et des équations de bases de la cellule de 2 volts, nous avons détaillé les trois types d'accumulateurs fabriqués aujourd'hui, à savoir, les batteries de type **S.L.I.** encore appelées "de démarrage", les batteries de type **stationnaire** destinées au soutien des réseaux d'énergie, et les batteries de type **traction**, sources principales d'énergie des véhicules électriques (chariots de manutention, bennes à ordures, automobile électrique, etc.).

La description originale du comportement en décharge de la matière active des électrodes positives, basée sur le modèle dit des "sphères", a permis ensuite au lecteur de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques dont la batterie est le siège.

Un dernier paragraphe sur les modes de dégradation de l'accumulateur conclut cette présentation en montrant la complexité et surtout l'aspect non linéaire du vieillissement d'une batterie.

La lecture de ce chapitre fait clairement ressortir les principales difficultés posées par ce système fortement non linéaire. L'énergie que peut fournir une batterie dépend de bon nombre de paramètres. Ainsi, par exemple, varie-t-elle avec le courant auquel la batterie est déchargée, avec la température ou encore avec l'état de vieillissement. La batterie regagne de la capacité en décharge lorsqu'elle subit une pause. Ses performances sur une décharge dépendent des décharges précédentes. Si l'influence de tous ces paramètres est relativement bien connue d'un point de vue qualitatif, l'approche quantitative est toute autre. Ces phénomènes sont difficiles à évaluer numériquement d'autant plus qu'ils se combinent de façon non linéaire et souvent aléatoire.

La détermination de l'état de charge est directement liée à cette approche quantitative de l'accumulateur. On comprend donc aisément pourquoi il est difficile de traiter ce problème. Les chapitres suivants tentent d'y répondre.

Chapitre 3

Evaluation des Méthodes Actuelles de Mesure de l'Etat de Charge basées sur la Coulométrie

Dans ce *troisième chapitre* nous proposons au lecteur de montrer les limites des jauges d'énergie actuelles pour véhicule électrique basées sur le principe de la Coulométrie.

Après un rappel général des principales méthodes utilisées aujourd'hui pour mesurer l'état de charge d'une batterie plomb acide, et critique vis à vis de l'application véhicule électrique, nous expliquons notre choix de l'étude des algorithmes basés sur la Coulométrie.

Nous proposons ensuite une évaluation quantitative de ces algorithmes à l'aide du banc d'expérimentation que nous avons utilisé pendant la thèse. Nous montrons les imprécisions importantes de ces méthodes et présentons celle que nous avons décidé d'optimiser.

III.1. Rappel des principales méthodes de détermination de l'état de charge d'une batterie plomb acide

De nombreuses méthodes ont été développées jusqu'ici pour traiter le problème de l'état de charge mais elles n'ont abouti à aucun système efficace. Deux types d'approches sont possibles pour déterminer cet état de charge de la batterie. Certains ont tenté de **modéliser** la batterie pour en extraire un ou plusieurs paramètres traduisant l'état de charge. D'autres se sont basés sur le **suiti expérimental de paramètres** de la batterie facilement accessibles dont l'évolution peut être rapprochée de celle de l'état de charge.

Ce paragraphe propose un aperçu critique de ces deux approches puis explique la démarche que nous avons finalement choisie pour notre détermination de l'état de charge des batteries plomb acide en véhicule électrique.

III.1.1. Les modélisations de la batterie plomb-acide

Les travaux effectués pour tenter de modéliser la batterie au plomb ne manquent pas. Trois méthodes principales sont utilisées pour prédire le comportement d'une plaque ou d'une cellule entière :

- la modélisation analytique
- la modélisation par la méthode dite des "éléments finis"
- l'équivalence à un réseau de composants électriques

III.1.1.i. la modélisation analytique

« distributionnelle » à partir de l'échelle microscopique

De nombreux travaux^{1,2,3,4,5} s'appuient sur cette méthode. On y considère, la plupart du temps, un élément de deux volts comme étant l'association de plusieurs compartiments contigus représentant ses principaux composants, les collecteurs de courant, les matières actives, l'électrolyte et le séparateur.

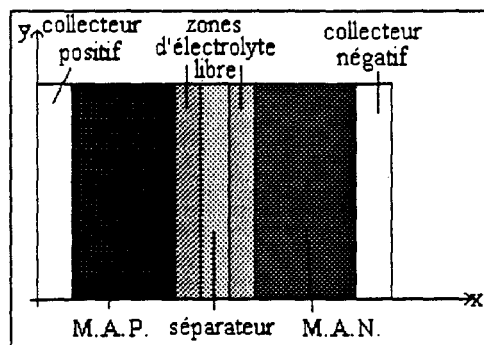


Figure III.1 Modélisation d'un élément de 2 Volts

comme une association de domaines contigus

(M.A.P. : Matière Active Positive / M.A.N. : Matière Active Négative)

A partir des équations de base concernant les bilans de matière, les équations de transport (de masse et de charge) et de cinétique électrochimique, on décrit dans chacun des compartiments les réactions physico-chimiques sous forme d'un ensemble d'équations différentielles non linéaires couplées.

Puis on intègre sur le domaine désiré à l'aide, bien souvent, de la méthode numérique des "différences finies". La plupart des travaux de ce type considèrent un modèle unidimensionnel (comme ci-dessus) afin de limiter la quantité et la difficulté des calculs. Certains chercheurs ont tenté tout de même d'élaborer des modèles en deux voire trois dimensions.

Cette méthode permet d'obtenir les distributions de paramètres internes de la cellule, comme par exemple la concentration d'acide, la densité de courant, la porosité ou encore les diverses surtensions.

Elle donne accès également aux paramètres macroscopiques tels que la tension ou le courant et permet d'en déduire les capacités à divers courants.

Ce type de modélisation est un formidable atout pour les constructeurs de batterie plomb acide car il permet d'optimiser les paramètres de fabrication afin d'améliorer les performances.

Malheureusement bon nombre de phénomènes ne sont pas encore pris en compte dans les modèles actuels par manque de capacité de calcul (besoin de résolutions numériques puissantes) ou de compréhension des phénomènes. Beaucoup d'hypothèses simplificatrices sont prises et de nombreux progrès restent à faire.

« globale » pour des relations entre paramètres macroscopiques

Certaines applications nécessitent des équations simples donnant des relations entre les grandeurs macroscopiques de la batterie (Courant, Tension, Capacité, Température, Temps, etc.).

L'équation de Peukert⁶ est la moins complexe et la plus usitée de toutes : établie de façon expérimentale, elle donne, à température constante, la capacité d'une batterie en fonction du courant de décharge par la formule :

$$\boxed{CI^n = K = \text{constante}} \quad (\text{III.1})$$

(avec n et K, deux coefficients empiriques)

Liebenow⁷ propose une relation expérimentale liant la capacité au temps de décharge par la formule :

$$\boxed{C = \frac{C_{\max.}}{1 + \gamma\sqrt{t}}} \quad (\text{III.2})$$

(avec γ coefficient empirique)

L'équation de Peukert est beaucoup plus précise que celle de Liebenow dans une large plage de courant. Certaines études¹ lui ont néanmoins révélé des erreurs importantes pour les décharges à faibles et forts courants.

Certains chercheurs^{8,9} ont tenté d'exprimer simplement la tension de la batterie en fonction des autres grandeurs à partir de considérations aussi bien microscopiques que macroscopiques. Les équations obtenues sont souvent dérivées des équations analytiques complexes à l'aide d'hypothèses simplificatrices telles que celle de considérer des états permanents et des faibles courants de décharge. Elles comportent un certain nombre de paramètres propres à la batterie déterminés par identification. Des imprécisions subsistent sur les décharges dynamiques à large plage de courant.

III.1.1.ii. la méthode dite par "éléments finis"

Proche de la première méthode, celle-ci est surtout utilisée pour déterminer les distributions de courants et de potentiels dans et entre les plaques.

On commence par définir un maillage de la plaque ou de la cellule étudiée. Sur chaque élément du maillage on écrit les relations liant les courants, les potentiels et les paramètres physiques tels que la résistivité des pâtes et des éléments de collecteurs (ces derniers paramètres sont souvent déterminés de façon expérimentale).

On relie ensuite tous les éléments par des conditions à leurs limites puis à celles de la plaque ou de la cellule.

Cette approche, très étudiée dans la littérature^{10,11,12,13}, nécessite des moyens de calculs numériques puissants.

III.1.1.iii. l'équivalence à un réseau de composants électriques

Les deux principaux et souvent uniques paramètres auxquels on a accès sur une batterie sont la tension et le courant. Il semble donc logique de vouloir modéliser cette batterie sous forme d'un réseau d'éléments électriques tels que résistances, condensateurs, diodes et autres sources de tension.

Le modèle de Thevenin constitue la base de ce type d'approche :

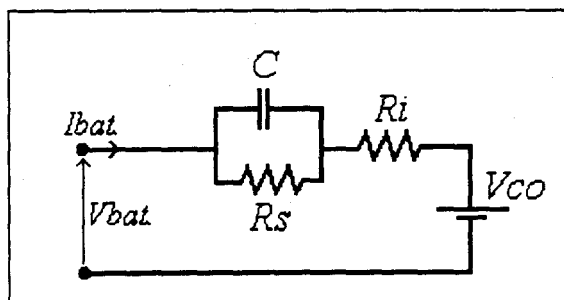


Figure III.2 Modèle de batterie de Thevenin

La source de tension V_{co} représente la f.é.m. de la batterie en circuit ouvert, R_i traduit sa résistance interne permanente et le circuit parallèle R_s - C tient compte des surtensions transitoires.

Les diverses améliorations de ce modèle ont consisté à :

- détailler les surtensions (voir équation II.10) à l'aide de mises en série et en parallèle de circuits R - C ^{14,16}, la diffusion étant parfois modélisée par une impédance dite de Warburg¹⁵,
- différencier le comportement en charge et en décharge par l'introduction de diodes de direction¹⁶,
- tenir compte de l'autodécharge par l'ajout d'une simple résistance¹⁶ ou d'un circuit de décharge à seuil¹⁴, en parallèle sur l'élément représentant la tension de circuit ouvert.
- exprimer les valeurs des divers composants par des équations non linéaires tirées de la nature des phénomènes électrochimiques¹⁶.

La modélisation complète de l'accumulateur au plomb n'existe pas ; néanmoins, les recherches approchent de plus en plus les phénomènes physiques et chimiques. Certains comportements sont encore mal expliqués notamment ceux faisant intervenir le vieillissement.

III.1.2. La caractérisation de l'état de charge d'une batterie de véhicule électrique par le suivi expérimental d'un paramètre représentatif

On entend ici par caractérisation le fait de s'intéresser à un ou plusieurs paramètres de la batterie et d'étudier son évolution au cours du temps.

Ce paragraphe résume les diverses méthodes et approches de caractérisation développées et utilisées au cours des dernières années.

III.1.2.i. la densité de l'électrolyte et la tension à vide

La mesure de la densité de l'électrolyte a été l'une des premières méthodes employées pour évaluer l'état de charge d'une batterie plomb acide.

La décharge de la batterie s'effectue par consommation de molécules d' H_2SO_4 . Par conséquent, on peut logiquement vouloir suivre l'évolution de cette décharge au travers de la densité de l'électrolyte. Elle fournit après correction la quantité d'énergie débitée ou reçue par la batterie.

Toutefois, une mesure par densimètre n'est pas pensable aujourd'hui en véhicule électrique, pour la bonne et simple raison que les batteries plomb acide sont désormais étanches pour cette application. L'accès à l'électrolyte de la batterie est donc impossible. Ce dernier y est de plus immobilisé sous forme de gel ou dans un séparateur "buvard". L'utilisation de capteur de pression de vapeur saturante avait été imaginée^{17,18} pour obtenir la densité mais le manque de précision et l'inertie trop importante de ces capteurs ont vite conduit à l'abandon de la démarche.

Comme on l'a vu dans le deuxième chapitre, la loi de Nernst (équations II.6 et II.7) fournit une relation directe entre la tension à vide et la densité. Certaines études^{19,20} ont donc envisagé d'utiliser la tension en circuit ouvert de la batterie pour obtenir l'état de charge. De par l'évolution de cette tension à vide, on peut suivre la quantité d'électricité échangée par une batterie étanche en véhicule électrique.

Seulement, la mesure de la tension à vide ne suffit pas pour donner une estimation fiable de la quantité d'énergie restante. A l'état stabilisé, elle ne donne aucune indication de l'état physique des plaques et donc des surtensions possibles lors d'un passage de courant.

La stratification de l'électrolyte dans les batteries étanches rend de plus très difficile l'interprétation physique des mesures de tension à vide.

La densité est une indication nécessaire mais non suffisante pour la détermination de l'état de charge d'une batterie. Elle ne donne de plus des résultats exploitables qu'après stabilisation et nécessite donc des temps de repos souvent incompatibles avec l'utilisation en véhicule électrique (deux à trois heures minimum que certains ont âprement ramenées à quelques minutes à l'aide d'extrapolations)

Par ailleurs, il est vrai que la quantité d'électricité échangée par la batterie peut être mesurée autrement, par intégration du courant. Mais la densité au travers de la tension à vide peut être fort utile pour évaluer l'autodécharge (absence de courant de décharge) ou encore l'état initial après une recharge complète (le rendement final non unitaire rendant difficile l'interprétation des ampères-heures remis), ou partielle.

III.1.2.ii. la mesure de la tension instantanée en décharge

Il y a deux manières possibles d'utiliser la valeur de la tension en décharge.

La première⁹ consiste à se servir d'une relation (établie par modélisation) entre la tension et le pourcentage de décharge, et de déduire l'un en mesurant l'autre.

La deuxième est la technique utilisée notamment par la jauge Curtis²¹ pour véhicule électrique. Elle compare les variations de la tension aux bornes d'une batterie au fur et à mesure d'une décharge à des évolutions standards souvent déterminées à courant constant chez les constructeurs.

L'utilisation de la tension instantanée en décharge peut être utilisée pour des interprétations plus qualitatives que quantitatives.

Les variations de cette tension sont dues principalement à la variation des surtensions internes ; la valeur mesurée dépend donc fortement du régime de décharge. Il faut également tenir compte des remontées de tension brutales lors des freinages récupératifs. La comparaison avec les graphes standards n'est pas aisée.

Par ailleurs, l'aspect relativement plat d'une courbe de décharge de batterie au plomb à courant constant complique encore l'interprétation des mesures, surtout dans une décharge véhicule électrique comportant autant d'états transitoires. Les extrapolations sont nécessaires mais périlleuses. La chute brutale de la tension en fin de décharge est certes aisément détectée et indiquée mais la méthode ne permet pas de la prévoir.

Cette méthode procure une bonne idée de l'évolution globale de la tension sans pouvoir donner d'indication quantitative précise. Les premiers véhicules électriques étaient équipés de jauges Curtis à 10 leds symbolisant 10 x 10%. Tout conducteur se rend vite compte de l'imprécision de ce type de jauge.

III.1.2.iii. la méthode coulométrique

Elle consiste à comptabiliser le nombre d'ampères-heures chargés ou déchargés et de le rapporter à la capacité totale disponible (ou à un pourcentage de celle-ci). De nombreuses recherches ont été menées ces dernières années sur le sujet^{18,22,23,24,25,26}

Les ampères-heures déchargés ou chargés se calculent par intégration numérique du courant.

La grosse difficulté de cette méthode est l'estimation de la capacité totale. Celle-ci dépend de nombreux paramètres et notamment du courant de décharge pour lequel on veut en déterminer la valeur.

Pour estimer la capacité de la batterie à un courant donné, la méthode la plus utilisée est l'équation empirique de Peukert (cf. III.1). Des calibrations par rapport à la mesure de paramètres tels que la tension à vide²⁰, la résistance interne²⁴ ou encore en utilisant des faisceaux existants ont été également étudiées.

III.1.2.iv. l'impédancemétrie

Le développement de cette méthode est récent mais les publications sur le sujet ne manquent pas^{15,27,28,29,30,31}. Partant de la constatation que les seules grandeurs accessibles sur toutes les batteries sont la tension et le courant, la mesure de résistance ou d'impédance s'impose.

La mesure de résistance interne

Des normes ont défini et standardisé durant ces dernières années des méthodes de détermination de résistance interne de batterie. Elles consistent à imposer un profil de courant

à plusieurs niveaux positifs et/ou négatifs, et à mesurer les tensions à partir desquelles des résistances ohmiques ou internes sont calculées.

Citons la norme CEI BS 6290 qui impose deux paliers de courant (I_1 , I_2), mesure les tensions stabilisées sur les deux paliers (V_1 , V_2) et calcule la résistance interne par la formule :

$$R_i = \frac{(V_1 - V_2)}{(I_2 - I_1)} \quad (\text{III.3})$$

La méthode JRC (Joint Research Committee, Traction Battery Working Group), établie dans le cadre du projet européen JOULE par un regroupement de constructeurs automobiles, impose deux paliers, l'un en décharge, l'autre en charge, séparés par des intervalles de pause. Puis elle calcule de la même façon que précédemment les résistances en décharge et en charge, en différenciant les résistances ohmiques des résistances internes totales. Elle considère par ohmique, la partie de la résistance interne correspondant aux variations de tension juste après coupure de courant. Elle prend en compte une pause de trois minutes pour calculer la résistance interne totale.

Mais comme il est difficile de déterminer par modélisation la tension de la batterie en fonction des autres paramètres, les mesures de résistances internes ne fournissent pas des résultats quantitatifs satisfaisants. L'évolution relative des valeurs au cours du temps ou au fil d'une décharge révèle des tendances mais peut difficilement être interprétée quantitativement avec précision. La résistance interne augmente brutalement en fin de décharge, traduisant logiquement la chute de tension, mais son comportement stationnaire pendant 90% de la décharge rend impossible les prévisions.

De plus, les valeurs obtenues, déjà très faibles (de l'ordre de quelques milliOhms), varient selon les méthodes d'investigation (niveau de courant, instant de mesure) dans un rapport parfois triple. Cette constatation démontre que l'accumulateur est loin de se comporter comme une source de tension parfaite en série avec une résistance. Des mesures d'impédance sont donc tentées à leur tour depuis quelques années pour essayer de mieux caractériser ce comportement fortement non linéaire.

Le mesure de l'impédance

Elle consiste à injecter, dans la batterie, un courant alternatif sinusoïdal à une fréquence donnée, à relever la réponse en tension sinusoïdale à la même fréquence, pour déterminer l'impédance et essayer de l'interpréter.

Si le courant injecté a pour expression mathématique $I_m \sin(\omega t)$, la tension résultante à la même fréquence s'écrit $V_m \sin(\omega t + \varphi)$: $Z_m = \frac{V_m}{I_m}$ donne l'impédance de la batterie et φ est le "déphasage" entre courant et tension.

Comme pour beaucoup de grandeurs électriques, l'impédance peut se calculer sous forme complexe à partir des expressions complexes du courant et de la tension dans le diagramme de Fresnel.

On obtient alors l'équation $Z = R + jX$ avec $Z_m = |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$

L'admittance complexe est l'inverse de l'impédance complexe :

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB = \frac{R - jX}{R^2 + X^2}$$

L'évolution de Z_m , ou de G avec l'état de décharge d'une batterie fait l'objet de recherches actives depuis quelques années. Les différents essais effectués sur des batteries Pb Acide et Ni-Cd ont révélé de grandes difficultés de mise en œuvre et d'interprétation.

La fréquence et l'intensité du courant injecté avec lesquelles l'impédance est mesurée influent fortement sur la qualité et la signification des mesures.

Toutes les études ont montré que les variations les plus intéressantes de l'impédance sont constatées pour des fréquences faibles à très faibles (entre quelques milliHertz et quelques dizaines de Hertz). Elles correspondent en fait à la cinétique plutôt lente des réactions chimiques internes. Pour des fréquences plus élevées, la batterie agit en filtre et présente des valeurs d'impédance beaucoup trop faibles pour conduire à des interprétations de précision.

Comme pour les mesures de résistance interne, les variations de l'impédance reflètent l'évolution de la batterie en décharge ou en charge mais surtout en fin de chaque phase. Elles permettent difficilement de prévoir la fin de décharge. De plus, une interprétation fiable des valeurs très faibles des mesures (quelques milliOhms) est fortement conditionnée par la qualité et la précision des instruments utilisés pour les effectuer.

III.1.3. Approche retenue pour notre étude

Une modélisation fine de la batterie plomb acide étanche nécessite des calculs relativement complexes. De plus, si son comportement en décharge à courant constant commence à être expliqué correctement, il n'en est pas du tout de même pour son comportement dynamique comme celui de l'application au véhicule électrique. Ce type d'étude n'aurait certainement pas abouti dans les trois années de la thèse. En outre, le lien entre une modélisation et l'état de charge de la batterie n'est pas évident.

Par ailleurs, la puissance envisagée des moyens de calculs du système de gestion embarqué est directement reliée au prix de revient de l'appareil. Destiné à aider à l'optimisation

de l'énergie, ce dernier doit voir son coût minimisé au maximum. Il ne doit pas amener au véhicule un surcoût indésirable actuellement.

A cause de cet impératif industriel, l'utilisation de modélisations trop complexes a été écartée de notre étude. Il est toutefois nécessaire de s'y intéresser car elles peuvent aider à la compréhension des phénomènes internes de la batterie et donc à l'explication des comportements macroscopiques.

Le suivi expérimental des paramètres d'une batterie ne nécessite à priori pas de calculs complexes et a donc été préféré à court et moyen termes pour notre étude.

La coulométrie et l'impédancemétrie ont très vite retenu notre attention. La densité par la tension à vide et le suivi de la tension instantanée ne peuvent, selon nous, être utilisés seuls pour déterminer l'état de charge, mais contribueront, par contre, à recalibrer les deux autres méthodes.

L'impédancemétrie est très en vogue aujourd'hui ; on voit proliférer les appareils de mesures d'impédances destinés aux batteries en applications stationnaires. Pourtant, aucun système portable et autonome n'existe pour l'instant à bord des véhicules et ce pour des raisons techniques évidentes :

- le calcul de l'impédance nécessite des développements techniques relativement coûteux (création de sinusoïdes, amplifications, filtrages, évaluations de déphasages, isolations, etc.)
- l'obtention de signaux exploitables oblige bien souvent l'utilisation d'amplitudes de courant relativement importantes (10 à 20 A crête). L'appareil présente donc une consommation d'énergie non permise actuellement dans les véhicules.
- les fréquences de mesure envisagées pour une bonne précision sur l'évolution de l'impédance nécessitent des temps de repos (absence de courant circulant) parfois relativement longs (> 10 secondes). L'utilisation dans une décharge dynamique est de ce fait tributaire des arrêts du conducteur. Le nombre de mesures en est par conséquent limité ; il faut noter tout de même que des études cherchent à interpréter des mesures qui seraient effectuées en superposition avec le courant de décharge.
- l'absence de résultats significatifs et les difficultés d'interprétation sur des décharges dynamiques retardent d'autant plus la mise en œuvre de tels systèmes de mesure.

Aussi, avons nous décidé, pour toutes ces raisons, de ne pas engager une étude d'impédancemétrie.

Restait alors la coulométrie. Techniquement, il est relativement facile et peu coûteux d'intégrer le courant de façon numérique pour obtenir les ampères-heures déchargés. La difficulté réside dans l'estimation de la capacité restante.

Nous avons donc décidé de nous lancer dans l'étude quantitative de la batterie et l'évaluation voire l'amélioration des méthodes actuelles basées sur la coulométrie.

III.2. Le banc d'expérimentation

Ce paragraphe décrit l'ensemble du matériel avec lequel nous avons effectué les essais et simulations.

Il se compose :

- des **batteries** plomb acide sur lesquelles nous avons mené notre étude,
- du **banc de charge/décharge** dynamique piloté par ordinateur et de **la cuve régulée en température** qui nous ont permis de réaliser les essais en laboratoire,
- du **véhicule électrique** dont nous avons de temps à autre disposé pour faire les tests nécessaires sur route,
- des **systèmes d'acquisition embarqués** qui nous ont permis de mémoriser les données en roulage,
- des **logiciels** de traitement de données et de simulation.

III.2.1. Les batteries étudiées

Nous avons effectués l'étude sur des batteries plomb acide Oldham destinées à l'application véhicule électrique. Nous avons travaillé sur des batteries extraites de deux séries différentes correspondant à deux gammes de performances : ces deux séries ont pour appellations officielles "12 RGT 73" et "6 RGT 180"

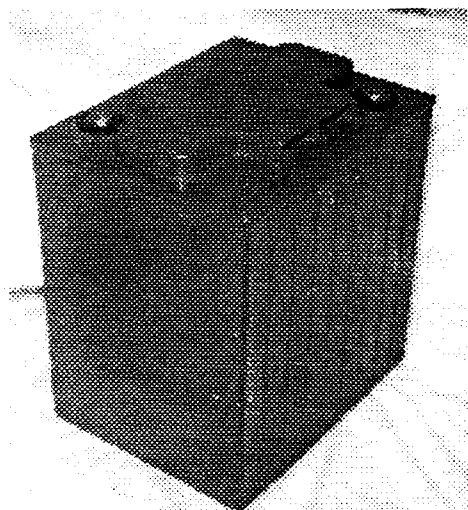


Figure III.3 Monobloc 6 RGT 180

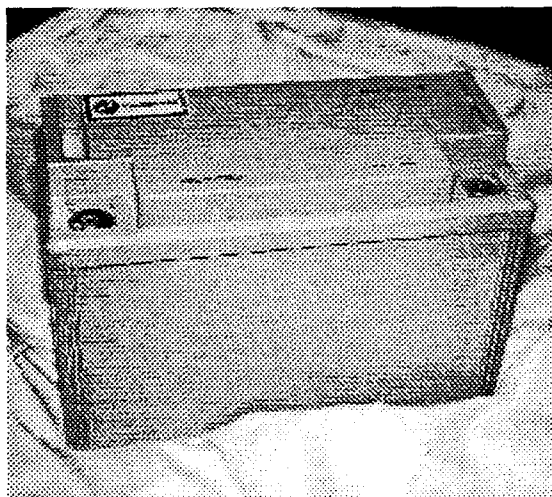


Figure III.4 Monobloc 12 RGT 73

Le premier nombre de cette appellation (**12** ou **6**) donne la tension nominale (12 ou 6 Volts) et, par la même, le nombre d'éléments (6 ou 3 éléments en série) du monobloc.

Les deux lettres "RG" signifient que le monobloc est de technologie étanche à Recombinaison de Gaz où l'électrolyte est immobilisé dans un séparateur buvard en fibres de verre.

La lettre "T" indique que le monobloc est destiné à l'application Traction donc notamment à l'utilisation en véhicule électrique.

Le dernier nombre (73, 180) donne la capacité nominale du monobloc en ampères-heures soit 73 Ah et 180 Ah en 5 heures. Le courant nominal ($0.2 C_5$), c'est à dire le courant avec lequel la batterie atteint la tension d'arrêt de 1.7 V/élt en 5 heures, vaut respectivement 14.6 A et 36 A.

Les deux types de batteries ont subi des essais en laboratoire mais seule la série 6 RGT 180, dernière sortie de la gamme, a été suivie en véhicule électrique.

III.2.2. Le banc d'essais en laboratoire

Il se compose d'un chargeur/déchargeur dynamique de la société Digatron et d'une cuve thermostatée à 25°C.

Le chargeur permet de charger et décharger une batterie ayant une tension totale nominale entre 2 et 72 Volts, à des courants variant entre -300 A et + 300 A en moins de 0.2 secondes.

Il est piloté par ordinateur à l'aide du logiciel BTS 600 développé également par la société Digatron. Ce logiciel permet de programmer aisément les profils de décharge et de charge que l'on envoie ensuite dans la mémoire du chargeur qui les fait subir aux monoblocs connectés. Il est possible de programmer les dates et heures de démarrage et d'arrêt des programmes.

Le logiciel, au travers du chargeur, permet également l'acquisition d'une vingtaine de voies tension (0-20 Volts) en différentiel, de deux voies tension de quelques centaines de millivolts destinés à la mesure de deux courants sur des shunts, et de deux voies températures par des sondes de type K. Cette interface d'acquisition élaborée appelée "Data Logger" permet de surveiller les tensions de la batterie en essai monobloc par monobloc. Toutes ces voies d'acquisition sont surveillées en instantané sur l'écran de l'ordinateur pilote.

Les programmes permettent de garder en mémoire les principaux paramètres suivants :

- tensions
- courants interne (du chargeur) et externes (sur shunts)
- températures
- ampères-heures et watts-heures déchargés, chargés, accumulés, etc.
- temps d'essai totaux ou par pas de programme
- dates d'essai

Les données peuvent être récupérées par des tableurs pour subir des traitements numériques.

Pour la majorité des essais décrits dans ce chapitre, les monoblocs ont été immergés au 4/5^{ème} dans un bain thermostaté à 25°C maintenu dans une cuve avec une résistance chauffante régulée.

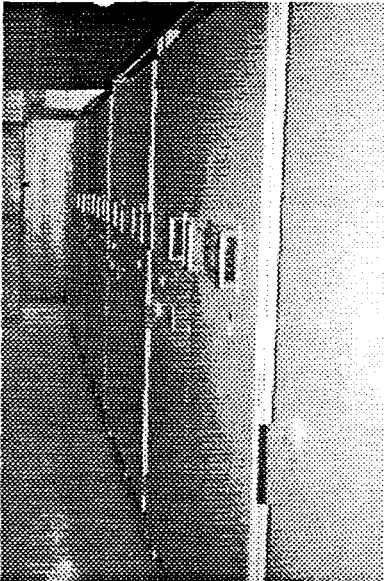


Figure III.5 Chargeurs
Digatron

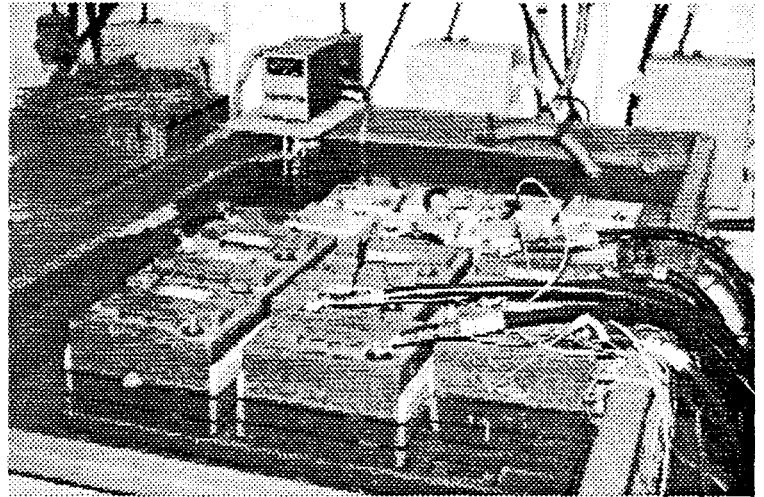


Figure III.6 Cuve thermostatée
avec monoblocs 6RGT180

III.2.3. Le véhicule électrique étudié

En accord avec la ville pilote de Douai et dans le cadre du partenariat entre cette même ville et la société Oldham au travers de l'A.D.U.V.E. (Association Douaisienne des Utilisateurs de Véhicules Electriques), nous avons pu disposer de temps à autre d'un véhicule électrique Volta première génération pour effectuer des essais sur route.

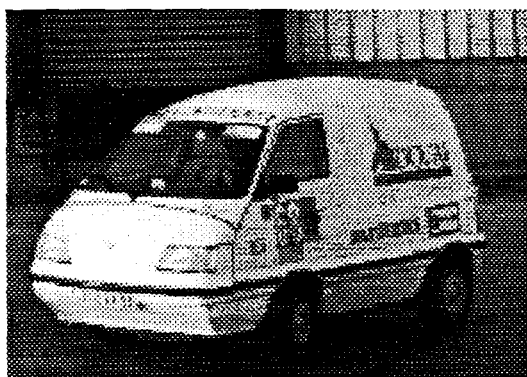


Figure III.7 Véhicule Volta

Les caractéristiques principales de ce Volta sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Type de véhicule	Utilitaire
Type de motorisation	Moteur à courant continu Leroy Somer , excitation série avec boîte 4 vitesses
Puissance nom-max	11 kW - 20 kW
Type de variateur	Hacheur Curtis réversible en courant
Type de batterie	16 monoblocs pb-acide étanches Oldham 6 RGT 180 en série
Poids batteries	16 * 37 kg = 592 kg
Tension nom. batterie	96 Volts
Chargeur embarqué	Chargeur Tecsup monophasé
Vitesse maximum	80 km/h
Poids à vide	1300 kg avec les batteries
Autonomie	120 km à 40 km/h et 90 km à 60 km/h

Tableau III.1 Caractéristiques du véhicule Volta étudié

III.2.4. Les systèmes d'acquisition embarqués

Afin de mémoriser les données en cours de roulage, nous avons utilisé une centrale d'acquisition et un multimètre à mémoire embarqués. Nous avons par ailleurs testé un système de gestion d'énergie embarqué existant en s'en servant également pour effectuer de l'acquisition de données.

La centrale d'acquisition utilisée est une "DT505" revendue par la société Dimelco.

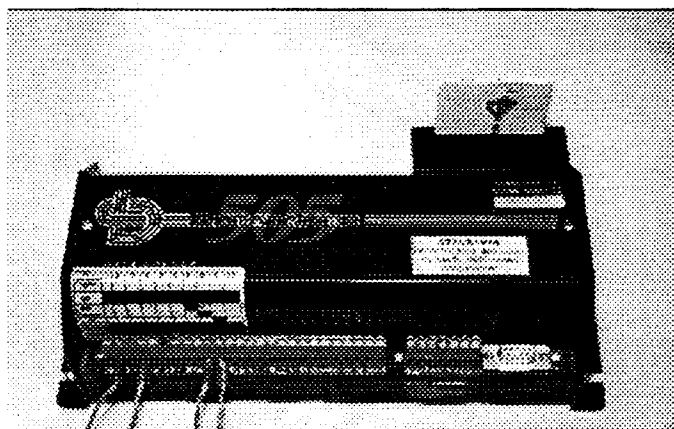


Figure III.8 Centrale d'acquisition de données DT505

Elle permet l'acquisition, à des fréquences d'échantillonnage pouvant descendre jusqu'à 1 seconde, de 10 voies (extensibles à 40 voies) tension (+/- 100 V), faible courant (+/- 20 mA), température (tous type de capteurs), résistance, fréquence ou compteur d'impulsions.

Pouvant être alimentée par une batterie 6 Volts externe et résistant aux vibrations, elle peut être embarquée en véhicule. Elle se programme par un ordinateur externe à l'aide du logiciel "Delogger Pro" qui permet en plus une visualisation en direct sur écran des données captées en instantané, sous forme de tableaux, de courbes ou d'icônes graphiques.

La centrale permet d'effectuer de nombreux calculs et de détecter des seuils d'alarmes.

Le multimètre à mémoire "Métra Hit 15S" de la société Camille Bauer nous a permis d'effectuer l'acquisition d'une seule voie (tension, courant, résistance, fréquence, etc.) mais à des fréquences d'échantillonnage pouvant descendre jusqu'à 90 millisecondes. Il est également piloté par un ordinateur portable à l'aide du logiciel "MetraWin 10".



Figure III.9 Multimètre MetraHit 15S piloté par le logiciel MetraWin 10 d'un ordinateur portable

L'étude nous aura permis par ailleurs de tester un système de gestion d'énergie embarqué existant, l'Intelligent Battery Controller (I.B.C.) première génération, élaboré conjointement par la société Intelligent Electronic System (I.E.S.) et Electricité De France. Il permet de surveiller jusqu'à 16 monoblocs de 6 Volts en série, détecte des écarts ou des chutes de tension trop importants, calcule par intégration numérique les ampères-heures déchargés ou chargés, mémorise les principaux paramètres de l'historique de la batterie et les trois derniers cycles d'utilisation en détail. Sa fréquence d'acquisition est de 0.2 secondes. Il ne possède pas de jauge d'énergie dans la version utilisée pour la thèse mais ce développement est en cours.

III.2.5. Les logiciels de traitement de données

Nous avons utilisé les logiciels Excel (Microsoft) et Labview (National Instruments) pour la majeure partie du dépouillement, du traitement des données et des simulations.

Tout ce matériel nous a permis de mener à bien l'approche expérimentale de la batterie et notamment les tests préliminaires de l'évaluation des méthodes actuelles de détermination de son état de charge en véhicule électrique basée sur la coulométrie.

III.3. Evaluation quantitative des algorithmes actuels basés sur la Coulométrie

Il existe aujourd'hui deux principaux types d'algorithmes d'état de charge basés sur la coulométrie : le premier se réfère à la capacité de la batterie au courant moyen de décharge, le second à la capacité nominale.

III.3.1. L'algorithme coulométrique basé sur le courant moyen de décharge^{22,25,32}

Le principe de cet algorithme est le suivant :

- Toutes les grandeurs qui suivent sont calculées à l'instant t à partir de la pleine charge
- Par intégration du courant entre le début de la décharge et l'instant t , on calcule Q , la quantité cumulée d'ampères-heures échangée (principalement déchargée) par la batterie.

$$Q = \int_0^t i(t) dt \quad (\text{III.4})$$

- La division de cette quantité par le temps d'utilisation t_{util} donne I_{moyen} , le courant moyen de décharge.

$$I_{\text{moyen}} = \frac{Q}{t_{\text{util}}} \quad (\text{III.5})$$

t_{util} peut être différent de t : certains comptabilisent les temps de pauses ($i(t)=0$) alors que d'autres ne cumulent que les temps de transfert d'énergie entre la batterie et le moteur.

- En se référant à la courbe donnant la capacité de la batterie en fonction du courant et de la température, on en déduit la capacité disponible à ce courant moyen :

$$C_{\text{dispo à } I_{\text{moyen}}} = f(I_{\text{moyen}}, \theta) \quad (\text{III.6})$$

- L'état de charge est ensuite défini au travers d'un pourcentage de décharge calculé selon :

$$\% \text{ décharge} = \frac{Q}{C_{\text{dispo à } I_{\text{moyen}}}} * 100 \quad (\text{III.7})$$

III.3.2. L'algorithme coulométrique basé sur une capacité fixe de référence de la batterie ^{24,33,34}

Cette deuxième voie de calcul de l'état de charge à partir de la coulométrie consiste à estimer la capacité restante à un courant donné fixe $I_{réf}$.

Soit $C_{réf}(I_{réf}, \theta)$ la capacité de la batterie, à partir de la pleine charge, à $I_{réf}$ et à la température θ . A cette capacité initiale, l'algorithme va soustraire les ampères-heures consommés et ajouter les ampères-heures rechargés par freinage. Ces quantités d'électricité échangées sont pondérées de coefficients traduisant les variations de la capacité avec le courant de décharge.

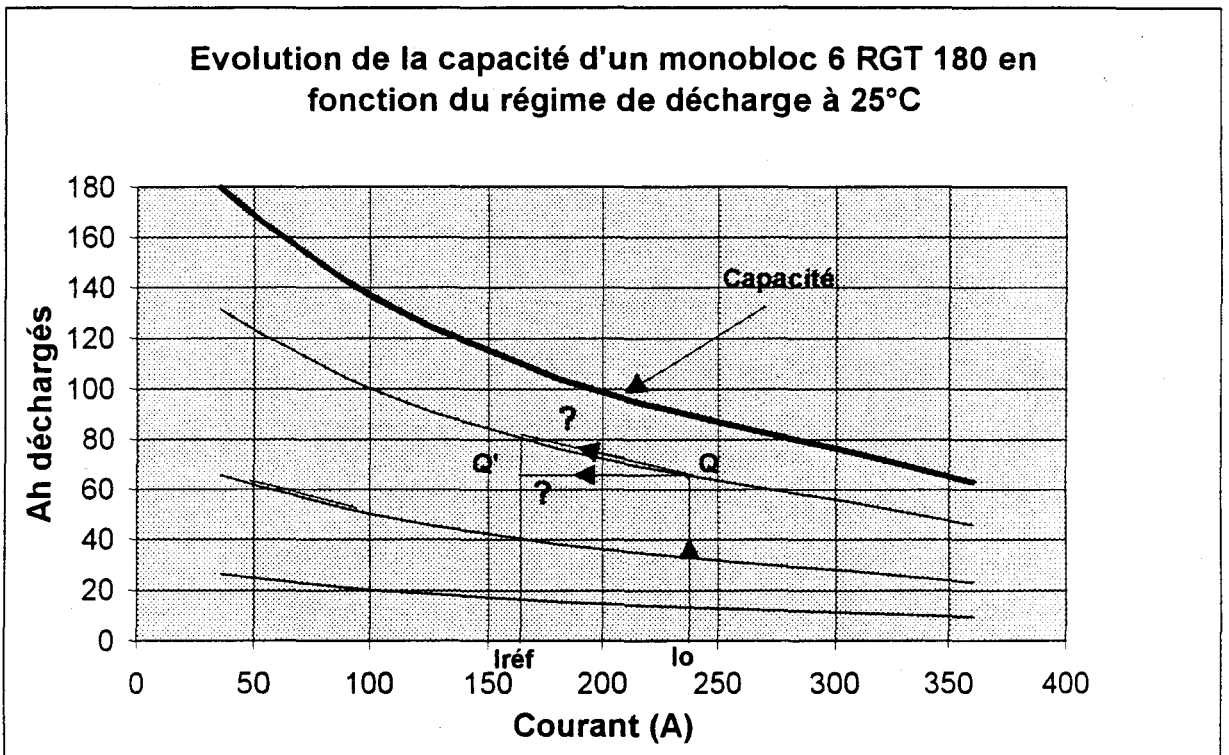


Figure III.10

En effet, comme la figure ci-dessus le montre, une quantité Q d'ampères-heures déchargée à $I_0 \neq I_{réf}$ ne peut être comptabilisée comme une quantité d'ampères-heures Q' déchargée à $I_{réf}$. La forme non horizontale d'une courbe de capacité en fonction du courant et la pratique montrent qu'une partie de décharge à courant fort diminue la capacité restante à courant faible et inversement. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces phénomènes dans le cumul des ampères-heures.

L'équation de ce cumul donnant la capacité restante C_r à $I_{réf}$ peut donc être écrite sous la forme

$$C_r = C_{réf} - \int_0^T \alpha(i) i(t) dt \tag{III.8}$$

L'état de charge est donc défini ensuite par le pourcentage de décharge suivant :

$$\boxed{\% \text{ décharge} = \frac{C_{\text{réf}} - C_r}{C_{\text{réf}}} * 100} \quad (\text{III.9})$$

La difficulté réside dans la détermination des coefficients $\alpha(i)$. La méthode la plus évidente et la plus utilisée pour résoudre ce problème est de raisonner de la façon suivante :

- une batterie a une capacité C_{I_0} au courant I_0 ,
- pour une capacité $C_{\text{réf}}$ à $I_{\text{réf}}$, une décharge complète à courant I_0 fait perdre ou gagner une quantité d'ampères-heures égale à $C_{\text{réf}} - C_{I_0}$ par rapport à $C_{\text{réf}}$,
- une décharge à courant I_0 de Q ampères-heures fait donc perdre ou gagner $\left[Q * \frac{C_{\text{réf}} - C_{I_0}}{C_{I_0}} \right]$ ampères-heures par rapport à $C_{\text{réf}}$,
- Q ampères-heures déchargés à I_0 correspond donc à $Q * \frac{C_{\text{réf}}}{C_{I_0}}$ à $I_{\text{réf}}$
- le coefficient $\alpha(I_0)$ peut donc se calculer simplement selon : $\boxed{\alpha(I_0) = \frac{C_{\text{réf}}}{C_{I_0}}}$

A ce cumul d'ampères-heures déchargés ou chargés s'ajoutent parfois les quantités d'énergie perdues ou gagnées par stockage ou vieillissement. Ces deux derniers phénomènes sont souvent négligés dans la littérature parce que difficilement quantifiables encore aujourd'hui.

003.3. Test de ces deux types d'algorithmes d'état de charge

Nous avons testé ces deux types d'algorithmes sur des monoblocs 12 RGT 73 et 6 RGT 180. Le déroulement des tests a consisté à décharger les monoblocs en laboratoire suivant des profils choisis (courant constant, type JRC TC69, type JRC ECE-15, dynamique aléatoire). Les tensions et courants enregistrés pendant ces décharges ont ensuite été mis en forme et traités par les algorithmes programmés sous Labview.

Comme les calculs d'intégrale s'effectuent de façon numérique, nous avons respecté l'ordre de grandeur des fréquences d'échantillonnage habituellement utilisées dans la littérature. Après avoir vérifié expérimentalement qu'elle était suffisante pour la dynamique de notre système batterie/variateur/moteur, nous avons opté pour une fréquence d'une mesure par seconde. Plus la fréquence est élevée et plus les résultats seront précis. Le calcul des ampères-

seconde. Plus la fréquence est élevée et plus les résultats seront précis. Le calcul des ampères-heures déchargés avec cette fréquence d'échantillonnage apporte une imprécision maximale de l'ordre de 0.5 %.

Pour l'algorithme basé sur le cumul des ampères-heures équivalents pour une décharge à I_{ref} , nous nous sommes conformés au choix de la grande majorité des études sur ce sujet, c'est à dire que nous avons pris les capacité et courant nominaux de la batterie (C_5 et $0.2C_5$) comme capacité et courant de référence.

De même, le calcul des coefficients $\alpha(i)$ n'étant que très rarement expliqués dans les publications, nous avons opté pour le plus courant, c'est à dire le rapport entre la capacité au courant i et la capacité de référence donc nominale.

Nous avons également besoin des courbes de capacité en fonction du courant des monoblocs étudiés. Nous avons pris les courbes moyennes élaborées par le laboratoire Oldham. Chaque monobloc a ses propres performances qui peuvent se différencier légèrement de la courbe moyenne. Afin d'être le plus précis possible, nous avons, pour chaque essai, ajusté la courbe de capacité moyenne par rapport à la capacité nominale du monobloc mesurée juste avant l'essai.

Les recharges entre chaque essai étaient complètes selon les profils conseillés par le constructeur et le rythme des essais était d'un cycle (décharge + charge) par journée.

En plus de servir aux tests des deux algorithmes coulométriques, ces essais constituaient notre première approche expérimentale des batteries. Ne sachant pas au départ ce que nous cherchions exactement, nous avons multiplié ces premiers essais afin de déceler les problèmes. C'est la raison pour laquelle ces tests comportent plusieurs essais de décharge aussi bien à courant constant qu'avec des profils dynamiques. Nous avons cherché à tester, entre autres, l'influence du courant moyen, de l'amplitude des profils de courant, de la durée des paliers de courant ou encore du critère de fin de décharge sur les performances des batteries.

III.3.3.i. la vérification des programmes sur des décharges à courant constant

Nous avons testé dans un premier temps la précision de notre programmation sur des décharges à courant constant. Nous avons donc fait subir à un monobloc 12 RGT 73, des décharges à des régimes de 0.2 (Essai C1), 0.4 (Essai C2), 1.2 (Essai C3) et $1.6C_5$ (Essai C4) jusqu'aux tensions d'arrêt préconisées par le constructeur, soit respectivement 1.7, 1.67 et 1.65 et 1.6V/élt. Ces points d'arrêt constituent les 100% de décharge réels en référence pour les tests.

A titre d'exemple, le graphe ci dessous montre l'évolution de la tension d'un monobloc 12 RGT 73 sur une décharge à $0.2C_5$.

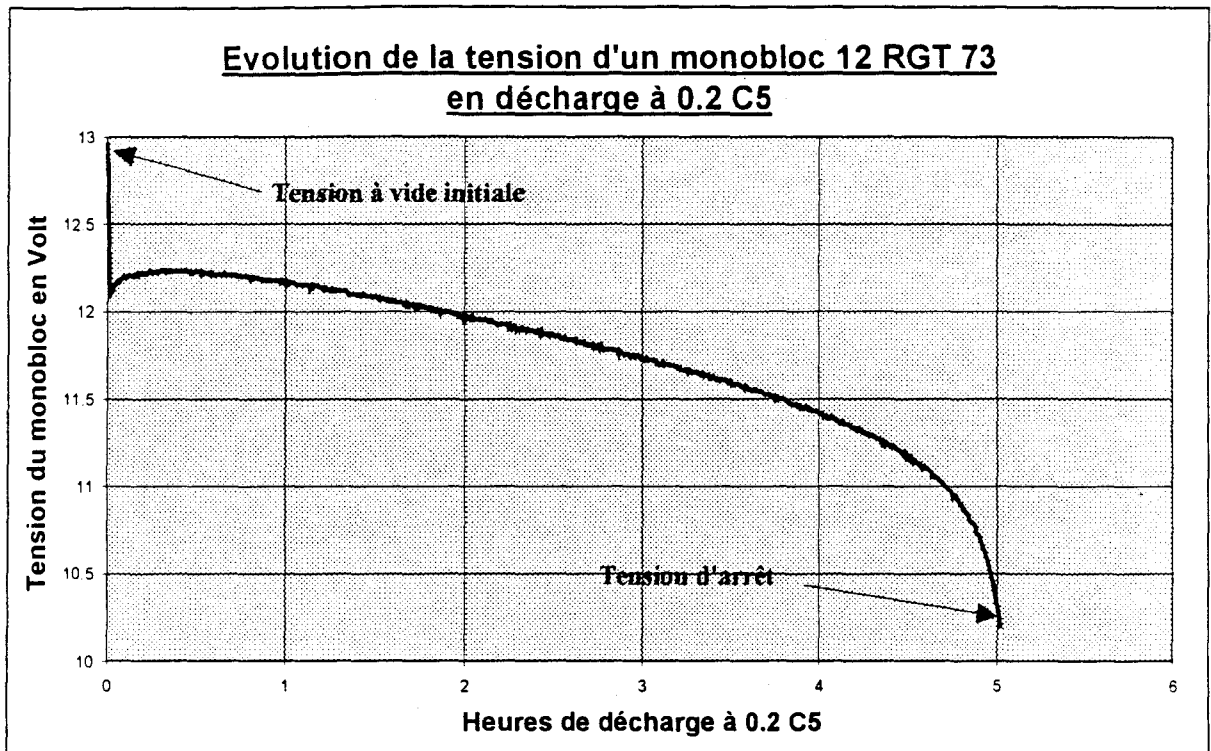


Figure III.10

Le tableau ci-dessous résume les résultats de ces essais :

	Régime	Ah déché	% [Imoyen]	% [Inom]
Essai C1	0.2 C5 (14.6 A)	73.2	100.3	100.3
Essai C2	0.4 C5 (29.2 A)	65.5	104.9	104.9
Essai C3	1.2 C5 (87.6 A)	45.7	100.5	100.5
Essai C4	1.6 C5 (116.8 A)	41.7	102	102

Tableau III.2 Tests des algorithmes coulométriques à courant constant

% [Imoyen] : pourcentage donné par l'algorithme basé sur l'estimation de la capacité restante au courant moyen de la décharge.

% [Inom] : pourcentage donné par l'algorithme basé sur l'estimation de la capacité restante à un courant fixe de référence, en l'occurrence ici le courant nominal.

III.3.3.ii. les tests autour d'un cycle véhicule électrique standard : le JRC-TC69, communément appelé "TC69"

Le profil de décharge standard TC69 consiste à appliquer à la batterie des microcycles à trois paliers, le premier au régime de 1.6 C₅ pendant 10 secondes, le deuxième au régime de

$0.4C_5$ pendant 20 secondes et le dernier en pause pendant 30 secondes. Ce microcycle est censé représenter un profil véhicule électrique en ville. Le premier palier simule une accélération, le deuxième, un maintien en vitesse et la pause traduit une période de freinage, d'arrêt et d'attente à un point de signalisation routière (feu, stop, balise, etc.).

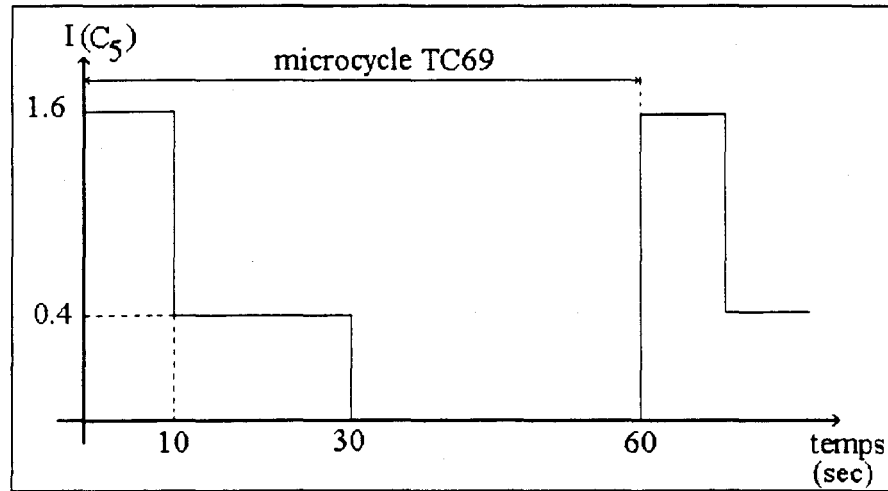


Figure III.11 Profil temporel du microcycle TC69

Les régimes et temps des paliers ont été choisis de telle sorte que le courant moyen du microcycle soit égal à $0.4C_5$, un régime correspondant à peu près aux régimes moyens des véhicules électriques roulant à l'époque de l'établissement de la norme.

Nous avons fait subir à un monobloc 12 RGT 73 des décharges suivant des profils basés sur ce microcycle TC69. Le déroulement a consisté en un enchaînement de microcycles calqués sur le TC69 jusqu'à atteindre la tension d'arrêt constructeur sur le palier le plus fort, suivi d'une fin de décharge au courant moyen des microcycles précédents à nouveau jusqu'à la tension d'arrêt préconisée par le constructeur pour ce courant.

Les microcycles suivants ont donc été considérés :

- le microcycle TC69 original (Essai TC1)
- le microcycle TC69 sans la pause (Essai TC2)
- le microcycle TC69 avec des temps de paliers triplés (Essai TC3)
- un microcycle type TC69 avec un premier palier à $1.6C_5$ pendant 20 secondes, un palier à $0.2C_5$ pendant 20 secondes et un dernier palier en pause pendant 20 secondes, donnant un courant moyen de $0.6C_5$ (Essai TC4)

Nous avons également effectué des décharges mixtes comprenant un palier à profil dynamique et un autre à courant constant :

- un enchaînement de microcycles TC69 pendant 1 heure (environ moitié de la décharge) suivi d'une décharge à $0.4C_5$ jusqu'à la tension d'arrêt correspondante (Essai TC5)

- une décharge à 0.4 C₅ pendant 1 heure suivie d'un enchaînement de 60 microcycles TC69 pendant 1 heure, pour terminer à 0.4C₅ jusqu'à la tension d'arrêt correspondante (Essai TC6)
- un enchaînement de microcycles TC69 sans pause pendant 1 heure prolongé par une décharge à 0.4 C₅ jusqu'à la tension d'arrêt correspondante (Essai TC7)

Ces variations un peu aléatoires des profils autour du microcycle de base avaient pour but de multiplier les types de sollicitation pour essayer de mettre à jour les problèmes.

Les données enregistrées de ces décharges ont ensuite été traitées par les algorithmes sur Labview ; les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

	Type	Imoyen (C5)	Ah déch	% [Imoyen]	% [Inom]
Essai TC1	TC69	0.4	61.6	98.7	131.7
Essai TC2	TC69 sans pause	0.8	53.7	104.85	116
Essai TC3	TC69 temps x 3	0.4	60.4	97	131.6
Essai TC4	Type TC69	0.6	57.6	103.45	133.5
Essai TC5	TC69 (1h) + 0,4 C5	0.4	62.5	100	116.5
Essai TC6	0,4C5 (1h) + TC69 (1h)	0.4	64.7	103.6	120.1
Essai TC7	TC69 sans pause (1h) + 0,4C5	~ 0,6	58.3	101.2	109.9

Tableau III.3 Tests des algorithmes coulométriques autour du microcycle TC69

III.3.3.iii. les tests sur des décharges dynamiques en laboratoire

Pour continuer cette série d'essais en laboratoire sur les deux grandes méthodes actuelles de détermination de l'état de charge à l'aide de la coulométrie, nous avons effectué des essais de décharge sur un monobloc 6 RGT 180 suivant des profils dynamiques, aléatoires basés sur notre expérience du véhicule ou sur le test dynamique ECE-15 de la norme internationale JRC qui propose des profils de puissance spécifique (W / kg de batterie) pour les zones urbaines et suburbaines.

Le monobloc a donc subi chaque décharge (Essais D1 à D8) jusqu'à atteindre une tension d'arrêt de 1.7 V/élt, point à partir duquel la décharge se terminait en courant constant de 100 A à nouveau jusqu'à 1.7 V/élt. Ce courant de 100 A approche le courant nominal du moteur du véhicule Volta étudié : c'est le courant nécessaire pour procurer au véhicule une accélération suffisante pour s'insérer dans un trafic routier.

Le tableau ci-dessous résume les résultats des décharges et des traitements des données résultantes par les algorithmes programmés.

	Type	I moyen (A)	% [Imoyen]	% [Inom]
Essai D1	Calqué sur ECE-15 (majorité suburbaine)	90.6	97.4	122.60
Essai D2	Calqué sur ECE-15 (majorité urbaine)	65.6	92.5	119.30
Essai D3	Calqué sur ECE-15 (équilibré)	75.8	92.8	119.10
Essai D4	Calqué sur ECE-15 (majorité urbaine)	44.2	86.9	119.60
Essai D5	Aléatoire basé sur expérience	62.3	86.5	117.70
Essai D6	Aléatoire basé sur expérience	84.0	95.0	111.70
Essai D7	Aléatoire basé sur expérience	93.0	99.4	121.00
Essai D8	Aléatoire basé sur expérience	88.5	96.3	115.10

Tableau III.4 Tests des algorithmes coulométriques

autour du microcycle JRC ECE-15 et de profils aléatoires

III.3.3.iv. les tests sur des décharges dynamiques réelles en véhicule électrique

Décidés à tester les deux types d'algorithmes sur le plus de cas possibles, nous avons pour terminer effectué avec le véhicule Volta, 5 cycles dynamiques réels (Essais VE1 à VE5) sur des routes nationales, de campagne et de ville.

A titre indicatif, les graphes ci-dessous donnent un aperçu des profils de courant échangés par la batterie lors de roulages réels à bord du véhicule électrique Volta.

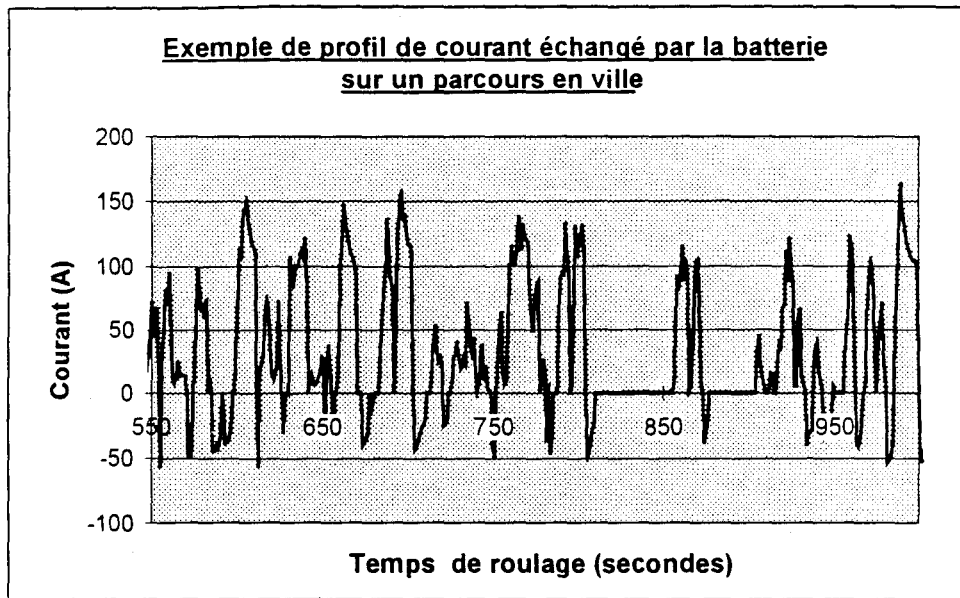


Figure III.12

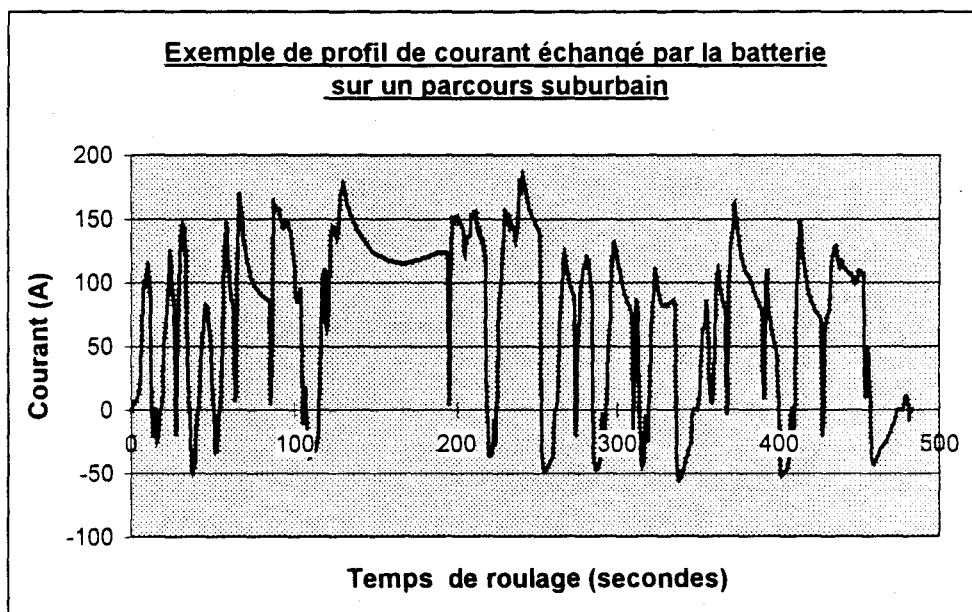


Figure III.13

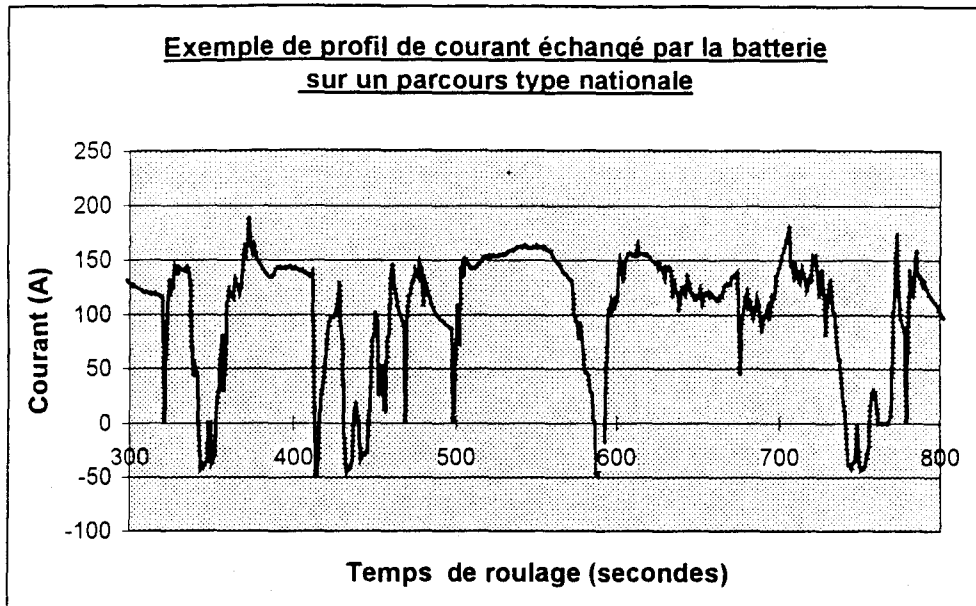


Figure III.14

N'ayant pas la possibilité de décharger la batterie jusqu'au critère d'arrêt voulu, nous avons arrêté les essais en se référant à un indicateur Curtis à 10 leds, dès l'allumage de la 9^{ème} led (rouge clignotante), nous indiquant, par expérience, une quantité d'énergie restante de moins de 5 %. Nous avons terminé les cinq décharges à peu près à la même quantité d'énergie restante. Ce point d'arrêt nous servira à comparer les résultats de ces décharges **entre eux**.

Les caractéristiques des décharges ont été enregistrées par le système de gestion I.B.C. testé à ce moment là. Il enregistrerait sur des paliers de 0.2 Ah déchargés, entre autres, le courant moyen, la tension moyenne de chaque monobloc, le temps du palier, la température moyenne des deux compartiments de monoblocs.

Nous avons ensuite traité ces données au travers des deux types d'algorithme.

Les résultats des essais et des traitements sont fournis dans le tableau suivant.

	Type	Kilomètres parcours	Vitesse moy. (km/h)	Ah déch. (cumul)	I moyen (A)	% [Imoy]	% [Inom]
Essai VE1	Campagne	104	47	145	66.3	93.1	106.2
Essai VE2	Nationale	94	59	142	88.4	99.8	109.5
Essai VE3	Ville	100	26	142	35.8	79.0	93.5
Essai VE4	Ville + Nationale	102	30	150	44.4	88.3	108.2
Essai VE5	Nationale + Côtes	101	41	152	61.4	96.3	117.2

Tableau III.5 Tests des algorithmes coulométriques autour d'essais VE réels

III.3.4. Bilan des tests des deux types d'algorithme d'état de charge basés sur la coulométrie

Ces tests avaient pour but de mettre en évidence les éventuelles imprécisions des deux types d'algorithme actuels basés sur la coulométrie.

Ils révèlent tout d'abord sans surprise **un bon comportement des deux méthodes sur les décharges à courant constant**. Ces essais entraînent des imprécisions de moins de 5 %. Ces erreurs légères mais non négligeables montrent la mauvaise estimation faite de la capacité du monobloc à l'aide de la courbe de capacité théorique calibrée avec la capacité nominale juste précédente. Il faut tenir compte de cet écart dans l'interprétation des essais suivants.

Les décharges autour du microcycle TC69 confirment la relativement bonne estimation de l'état de charge par l'algorithme basé sur le courant moyen, surtout compte tenu des erreurs d'estimation de la capacité du monobloc à courant constant. Par contre, elles révèlent une **divergence importante du deuxième algorithme** (> 30% pour TC1, 3 et 4). Le calcul d'équivalence d'ampères-heures déchargés par la formulation des coefficients d'équivalence $\alpha(i)$ présentée précédemment introduit donc des erreurs importantes **dans le sens pessimiste** de l'estimation c'est à dire au delà de 100%. Le conducteur a dans ce cas une information inexacte qui l'empêche d'utiliser sa batterie au maximum mais qui **ne provoque pas de décharge profonde**.

Les décharges dynamiques en laboratoire et en véhicule confirment les erreurs observées de l'algorithme coulométrique par équivalence des ampères-heures ramenés à la capacité nominale (près de 20% d'erreur pour D1 à D8 et d'écart entre VE3 et VE5).

Elles mettent également en évidence de **plus grandes erreurs de l'algorithme basé sur le courant moyen de décharge**. On constate ainsi près de 15 % d'erreur sur les cycles dynamiques D4 et D5. En plus d'être importante, cette divergence a le désavantage d'être **d'aspect optimiste pour le conducteur** et de **risquer de l'emmener en décharge profonde** en lui donnant une indication erronée inférieure à 100%. Les cycles VE3 et VE4, en comparaison avec les cycles VE1 et VE2, confirment ces erreurs néfastes.

Ces écarts importants mettent en évidence la mauvaise adaptation de ces algorithmes vis à vis d'une utilisation réelle en véhicule électrique. Le premier, au travers du courant moyen, ne tient pas assez compte du profil de courant instantané. Le second paraît mieux adapté aux profils dynamiques type véhicule électrique mais le choix de la référence et le calcul des coefficients d'équivalence restent à améliorer. Ces carences sont expliquées en détail ci-dessous.

L'utilisation du courant moyen comme référence pour l'état de charge donne d'assez bons résultats sur des décharges ayant de faibles variations de courant moyen. Ainsi, sur les décharges à courant constant et sur les décharges suivant les profils types TC69, nous n'avons

pas constaté d'erreurs importantes parce que pour tous ces essais, le courant moyen variait peu du début à la fin de la décharge ; le critère d'arrêt était fixé par rapport au courant moyen relativement constant de toute la décharge.

Par contre, sur les décharges dynamiques, la fin de la décharge survient quand la batterie ne peut plus fournir suffisamment d'énergie à un courant fixe de référence de 100 A. Pour ces essais, lorsque le courant moyen de la décharge est éloigné de ce courant d'arrêt, les erreurs les plus importantes sont observées (Essais D4, D5, VE3). Le véhicule électrique étant destiné à voyager en ville, ses courants moyens de décharge oscilleront en majorité entre 30 A et 70 A. Une utilisation du courant moyen pour la détermination de l'état de charge en ville risque donc d'entraîner d'importantes imprécisions.

De plus, de grandes variations de courant dans une décharge peuvent être masquées par la seule connaissance du courant moyen (Essai D5). Si trois quarts de la décharge s'effectuent à courant moyen faible (en ville) et que le dernier quart est prévu à courant moyen plus élevé (nationale), le courant moyen total risque de cacher au conducteur cette variation et de l'induire une nouvelle fois en erreur.

Concrètement, lorsqu'un conducteur a roulé de façon à obtenir un courant moyen de décharge de l'ordre de 40 A, il risque avec cet algorithme de voir indiqué 15 % d'énergie restante alors qu'en réalité, la batterie ne pourra plus délivrer l'énergie nécessaire au véhicule pour circuler aisément voire pour monter une côte avant le lieu de retour. Cette fausse indication, nous l'avons vu, peut entraîner des utilisations de la batterie abusives, destructrices et donc indésirables.

Le calcul de l'équivalence des ampères-heures déchargés vis à vis de la capacité nominale est théoriquement plus approprié à des décharges dynamiques comme celles du véhicule électrique. Il tient compte de leur profils de courant instantanés. Cependant, les erreurs importantes observées lors de ces essais ont démontré que le calcul des coefficients d'équivalence par rapport aux quantités d'électricité perdues ou gagnées entre les décharges à courant constant et la capacité nominale, ne traduit pas de façon optimale le comportement réel de la batterie. Ce calcul ne fournit pas d'erreur importante en dessous de 100% mais ne permet pas une utilisation optimale de la quantité d'énergie stockée dans la batterie.

Par ailleurs, l'énergie restante de la batterie à un courant faible ($0.2 C_5$) ne donne pas d'informations suffisantes sur ses possibilités réelles au régime supérieur nécessaire pour faire démarrer le véhicule et lui permettre de s'insérer correctement dans un trafic routier urbain. Il faut donc choisir un courant et une capacité de référence plus adaptés aux performances du véhicule et non pas seulement à celles de la batterie.



III.4. Conclusion

Ce chapitre avait pour but de tester les deux principales méthodes de calcul de l'état de charge d'une batterie plomb acide par la coulométrie. La première donne la capacité résiduelle de la batterie au courant moyen de la décharge tandis que la deuxième fournit cette capacité résiduelle à un courant fixe de référence, bien souvent le courant nominal de la batterie.

Nous avons donc évalué les deux algorithmes sur des décharges aux profils de courant très variables pour pouvoir mettre en évidence les éventuels cas d'erreurs.

L'analyse des résultats donnés par ces deux algorithmes a révélé des imprécisions intolérables dans certains cas et nous a conduits aux conclusions suivantes :

- le courant moyen de décharge ne reflète pas suffisamment le profil de courant réel. Son utilisation pour indiquer l'énergie restante d'une batterie en véhicule électrique peut donc entraîner des imprécisions importantes mais surtout néfastes pour la batterie et pour le conducteur. **Nous proposons donc de ne pas utiliser le courant moyen de décharge pour indiquer l'état de charge.**
- l'indication de l'énergie restante au courant nominal de la batterie, donc à un courant fixe, semble mieux convenir aux profils de courant dynamiques type véhicule électrique. Par contre, le calcul des coefficients d'équivalence des ampères-heures réellement déchargés vers les ampères-heures déchargés au courant nominal ne doit pas s'effectuer uniquement à partir des performances de la batterie à courant constant. La complexité physico-chimique d'une batterie incite à penser qu' **une étude quantitative de son comportement dynamique est nécessaire pour pouvoir définir correctement les coefficients d'équivalence** et optimiser ainsi l'utilisation.
- indiquer l'énergie restante d'une batterie à son courant nominal ($0.2 C_5$) ne donne pas l'information au conducteur sur ses possibilités réelles en termes de démarrage et d'accélération du véhicule. Le courant nominal de la batterie est la plupart du temps assez éloigné du courant nécessaire au véhicule pour accélérer et s'insérer dans un trafic routier de façon convenable. Il faut donner au conducteur une information fiable de l'énergie restante réellement exploitable. **Il faut donc choisir comme courant de référence, un courant permettant au véhicule de circuler correctement dans un trafic routier urbain, et comme capacité de référence, la capacité de la batterie à ce courant de référence.**

En s'appuyant sur ces conclusions, les chapitres suivants proposent une amélioration de l'algorithme coulométrique donnant l'énergie restante à un courant de référence lié au véhicule.

Chapitre 4

Algorithme d'Etat de Charge pour Batterie Plomb-Acide Etanche en Application Véhicule Electrique

Ce *quatrième chapitre* propose une amélioration de l'algorithme coulométrique d'état de charge d'une batterie plomb acide en véhicule électrique donnant les ampères heures restant à un courant de référence fixe I_{ref} en fonction des ampères heures réellement échangés.

S'appuyant sur les résultats du chapitre précédent, nous proposons tout d'abord la définition de l'état de charge sur laquelle nous travaillons dans tout ce chapitre.

Nous rapportons ensuite les résultats d'une analyse statistique de quelques décharges réelles en véhicule électrique qui nous a permis d'optimiser les temps d'essais en ciblant les expériences nécessaires et significatives.

Des décharges effectuées en laboratoire suivant des profils choisis nous ont fourni l'approche quantitative des phénomènes qualitatifs repérés dans les décharges véhicules électriques. Nous avons tiré de ces tests des coefficients d'équivalence qui nous ont permis de construire petit à petit notre algorithme d'état de charge.

Nous en testons et évaluons les différentes versions tout au long de ce chapitre sur des décharges réelles reproduites en laboratoire.

IV.1. Définition de l'état de charge d'une batterie plomb acide en véhicule électrique

L'état de charge doit être défini par rapport au besoin du conducteur. Jusqu'au 0% d'état de charge, le véhicule doit être apte à répondre aux exigences minimales de la circulation. C'est pourquoi nous avons choisi, pour l'état de charge, d'indiquer la quantité d'électricité (Ah) restante à un régime de référence $I_{réf}$ fixe choisi par rapport au véhicule électrique complet, tenant compte de la puissance nominale du moteur, de la tension nominale de la batterie et du poids total du véhicule. **Il est clair qu'à chaque configuration de véhicule correspondra un courant de référence et donc un algorithme.**

Nous proposons la définition de l'état de charge d'une batterie plomb acide étanche en véhicule électrique au travers d'un pourcentage de charge ou d'un pourcentage de décharge défini comme suit :

$$P_{charge} = \% \text{ état de charge} = \frac{Q_{restante \text{ à } I_{réf}}}{C_{initiale \text{ à } I_{réf}}} * 100 \quad (IV.1)$$

ou

$$P_{décharge} = \% \text{ état de décharge} = \frac{Q_{perdue \text{ à } I_{réf}}}{C_{initiale \text{ à } I_{réf}}} * 100 \quad (IV.2)$$

P_{charge} varie donc de 100 % à l'état pleinement chargé jusqu'à 0 % à l'état déchargé, i.e. quand la batterie atteint sa tension d'arrêt pour le courant de référence $I_{réf}$ et ne peut donc plus fournir d'énergie à ce courant.

$P_{décharge}$ est la définition complémentaire de la première, à savoir qu'il varie de 0 % à l'état pleinement chargé jusqu'à 100 % en fin de décharge.

Les deux définitions sont liées par l'équation :

$$Q_{restante \text{ à } I_{réf}} = C_{initiale \text{ à } I_{réf}} - Q_{perdue \text{ à } I_{réf}} \quad (IV.3)$$

et par conséquent, bien évidemment, par la relation :

$$P_{charge} = 100 - P_{décharge} \quad (IV.4)$$

Pour notre étude, nous avons choisi de travailler sur la **deuxième définition**, à savoir, la détermination du pourcentage de décharge $P_{décharge}$.

L'algorithme a donc pour principale difficulté le calcul de $Q_{perdue \ à \ I_{réf}}$, grandeur virtuelle, déterminée de manière analytique à l'aide du courant réel et de coefficients ramenant tous les ampères-heures réellement consommés à une quantité équivalente égale aux ampères-heures qui auraient été consommés pour aboutir au même état de décharge lors d'une décharge à courant constant égal à $I_{réf}$. Ainsi l'algorithme doit permettre d'estimer les ampères-heures restants si l'on suppose que la fin de décharge s'effectue à $i = \text{constante} = I_{réf}$.

La détermination de la capacité $C_{initiale \ à \ I_{réf}}$ constitue une deuxième difficulté car elle dépend entre autre directement de l'état de vieillissement de l'accumulateur.

L'intégration temporelle simple du courant fournit $Q_{échangé}$ le cumul des ampères-heures effectivement échangé entre la batterie et le véhicule.

$$Q_{échangée} = \int_0^t i(t) dt \quad (IV.5)$$

Cette grandeur **ne nous sert pas** directement dans le calcul de notre état de charge. Comme nous l'avons dit précédemment, nous proposons de la moduler par introduction dans l'intégrale de coefficients que nous appellerons "coefficients d'équivalence", notés $\alpha(i,t)$, traduisant l'effet des ampères-heures déchargés à $i \neq I_{réf}$ sur les ampères-heures restant à $I_{réf}$. A cette intégrale modulée, nous ajouterons une quantité $Q_{récup}$ correspondant aux ampères-heures qui pourront être récupérés lors des pauses ou des phases de freinage récupératif.

Nous proposons donc une quantité d'ampères-heures perdue à $I_{réf}$ équivalente sous la forme :

$$Q_{perdue \ à \ I_{réf}} = \int_0^t (\alpha(i, t) * i(t)) dt - Q_{récup} \quad (IV.6)$$

La détermination des divers paramètres de cet algorithme est détaillée dans les paragraphes suivants.

IV.2. Analyse statistique de décharges véhicule électrique

Avant de lancer des tests quantitatifs, nous avons analysé de manière statistique quelques décharges véhicule électrique afin de prévoir, pour le banc laboratoire, des profils de décharge représentatifs de l'application sur route. Nous voulions connaître les quantités d'ampères-heures échangées selon les zones de courant et la forme du profil de courant au travers des durées de passage et de stabilisation du courant dans certaines zones de valeurs.

Nous avons pour cela programmé un parcours représentatif en Volta, à moitié en zone urbaine, à moitié en zone suburbaine (banlieue, nationale), que nous avons fait faire à huit conducteurs différents. A bord du véhicule nous avons placé un multimètre à mémoire branché sur un shunt situé entre la batterie et le variateur afin d'enregistrer les valeurs de courant utilisées. La fréquence d'échantillonnage était de 5 mesures par seconde.

L'analyse de ces parcours nous fournit une répartition moyenne des ampères-heures déchargés ou chargés selon le courant et une distribution des temps de passage du courant selon les zones de valeurs.

IV.2.1. La répartition des ampères-heures déchargés selon le courant de décharge.

Ces premiers résultats d'analyse nous renseignent sur la répartition moyenne des ampères-heures échangés par la batterie avec le véhicule pendant une décharge réelle, en fonction des courants auxquels ils sont échangés.

Les ampères-heures déchargés ont été répartis sur la plage de courant par tranches de 20 A. Les ampères-heures liés au freinage récupératif ont été cumulés dans une seule tranche au courant de - 50 A, courant de freinage maximal réglé pour le Volta utilisé.

Ces résultats sont rapportés dans les graphes des pages suivantes.

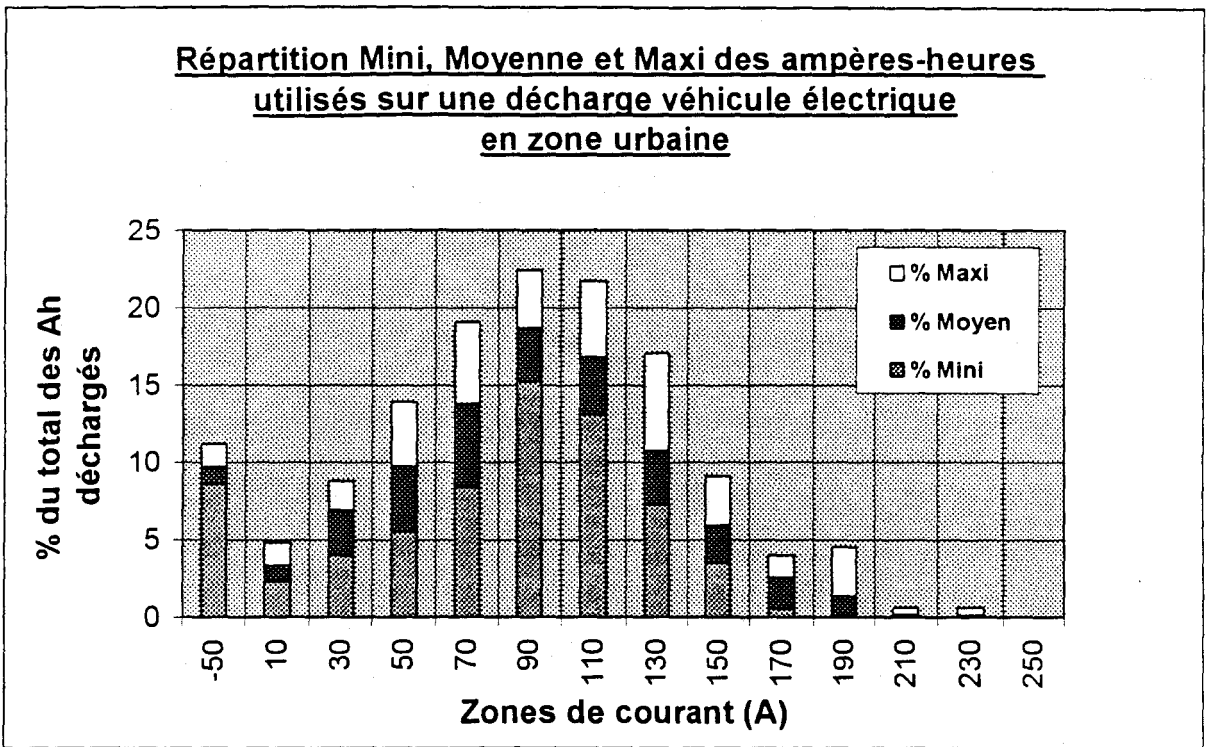


Figure IV.1

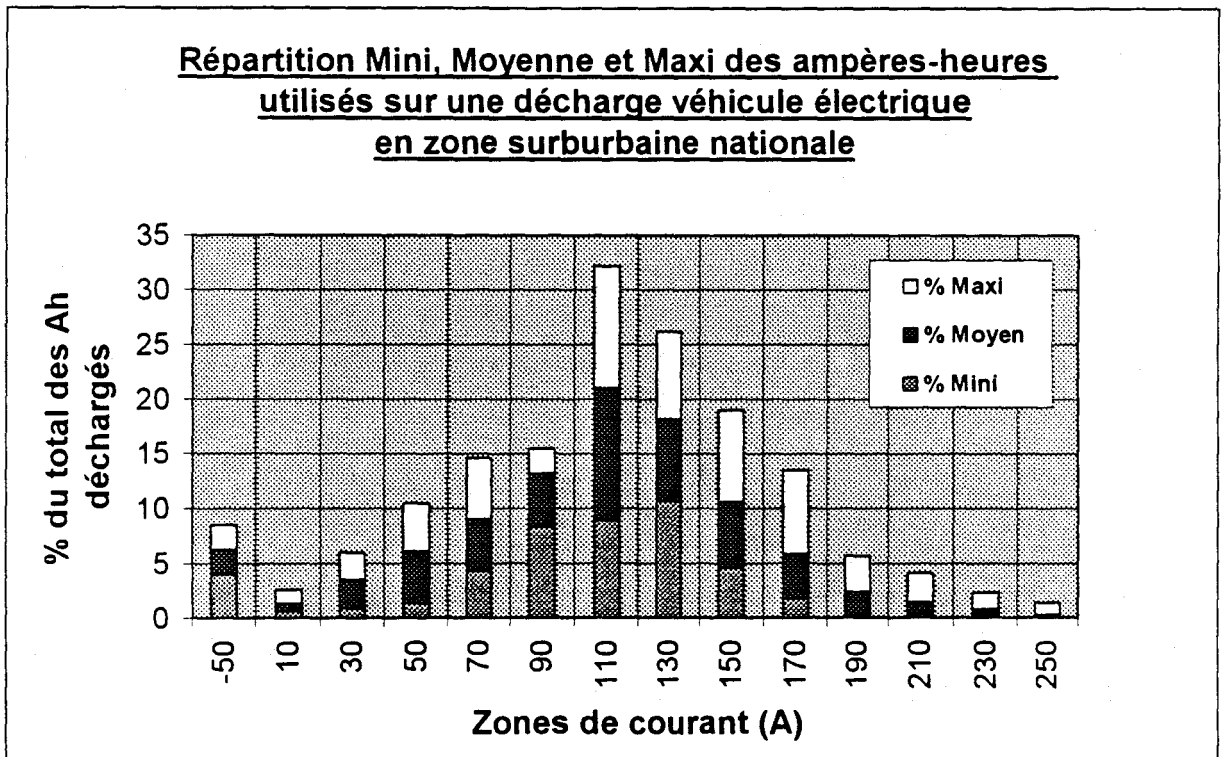


Figure IV.2

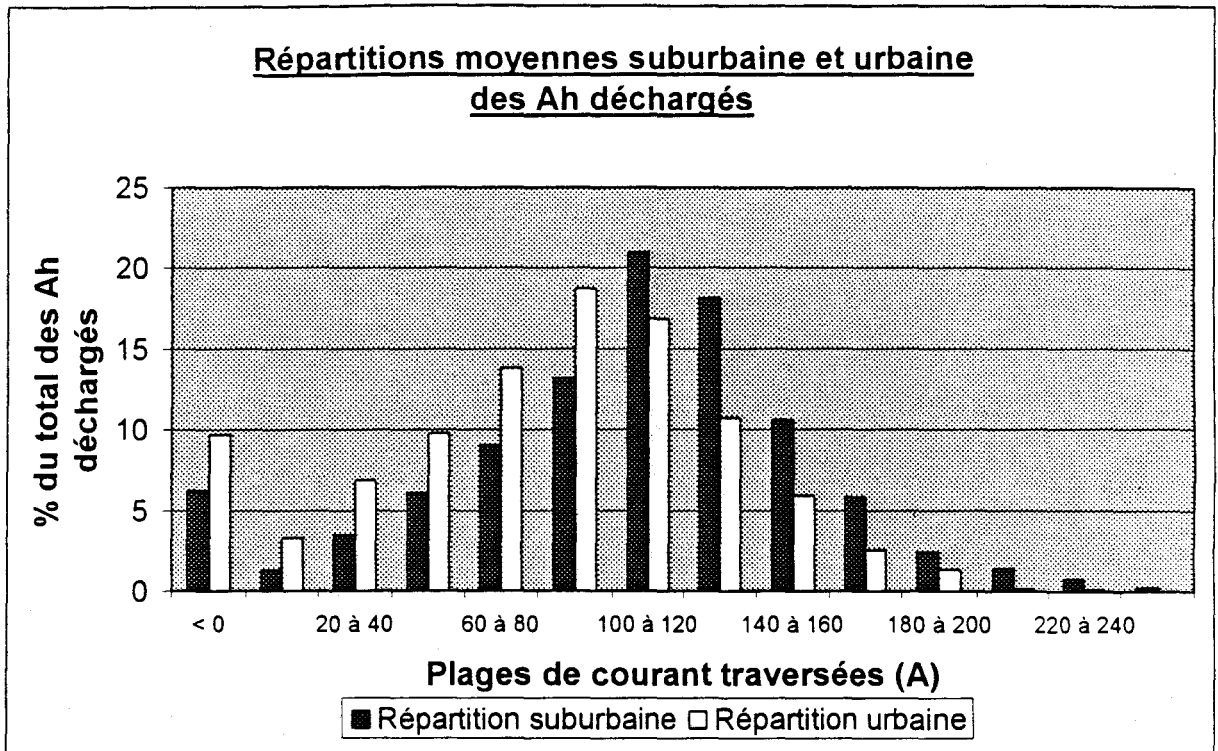


Figure IV.3

De ces graphes nous retenons les conclusions suivantes :

- ↪ la répartition des ampères-heures déchargés suit une forme de courbe gaussienne dont les maxima se situent près de 100 A en zone urbaine et près de 120 A en zone suburbaine.
- ↪ en zone urbaine, la grande majorité (60%) des ampères-heures déchargés se situe dans la fourchette 70 A - 130 A.
- ↪ en zone suburbaine, la grande majorité (60%) des ampères-heures déchargés se situe dans la fourchette 90 A - 150 A.
- ↪ le freinage récupératif représente près de 10 % du total des ampères heures utilisés en zone urbaine contre 6 % en zone suburbaine.

IV.2.2. La répartition des temps de passage du courant selon les zones de valeurs

Un deuxième traitement des données enregistrées sur le véhicule nous informe sur les durées des paliers de courant dans la décharge.

Nous avons comptabilisé les passages du courant dans 7 zones de valeurs $\{(-50 \leftrightarrow -10), (-10 \leftrightarrow 10), (10 \leftrightarrow 35), (35 \leftrightarrow 75), (75 \leftrightarrow 125), (125 \leftrightarrow 200), (200 \leftrightarrow 300)\}$ et la durée de chacun de ces passages.

Dans cette analyse des temps de paliers en zones urbaine et suburbaine, nous avons tout d'abord comptabilisé la répartition des temps des paliers dans chaque plage de courant.

Les deux graphes ci-après rapportent ces résultats.

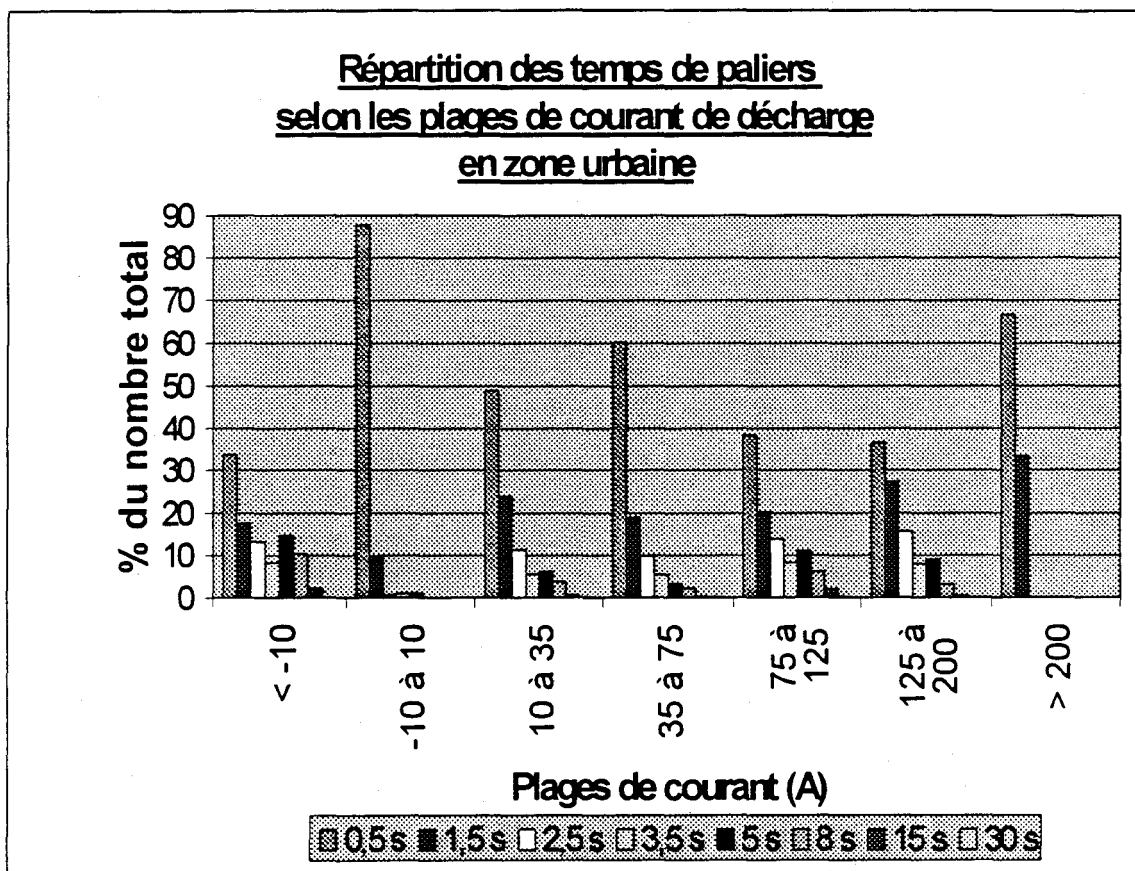


Figure IV.4

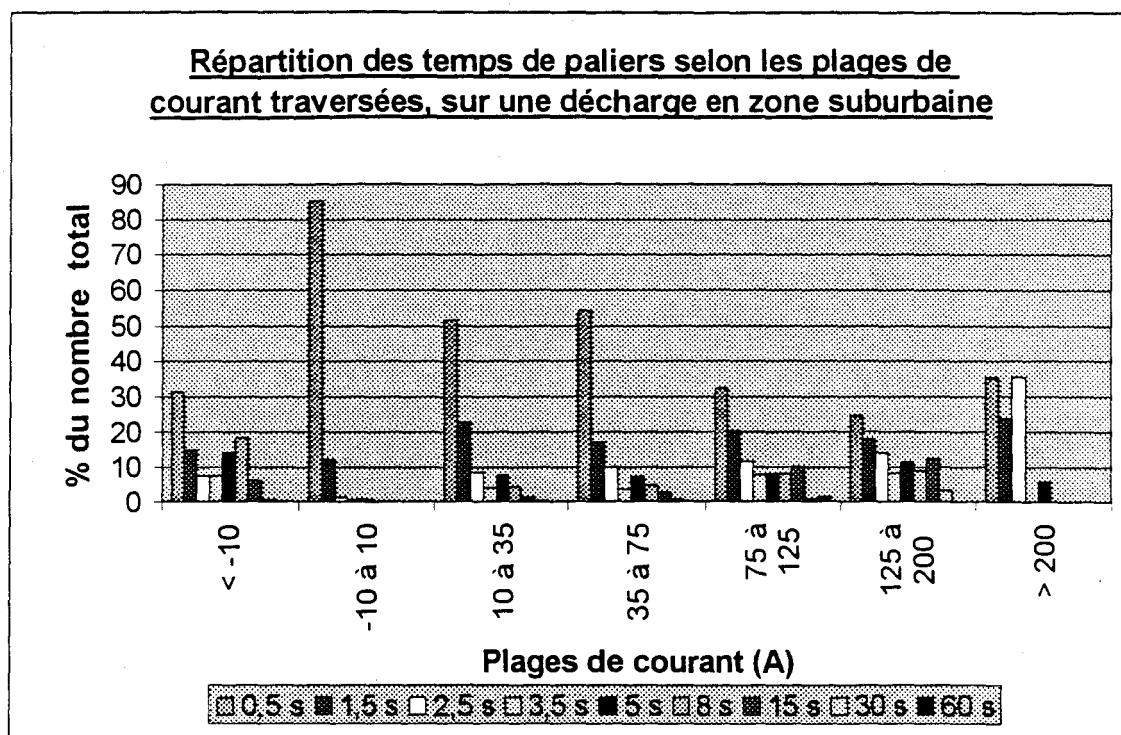


Figure IV.5

Ces deux graphes nous enseignent les constatations suivantes :

- ↳ Quelle que soit la plage de courant, les paliers les plus nombreux sont ceux de courte durée (< 2 secondes). Cela confirme l'aspect fortement dynamique du profil de courant imposé à la batterie lors d'une décharge véhicule électrique. Les périodes de régime de décharge "quasi" permanent se font très rares et la batterie fonctionne pratiquement tout le temps en régime transitoire.
- ↳ Les nombreux paliers de faible durée s'expliquent également par le fait que le véhicule possède un boîte de vitesses qui multiplie les variations brutales de courant sur toute la plage utilisée par le Volta. Cette analyse "statistique" est donc propre au véhicule Volta et donnerait certainement des résultats différents pour des véhicules sans boîte de vitesse, avec des profils de courant différents.
- ↳ La différence principale entre les répartitions urbaine et suburbaine se situe au niveau du nombre de paliers à forts courants et en freinage récupératif. Comme une approche physique simple du problème nous le laissait logiquement prévoir, le véhicule impose des paliers de courant fort plus longs en zone suburbaine qu'en zone urbaine. Par contre la zone urbaine nécessite plus d'accélération et donc de pointes de courant courtes (< 2 secondes). De même, les paliers de freinage récupératif sont plus longs en zones suburbaine qu'en zone urbaine et ce parce que le véhicule y atteint des vitesses plus élevées et nécessite donc des énergies et des distances de freinage plus importantes. Les périodes de réinjection de courant sont donc plus longues en zone suburbaine.

L'analyse nous a fourni ensuite les durées moyenne et maximale des paliers de courant supérieurs à 2 secondes, comptabilisés dans chacune des zones de valeurs choisies au départ. Les deux graphes ci-après résument ces résultats.

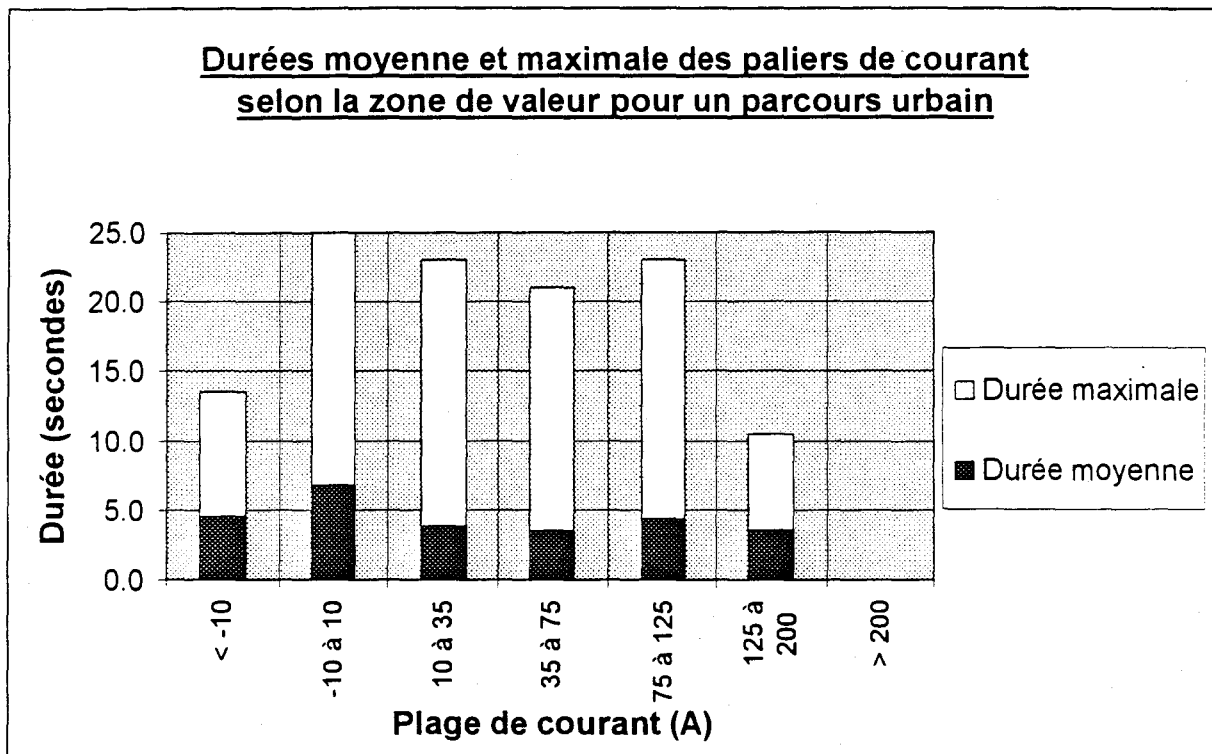


Figure IV.6

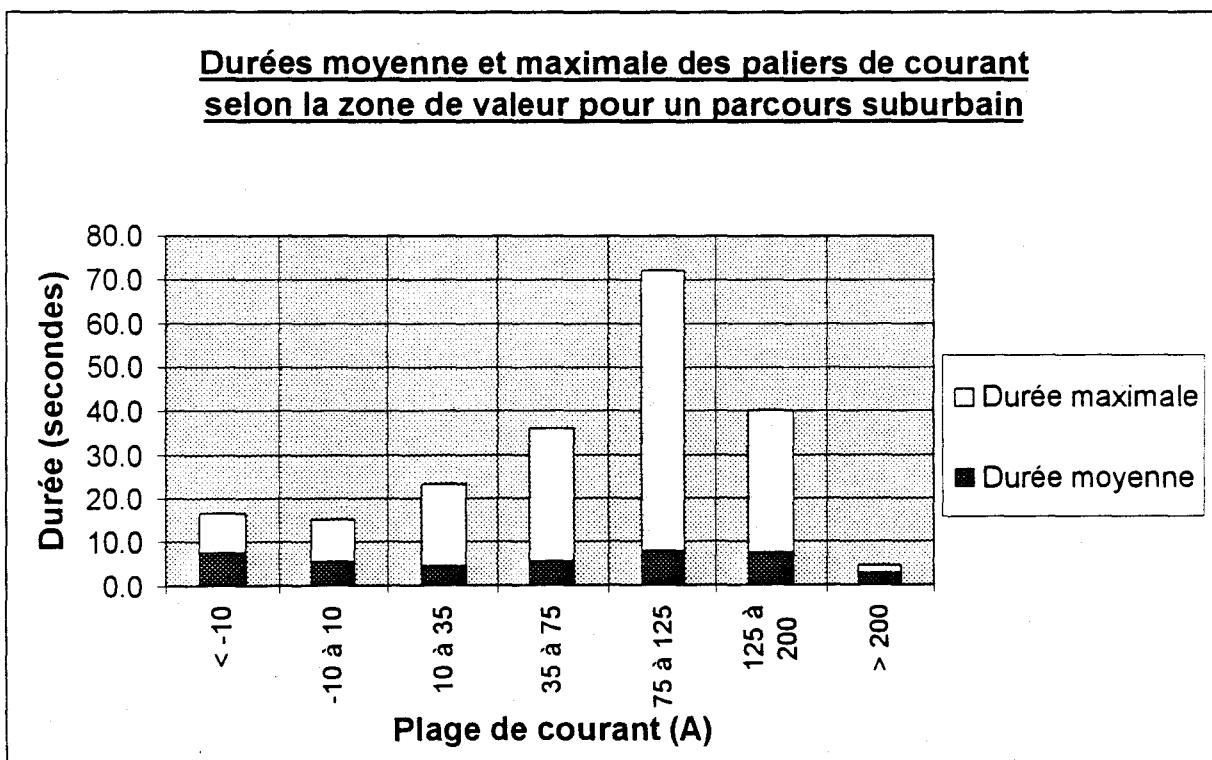


Figure IV.7

De ces deux graphes nous retenons les conclusions suivantes :

- ↪ les paliers des décharges en zone urbaine ne dépassent pas 25 secondes dans chaque plage de courant.
- ↪ les paliers correspondant aux freinages et pauses ont des durées de l'ordre de 5 à 15 secondes pour le freinage et 15 à 30 secondes pour les pauses fonctionnelles (arrêts aux organes de signalisation routière, embouteillages, etc.).
- ↪ pour les décharges en zone suburbaine, donc souvent sur nationale, des paliers plus longs sont constatés dans une plage de courant entourant 100 A : le maintien d'une vitesse sur nationale fait fonctionner le moteur électrique près de son courant nominal (~100 A pour le Volta).

Une dernière analyse des données nous a permis de faire ressortir également le cumul des temps passés par le courant dans chaque plage de valeurs choisies précédemment. Les deux graphes ci-dessous rapportent les résultats de cette analyse.

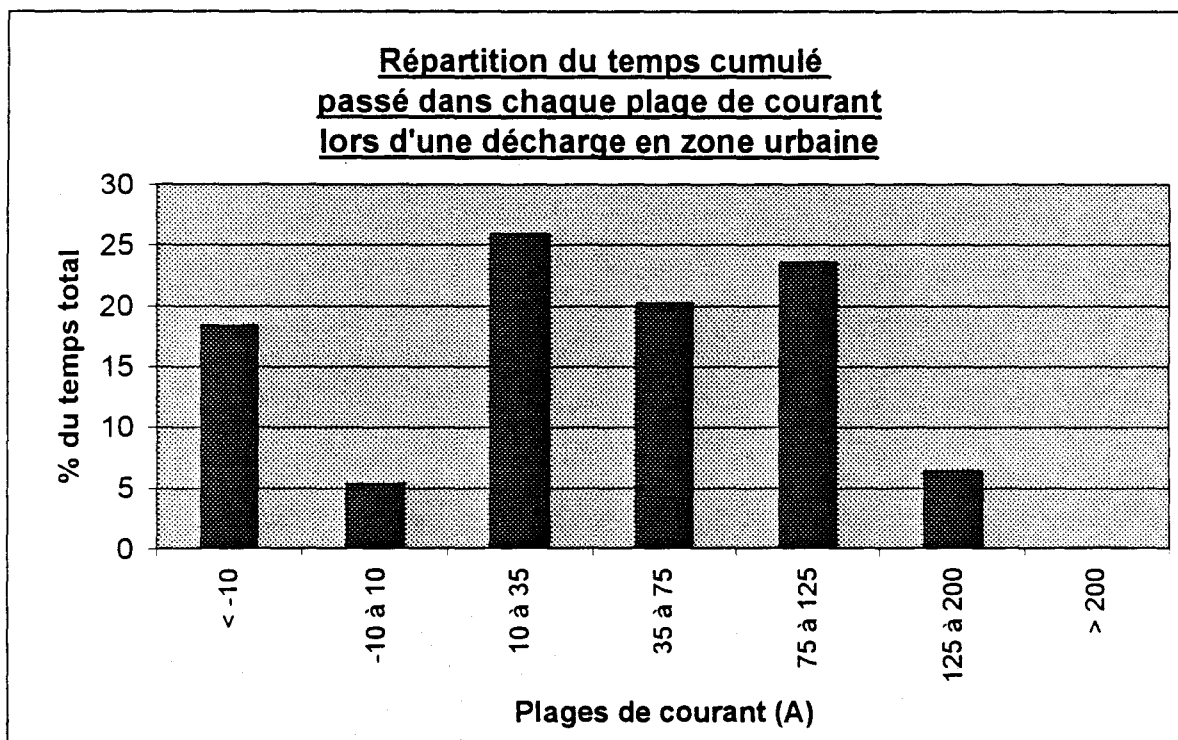


Figure IV.8

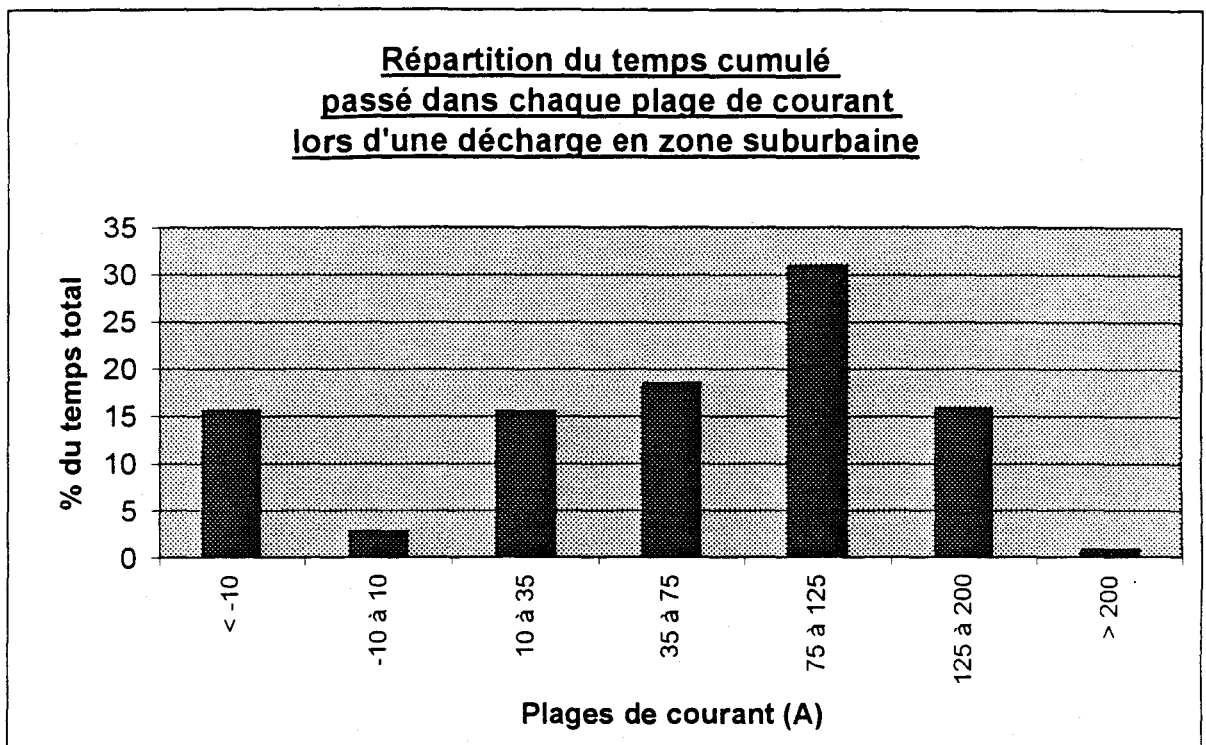


Figure IV.9

Ces deux graphes nous apportent les informations suivantes :

- ↳ en zone urbaine, le courant passe 70 % du temps de la décharge dans la zone inférieure à 75 A, donc a fortiori inférieure à notre courant de référence de 100 A ; en zone suburbaine, le courant passe 50 % du temps de la décharge dans cette même zone.
- ↳ cette différence, inversée pour les forts courants, signifie que la batterie bénéficie de plus de temps de récupération en zone urbaine qu'en zone suburbaine, vis à vis d'une décharge à 100 A. Ceci confirme ce que nous avons souvent constaté expérimentalement, à savoir que le véhicule électrique Volta équipé de batteries plomb acide a une plus grande autonomie en ville que sur nationale.

Forts de ces constatations sur les répartitions des ampères-heures déchargés et sur les temps de passage du courant selon les zones de valeurs, nous avons pu élaborer des tests laboratoire avec des profils se rapprochant des profils réels. Nous avons notamment respecté les quantités d'ampères-heures échangées et les temps de paliers, moyens et maximaux, dans chaque zone de courant considérée.

IV.3. Détermination des coefficients d'équivalence liés aux gains et pertes de capacité aux courants différents du courant de référence

Ce paragraphe a pour but de répondre au besoin de quantification des coefficients d'équivalence introduits en IV.1 dans notre définition de l'algorithme. Concrètement, nous allons expliquer comment calculer l'effet d'une décharge de Q ampères-heures à courant I ($\neq I_{\text{réf}}$) sur la capacité restante à $I_{\text{réf}}$. Nous aborderons également l'aspect récupératif des pauses et des recharges par freinage, si nombreuses dans une utilisation véhicule électrique.

Toutes les expériences de ce paragraphe ont été menées sur trois monoblocs **6 RGT 180**, que nous baptisons **B1**, **B2** et **B3**, par rapport à une implantation dans le véhicule Volta étudié. Nous avons donc choisi notre courant de référence $I_{\text{réf}}$ de 100 A, par rapport aux caractéristiques du véhicule et à notre expérience de celui-ci. C'est un courant proche du courant nominal du moteur, permettant au véhicule vide chargé de deux personnes de s'insérer dans un trafic routier sans gêner la circulation et correspondant au maximum de la zone verte (autorisée) de son éconoscope.

IV.3.1. La mise en condition des monoblocs

L'analyse qualitative du comportement d'une batterie plomb acide est relativement facile. Au travers d'essais simples, on peut mettre en évidence qu'une batterie décharge moins d'ampères heures à forts courants qu'à faibles courants ou qu'une pause permet de récupérer de l'énergie. Par contre, **une analyse quantitative est beaucoup moins facile** à mettre en œuvre. Des conditions d'essais précises sont nécessaires pour contrôler cet aspect quantitatif.

Nous avons décidé d'effectuer tous nos essais quantitatifs précis sur des monoblocs d'un même type, d'une même série et plongés dans un bain thermostaté à 25°C.

Si l'on veut connaître l'influence de tel type de profil de courant sur la capacité de la batterie au courant de référence choisi, il est nécessaire de connaître cette capacité à l'état initial. Nous avons donc envisagé un **cyclage des monoblocs testés comprenant des décharges complètes au courant de référence de 100 A et des recharges complètes afin de stabiliser la capacité à 100 A avant chaque test.**

Lors des premiers essais, nous avons constaté des fluctuations importantes de la capacité avant stabilisation. Cherchant à optimiser la durée des essais, nous avons réfléchi sur les causes de ces fluctuations pour essayer de les amortir le plus vite possible. Nous nous sommes rendus compte qu'une pause d'une journée entre les cycles de décharges à 100 A accélérerait la stabilisation et la rendait possible en une semaine plutôt qu'en un mois.

Avec cette pause, nous éliminons tout d'abord l'effet de la montée de température du monobloc pendant la charge. En effet, la température interne d'un monobloc étanche peut monter de 5 à 10 °C entre le début et la fin de charge. Si la décharge suivante démarre juste après la fin de charge, la température du monobloc pour cette décharge diffère de celle d'avant et induit donc des fluctuations de capacité. Une longue pause (> 24 heures) permet au monobloc de redescendre à la température du bain.

La fin de charge est caractérisée par la formation de gaz censés se recombinaison à plus de 95 %. Seulement, cette recombinaison demande un certain temps pour être pleinement efficace. Deux décharges enchaînées sans pause vont différer du fait de l'accumulation de gaz non totalement recombinaison à la surface des plaques pendant la deuxième décharge, faisant obstruction aux réactions entre l'acide et la matière active. Une longue pause permet aux gaz de se recombinaison convenablement.

Ces deux phénomènes suscités entraînent des oscillations importantes de la capacité à 100 A lorsqu'une pause trop courte est imposée entre chaque décharge de stabilisation. Nous avons donc opté pour **un cyclage de stabilisation de six à huit jours minimum à 100 A avec une décharge tous les deux jours pour laisser au moins 24 heures de pause**. La stabilisation était atteinte lorsque la capacité à 100 A variait entre deux cycles de moins de 0.5 Ah soit environ **moins de 0.3 %**.

Un essai quantitatif, soit, en fait, une décharge sur une journée, nécessitait donc entre une semaine et quinze jours de préparation afin de stabiliser la capacité du monobloc à 100A lorsque tout se passait bien. C'est pourquoi, faute de matériel mais aussi et surtout de temps, nous n'avons pu multiplier ces essais quantitatifs et avons du cibler ceux qui pouvaient nous donner des résultats exploitables pour l'étude.

IV.3.2. La détermination expérimentale des coefficients d'équivalence

Nous avons vu, dans le deuxième chapitre, que l'énergie disponible d'une batterie dépend du courant auquel on la décharge. Plus le courant est fort, moins elle fournit d'ampères-heures. La courbe ci-dessous relative au monobloc 6 RGT 180 illustre concrètement ce phénomène.

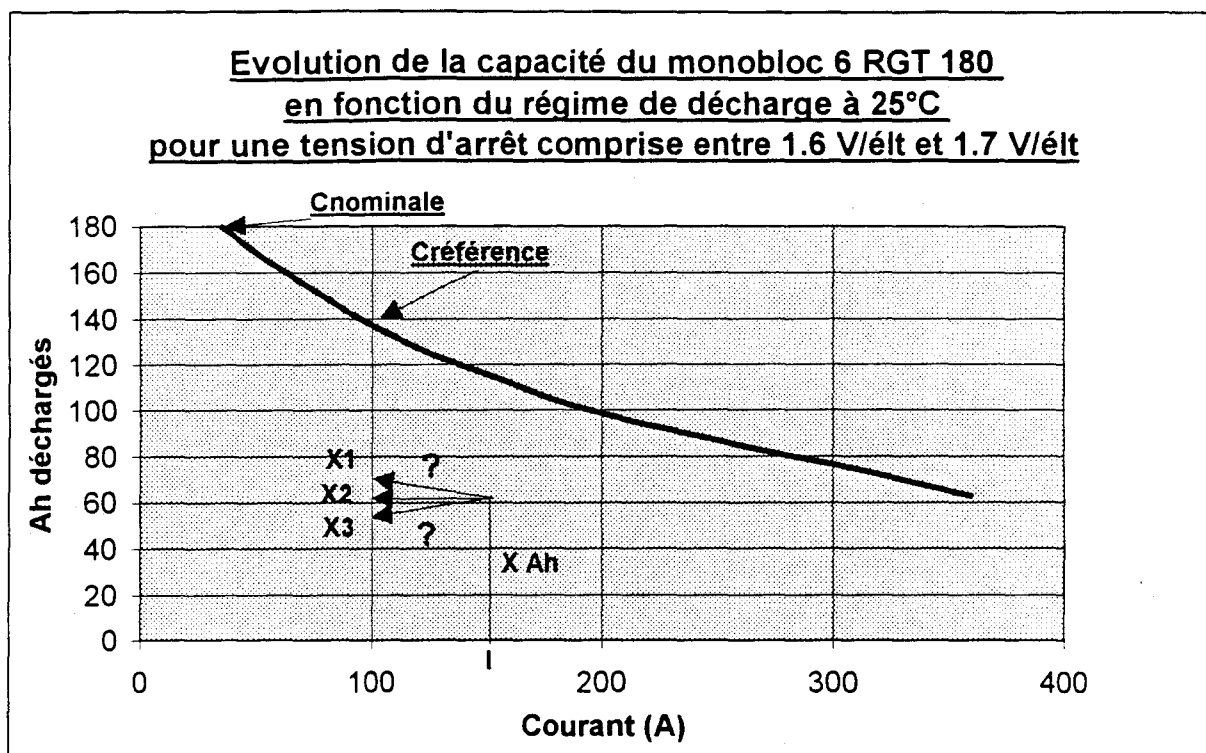


Figure IV.10

D'un point de vue qualitatif, il semble donc qu'un palier de courant à $I > I_{réf}$ dans une décharge à $I_{réf}$ diminue la capacité totale disponible à $I_{réf}$ et qu'un palier de courant à $I < I_{réf}$ permet d'augmenter la capacité disponible à $I_{réf}$.

Afin de quantifier ce phénomène, nous avons choisi de mesurer l'effet d'une quantité Q d'ampères-heures déchargée à un courant I incluse dans une décharge à courant constant égal au courant de référence. Mais plutôt que de décharger Q en un seul palier, nous avons décidé de **l'étaler sur toute la décharge en un ensemble de paliers** d'une durée tirée de l'analyse des cycles réels. Nous obtiendrons par là un coefficient "statistique" moyen calculé sur toute la décharge.

Etant limités par le temps et donc par le nombre d'essais, nous avons choisi quatre valeurs de courant I étalées sur la gamme de courant de décharge utilisée par le véhicule Volta soit : 20 A, 50 A, 150 A, 250 A. Ces valeurs correspondent en fait aux centres des zones de courant choisies lors de l'analyse statistique du IV.2.

IV.3.2.i. coefficient d'équivalence à 150 A

Après le cyclage de stabilisation de la capacité à 100 A, nous avons fait subir au deux monoblocs, B1 et B2, le profil de décharge suivant :

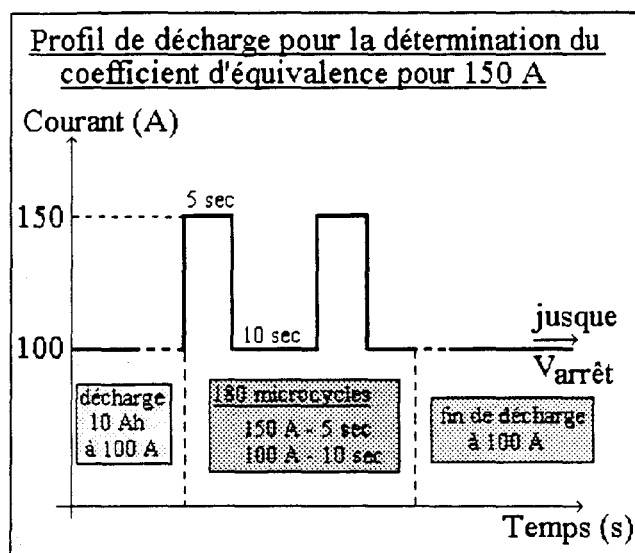


Figure IV.11

La décharge comprend donc trois phases :

- 10 Ah déchargés à 100 A au début du cycle
- 180 microcycles comprenant un palier à 150 A pendant 5 secondes et un palier à 100 A pendant 10 secondes, soit : 37.5 Ah déchargés à 150 A et 50 Ah déchargés à 100 A
(37.5 Ah à 150 A ont été choisis par rapport à l'analyse des cycles réels)
- fin de décharge à 100 A jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt

Résultats :

Bloc	C _{100A} précédente (Ah)	Ah déchargés à 150 A (Ah)	Ah déchargés au total (Ah)	Gain ou Perte (Ah)
B1	126	37.5	124.5	-1.5
B2	136	37.5	134.6	-1.4
moyen	***	37.5	***	-1.45

Tableau IV.1

De ce tableau ressort donc un coefficient statistique d'équivalence des Ah réellement déchargés à 150 A vers les Ah déchargés à 100 A :

$$\alpha(150 A \rightarrow 100 A) = \frac{(37.5 + 1.45)}{37.5} = 1.04 \quad (IV.7)$$

Concrètement, Q Ah déchargés à 150 A représentent Q' = 1.04 x Q Ah déchargés à 100 A.

IV.3.2.ii. coefficient d'équivalence à 50 A

Toujours après le cyclage de stabilisation à 100 A, le profil suivant a été appliqué aux monoblocs B1 et B2 :

- décharge à 100 A pendant 10 Ah, pour centrer l'essai sur la décharge totale
- 180 microcycles comprenant un palier de décharge à 50 A pendant 20 secondes et un palier de décharge à 100 A pendant 10 secondes, soit 50 Ah déchargés à 50 A et 50 Ah déchargés à 100 A.
- décharge à 100 A jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt

Résultats :

Bloc	C _{100A} précédente (Ah)	Ah déchargés à 50 A (Ah)	Ah déchargés au total (Ah)	Gain ou Perte (Ah)
B1	126	50	134	+8
B2	137.5	50	141.4	+3.9
moyen	***	50	***	~ +6

Tableau IV.2

D'où le coefficient statistique d'équivalence des Ah réellement déchargés à 50 A vers les Ah déchargés à 100 A :

$$\alpha(50 A \rightarrow 100 A) = \frac{(50 - 6)}{50} = 0.88 \quad (IV.8)$$

IV.3.2.iii. coefficient d'équivalence à 250 A

Nous avons déterminé ce coefficient sur le monobloc B1, à l'aide de deux décharges. L'une concentre les forts courants en début de décharge alors que l'autre les fait subir à la batterie en fin de décharge. Nous avons testé l'effet de forts courants en début et fin de décharge pour simuler une hausse de la consommation d'électricité due, par exemple, à un déplacement sur nationale, en début ou en fin de décharge.

Nous supposons, d'après notre modèle, que l'obstruction des pores de la matière active sous l'effet de forts courants sera plus importante dans l'essai concentrant les impulsions en fin de décharge. La perte de capacité devrait donc être plus importante dans ce cas. Les deux décharges permettront d'évaluer cette différence.

Les profils de ces deux tests sont décrits ci-dessous :

Décharge 1 (2 phases)

- 58 microcycles comprenant un palier de décharge à 250 A pendant 5 secondes et un palier de décharge à 100 A pendant 6 secondes, soit 20 Ah déchargés à 250 A et 10 Ah déchargés à 100 A.
- décharge à 100 A jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt

Décharge 2 (3 phases)

- décharge à 100 A pendant 70 Ah, pour déplacer l'essai sur la fin de la décharge
- 58 microcycles comprenant un palier de décharge à 250 A pendant 5 secondes et un palier de décharge à 100 A pendant 6 secondes, soit 20 Ah déchargés à 250 A et 10 Ah déchargés à 100 A.
- décharge à 100 A jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt

Ces deux décharges permettent de quantifier l'effet d'un courant de 250 A sur la capacité à 100 A, lorsque celui-ci est appliqué en début ou en fin de décharge. Les 20 Ah déchargés à 250 A correspondent dans l'analyse statistique au cumul des pourcentages d'Ah déchargés dans la plage 200 à 250 A. Une quantité déchargée de l'ordre de 20 Ah permet, de plus, une meilleure évaluation du coefficient qu'avec une quantité nettement moindre.

Les résultats de ces deux décharges sont les suivants:

Bloc	C _{100A} précédente (Ah)	Ah déchargés à 250 A (Ah)	Ah déchargés au total (Ah)	Gain ou Perte (Ah)
B1 Déc.1	129.5	20	122.3	-7.2
B1 Déc.2	130	20	124.2	-5.8
moyen	***	20	***	-6.5

Tableau IV.3

Ces résultats nous montrent que l'emplacement en début ou en fin de décharge des paliers à fort courant influe relativement peu sur la perte finale d'ampères-heures. Nous pouvons donc faire la moyenne des deux pertes pour obtenir un coefficient statistique d'équivalence des Ah réellement déchargés à 250 A vers les Ah déchargés à 100 A :

$$\alpha(250 \text{ A} \rightarrow 100 \text{ A}) = \frac{20 + 6.5}{20} = 1.32 \quad (\text{IV.9})$$

IV.3.2.iv. coefficient d'équivalence à 20 A

Pour ce coefficient, nous avons différencié l'effet au début et à la fin de la décharge, pour évaluer également l'influence de l'emplacement des impulsions sur les problèmes diffusionnels au sein de la matière active. Nous avons donc fait subir aux monoblocs B1 et B2 les deux profils suivants :

Décharge 1

- 120 microcycles comprenant un palier de décharge à 20 A pendant 30 secondes et un palier de décharge à 100 A pendant 3 secondes, soit 20 Ah déchargés à 20 A et 10 Ah déchargés à 100 A.
- décharge à 100 A jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt

Décharge 2

- décharge à 100 A pendant environ 100 Ah, pour déplacer l'essai sur la fin de la décharge
- 120 microcycles comprenant un palier de décharge à 20 A pendant 30 secondes et un palier de décharge à 100 A pendant 3 secondes, soit 20 Ah déchargés à 20 A et 10 Ah déchargés à 100 A.
- décharge à 100 A jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt

Au travers de ces deux décharges nous pouvons, comme dans le cas précédent, quantifier l'effet d'un courant de 20 A sur la capacité à 100 A, lorsque celui-ci est appliqué en début ou en fin de décharge. Les 20 Ah déchargés à 20 A correspondent dans l'analyse statistique au cumul des pourcentages d'Ah déchargés dans la plage 0 à 40 A.

Les résultats sont :

Bloc	C _{100A} précédente (Ah)	Ah déchargés à 20 A (Ah)	Ah déchargés au total (Ah)	Gain ou Perte (Ah)
B1 Déc.1	127.7	20	136.2	+8.5
B1 Déc.2	128.6	20	137.9	+9.3
B2 Déc.1	136.7	20	143.3	+6.6

B2 Déc.2	138	20	147.9	+9.9
moyen	***	20	***	+8.6

Tableau IV.4

Comme dans le cas précédent, nous constatons que l'emplacement des impulsions influe sur le gain d'ampères-heures mais de manière suffisamment faible pour nous permettre de moyenniser les gains afin d'obtenir un coefficient statistique d'équivalence des Ah réellement déchargés à 20 A vers les Ah déchargés à 100 A :

$$\alpha(20 \text{ A} \rightarrow 100 \text{ A}) = \frac{20 - 8.6}{20} = 0.57 \quad (\text{IV.10})$$

IV.3.2.v. bilan sur les coefficients d'équivalence

De ces essais effectués pour quantifier l'influence d'un palier de courant sur la capacité à Iréf, nous tirons la courbe d'un coefficient d'équivalence statistique moyen $\alpha(I \rightarrow Iréf)$.

Avec $\alpha(100 \text{ A} \rightarrow 100 \text{ A}) = 1$ et $\alpha(0 \text{ A} \rightarrow 100 \text{ A}) = 0$, on retient la courbe ci-dessous :

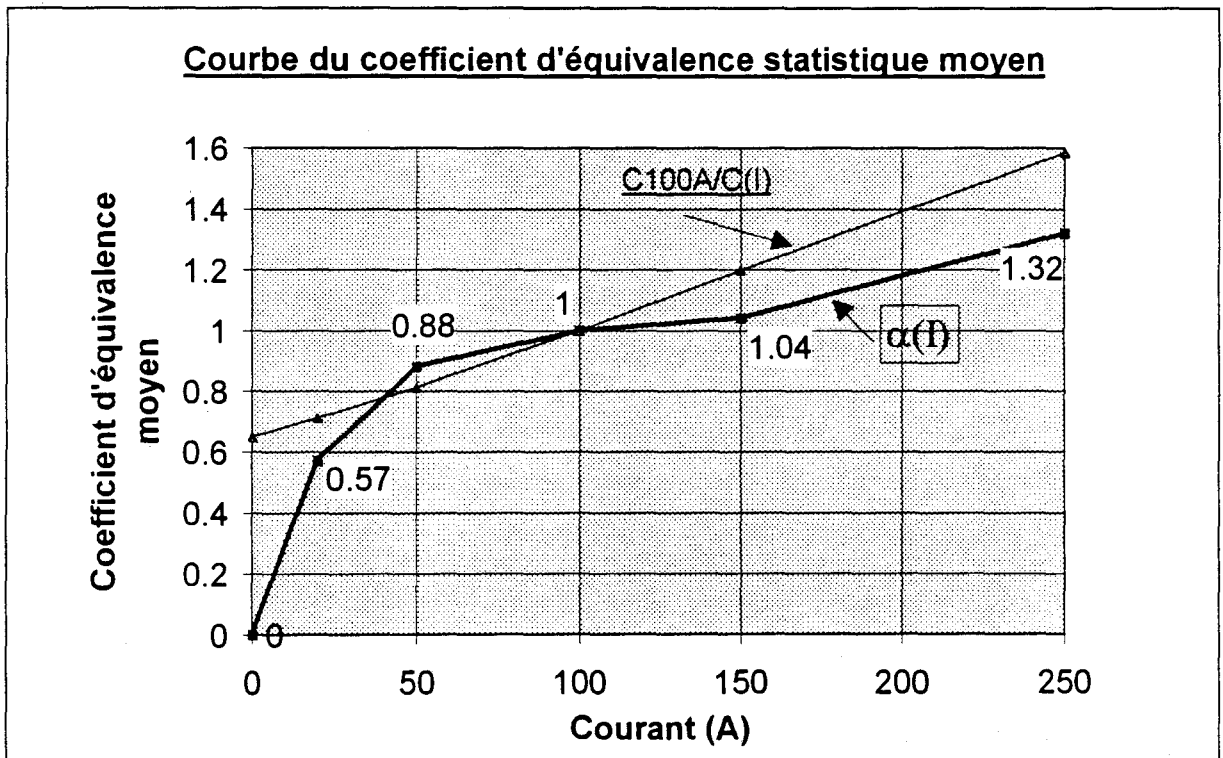


Figure IV.12

La valeur nulle du coefficient à courant nul et surtout l'interpolation linéaire entre les deux premiers points de la courbe peuvent être contestées. Comme, d'une part, nous n'avons pas d'essais quantitatifs dans cette zone de courant et que, d'autre part, les quantités d'ampères-heures déchargées y sont faibles, nous avons choisi cette forme de courbe comme première approximation, sachant qu'une forme plus horizontale, discontinue en zéro, n'influerait que peu sur les résultats.

Nous avons également dessiné, sur ce graphe, le coefficient d'équivalence décrit dans le troisième chapitre et utilisé dans bon nombre de méthodes, à savoir, le rapport entre la capacité au courant de référence et la capacité au courant considéré.

Le calcul de $Q_{perdue \text{ à } Iréf}$ devient donc avec ces coefficients :

$$Q_{perdue \text{ à } Iréf} = \int_0^t [\alpha(i(t)) * i(t)]_{i>0} dt \quad (IV.11)$$

Dans cette première définition, nous ne prenons pas encore en compte les courants négatifs et les pauses. Il nous faut donc évaluer ce calcul d'ampères-heures équivalents dans un premier temps sur des décharges sans pause ni régénération.

IV.3.3. Introduction de ce coefficient dans l'algorithme d'état de charge et tests sur des décharges dynamiques reproduites en laboratoire, sans pause ni régénération

Nous voulons montrer, dans ce paragraphe, l'amélioration apportée par ce calcul statistique dans la détermination de l'état de charge.

Nous avons donc introduit le coefficient $\alpha(I \rightarrow Iréf)$ établi ci-dessus dans l'algorithme décrit en III.3.2 à la place des coefficients habituels basés sur le simple rapport des capacités.

Nous avons ensuite fait subir à nos deux monoblocs B1 et B2, deux décharges type véhicule électrique *sans pause ni régénération*, tirées de décharges réelles enregistrées sur route à bord du véhicule Volta.

Il s'agit de deux décharges type véhicule électrique, l'une (**DR1**) tirée d'un roulage réel en *ville* et l'autre (**DR2**) d'un roulage réel mêlant *ville et nationale*. Les pauses et régénérations ont été enlevées de ces deux décharges afin de ne pas multiplier les paramètres.

Les applications de ces deux décharges sur les deux monoblocs ont bien sûr été précédées du cyclage de stabilisation de la capacité à 100 A.

Les profils dynamiques type véhicule électrique ont été appliqués jusqu'à atteindre la tension d'arrêt de 1.7 V/élt puis nous avons terminé les décharges à 100 A à nouveau jusque 1.7 V/élt. Ce dernier point constitue le **100% de décharge de référence**.

Nous avons ensuite passé les deux algorithmes initiaux et l'algorithme modifié avec $\alpha(I \rightarrow Iréf)$ sur les données extraites de ces décharges de référence afin de démontrer l'amélioration.

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des profils de décharge, les résultats des applications sur les monoblocs et les pourcentages donnés par les trois algorithmes.

Bloc-Décharge	B1-DR1 (ville)	B1-DR2 (ville+nationale)	B2-DR1 (ville)	B2-DR2 (ville+nationale)
C(100A) initiale (Ah)	128,7	128	138	139
Courant moyen (A)	55,6	62,2	55	61,8
Capacité Courant Moyen (Ah)	158,8	153,2	167,9	165,8
Ah déchargés au total	144,2	135,7	155,3	153,5
% algorithme Iréf = Imoyen	90,8	88,6	92,5	92,6
% algorithme Iréf = 100 A avec C(100A)/C(I) comme coefficient d'équivalence	107,8	104,7	108,5	107,9
% algorithme Iréf = 100 A avec notre coefficient d'équivalence statistique	103,8	100,2	104,4	103,5

Tableau IV.5

Bilan de ces quatre décharges tests:

Ces décharges de référence, aux profils de courant basés sur des décharges réelles enregistrées sur route, ont montré l'amélioration apportée par notre calcul "statistique" du coefficient d'équivalence des ampères-heures déchargés réels vers les ampères-heures déchargés vis à vis d'une fin de décharge au courant de référence de 100 A.

L'algorithme basé sur le courant moyen est trop optimiste avec une erreur proche de -10 %, erreur négative qui, comme on l'a déjà dit, est préjudiciable pour la batterie car elle peut entraîner une décharge profonde.

L'algorithme basé sur le courant de référence de 100 A, avec comme coefficient d'équivalence, le rapport des capacités aux courants instantané et de référence, est, quant à lui, trop pessimiste avec une erreur entre + 4.7 % et + 8.5 %. Certes, il ne risque pas de provoquer de décharge profonde, mais il ne permet pas une utilisation optimale de l'énergie contenue dans la batterie.

Nous obtenons sur ces quatre décharges, une erreur maximale de + 4.4 %, ce qui constitue une amélioration significative. Par ce calcul, l'algorithme n'est ni optimiste, ni trop pessimiste.

IV.3.4. Test de cet algorithme sur d'autres décharges dynamiques contenant pauses et régénérations

Afin de compléter nos tests, nous avons appliqué ces trois algorithmes sur deux autres décharges dynamiques, l'une (**DR3**) basée sur un roulage réel en *ville*, l'autre (**DR4**) sur un roulage réel sur *nationale*. Par manque de temps, nous n'avons pu tester ces deux décharges que sur le monobloc B2.

Un cyclage de stabilisation à 100 A a bien sûr précédé ces essais. Le profil dynamique relevé sur route a été appliqué au monobloc en laboratoire jusqu'à l'obtention de la tension d'arrêt de 1.7 V/élt. A partir de ce point, une décharge à 100 A déterminait, à l'atteinte une nouvelle fois de la tension d'arrêt de 1.7 V/élt, le 100 % de décharge réel de référence.

Nous avons passé les trois algorithmes sur ces deux décharges, en prenant un **coefficient multiplicateur unitaire pour les courants négatifs** :

$$\alpha(i) = 1 \text{ pour } i < 0$$

Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Bloc-Décharge	B2-DR3 (ville)	B2-DR4 (nationale)
C(100A) juste précédente (Ah)	141,3	143
Courant moyen (A)	28	98
Courant moyen calculé sans tenir compte des temps de pause (A)	42	103,5
Capacité Courant Moyen (Ah)	192,9	144
Cumul total des Ah échangés	163,6	136,5
Ah chargés par freinage	19,1	6
% algorithme Iréf = Imoyen en tenant compte des pauses dans le calcul de Imoyen	84,8	94,8
% algorithme Iréf = Imoyen sans tenir compte des pauses dans le calcul de Imoyen	90,9	96,7
% algorithme Iréf = 100 A avec C(100A)/C(I) comme coefficient d'équivalence	111,4	107,9
% algorithme Iréf = 100 A avec notre coefficient d'équivalence statistique	107	98,7

Tableau IV.6

Bilan de ces deux décharges :

Le test des trois algorithmes sur ces deux décharges est intéressant car il nous montre que notre méthode reste toujours la meilleure des trois mais que les erreurs sont plus grandes sur ces deux cas.

- -3.3 % et -15.2 % d'erreur pour l'algorithme basé sur le courant moyen : cet algorithme est toujours trop optimiste, surtout sur un parcours en ville.
- + 7.9 % et + 11.4 % d'erreur pour l'algorithme basé sur le courant de référence de 100 A avec des coefficients d'équivalence calculés par le rapport des capacités : cet algorithme est encore trop pessimiste et empêche une utilisation optimale de l'énergie de la batterie.
- - 1.3 % et + 7 % d'erreur pour notre calcul algorithmique : l'optimisme sur nationale peut s'expliquer par notre détermination du coefficient à 150 A que nous avons effectuée à l'aide de paliers de courant de 5 secondes peut-être trop courts pour être

représentatifs d'une utilisation sur nationale ; le pessimisme relativement important en ville, quant à lui, provient certainement d'une mauvaise prise en compte du freinage et surtout des temps de pause qui permettent à la batterie de récupérer un peu d'énergie et qui ne sont pas comptabilisés au travers du coefficient $\alpha(i)$.

Une étude de la récupération d'énergie de la batterie par freinage ou pendant les temps de pause est nécessaire afin d'améliorer encore notre algorithme en ville, domaine d'utilisation privilégié du véhicule électrique.

IV.4. Etude de la récupération d'énergie de la batterie par freinage ou pendant les temps de pause.

Lors d'un freinage récupératif, la batterie récupère des ampères-heures par réinjection de courant. Il est donc nécessaire de déduire cette énergie remise du cumul d'ampères-heures échangés équivalent pour une fin de décharge à 100 A. Mais est-ce qu'une quantité Q d'ampères-heures rechargés par freinage récupératif entraîne un gain de Q ampères-heures équivalents ? Des essais quantitatifs doivent nous aider à répondre à cette question.

De même, comme nous l'avons expliqué dans le deuxième chapitre et comme il est facile de le montrer par des essais qualitatifs, une pause en cours de décharge permet à la batterie de récupérer de l'énergie par diffusion et homogénéisation de son électrolyte dans la matière active. Il est donc nécessaire de quantifier par des essais cette récupération d'énergie.

Par nos observations sur les utilisations réelles des batteries en véhicule électrique, nous avons décidé de séparer la récupération d'énergie en deux études :

- la récupération par les périodes de freinage récupératif suivi la plupart du temps d'une pause relativement courte, correspondant aux arrêts obligatoires imposés par le code de la route (feux, stops, balises,) ou par les embouteillages.
- la récupération lors des périodes de stockage prolongé, correspondant à une pause déjeuner le midi ou un arrêt d'une nuit lors des décharges étalées sur plusieurs jours.

IV.4.1. Le freinage récupératif et les pauses fonctionnelles courtes

Nous avons décidé de coupler ces deux phénomènes en partant du principe qu'un arrêt à un stop, à des feux ou en embouteillage est toujours précédé d'un freinage récupératif lors de la décélération du véhicule. Par ailleurs, un freinage récupératif est suivi, la plupart du temps, par une pause.

Nous avons donc, à l'aide de l'analyse statistique des décharges véhicule électrique, imaginé plusieurs tests destinés à quantifier par un coefficient, l'énergie équivalente récupérée lors des phases de freinage récupératif suivi ou non de pause courte. Nous avons séparé la récupération sur nationale et en ville : en effet, les paliers de freinage récupératif sont plus longs sur nationale qu'en ville contrairement aux pauses suivant le freinage qui sont plus longues et plus fréquentes en ville que sur nationale.

Toujours après la stabilisation de la capacité 100 A, nous avons donc fait subir aux monoblocs B1, B2 ou B3 des décharges aux profils suivants :

- essai **NATCYC1** (nationale) comprenant N microcycles composés chacun d'un palier à 100 A pendant 84 secondes et d'un palier de freinage récupératif à -50 A pendant 10 secondes. La décharge se termine à 100 A constant jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt. N est choisi par rapport au monobloc étudié pour que le cyclage couvre plus de 95% de la décharge.

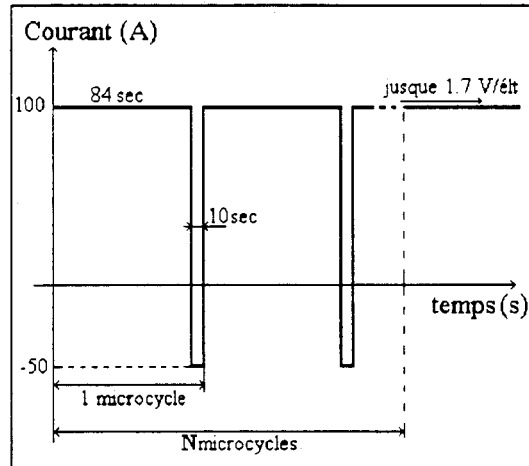


Figure IV.13 Profil de courant de décharge pour le test NATCYC1

- essai **NATCYC2** en rajoutant au précédent une pause de 10 secondes après chaque freinage récupératif.
- essai **VILCYC1** (ville) comprenant N microcycles composés chacun d'un palier à 100 A pendant 24 secondes et d'un palier à -50 A pendant 5 secondes. La décharge se termine au courant de 100 A constant jusqu'à la tension d'arrêt de 1.7 V/élt. N est choisi pour que le cyclage occupe plus de 95 % de la décharge.

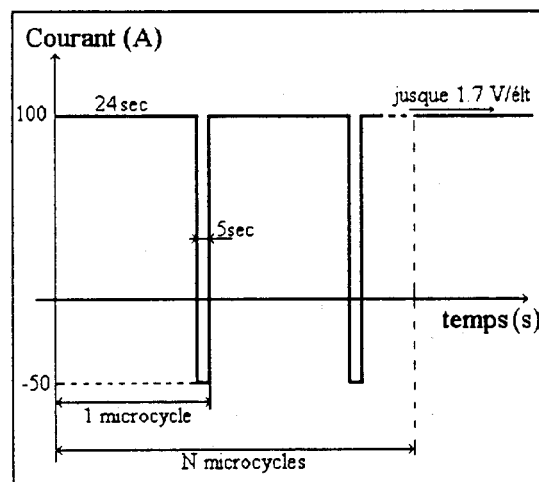


Figure IV.14 Profil de courant de décharge du test VILCYC1

- essai **VILCYC2** en rajoutant au précédent une pause de 15 secondes après chaque freinage récupératif.

- essai **VILCYC3** en rajoutant à VILCYC1 une pause de 30 secondes après chaque freinage récupératif.
- essai **VILCYC4** en rajoutant à VILCYC1 une pause de 60 secondes après chaque freinage récupératif.

Les résultats de ces 7 décharges sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Bloc-Essai	Capacité 100 A précédente (Ah)	Ah chargés	Tps cumulé régénérations + pauses (secondes)	Ah déch. total	Gain (Ah)	Gain (%C _{100A})
B3-NATCYC1	135,7	7,9	600	146,1	2,5	1,8
B3-NATCYC2	135,8	7,9	1200	153,1	9,4	6,9
B1-VILCYC1	130,2	13,7	1100	150,7	6,8	5,2
B1-VILCYC2	129,6	13,7	4400	153,7	10,4	8,0
B2-VILCYC1	139,5	14,5	1100	161	7	5,0
B2-VILCYC3	138	14,5	7700	163,6	11,1	8,0
B2-VILCYC4	137,5	14,5	14300	164,4	12,4	9,0

Tableau IV.7

Afin de pouvoir extraire un coefficient de ce tableau, nous allons faire l'**hypothèse suivante** : nous considérons que les ampères-heures remis par freinage récupératif sont consommés très rapidement dès la reprise de la décharge. Ils ne permettent pas de faire gagner de la capacité à la batterie. Par contre, le temps pendant lequel les freinages et les pauses ont lieu permet à l'électrolyte de diffuser à l'intérieur de la matière active et c'est donc de ce temps que dépend le gain de capacité constaté.

S'appuyant sur cette hypothèse, nous avons essayé de modéliser l'évolution du gain de capacité en pour-cent en fonction du temps cumulé des freinages récupératifs et des pauses.

Après calcul nous avons obtenu une bonne approximation par une équation en exponentielle négative "bornée" faisant apparaître une pseudo constante de temps τ . Le graphe ci-dessous résume les résultats de ces calculs.

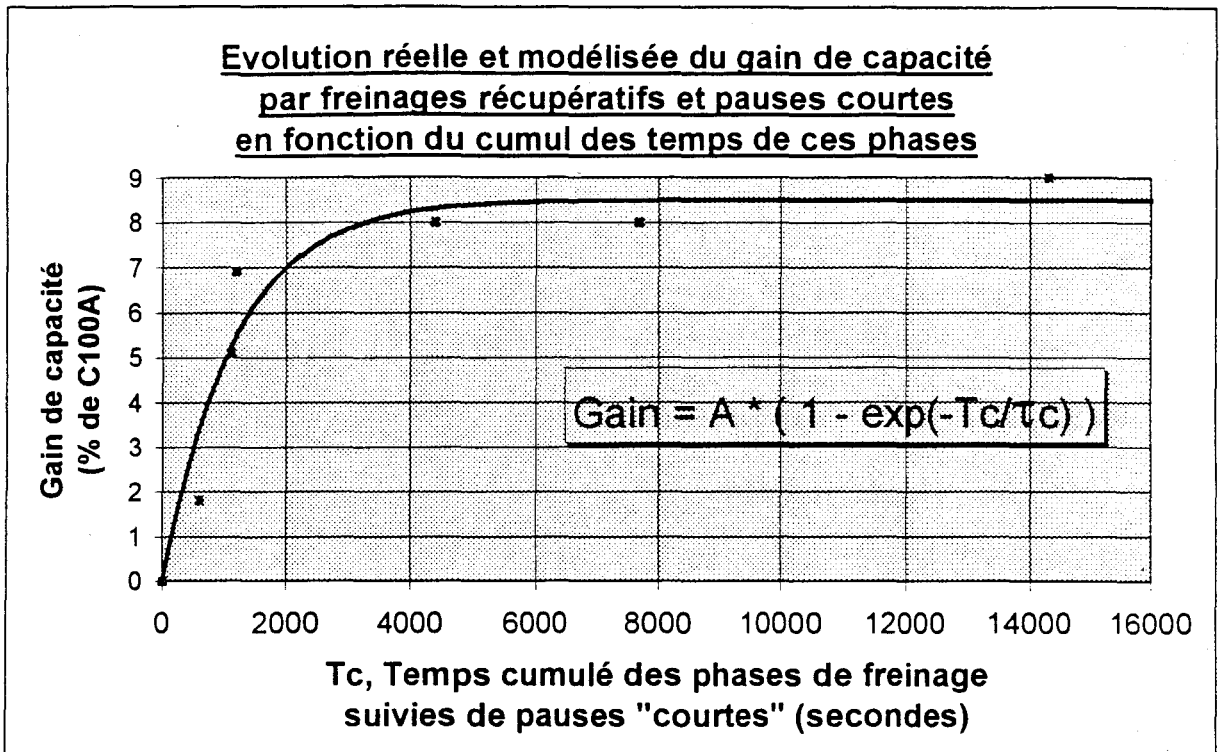


Figure IV.15

De ces essais nous tirons donc un coefficient de gain de capacité apporté par des périodes de freinage avec pauses courtes dans une décharge à 100 A, sous la forme :

$$\beta(T_c) = A * \left(1 - \exp \left[- \frac{T_c}{\tau_c} \right] \right) \quad (\text{IV.12})$$

T_c est le temps cumulé des freinages récupératifs et des pauses courtes (< 1 min.).
 β est donné en pour-cent de la capacité 100 A.

A et τ_c sont des paramètres expérimentaux. Les calculs ont donné pour A et τ_c les valeurs suivantes : 8,5 et 1166.

Concrètement, Q_f ampères-heures remis par freinage récupératif et T_c secondes passées pendant les phases de freinage et de pauses courtes permettent de récupérer $Q_{f,\text{total}}$ ampères-heures dans une décharge à 100 A donnés par :

$$Q_{f,\text{total}} = Q_f + \beta(T_c) * C_{100A} \quad (\text{IV.13})$$

La quantité Q_f peut être facilement calculée dans l'intégrale modulée en admettant un coefficient $\alpha(i) = 1$ pour $i < 0$.

Par contre, la quantité d'énergie récupérée $\beta(T_c) * C_{100A}$ est à déduire de $Q_{perdue \text{ à Iréf}}$. Le calcul de $Q_{perdue \text{ à Iréf}}$ devient donc :

$$Q_{perdue \text{ à Iréf}} = \int_0^t [\alpha(i(t)) * i(t)] dt - \beta(T_c) * C_{initiale \text{ à } 100A} \quad (IV.14)$$

avec T_c le temps cumulé des phases de freinage récupératif et des pauses inférieures ou égales à 1 minute, et $\alpha(i) = 1$ pour $i < 0$.

IV.4.2. Les pauses longues

Nous avons traité ce phénomène à part du précédent car il ne peut rentrer dans une approche statistique puisque ces pauses longues sont ponctuelles et non étalées sur toute la décharge.

Le nombre et la longueur de ces pauses sont bien sûr aléatoires en utilisation réelle, mais nous ne pouvons évaluer l'effet de toutes les longueurs et toutes les fréquences de pauses possibles. Aussi avons nous décidé d'évaluer de manière prioritaire les gains énergétiques apportés par une pause de 2 heures correspondant, par exemple, à une pause déjeuner, et par une pause de 24 heures pour les décharges étalées sur plusieurs jours.

Comme l'emplacement de la pause est ponctuel, nous avons choisi de la simuler en trois endroits de la décharge, à 25%, 50% et 75% de décharge. Il n'était pas nécessaire à nos yeux d'effectuer le test à 100% de décharge car le cas réel correspondant est plutôt rare.

Chaque essai étant toujours précédé d'un cyclage de stabilisation de la capacité à 100 A (C_{100A}), nous avons fait subir, au monobloc B1, les profils de décharge suivants :

- décharge d'une quantité Q d'ampères-heures à 100 A
avec Q = 25 % de C_{100A}
50 % de C_{100A}
75 % de C_{100A}
- pause de 2 heures ou 24 heures
- décharge à 100 A jusque 1.7V/élt

Soit en tout six décharges relatives aux pauses longues. Les résultats de ces six décharges sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Bloc-Essai	B1-P1	B1-P2	B1-P3	B1-P4	B1-P5	B1-P6
Capacité 100 A juste précédente (Ah)	131	130.5	130.5	129	126.8	132.3
Ah déchargés à 100 A pendant la 1ère phase	32.5	65	97.5	32.5	65	97.5
% de décharge atteint à la première phase	25	50	75	25	50	75
Temps de pause (heures)	2	2	2	24	24	24
Ah déchargés total	133	133.6	134.9	136.2	137.7	147.6
Gain (Ah)	2	3.1	4.4	7.2	10.9	15.3
Gain %	1.5	2.4	3.4	5.6	8.6	11.6

Tableau IV.8

Avec ce tableau, on vérifie le comportement qualitatif dont nous avons parlé dans le deuxième chapitre, à savoir que plus la pause est longue et intervient près de la fin de décharge, plus la récupération d'énergie est importante.

En partant du fait qu'une pause de 0 heure apporte un gain d'ampères-heures nul, nous pouvons tracer l'évolution du gain en fonction du temps de pause et du pourcentage de décharge auquel la pause a lieu (voir ci-dessous) et la modéliser à l'aide d'exponentielles négatives "bornées".

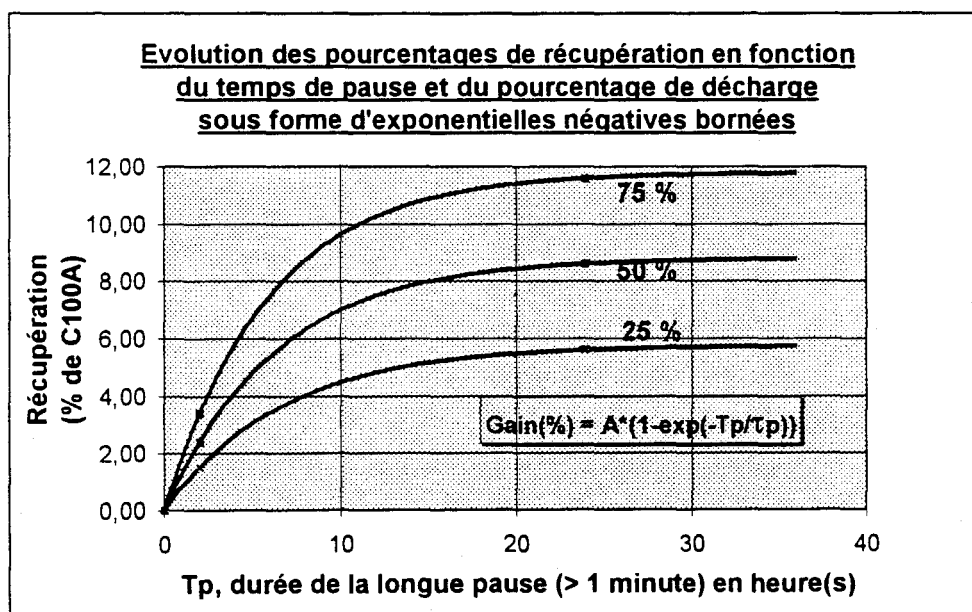


Figure IV.16

Afin de pouvoir programmer l'algorithme facilement, nous proposons de modéliser de façon mathématique l'évolution des coefficients A et τ_p en fonction du pourcentage de décharge. Les deux graphes ci-dessous montrent les évolutions réelles et modélisées des deux coefficients.

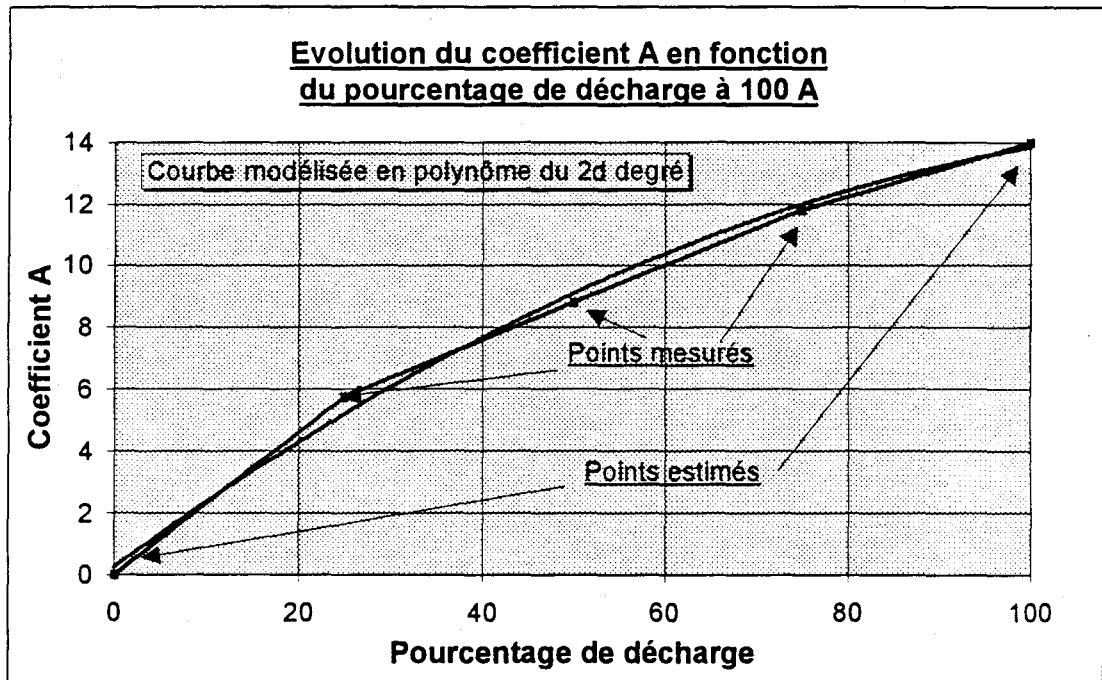


Figure IV.17

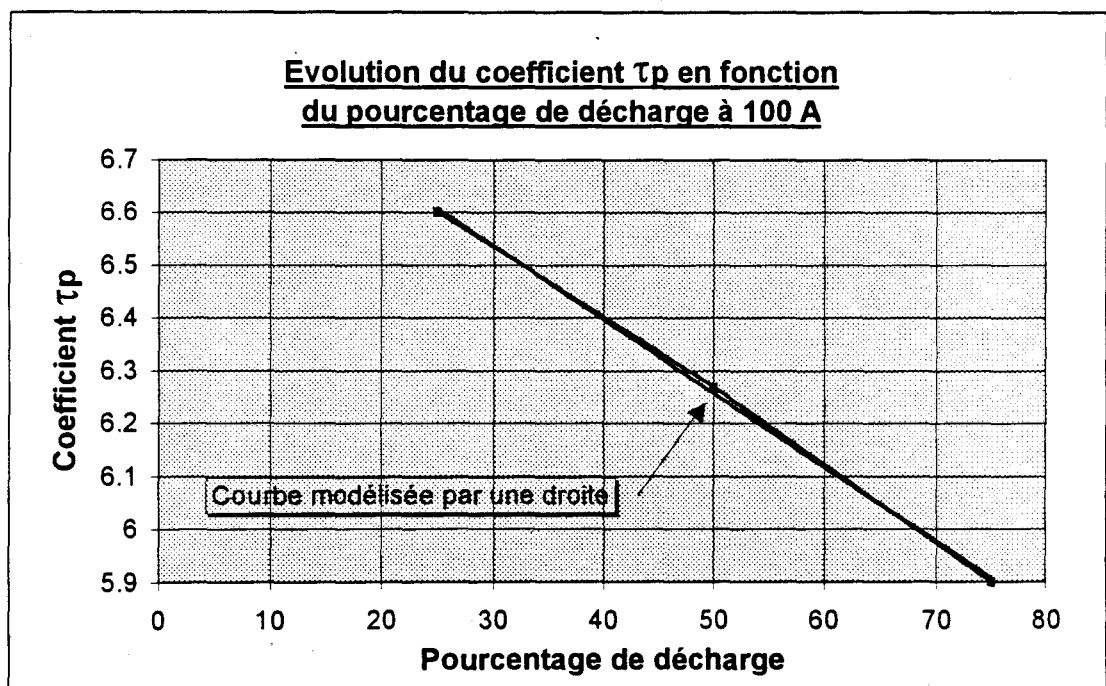


Figure IV.18

Nous avons volontairement estimé des points pour le coefficient A sans en ajouter pour le coefficient τ_p . Nous traduisons par là mathématiquement le fait qu'une pause de 0 heure procure un gain d'énergie nul, quelque soit le pourcentage de décharge, et que le gain d'énergie des pauses longues est borné. Nous obtenons donc deux équations mathématiques simples, fonctions du pourcentage de décharge P, sous la forme :

$$A(P) = a * P + b * P^2 \quad (IV.15)$$

et

$$\tau_p(P) = c * P + d \quad (IV.16)$$

Les calculs ont donné comme valeurs numériques :

$$a = 0.226 \quad b = -0.000879 \quad c = -0.014 \quad d = 6.956$$

Nous tirons donc de ces résultats un coefficient $\chi(P, T_p)$, exprimé en pour-cent, traduisant le gain d'ampères-heures procuré par des longues pauses en fonction de T_p , la durée de la longue pause et de P, le pourcentage de décharge à 100 A.

Concrètement, pour une pause longue de durée T_p à P pour-cent de décharge à 100 A, il faut retirer à la quantité déchargée à 100 A, Q_{pl} ampères-heures égaux à :

$$Q_{pl} = C_{100A} * \chi(P, T_p) \quad (IV.17)$$

avec

$$\chi(P, T_p) = A(P) * \left[1 - \exp\left(-\frac{T_p}{\tau_p(P)}\right) \right] \quad (IV.18)$$

Quand plusieurs pauses longues s'enchaînent, il faut tenir compte d'un maximum de récupération correspondant à un maximum de saturation de la matière active en $PbSO_4$ vis à vis d'une décharge à 100 A. Par expérience, un monobloc 6 RGT 180 peut délivrer à 100 A près de 20% de capacité en plus avec les effets cumulés de plusieurs pauses (longues et courtes). Nous considérerons donc que les ampères-heures récupérés par plusieurs longues pauses s'ajoutent avec une limite de récupération à 20%.

Par ailleurs, si deux très longues pauses se suivent à quelques pour-cent de décharge d'intervalle, leurs effets ne sont pas forcément à cumuler puisque la deuxième pause longue bénéficie de la large récupération de la première pause. Nous n'en tiendrons pas compte dans notre algorithme en considérant que ces cas sont plutôt rares.

L'introduction de ce coefficient récupérateur dans l'algorithme n'est pas aisée. Nous ne pouvons, en effet, ajouter simplement ce terme aux autres termes constituant $Q_{perdue \text{ à Iréf}}$ et ce pour une raison évidente : nous avons déjà tenu compte dans l'algorithme des cas de récupération d'énergie dus aux courants inférieurs à 100 A et aux pauses courtes, dans $\alpha(i)$ et $\beta(T_c)$. Nous ne pouvons donc pas ajouter une récupération supplémentaire sans tenir compte de celles déjà subies par la batterie.

Le problème est que ces récupérations s'ajoutent toutes de façon totalement non linéaire.

N'ayant pas effectué assez d'essais pour déterminer les effets combinés de ces récupérations dans une décharge véhicule électrique, nous proposons l'**hypothèse suivante** :

Nous allons tenir compte, dans le calcul de la récupération d'énergie, du maximum des deux valeurs $\beta(T_c) * C_{100A}$ et $\sum(\chi(P_{décharge}, T_p) * C_{100A})$; autrement dit, nous considérons que ce qui est récupéré par freinages et pauses courtes ne s'ajoute pas à ce qui est récupéré par pauses longues mais que **ces deux types de récupération contribuent au même gain énergétique**.

En effet, dans notre détermination d'un coefficient de pause longue, nous n'avions pas inséré de pauses courtes dans les décharges. Or, en réalité, une pause longue survient souvent au milieu de pauses courtes. L'effet d'une pause longue dans une décharge réelle est donc moins important que celui que nous avons déterminé expérimentalement à cause de la récupération des pauses courtes. Pour tenir compte de ces récupérations complémentaires et non supplémentaires, nous avons décidé de ne pas changer nos coefficients expérimentaux mais de prendre comme valeur de récupération le maximum des deux valeurs.

Concrètement, si une décharge contient beaucoup de pauses courtes et une petite pause longue, l'effet de la pause longue sera quasi nul comparé à celui des pauses courtes. De même, dans une décharge comprenant peu de pauses courtes et une ou plusieurs longues pauses, ce sont les effets des longues pauses qui vont permettre la plus grande récupération.

Avec cette hypothèse certes brutale mais néanmoins meilleure que l'addition pure et simple des effets, nous obtenons la formulation suivante de la quantité d'ampères-heures équivalents perdus à 100 A :

$$Q_{perdue \text{ à Iréf}} = \int_0^t [\alpha(i(t)) * i(t)] dt - \text{MAX} \left[\beta(T_c) * C_{100A}, \sum_{\text{pauses longues}} [\chi(T_p, P_{décharge}) * C_{100A}] \right]$$

(IV.19)

avec le dernier terme limité à 20% de C_{100A} .

IV.4.3. Insertion de ces coefficients dans l'algorithme et tests sur des décharges dynamiques avec freinages récupératifs et pauses

Les coefficients déterminés dans les deux derniers paragraphes ont été introduits dans l'algorithme.

Cette nouvelle version de l'algorithme, censée être par la récupération moins pessimiste que la version précédente, a été testée sur les dernières décharges dynamiques réelles (DR4 et DR5) contenant du freinage récupératif et des pauses courtes, mais aussi sur deux autres décharges étalées sur une journée (DR6) ou sur deux jours (DR7), comprenant donc des pauses longues de 10 minutes, de 2 heures et d'environ 17 heures.

Les résultats du comportement du nouvel algorithme sur ces décharges sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Bloc-Décharge	B2-DR3 (ville)	B2-DR4 (nationale)	B2-DR5 (ville / 1 journée)	B2-DR6 (ville / 2 jours)
C(100A) juste précédente (Ah)	141	143	141	141
Courant moyen (A)	28	98	19	6
Courant moyen calculé sans tenir compte des pauses (A)	42	103	44	45
Capacité Courant Moyen (Ah)	192,6	144	201,7	215,9
Cumul total des Ah échangés	163,6	136,5	160,3	171,8
Ah chargés par freinage	19,1	6	17,9	18,1
% algorithme Iréf = Imoyen en tenant compte des pauses dans le calcul de Imoyen	85	94,8	79,5	79,6
% algorithme Iréf = Imoyen sans tenir compte des pauses dans le calcul de Imoyen	91	96,7	90,1	96,7
% algorithme Iréf = 100 A avec C(100A)/C(I) comme coefficient d'équivalence	111,6	107,9	116,9	118,8
% algorithme Iréf = 100 A avec nos coefficients d'équivalence (1ère version)	107,3	98,7	106	113,8
% algorithme Iréf = 100 A avec nos coefficients d'équivalence (2ème version)	98,8	95,7	97,6	98,4

Tableau IV.9

Bilan de ces quatre décharges :

Notre deuxième version de l'algorithme prend mieux en compte les phénomènes de récupération de capacité au travers des phases de freinage récupératif suivi de pauses courtes, et lors des longues pauses en cours de décharges.

Sur ces quatre décharges dynamiques, nous pouvons constater la nette amélioration de notre méthode de calcul de l'état de charge vis à vis des deux principales autres méthodes très utilisées jusqu'ici. Nous obtenons des erreurs inférieures à 5 %, ce qui est tout à fait acceptable compte tenu de la grande difficulté à appréhender le comportement fortement non linéaire d'une batterie en véhicule électrique.

L'erreur la plus importante se situe sur la décharge "nationale" avec - 4,5 %. Elle peut s'expliquer par la détermination du coefficient d'équivalence $\alpha(150A \rightarrow 100A)$ qu'il reste à améliorer pour les cas de roulage sur nationale.

IV.5. Conclusion

Ce chapitre a donc proposé au lecteur une définition de l'état de charge d'une batterie de véhicule électrique en se basant sur un courant de référence fixe lié aux performances du véhicule en ville (100 A pour le véhicule Volta étudié dans notre cas). L'état de charge est donné à l'instant t sous la forme du rapport entre la quantité d'ampères-heures perdue vis à vis d'une fin de décharge au courant de référence et la capacité initiale disponible à ce même courant de référence.

$$P_{\text{décharge}} = \%_{\text{état de décharge}} = \frac{Q_{\text{perdue à } I_{\text{réf}}}}{C_{\text{initiale à } I_{\text{réf}}}} * 100$$

A l'aide d'une analyse statistique de quelques décharges réelles véhicule électrique, nous avons ciblé les conditions des essais à réaliser.

Par ces essais nous avons obtenu un algorithme mathématique pour le calcul de la quantité d'ampères-heures perdue vis à vis de la fin de décharge au courant de référence. Elle s'exprime sous la forme :

$$Q_{\text{perdue à } I_{\text{réf}}} = \int_0^t [\alpha(i(t)) * i(t)] dt -$$

$$\text{Maximum} \left[\beta(T_c) * C_{I_{\text{réf}}}, \sum_{\text{nombre de pauses longues}} [\chi(P, T_p) * C_{I_{\text{réf}}}] \right]$$

(IV.15)

avec :

- $\alpha(i)$: coefficient d'équivalence des ampères-heures réellement déchargés vers les ampères-heures équivalents déchargés "virtuellement" à $I_{\text{réf}}$.
- β : coefficient de gain énergétique apporté par le cumul des freinages récupératifs et des pauses courtes (< 1 minute) de durée T_c .
- χ : coefficient de gain énergétique apporté par une pause longue (> 1 minute) de durée T_p arrivant à un pourcentage de décharge P
- $C_{I_{\text{réf}}}$: capacité initiale du monobloc à $I_{\text{réf}}$ (100A dans notre cas)

Les tests de cet algorithme sur des décharges réelles reproduites et contrôlées en laboratoire ont donné une imprécision inférieure à 5 %. Faute de temps nous n'avons pu tester l'algorithme sur plus de décharges en laboratoire. Nous nous appuyons sur ces quelques décharges véhicules électriques reproduites sur banc que nous jugeons représentatives d'une grande partie des cas réels pour affirmer l'amélioration apportée par notre approche « statistique » du problème.

Cet algorithme donne donc d'assez bons résultats en laboratoire sous conditions contrôlées (température, "précyclage" de stabilisation de la capacité à 100 A, charges complètes, etc.). Il reste à transposer cet algorithme pour qu'il puisse être utilisé en véhicule électrique, c'est le sujet du cinquième et dernier chapitre de ce mémoire.

Chapitre 5

Adaptation de l'Algorithme Laboratoire aux Conditions Réelles d'Utilisation

A ce niveau de l'étude nous possédons un algorithme coulométrique d'état de charge d'une batterie plomb acide étanche en utilisation véhicule électrique donnant d'assez bons résultats en laboratoire sous conditions contrôlées. La dernière étape est l'adaptation de cet algorithme aux conditions réelles d'utilisation c'est à dire à bord d'un véhicule électrique.

Ce *cinquième et dernier chapitre* se décompose en trois parties.

La première partie rapporte l'évaluation de l'algorithme développé au quatrième chapitre en conditions réelles d'utilisation à bord d'un véhicule électrique sur des cycles consécutifs. Elle fait ressortir l'influence de deux paramètres nouveaux : la température et les décharges précédentes

La deuxième partie propose une réflexion sur ces deux paramètres avec pour objectif l'insertion de deux coefficients correctifs de la capacité de référence.

Des voies d'investigation sur la généralisation de l'algorithme concluent ce dernier chapitre. Nous y proposons des idées de prise en compte du reste des conditions réelles pour une insertion de l'algorithme dans le système intelligent de gestion, en montrant ainsi les améliorations possibles et les suites envisageables de l'étude.

V.1. Evaluation de l'algorithme d'état de charge en conditions réelles d'utilisation, à bord d'un véhicule électrique

L'évaluation de l'algorithme en laboratoire sur les monoblocs B1 et B2 nous a révélé une imprécision tout à fait acceptable inférieure à 5 % sous conditions contrôlées. Tester la méthode en conditions réelles nous a alors semblé une suite logique et indispensable. Nous avons donc utilisé l'algorithme à bord d'un véhicule électrique comme indicateur de l'état de charge de la batterie. Nous savions que cette transposition au cas réels d'utilisation apportait tout un ensemble de nouveaux paramètres et risquait d'entraîner la dérive de l'algorithme. Notre objectif était donc d'évaluer l'importance de cette éventuelle dérive et d'en définir les principales causes.

V.1.1. Le but et le principe d'essais embarqués

Pourquoi effectuer une évaluation de l'algorithme à bord d'un véhicule électrique ?

Nous voulions, d'une part, mettre au point et valider un banc d'expérimentation embarqué permettant de tester un algorithme en roulant, et d'autre part, confirmer, sur des cas réels, la relativement bonne précision obtenue sur des tests en laboratoire avec reconstitution de profils réels sur des convertisseurs dynamiques (Digatron).

Comment effectuer l'évaluation de l'algorithme à bord du véhicule électrique ?

Le principe des essais consistait à embarquer la version de l'algorithme développée dans le quatrième chapitre et à l'utiliser en roulant comme jauge d'énergie jusqu'à atteindre le 100% de décharge réel sur le monobloc le plus faible. Ce point devait servir de référence pour évaluer l'indication de l'algorithme.

V.1.2. La mise en place matérielle des essais embarqués

Le véhicule et les monoblocs utilisés

Comme nous l'avons dit et justifié dans les troisième et quatrième chapitres, chaque type de véhicule électrique doit avoir son propre algorithme d'état de charge, donc sa jauge d'énergie, établi en fonction de ses batteries et de ses caractéristiques mécaniques et

électriques. Fidèles à cette affirmation, nous avons donc testé l'algorithme sur le véhicule à partir duquel nous avons effectué l'étude, à savoir le **véhicule Volta 1^{ère} génération**, prêté par la ville de Douai.

L'état de vieillissement des monoblocs du véhicule étant mal connu à la période de ces essais réels, nous avons préféré ne pas évaluer notre algorithme sur eux. Afin de limiter le nombre de paramètres nouveaux apportés par cette transposition de l'étude en conditions réelles, **nous avons décidé d'insérer dans le véhicule**, à la place du monobloc d'origine le plus faible, **un monobloc qui nous avait servi en laboratoire, en l'occurrence le monobloc B2 (c.f. chapitre 4)**, et d'évaluer l'algorithme sur ce dernier.

L'acquisition et le traitement des données embarqués

L'instrumentation du véhicule et donc du monobloc testés est une condition importante au bon déroulement de nos essais. Ces tests quantitatifs nécessitent de la précision et de la fiabilité dans les mesures et dans les calculs. Comme, de plus, nous évaluons une méthode coulométrique basée sur l'obtention d'une grande valeur par le cumul de petites valeurs, toute imprécision de mesure ou de calcul risque d'entraîner une erreur finale importante. Nous devons donc utiliser un matériel relativement performant afin de s'affranchir de ces problèmes.

Pour le traitement des données et la visualisation des résultats pour le conducteur, nous avons choisi le logiciel **Labview**. Il propose une programmation graphique aisée, de nombreuses facilités de calcul mathématique et une présentation des données sous formes d'icônes et d'indicateurs. Installé sur un **ordinateur portable Pentium 90 MHz**, il nous assurait un calcul fiable et rapide directement lié aux performances de l'ordinateur.

Pour effectuer l'acquisition des données, nous avons complété ce logiciel de la société *National Instruments* par du matériel totalement compatible, proposé également par cette société. Nous nous sommes donc munis d'une **carte d'acquisition 16 bits AT-MIO-16XE-50**, placée dans l'entrée PCMCIA de l'ordinateur portable. Cette carte reliée à un bornier de connexion par l'intermédiaire d'un câble, permet, entre autres, l'acquisition de 16 voies analogiques référencées à un même point ou de 8 voies analogiques différentielles. Nous avons donc utilisé deux voies différentielles, l'une pour mesurer, à l'aide d'un **shunt (250A/100mV)**, le courant traversant les monoblocs et l'autre pour surveiller la tension du monobloc testé. Nous n'avons pas effectué l'acquisition de la température, grandeur dont l'évolution relativement lente nous permettait une entrée manuelle dans l'algorithme.

Nous avons évalué la précision des mesures et des calculs sur des sommations simples d'ampères-heures échangés par la batterie avec une fréquence d'échantillonnage d'une mesure

par seconde. Nous avons comparé les résultats des calculs effectués par Labview à ceux effectués par deux appareils de référence, l'IBC également installé à bord du véhicule et échantillonnant à 5 Hz, et une centrale d'acquisition DT505 programmée avec une prise de mesure par seconde. Avec moins de 0.1 Ah de différence sur 160 Ah échangés (soit moins de 0.1% d'erreur), nous avons validé notre instrumentation pour les essais.

V.1.3. La version testée de l'algorithme

L'utilisation du monobloc en conditions réelles introduit de nouveaux paramètres qui vont influencer sur ses performances et dont nous devons donc tenir compte dans l'algorithme :

- l'évolution de la capacité de référence et des autres paramètres de l'algorithme ($\alpha(i)$, $\beta(T_c)$ ou $\chi(P, T_p)$) entre chaque cycle,
- la température ambiante.

Afin de se rapprocher des conditions réelles d'utilisation, nous avons réalisé un essai par jour, supprimant par conséquent les précyclages de stabilisation de la capacité de référence à 100 A. Lors des essais en laboratoire, nous stabilisons cette capacité avant chaque essai quantitatif. Pour ces essais réels, nous disposons de la capacité stabilisée à 100 A du monobloc B2 juste avant la première décharge. Comme nous n'avons pas quantifié l'évolution de cette capacité de référence, **nous l'avons gardé constante entre chaque cycle** pour nos essais. De même, nous avons fait l'hypothèse que les autres coefficients de l'algorithme ($\alpha(i)$, $\beta(T_c)$ ou $\chi(P, T_p)$) restaient également constants entre chaque cycle.

La température ambiante dans laquelle travaillent les monoblocs en véhicule doit également être prise en compte. Contrairement aux essais du 4^{ème} chapitre où le bain thermostaté permettait de conserver la batterie dans une température ambiante comprise entre 24°C et 26°C, les monoblocs subissent en véhicule des variations importantes de température (notamment lors des stockages nocturnes à l'extérieur). Il faudrait donc en tenir compte dans notre jauge embarquée. Pour ces essais **nous avons choisi de ne pas tenir compte de l'effet température** et ce pour la raison suivante : le monobloc que nous insérons dans le véhicule est conditionné au départ dans le bain thermostaté et subit après chaque décharge, une recharge en laboratoire, à nouveau dans le bain thermostaté. Le monobloc ayant une inertie thermique relativement importante vis-à-vis de la température ambiante, **nous considérons, au moins pour les essais sans pause longue, que sa température varie peu autour de 25°C.**

Nous avons donc programmé et testé la version de l'algorithme développée au 4^{ème} chapitre, sans apporter de modification concernant l'évolution de la capacité de référence ou de la température. En soumettant l'algorithme aux nouvelles contraintes apportées par une étude en conditions réelles, nous avons voulu constater l'évolution de sa précision, la comprendre et l'expliquer, afin de proposer des solutions correctives si nécessaire.

V.1.4. Le déroulement des essais

Chaque essai consistait en une décharge « complète » en roulage suivi d'une recharge complète.

A partir de l'état pleinement chargé, nous avons roulé avec le véhicule Volta, sur des parcours prédéfinis, en utilisant notre algorithme pour indiquer l'état de charge de la batterie, en l'occurrence du monobloc B2. Nous suivions sa tension jusqu'à atteindre la tension d'arrêt au courant de référence (5.1 Volts à 100A dans notre cas) représentant le **100% réel** d'état de décharge, point qui servait alors de référence pour évaluer l'algorithme. Nous n'avons pas eu de difficulté à atteindre le 100% car le monobloc B2 était le plus faible de tous les monoblocs du véhicule.

Une fois le 100% atteint, nous rentrions au laboratoire à allure réduite pour remettre en charge les monoblocs en vue de l'essai suivant. Cette recharge posait toutefois un problème. Le chargeur embarqué du véhicule recharge la batterie suivant un profil de base « IU », identique à celui utilisé dans nos essais laboratoire, mais en régulant sur la tension totale de la batterie. Comme, dans ce cas, le monobloc B2 risquait de subir une recharge différente de celle utilisée pendant nos tests du quatrième chapitre, nous avons préféré sortir le monobloc du véhicule, à chaque fin de décharge, pour le recharger dans le bain thermostaté en laboratoire suivant le profil voulu. Cette manipulation obligeait, en retour, de remettre un monobloc dans le véhicule pour permettre aux autres monoblocs de se recharger. Des essais pourraient s'envisager ultérieurement en laissant le monobloc dans le véhicule pendant la recharge.

Nous avons effectué **quatre essais consécutifs** (pas plus de 5 heures entre la recharge complète d'un essai et la décharge de l'essai suivant).

Les deux premiers (**Essai 1** et **Essai 2**) ont consisté à rouler en ville (vitesse limitée à 50 km/h) sans aucune pause longue.

Pour le troisième essai (**Essai 3**), nous avons mêlé roulage en ville et roulage sur

nationale (vitesse limitée à 90 km/h), toujours sans pause longue, avec une majorité de passages sur nationale.

Pour terminer (**Essai 4**), nous avons également alterné roulages en ville et sur nationale, avec, cette fois-ci, une majorité de kilomètres effectués en ville et en ajoutant des pauses longues (10 minutes, 1 heure et 15 heures).

V.1.5. les résultats des essais

Le conditionnement du monobloc B2 (voir chapitre 4) avec le précyclage de stabilisation à 100 % à 100 A dans le bain thermostaté à 25°C a donné une capacité initiale de **135 Ah**.

Les quatre décharges réelles avec recharges hors du véhicule ont donné les résultats rassemblés dans les synoptiques et le tableau récapitulatif V.1.

Pour résumer chaque essai, nous proposons, en effet, au lecteur, le synoptique de Labview dont nous nous servons sur l'ordinateur portable pendant les roulages. Il présente les valeurs mesurées et calculées au 100% de décharge réel obtenu sur route.

Le tableau suivant les synoptiques récapitule les informations principales apportées par ces quatre essais.

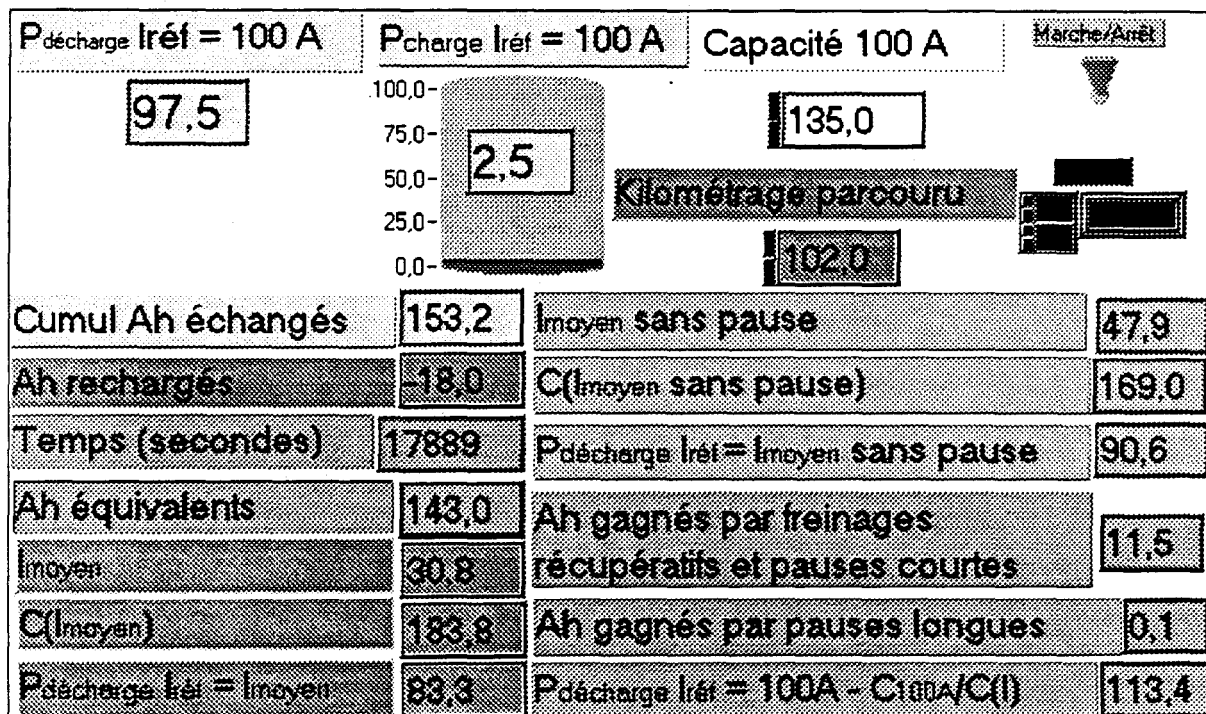


Figure V.1 Synoptique du roulage en zone urbaine sur une demi journée (**Essai 1**)

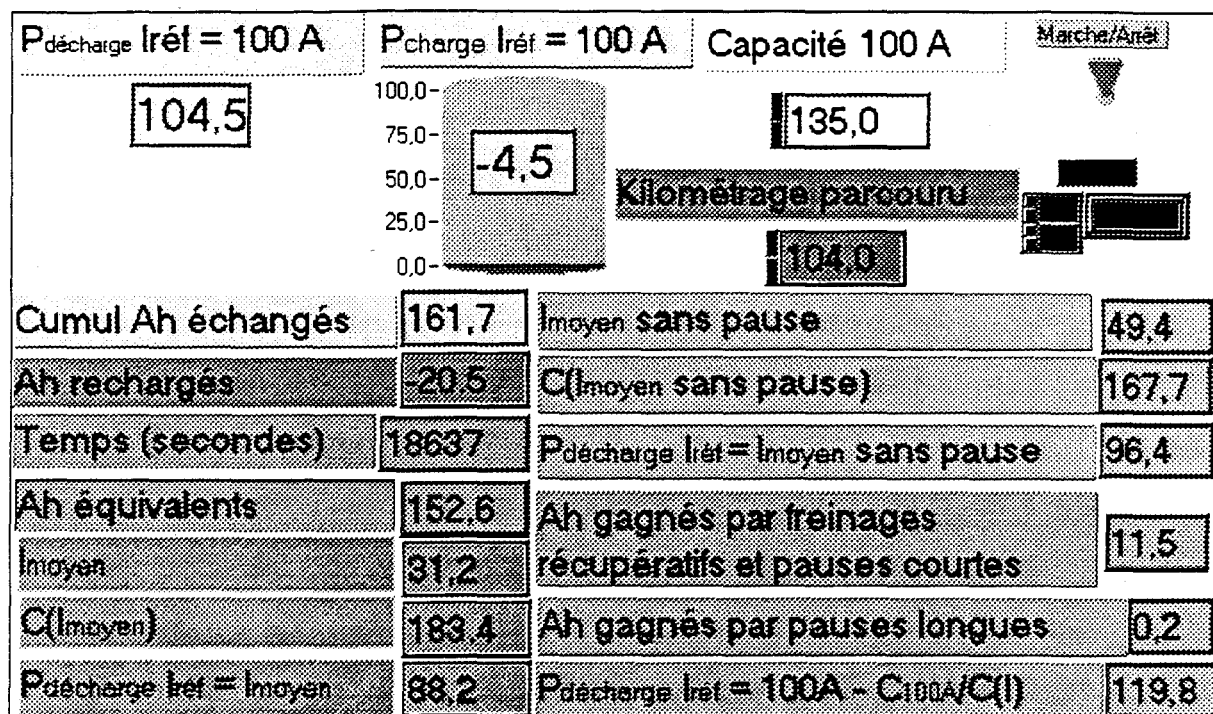


Figure V.2 Synoptique du roulage en zone urbaine sur une demi journée (Essai 2)

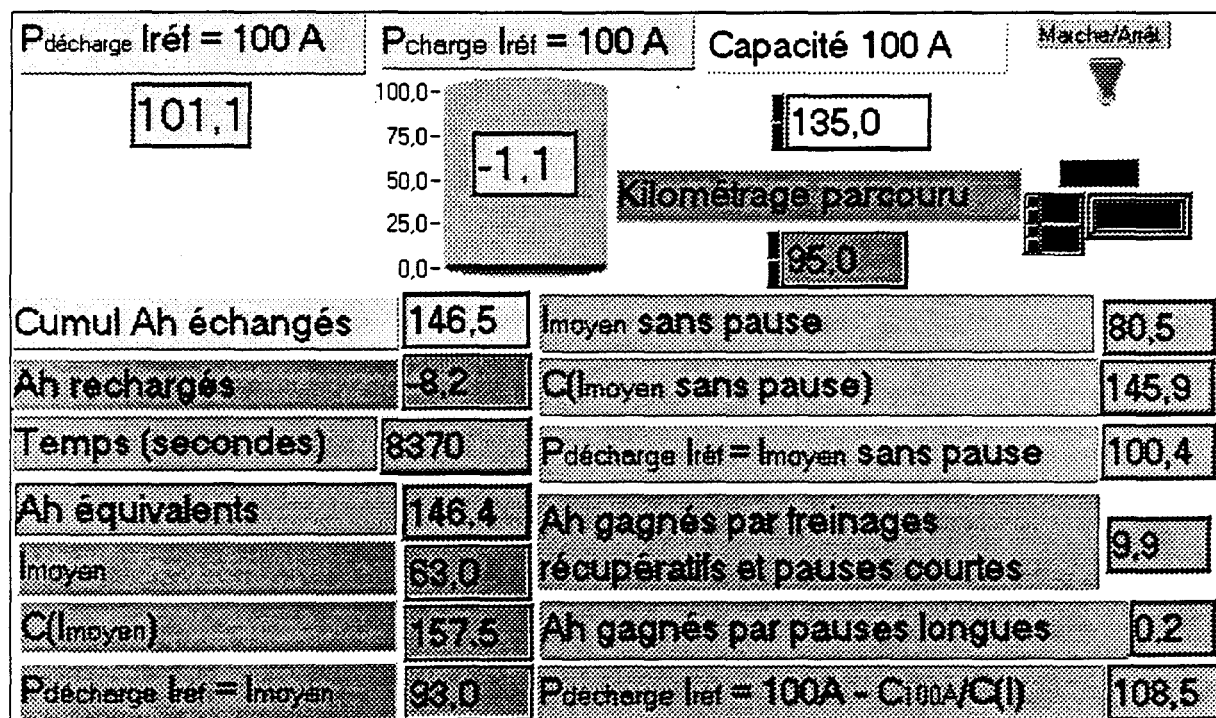


Figure V.3 Synoptique du roulage en zone suburbaine sur une demi journée (Essai 3)

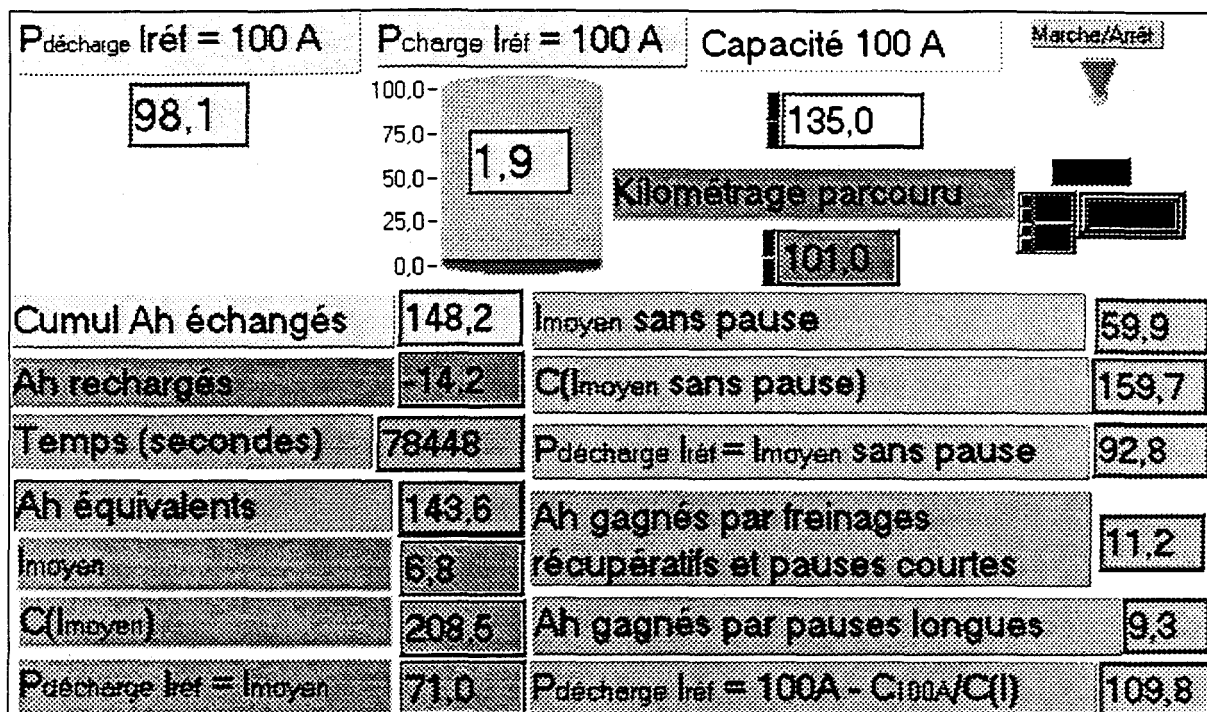


Figure V.4 Synoptique du roulage en zone suburbaine sur deux jours (Essai 4)

	Essai 1 (Ville 1/2 J)	Essai 2 (Ville 1/2 J)	Essai 3 (Ville+Nationale 1/2 J)	Essai 4 (Ville+Nationale 2 J)
Créférence à 100 A	135	135	135	135
Imoyen sans pause	48	49	80	60
Kilométrage parcouru	102	104	95	101
Cumul des Ah réellement échangés	153,2	161,7	146,5	148,2
Pdécharge Iréf = Imoyen	83,3	88,2	93	71
Pdécharge Iréf = Imoyen sans pause	90,6	96,4	100,4	92,8
Pdécharge Iréf = 100 A C100A/C(I)	113,4	119,8	108,5	109,8
Pdécharge Iréf = 100 A (α,β,χ)	97,5	104,5	101,1	98,1

Tableau V.1 Récapitulatif des quatre essais embarqués

V.1.6. L'analyse des résultats

Les résultats de ces quatre essais réels nous apportent plusieurs enseignements tout à fait intéressants.

Nous constatons tout d'abord que **parmi les méthodes coulométriques étudiées, notre algorithme reste celui qui donne les meilleurs résultats avec une erreur inférieure à 5%**.

L'algorithme basé sur le courant moyen est trop optimiste avec entre 7% et 19% d'erreur *par défaut*, l'erreur la plus grave pour la batterie.

Si on enlève les temps de pauses dans le calcul du courant moyen, l'erreur descend entre 0% et 10% *par défaut*, ce qui est meilleur mais encore trop optimiste.

L'algorithme ramenant les ampères-heures échangés à la capacité de référence à 100 A, par des coefficients d'équivalence calculés à partir des performances à courant constant, est quant à lui toujours trop pessimiste avec une erreur *par excès* entre 8% et 20%. Il ne risque pas d'entraîner de décharge profonde de la batterie mais ne permet pas son utilisation optimale.

Par ailleurs, l'analyse des résultats de notre algorithme **révèle une dérive légère de notre précision** au fil des cycles que nous pouvons expliquer comme suit.

Entre les deux premières décharges basées sur le même type de profil (ville), nous constatons un écart de l'indication de 7% vers l'excès, de 97,5% à 104,5%.

L'optimisme de la première décharge peut s'expliquer, comme celui observé dans les essais de la fin du quatrième chapitre, par une surestimation, dans l'algorithme, de la récupération d'énergie par diffusion lors des pauses et freinages récupératifs.

Le pessimisme de la deuxième décharge, quant à lui, révèle un gain d'énergie de la batterie entre les deux cycles. Le seul paramètre ayant changé entre ces deux cycles est l'absence de précyclage de stabilisation de la capacité de référence à 100 A pour le second. Il semble donc que cette capacité de référence ait augmenté entre les deux décharges. Nous pensons que ce gain s'explique comme suit : le courant moyen de 48 A du premier essai permet d'utiliser plus de matière active, avant d'atteindre la tension d'arrêt, qu'un courant de 100 A (153 Ah déchargés réellement au lieu de 135 Ah disponibles à 100 A) ; ceci aurait tendance à préconditionner favorablement la batterie pour l'essai suivant en augmentant sa capacité de référence par une sorte d' "effet mémoire". La batterie aurait tendance à fournir plus quand on lui soutire plus et vice versa.

Entre la deuxième et la troisième décharge, nous observons une baisse de 3,4% de l'indication de notre algorithme, de 104,5% à 101,1%. Elle semble confirmer l'écart de la fin du quatrième chapitre entre les décharges en ville et les décharges comprenant du roulage sur nationale. La valeur du coefficient $\alpha(150A \rightarrow 100A)$, a priori sous-estimée pour des profils « nationale », n'y est peut-être pas étrangère.

Enfin, la baisse de l'indication de 3%, de 101,1% à 98,1%, entre les deux dernières décharges est sans doute à attribuer à l'effet de la température. La dernière décharge contenait, en effet, des pauses longues, dont l'une durait 15 heures (repos nocturne). Durant cette longue pause, le monobloc B2 était resté dans le véhicule à l'extérieur et a donc subi une baisse nocturne sensible de la température ambiante donc de sa température de fonctionnement. Du fait de son importante inertie thermique, le monobloc a donc fini la décharge à une température de fonctionnement plus basse que les 25°C initiaux. Cette baisse de la température peut expliquer l'imprécision optimiste de la dernière décharge.

En conclusion de ces essais, nous pouvons être **satisfaits de la relative stabilité de l'algorithme** sur ces essais réels. En gardant la capacité de référence initiale constante et l'effet de température nul, **nous n'avons pas constaté d'importante dérive de notre indicateur**.

Ces quatre essais réels ne suffisent néanmoins pas à conclure sur une bonne reproductibilité de la précision à long terme mais ils ont permis de mettre à jour deux paramètres importants que nous pensons être **l'origine principale des dérives de l'algorithme : l'influence de la température et des décharges précédentes sur la capacité de référence à 100 A**. Nous proposons dans un premier temps, en effet, de considérer constants les autres paramètres de l'algorithme (α, β, χ) et de n'attribuer la dérive qu'à des variations de la capacité de référence.

V.2. Evolution de la capacité de référence en fonction de la température ou des décharges précédentes

Nous proposons dans ce paragraphe, une réflexion sur l'évolution de la capacité de référence de notre algorithme en fonction des deux paramètres que sont la **température** et les **décharges précédentes**.

V.2.1. l'effet de la température

La quantité d'énergie que peut délivrer une batterie plomb acide suit l'évolution de la température de ses constituants et plus particulièrement celle de son électrolyte. Ce phénomène est en effet attribué principalement à l'influence de la température sur la mobilité des ions de l'électrolyte. Plus celle-ci est élevée, plus la diffusion de l'acide au sein de la matière active est facilitée et permet de gagner en capacité.

Pour traduire ce phénomène dans l'algorithme, nous avons besoin d'un coefficient correctif de la capacité de référence en fonction de la température.

Des essais effectués par le laboratoire d'Oldham ont permis de déterminer un coefficient correctif pour tenir compte de la température dans notre version embarquée de l'algorithme.

Ces essais consistaient à décharger à plusieurs régimes et à plusieurs températures ambiantes, des batteries étanche du même type que celles que nous utilisons. Nous avons ainsi à disposition, l'évolution des capacités en 20 heures, en 3 heures et à un régime de 1,5 C₅ à des températures ambiantes allant de 0°C à 40°C.

Nous avons interpolé ces tableaux de résultats pour proposer un coefficient d'évolution de la capacité à 100 A du monobloc 6RGT180 en fonction de la température ambiante.

Le tableau ci-dessous donne les coefficients correctifs de la capacité d'un monobloc 6RGT180 par rapport à la température en prenant 25°C pour référence.

Température de la batterie	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C
Facteur correctif sur la capacité	0.82	0.86	0.89	0.94	0.97	1.00	1.01	1.03	1.04

Tableau V.2 Coefficients correctifs de la capacité d'un monobloc 6RGT180
en fonction de sa température

L'évolution de ces valeurs peut être traduite de façon mathématique par l'équation $y = ax^2 + bx + c$ avec $a = -0,000098$, $b = 0,0095$ et $c = 0,816$.

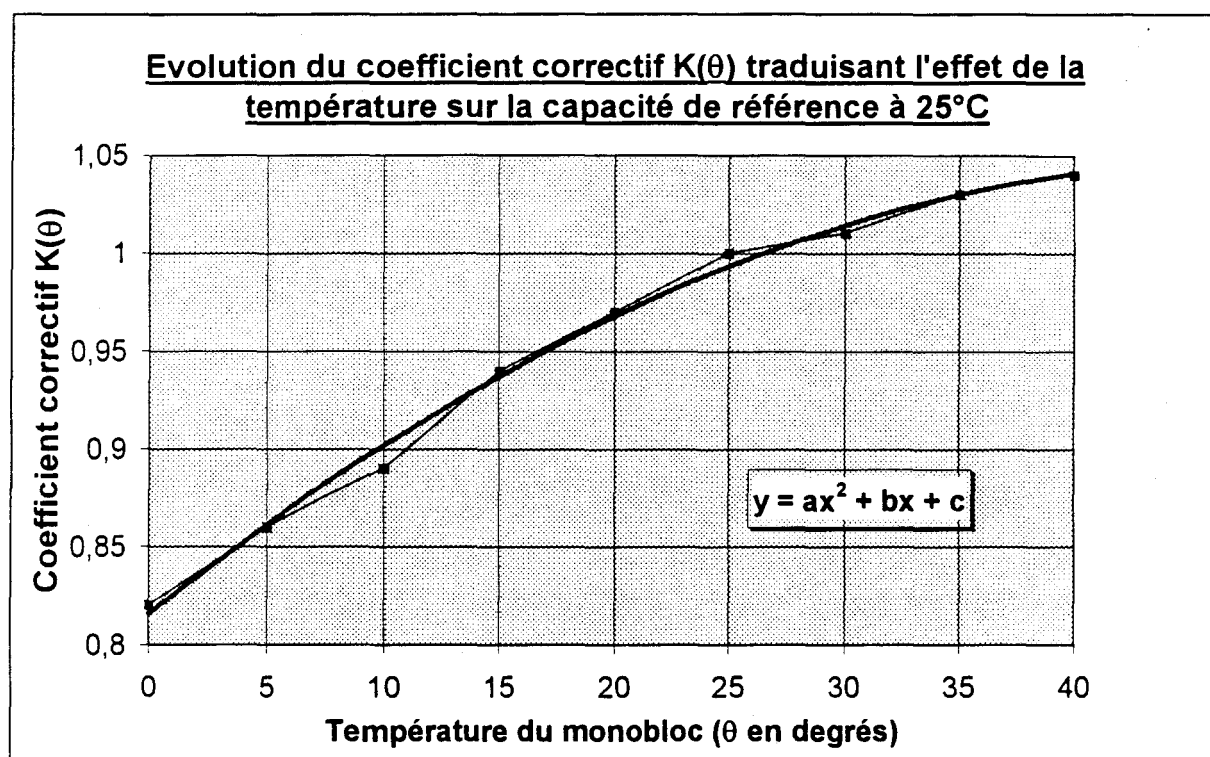


Figure V.5

L'accès à la température interne est possible à l'aide de fines sondes résistantes à l'acide. Seulement, pour des besoins de simplicité et de facilité de mise en place, **nous nous imposons la mesure de la température sur la paroi du monobloc**. Celle-ci reflète en grande partie la température interne avec un décalage temporel dû à l'inertie thermique des matériaux composant la batterie. Nous considérerons cette température paroi pour évaluer la température du monobloc, en prenant en compte sa moyenne sur les quelques heures précédentes.

Nous proposons donc de moduler la capacité de référence de l'algorithme par un coefficient multiplicateur traduisant les pertes et gains de capacité du monobloc à des températures différentes de la température de référence de 25°C.

La capacité corrigée s'écrit donc :

$$C_{\text{cycle } N, \theta} = C_{\text{cycle } N, 25^{\circ}\text{C}} * K(\theta) \quad (\text{V.1})$$

avec $K(\theta)$ donné par la figure V.5.

V.2.2. L'influence des décharges précédentes

La batterie a tendance à « s'habituer » à ce qu'on lui impose. Ce phénomène souvent appelé « effet mémoire » est constaté par tous ceux qui travaillent sur les accumulateurs. La littérature (voir chapitre 2) a déjà rapporté plusieurs expériences qualitatives pour le mettre en évidence.

Pour notre part, nous l'avons observé durant les nombreux essais de cette étude.

De quoi s'agit-il exactement ?

Nous avons remarqué, tout au long de notre étude, que l'évolution de la capacité à 100 A du cycle en cours dépendait des **quantité d'ampères-heures déchargés et courant moyen du cycle précédent**.

Nous avons constaté, en effet, que la capacité de la batterie au cycle "n" augmentait quand la quantité d'ampères-heures déchargée au cycle "n-1" était supérieure à la capacité de cette batterie au cycle "n-1", et que, de même, la capacité diminuait si la quantité d'ampères-heures déchargée lui était inférieure. Cette adaptation restait d'amplitude relativement faible. Néanmoins, plus la quantité d'ampères-heures déchargée était éloignée de la capacité, plus ce phénomène d'adaptation semblait "important".

Nous avons également remarqué que, pour une même quantité d'ampères-heures déchargée, si le courant moyen de la décharge en cours était plus faible que le régime auquel on voulait la capacité alors cette décharge augmentait la capacité au cycle suivant.

Ce phénomène apparaît comme une adaptation de la batterie à son utilisation. Nous en

proposons l'explication physique suivante.

Si l'on se réfère au modèle physico-chimique original du deuxième chapitre, nous pouvons essayer d'expliquer cette sorte d' "effet mémoire" par un **problème de diffusion de l'électrolyte dans la matière active**.

La matière active est considérée comme un agglomérat de grains microporeux formant une matrice macroporeuse. La valeur d'une capacité à un régime donné correspond à un état macroporeux donné de la matière active puisqu'elle est principalement déterminée par l'obstruction des pores de cette dernière.

Si l'on décharge une quantité d'ampères-heures inférieure à cette valeur de capacité, nous pensons que la région poreuse de la matière active n'ayant pas subi de transformation a tendance à se contracter sous l'effet des surpressions internes au monobloc et à la matière active. L'état macroporeux du cycle suivant est donc moins favorable et conduit à une baisse de la capacité.

Lors d'une décharge d'une quantité d'ampères-heures plus importante que la valeur de la capacité, nous pensons que l'augmentation de volume, causée par la transformation des molécules de sulfate de plomb en molécules de plomb ou de dioxyde de plomb, décontracte la matière active, l'aère, en améliorant sa macroporosité. La capacité du cycle suivant s'en trouve augmentée.

Nous pensons également que le même phénomène survient en fonction du courant moyen de la décharge en cours. Une décharge à faible courant privilégie, d'après le modèle, la transformation de la matière active sur une "profondeur" plus importante.

L'augmentation de volume des grains permet, dans ce cas, d'agrandir les pores sur une plus grande profondeur et entraîne un meilleur rendement de matière active au cycle suivant donc un gain de capacité.

A l'opposé, une décharge à fort courant concentre, d'après le modèle, les transformations de matière en surface de la plaque, en laissant l'intérieur peu actif. La contraction de la matière en profondeur entraîne alors une baisse de la capacité au cycle suivant.

Pour illustrer concrètement ce phénomène, nous rapportons, dans le tableau V.3 ci-dessous, quelques uns de nos essais mettant en évidence les variations suscitées. Nous donnons les évolutions de la capacité à 100 A entre la fin des précyclages de stabilisation du quatrième chapitre et le début des précyclages suivant les essais effectués. Nous donnons pour chaque cas

pris parmi nos essais quantitatifs :

- la capacité 100 A obtenue à la fin des précyclages précédent l'essai
- la quantité d'Ah déchargés pendant l'essai étudié
- la capacité à 100 A suivant l'essai, c'est à dire les Ah débités lors de la première décharge de précyclage pour l'essai ultérieur.

	Capacité à 100A du cycle n-1	Ah déchargés pendant l'essai au cycle n	Capacité à 100 A du cycle n+1	Gain (%)
1	139	155	141	1,4
2	137	141	138	0,7
3	136	134	135	-0,7
4	137	143	140	2,2
5	138	148	140	1,4
6	139	153	142	2,2
7	140	146	142	1,4
8	142	179	148	4,2
9	141	160	148	5,0
10	143	136	140	-2,1
11	141	160	148	5,0

Tableau V.3

Ces essais tirés des précyclages de stabilisation montrent bien des variations entre la capacité à 100 A précédant et celle suivant l'essai. Rappelons seulement que, grâce aux pauses de plus de 24 heures entre les décharges, nous avons éliminé les effets de la température et de la recombinaison et que les variations constatées ont donc une autre cause.

Ces explications basées sur le modèle proposé dans le chapitre 2, permettent de mieux comprendre les phénomènes observés. Cette approche reste qualitative. Des essais quantitatifs sont nécessaires pour tenir compte de ces évolutions dans un algorithme.

Pour obtenir la capacité de référence à 25°C au cycle "n", nous proposons de moduler comme ci-dessous la capacité de référence à 25°C du cycle "n-1" par un coefficient d'évolution

δ que l'on déterminerait par ces essais quantitatifs :

$$C_{\text{référence, cycle } n} = C_{\text{référence, cycle } n-1} * \delta \left(C_{\text{référence, cycle } n-1}, Ah_{\text{déchargés au cycle } n-1}, I_{\text{moyen, cycle } n-1} \right) \quad (V.2)$$

avec δ fonction des capacité de référence, quantité d'ampères-heures déchargés et courant moyen du cycle précédent.

V.2.3. Introduction des deux coefficients dans l'algorithme

L'introduction de ces deux coefficients dans l'algorithme apporterait sans doute des améliorations sur nos quatre essais réels.

Par ailleurs, il serait intéressant de continuer les essais réels, en se plaçant dans des cas plus fréquents tels que des alternances de décharges complètes et partielles ou des successions, prolongées ou non, de décharges partielles, dans des températures ambiantes variables, pour évaluer quantitativement l'influence *apparemment* faible du phénomène d'adaptation suscitée et celle de la température.

Il est certain que dans tous les cas une dérive est à attendre à long terme. Même si l'introduction des deux derniers coefficients améliorera sans doute la stabilité de la précision sur quelques cycles, voire quelques dizaines de cycles, le vieillissement irréversible de l'accumulateur finira certainement par créer des erreurs plus importantes.

Il serait donc intéressant d'évaluer ou de valider les deux coefficients introduits dans ce paragraphe, de prouver leur intérêt en montrant l'amélioration apportée sur la précision de l'algorithme sur quelques cycles, puis d'introduire le vieillissement irréversible de l'accumulateur afin d'essayer de valider notre calcul sur la durée de vie d'une batterie.

V.3. Généralisation de l'algorithme d'état de charge

Lors de l'élaboration de l'algorithme au quatrième chapitre et son évaluation dans ce cinquième chapitre, nous avons fixé des conditions d'étude pour réussir à obtenir des résultats quantitatifs exploitables dans un contexte bien défini.

Les divers coefficients de l'algorithme ont été trouvés à l'aide d'expériences à température donnée (25°C), sur des monoblocs d'un état de vieillissement peu avancé et conditionnés en cyclage à 100 A pour fixer la capacité de référence "juste précédente".

Les évaluations des divers algorithmes étudiés sur des décharges véhicule électrique reproduites en laboratoire ont également été effectuées sous les mêmes conditions.

Dans l'évaluation en conditions réelles, nous avons rencontré l'influence de nouveaux paramètres tels que la température ou l'effet d'une décharge sur sa suivante.

Afin d'insérer l'algorithme d'état de charge dans le système embarqué intelligent de gestion d'énergie, il est nécessaire d'aborder le reste des conditions réelles qui peuvent influencer. Notre objectif est ici de montrer que même si l'algorithme actuel ne prend pas en compte l'ensemble des conditions réelles, il existe des solutions ou des voies de recherche aux problèmes restants.

V.3.1. Le reste des contraintes non envisagées en laboratoire

Une batterie de véhicule électrique comporte N monoblocs (16 dans notre cas) le plus souvent connectés en série. L'algorithme doit tenir compte de la **diversité des monoblocs (performances, vieillissement, température)** pour l'indication de l'état de charge.

L'algorithme est destiné à indiquer l'état de charge de la batterie de son état neuf jusqu'à sa fin de vie. Il doit donc tenir compte du **vieillissement irréversible des monoblocs**

La recharge et le stockage de la batterie doivent aussi être pris en compte dans l'algorithme.

Nous détaillons ci-dessous chacun de ces trois problèmes en proposant les voies de résolutions auxquelles nous pensons.

V.3.2. la généralisation à N monoblocs en série

Les expériences du quatrième chapitre ont été menées sur trois monoblocs et nous leur avons généralisé les coefficients de l'algorithme trouvés pour les évaluations en simulation. En réalité, l'algorithme doit s'adapter à N monoblocs en série (N souvent supérieur à 8).

Pour tenir compte de l'hétérogénéité plus ou moins naturelle des monoblocs, il aurait été souhaitable d'effectuer les expériences du précédent chapitre sur un grand nombre de monoblocs extraits de fabrications différentes et de généraliser de façon statistique sur cet échantillon représentatif.

De même, des essais sur plusieurs monoblocs en série sur le même chargeur nous auraient rapprochés des conditions réelles mais l'hétérogénéité des performances et la recharge globale auraient rendu encore plus difficile l'interprétation des résultats (tensions d'arrêt différentes).

Aussi, nous proposons de généraliser l'algorithme en admettant, dans un premier temps, que **les coefficients de l'algorithme trouvés par essais sont identiques pour tous les monoblocs** et que seules les capacités de référence vont les différencier. Des expériences ultérieures nous permettront peut être d'adapter nos coefficients à cette hétérogénéité.

Par ailleurs, **l'algorithme donnera l'état de charge du monobloc le plus faible** que le système de gestion d'énergie embarqué aura situé dans la batterie. L'évolution des caractéristiques de tous les monoblocs devra être gardée en mémoire pour que l'algorithme vienne y puiser les informations nécessaires à chaque décharge.

V.3.3. le vieillissement irréversible de la batterie

Ce vieillissement est l'évolution minimale des performances des monoblocs dont il faut tenir compte tout au long de la vie de la batterie. En supposant que les coefficients de l'algorithme ne vieillissent pas, il nous faut déterminer l'évolution de la capacité de référence moyenne disponible pour en connaître la valeur à chaque cycle d'utilisation. A ce vieillissement irréversible minimum viendront s'ajouter les gains et pertes de capacité transitoires et donc réversibles que nous avons évoqués dans le paragraphe précédent.

Comme on l'a vu dans le deuxième chapitre, le vieillissement irréversible des batteries

plomb acide étanches en application « cyclage », donc notamment en utilisation véhicule électrique, est principalement dû à une « passivation » de la matière active positive par isolation d'agglomérats de cristaux de PbO_2 . S'il est facile de montrer de façon qualitative ce vieillissement, l'approche quantitative est toute autre.

Nos réflexions sur le sujet nous ont conduits à envisager plusieurs méthodes pour estimer le vieillissement des monoblocs en véhicule électrique : la référence à des abaques, les contrôles de capacité périodiques ou les méthodes de type impédancemétrique.

V.3.3.i. L'utilisation d'abaques

Pour traiter le problème du vieillissement irréversible, nous pouvons tout d'abord nous aider d'abaques donnant l'évolution des performances du monobloc en fonction du nombre de cycles effectués ou d'ampères-heures déchargés.

De ces courbes, nous pouvons essayer d'extraire l'évolution de la capacité de référence.

Le problème est que le vieillissement irréversible dépend du cyclage qu'on impose à la batterie. Il est fonction du nombre de transformations de la matière active, donc du nombre de cycles. Il dépend également de la quantité de matière travaillant à chaque cycle, donc de la quantité d'ampères-heures déchargés à chaque cycle. Or, l'utilisation du véhicule en conditions réelles est quasiment aléatoire. Il est donc difficile de rapprocher le vieillissement réel d'un vieillissement provoqué en laboratoire.

Nous pouvons tout de même essayer d'utiliser, comme référence, un vieillissement provoqué par un cyclage comprenant des décharges de type véhicule électrique ou des décharges à courant constant égal au courant moyen d'utilisation réelle, déchargeant le monobloc à un pourcentage compris entre 80% et 100% à chaque cycle. Ces courbes donneraient un coefficient correctif de la capacité de référence en fonction du nombre de cycles et/ou de la quantité totale d'ampères-heures déchargés.

V.3.3.ii. Les contrôles périodiques de la capacité de référence

Pour recalibrer l'éventuelle dérive de l'abaque précédent au fil des cycles, du fait de la différence d'utilisation entre le cyclage réel et le cyclage appliqué en laboratoire, il peut être

envisagé un **contrôle périodique de la capacité de référence en effectuant plusieurs décharges consécutives complètes à 100 A.**

Une seule décharge fournirait une première indication ; l'enchaînement de plusieurs décharges permettrait d'inhiber les effets mémoire et température transitoires pour obtenir une indication reflétant plus l'état réel de la matière active.

V.3.3.iii. L'utilisation de l'impédancemétrie

Comme on l'a dit dans le troisième chapitre, l'impédancemétrie est une méthode d'investigation intéressante. Elle est envisagée par beaucoup de chercheurs pour déterminer l'état de charge et/ou le vieillissement d'un monobloc.

Pour le vieillissement, un suivi relatif pourrait être envisagé par des mesures périodiques de l'impédance du monobloc. En effet, profitant soit de la recharge du véhicule, soit des périodes de pause d'après recharge, une mesure de l'impédance à des fréquences très basses pourrait, en comparaison avec une mesure effectuée et étalonnée à l'état neuf, donner l'état de vieillissement relatif de la batterie et donc l'évolution de la capacité de référence.

Des essais quantitatifs seraient donc intéressants pour confirmer la possibilité de suivre la capacité de référence au travers de l'impédance à certaines fréquences.

V.3.4. les problèmes de recharge et de stockage de la batterie

V.3.4.i. recharge globale ou séparée

Les chargeurs de batterie plomb acide, embarqués actuellement dans les véhicules électriques, imposent des profils contenant des régulations sur la tension totale de la batterie sans tenir compte de la tension de chacun des monoblocs. Une hétérogénéité est donc possible dans les profils de recharge des monoblocs. Le rapprochement de ce cas réel à notre étude paraît dans ce cas plus difficile du fait de la différence possible des conditions de recharge.

Les profils actuels, basés, comme on l'a vu dans le deuxième chapitre, sur la combinaison IU d'un palier de régulation de courant suivi d'un palier de régulation de tension, contiennent néanmoins des phases supplémentaires assurant une bonne homogénéité en recharge des monoblocs de la batterie. Nous pouvons donc considérer que le profil de recharge d'un monobloc unitaire utilisé pour les essais de cette thèse était représentatif des profils réels subis par chacun des monoblocs des batteries de véhicule électrique.

Par ailleurs, le concept de recharge séparée ou "monobloc par monobloc" est en étude

actuellement et pourrait voir le jour dans les années à venir si les avantages amenés par cette technique justifient le surcoût de fabrication. Chaque monobloc d'une batterie de véhicule électrique subirait dans ce cas le profil de recharge exact, sans interférence des autres monoblocs. Notre étude sur monobloc unitaire prendrait alors tout son sens.

V.3.4.ii. la réinitialisation en fin de charge

La fin de la recharge constitue le principal point de réinitialisation de l'algorithme d'état de charge. La matière y est théoriquement, totalement ou, du moins, en très grande majorité, retransformée et disponible pour une nouvelle décharge.

Il faut toutefois tenir compte d'un phénomène dû encore une fois à la diffusion de l'électrolyte. En cours de charge, le sulfate de plomb se transforme en plomb et en dioxyde de plomb dans les plaques. De l'électrolyte est donc formé à l'intérieur des plaques et retourne dans le séparateur, limité par sa diffusion dans la matière active. En toute fin de la recharge, la tension à vide est donc plus élevée, due à une plus forte densité d'électrolyte dans les plaques. Cette quantité importante d'électrolyte dans les plaques n'est que transitoire mais permet de gagner un peu de capacité en cas de décharge enchaînée juste après la charge. L'enchaînement sans pause d'une charge et d'une décharge est toutefois rare dans la réalité. Les périodes de repos permettent à l'électrolyte de s'homogénéiser et à la batterie, en quelque sorte, de se réinitialiser.

V.3.4.iii. la recharge partielle encore appelée « biberonnage »

La recharge partielle est un cas d'utilisation fréquent du véhicule électrique et donc de la batterie. Par manque de confiance dans la jauge d'énergie ou par nécessité d'une plus grande autonomie, il arrive souvent que les utilisateurs rechargent partiellement la batterie avant de terminer leur cycle. Cette recharge partielle, souvent appelée "biberonnage", n'est pourtant pas préconisée par les constructeurs de batterie et ce pour une raison bien simple : lorsqu'on effectue une décharge, une recharge partielle puis à nouveau une décharge, on fait "travailler" une partie de la matière active deux fois en un seul cycle. Or, l'isolation des grains de la matière active entraînant son vieillissement est directement fonction du nombre de leurs transformations. Le "biberonnage" cause donc une accélération du vieillissement d'une certaine partie de la matière active.

Il est par ailleurs vrai qu'un biberonnage permet de soutirer plus d'énergie de la batterie et ce, principalement pour la raison donnée dans le paragraphe précédent, à savoir l'accumulation en charge d'électrolyte dans les plaques, inhibant temporairement les problèmes

de diffusion et retardant donc la chute de la tension.

Cette utilisation particulière serait donc à étudier en détail pour aider le système de gestion à la conseiller ou à la combattre.

V.3.4.iv. l'amélioration du profil de charge

Nous évoquons ce problème car il constitue un paramètre limitatif majeur du concept véhicule électrique. Des études sont en cours pour modifier le profil de recharge afin d'accélérer la recharge des monoblocs plomb acide étanches. En imposant un courant de recharge plus fort, on augmente les surtensions, les échauffements et les dégagements gazeux. Tous ces paramètres vont influencer sur les performances de la batterie. Une étude de ces nouveaux types de recharge sera donc nécessaire pour permettre d'en tenir compte dans l'algorithme d'état de charge.

V.3.4.v. le stockage

Le véhicule électrique est souvent amené à subir de longues périodes de pause, appelées stockage, pendant lesquelles la batterie peut subir les deux principaux phénomènes suivants.

Si elle est complètement déconnectée du reste du véhicule, elle ne subit que l'autodécharge "naturelle", fonction de la température, des états de charge et de vieillissement et du temps de stockage.

Si elle est restée connectée aux convertisseurs du véhicule (convertisseur batterie principale / batterie auxiliaire, variateur de vitesse), elle peut être soumise à un léger courant de décharge venant s'ajouter au phénomène d'autodécharge naturelle.

Ces deux phénomènes entraînent une lente diminution de l'énergie disponible. Le système de gestion et l'algorithme doivent en tenir compte. La tension du monobloc est dans ce cas un bon indicateur de l'effet du stockage et peut donc être utilisée pour le quantifier. On peut également imaginer d'utiliser une technique impédancemétrique pour tenter d'évaluer la quantité de matière transformée et donc indisponible pour la décharge.

Les chargeurs embarqués actuels combattent cette autodécharge en imposant un "floating" (voir chapitre 2) à la batterie dès la fin de charge, consistant à imposer un faible courant pour compenser les transformations de matière.

Le système de gestion devra par ailleurs combattre les périodes longues de stockage sans compensation qui peuvent dans certains cas détériorer la batterie (voir chapitre 2).

V.3.5. Bilan

L'approche développée dans ce paragraphe concernant le reste (non exhaustif) des principaux problèmes apportés par les conditions réelles d'utilisation de la batterie en véhicule électrique est essentiellement qualitative. Nous n'avons pas effectué d'essais rigoureux pour évaluer l'influence de chacun de ces paramètres afin d'en tenir compte dans l'algorithme d'état de charge.

Ce passage en revue nous permet, tout de même, d'avoir une bonne vue d'ensemble des paramètres à prendre en compte pour envisager l'insertion de l'algorithme dans un système de gestion en conditions réelles.

Pour aboutir à un algorithme fiable , il apparaît nécessaire de prolonger les essais laboratoires pour quantifier chacun des paramètres de manière rigoureuse. Le passage à l'évaluation réelle sera alors le seul critère permettant de valider le système global de gestion de l'énergie embarquée.

V.4. Conclusion

Ce chapitre avait pour but dans un premier temps de tester en conditions réelles l'algorithme d'état de charge développé dans le quatrième chapitre afin de mettre en valeur ses points forts mais aussi ses points faibles. Dans un second temps, nous nous sommes attachés à présenter, d'une part, les explications physiques des écarts rencontrés afin de proposer des voies d'investigation pour faire évoluer l'algorithme, et d'autre part, de rappeler les conditions à ajouter en vue de son insertion dans un système de gestion réel.

Ainsi, nous avons présenté les résultats obtenus avec l'algorithme "embarqué" dans le véhicule électrique Volta. Avec moins de 5% d'erreur sur quatre essais consécutifs, ils ne révèlent pas de dérive importante de l'algorithme et montrent que ce dernier est toujours le plus fiable des algorithmes présentés.

Néanmoins, ces essais mettent en évidence l'influence de deux paramètres bien connus, dont nous nous étions volontairement affranchis durant nos essais laboratoire : la température et l'effet mémoire. Ces phénomènes physiques ont alors été expliqués afin de montrer la voie à prendre dans l'optique d'essais quantitatifs visant à la détermination de nouveaux coefficients correctifs.

Enfin, nous avons voulu discuter de l'influence d'autres paramètres apportés par l'utilisation en conditions réelles afin d'envisager l'insertion de l'algorithme dans un système intelligent de gestion d'énergie embarquée. La généralisation de l'étude à plusieurs monoblocs en série, la prise en compte du vieillissement ou encore l'influence de la recharge et du stockage ont été abordées de façon qualitative donnant des perspectives d'études supplémentaires pour converger vers la précision souhaitée.

Il est clair que des essais en laboratoire seront toujours nécessaires pour quantifier de manière rigoureuse les phénomènes.

L'étude de fond développée dans les quatrième et cinquième chapitres nécessite néanmoins un apport expérimental plus important en utilisation réelle. La démarche future doit consister à intégrer l'algorithme dans un système intelligent de gestion d'énergie embarqué et à le tester en conditions réelles d'utilisation, dans un véhicule électrique, afin d'étudier la stabilité de notre méthode, de mettre à jour les paramètres non envisagés et d'améliorer notre approche.

Conclusion générale



Conclusion générale

L'objectif de cette étude était l'élaboration d'un algorithme pour déterminer de façon plus précise l'état de charge d'une batterie plomb acide étanche en application véhicule électrique.

Le premier chapitre nous a permis tout d'abord de replacer cette étude dans son contexte économique et scientifique pour en montrer son intérêt.

Le rôle à long terme du véhicule électrique dans notre société n'est plus à démontrer. Même si le lancement du produit sur le marché n'est pas attractif aujourd'hui, il est certain que ses avantages en termes d'environnement et de type d'énergie utilisée finiront par le propulser principal mode de transport, tout au moins en ville. Mais pour l'instant, il ne convient pas. On lui préfère d'autres solutions telles que celle du véhicule au gaz. La cause en est simple : l'autonomie du véhicule électrique est trop faible, imprécise, la durée de vie des batteries est trop courte et leur prix d'achat trop élevé. Les batteries plomb acide constituent la moins chère des technologies employées mais pourtant elles ont tendance à être aujourd'hui écartées des études. Premier type d'accumulateur à avoir été testé en véhicule électrique, la batterie plomb acide a en effet été victime de la méconnaissance des chercheurs et des industriels vis à vis de ce nouveau type d'utilisation. Les nombreux échecs des premières campagnes d'essais ont révélé surtout un manque de surveillance de la batterie et une utilisation non optimale de ces performances due notamment à une indication imprécise de son état de charge. L'autonomie "faible" (~ 100 km) atteinte avec les batteries plomb acide suffit néanmoins à de nombreuses applications et ne constitue pas le problème principal. Un système de gestion de l'énergie embarquée est devenu nécessaire pour les batteries plomb acide à bord du véhicule. Nous avons alors proposé un cahier des charges non exhaustif des principales caractéristiques d'un tel système de gestion. L'état de charge de la batterie est l'un des points clefs de ce système, d'une part, car sa précision permet une meilleure utilisation de la batterie, et d'autre part, parce qu'il doit rassurer l'utilisateur qui n'a plus confiance dans cette technologie, ce qui la dévalorise. Sans ce type d'outil, la commercialisation de ce nouveau mode de transport est vouée à l'échec. Cette étude proposée par Oldham France prend alors toute sa dimension par son enjeu vital pour l'avenir de ce type de véhicule.

Dans le deuxième chapitre, un rappel des principales caractéristiques et définitions de la batterie plomb acide a été proposé afin de mieux situer les difficultés de détermination de son état de charge.

Ce rappel met en évidence le caractère fortement non linéaire de l'accumulateur. Sa capacité (quantité d'électricité disponible en décharge) dépend en effet de nombreux paramètres externes et ce de façon totalement non linéaire. Les courants de décharge et de charge, les pauses, la température, le vieillissement sont autant de paramètres influant ensemble sur les performances d'une batterie plomb acide. Une présentation physique simple des phénomènes électrochimiques ayant lieu dans la matière active de la batterie nous a alors permis de mieux comprendre la complexité de ses comportements macroscopiques et microscopiques.

Forts de ces constatations sur la physique et la chimie de l'accumulateur plomb acide, nous avons proposé dans le troisième chapitre une étude des principales méthodes de détermination de l'état de charge développées jusqu'ici.

Parmi toutes ces méthodes, la coulométrie a retenu notre attention du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de son raisonnement le plus proche d'un besoin quantitatif. Nous avons évalué les deux principaux algorithmes basés sur la coulométrie, sur des décharges en laboratoire.

Le premier donne la capacité restante au courant moyen de la décharge en cours, en soustrayant la quantité d'ampères-heures réellement déchargée à la capacité disponible de la batterie au courant moyen. D'importantes et néfastes erreurs (jusqu'à plus de 20%) révélées par l'évaluation ont montré que l'utilisation du courant moyen masque trop l'aspect dynamique à dominante transitoires du profil réel de courant en véhicule électrique.

Le second calcule la capacité restante à un courant fixe de référence, en pondérant de coefficients d'équivalence la quantité d'ampères-heures réellement déchargée et en la soustrayant à la capacité disponible à ce courant de référence. Cette méthode tient plus compte du profil réel de courant. Par contre, les essais réels ont montré que la précision des résultats dépend du courant de référence et des coefficients d'équivalence. Le choix d'un courant de référence proche du courant nominal de la batterie et le calcul des coefficients d'équivalence par rapport aux performances de la batterie à courant constant entraînent une sous-estimation (jusqu'à près de 20%) des performances de la batterie en conditions véhicule électrique.

Suite à cette évaluation, nous nous sommes posés la question fondamentale suivante : comment définir la condition d'arrêt du système ? En effet, une batterie a un comportement physique fortement dépendant des conditions qu'on lui impose. Il faut donc choisir une condition de fin de décharge de la batterie tenant compte de son utilisation. Aussi, la capacité restante du monobloc a été définie en fonction du véhicule : cette capacité est déterminée pour un courant de référence permettant au véhicule de rouler correctement dans un trafic routier urbain, principal lieu d'utilisation du véhicule.

En se basant sur ces critères et sur des résultats d'essais préliminaires, nous avons effectué des essais quantitatifs dynamiques, établis à partir d'une étude statistique des profils réels de courant imposés à la batterie, pour déterminer des coefficients d'équivalence des quantités d'ampères-heures réellement déchargées aux quantités virtuellement déchargées au courant de référence. L'effet des périodes de régénération de courant par freinage et des pauses

courtes et longues dans une décharge véhicule électrique a alors été évalué sous conditions contrôlées.

L'évaluation de cet algorithme sur des essais réels reproduits en laboratoire a confirmé l'amélioration envisagée de la méthode sur celles étudiées dans le chapitre précédent et a révélé une imprécision inférieure à 5%.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous avons évalué l'algorithme en conditions plus réelles d'utilisation sur quelques cycles consécutifs à bord d'un véhicule électrique. La précision de la méthode reste la meilleure avec, une nouvelle fois, moins de 5% d'erreur. Ces tests réels ont toutefois révélé l'influence de deux paramètres importants et non pris en compte jusque là : la température et l'effet mémoire.

Les effets liés à ces deux paramètres ont alors été expliqués qualitativement en présentant les phénomènes physico-chimiques qui les provoquent, ceci afin de pouvoir orienter l'évolution de l'algorithme proposée grâce à l'ajout de deux coefficients adaptatifs.

Enfin, une discussion plus générale du reste des paramètres pouvant influencer sur l'algorithme lors de son insertion dans les conditions réelles d'utilisation montre comment il peut être implanté dans un système de gestion de l'énergie embarquée.

L'étude du comportement de la batterie soumise à des profils de courant dynamiques s'est donc révélée plus appropriée à la détermination de son état de charge en véhicule électrique. Une méthode de calcul coulométrique simple avec des coefficients de pondération plus représentatifs du comportement physico-chimique de la batterie sous conditions de décharges dynamiques, nous a permis d'obtenir d'assez bons résultats sur des essais relativement proches des cas réels.

L'étude est bien sûr loin d'être terminée. Des essais supplémentaires seront encore nécessaires pour quantifier et vérifier l'influence des paramètres tels que la température de la batterie ou l'effet mémoire dû aux décharges précédentes.

Le vieillissement irréversible de la batterie et l'influence de la recharge ou du stockage seront également à envisager en vue d'une finalisation de l'algorithme en conditions réelles à bord des véhicules électriques.

L'état actuel de l'algorithme permet tout de même son implantation prochaine dans un prototype de système de gestion embarqué qui servira de banc d'essais d'importance capitale pour les améliorations futures.

Bibliographie

Bibliographie

Chapitre 1 : Véhicule Electrique et Batterie Plomb Acide

- ¹ M. KANT, *Technologie* 88, mars 1997, 22.
- ² C. DILLESEGER, *1^{er} Cercle - le Magazine des Décideurs*, janvier - février 1997, 27.
- ³ K. RAJASHERA, R. MARTIN, G. CAMERON : "Electric & hybrid propulsion systems technology trends : sub-car to heavy duty vehicles"
EVT 95, Vol.1, 312.
- ⁴ H. KAHLEN : "Technological steps in the electric vehicle drivetrain development"
EVT 95, Vol. 1, 328.
- ⁵ A. LEVY : "Quelle motorisation pour le véhicule électrique : synchrone à rotor bobiné ou à aimants ?"
C-VELEC'97, B-8
- ⁶ P. LANGRY : "Caractérisation et optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique. Problématique et résultats"
C-VELEC'97, B-15
- ⁷ A. PELLERIN : "Are you talking batteries"
Electric & Hybrid Vehicle Technology ' 96, 68.
- ⁸ W. BÖGEL, J.P. BÜCHEL, C. HIRON : "Utilisation of traction batteries for EV application"
EVT 95, Vol. 1, 99.
- ⁹ H. MORROW : "Ni-Cd - the cost-effective choice"
Electric & Hybrid Vehicle Technology ' 96, 87.
- ¹⁰ D. OHMS : "Sealed Nickel-Metal Hybrid batteries and their application in electric vehicles and hybrid cars"
EVT 95, Vol. 1, 211.
- ¹¹ C. MODERY, J. P. CORNU : "Les couples à cathode de nickel et le véhicule électrique"
VP/CV 93, La Rochelle, France, 322.
- ¹² W. FISCHER, J. RÖDIG : "Results of two EC-studies : Performance of NaS Battery propelled Evs in 1995 and 2005"
EVS 11, Vol.2, 14.01
- ¹³ M. NAGANO, K. OYAMA, F. SATO : "Advancing Nickel-metal hybride"
Electric & Hybrid Vehicle Technology ' 96, 93.
- ¹⁴ G. BRONOEL : "Piles métal-air pour véhicules électriques"
VP/CV 93 La Rochelle, 134.

- ¹⁵ J. WHARTMAN, J. R. GOLDSTEIN, B. KORETZ, J. TWERSKY : "The deutsche post-Electric Fuel field test : large fleet operator forms initial EV market"
EVS 13, vol. I, 649.
- ¹⁶ D. H. DOUGHTY : "Materials development for lithium-ion batteries"
Electric & Hybrid Vehicle Technology ' 96, 102.
- ¹⁷ M. BROUSSELY : "La batterie Li Ion pour véhicule électrique : démonstration de faisabilité"
C-VELEC ' 97, F-8.
- ¹⁸ D. BLANCHET, "Science & Vie", n° 954 mars 1997, 118.
- ¹⁹ T. ALLEAU : "Progrès récents des piles à combustible appliquées aux véhicules électriques"
C-VELEC ' 97, A-10
- ²⁰ M. MAYER : "Battery Electric Vehicles in Europe status and prospects"
"The Battery Man", Avril 1997, 32.
- ²¹ F. TOKARZ, J. R. SMITH, J. COOPER : "A concept EV using zinc-air and flywheel batteries"
Electric & Hybrid Vehicle Technology ' 95, 126.
- ²² J. F. LUTZ, J. M. OLBERMANN : "Motor/generator design considerations for flywheel applications"
EVS 13, vol. II, 183.
- ²³ J. TAKEHARA, N. OHKUBO, K. MIYAOKA, T. FUKUDA : "Series conjunction of ultracapacitors and batteries for load leveling of EV batteries"
EVS 13, vol. II, 190.
- ²⁴ G. ANERDI, A. ANCARANI, G. BRUSAGLINO, X. ANDRIEU : "Supercapacitor as a buffer to enhance energetical, operational and economical effectiveness of electric vehicle systems"
EVT 95, vol. I, 75.
- ²⁵ C. B. JOHNSON, E. K. STEFANAKOS : "Acquisition et traitement automatique des données embarquées pour une flotte de véhicules électriques"
VP/CV 93 La Rochelle, C.1, 19.
- ²⁶ P. LENAIN, M. KECHMIRE : "Gestion informatique des batteries dans un parc de véhicules électriques"
VP/CV 93 La Rochelle, A4.3
- ²⁷ K. YAMAGUCHI : "Advancing the hybrid-system"
Electric & Hybrid Vehicle Technology ' 96, 158.
- ²⁸ N. TAKEDA, N. KUMAGAI : "Development of a HEV for light-duty trucks"
EVS 13, vol. I, 121.

Chapitre 2 : L'Accumulateur Plomb Acide : Présentation et Définitions

- ¹ H. BODE : "Lead Acid Batteries"
ed. Wiley Interscience (1977)
- ² M. A. DASOYAN & I. A. AGUF : "Current Theory of Lead Acid Batteries"
(1979)

- ³ R. W. GRAHAM : "Secondary Batteries, Recent Advances"
Noves Data Corporation, (1978)
- ⁴ D. BERNDT, "Maintenance-Free Batteries, a Handbook of Battery Technology"
(1993)
- ⁵ J. MRHA, K. MICKA, J. JINDRA, M. MUSILOV : "Oxygen cycle in sealed lead-acid batteries"
Journal of Power Sources, 27 (1989) 91.
- ⁶ A. WINSEL, E. VOSS, U. HULLMEINE : "The aggregate-of-spheres ('Kugelhaufen') model of the PbO₂/PbSO₄ electrode"
Journal of Power Sources, 30 (1990) 209.
- ⁷ B. CULPIN, D. A. J. RAND : "Failures modes of lead/acid batteries"
Journal of Power Sources, 36 (1991) 417.
- ⁸ R. WAGNER, *Journal of Power Sources*, 53 (1995) 153.
- ⁹ C. BRISSAUD : "Etude morphologique et structurale des mécanismes de dégradation des batteries plomb/acide a recombinaison de gaz lors des tests de cyclage et de surcharge"
Thèse U.S.T.Lille, (1996)
- ¹⁰ S. M. CAULDER, A. C. SIMON :
Journal of the Electrochemical Society, 122 (1975) 461. & 1640.
- ¹¹ R. J. HILL, D. A. J. RAND
Power Sources 11 Symposium, (1987) 103.
- ¹² K. TAKAHASHI, N. HOSHIHARA, H. YASUDA, T. ISHII, U. JIMBO : "Phenomena at the interface between positive active material and lead-calcium-tin grids"
Journal of Power Sources, 30 (1990) 23.
- ¹³ U. HULLMEINE, A. WINSEL, E. VOSS : "Effect of previous charge/discharge history on the capacity of the PbO₂/PbSO₄ electrode : the hysteresis or memory effect"
Journal of Power Sources, 25 (1989) 27.

Chapitre 3 : Evaluation des Méthodes Actuelles de Mesure de l'Etat de Charge basées sur la Coulométrie

- ¹ N. F. COMPAGNONE : "A new equation for the limiting capacity of the lead/acid cell"
Journal of Power Sources, 35 (1991) 97.
- ² J. LANDFORS, D. SIMONSSON, A. SOKIRKO : "Mathematical modelling of a lead/acid cell with immobilized electrolyte"
Journal of Power Sources, 55 (1995) 217.
- ³ O. E. ABDEL-SALAM : "Mathematical modelling of tubular-plate lead/acid batteries"
Journal of Power Sources, 30 (1990) 227.
- ⁴ S. F. BURLATSKII, M. G. RUDENKO : " Effect of low potentials on the discharge of the positive electrode of a lead-acid accumulator"

Bibliographie

- Russian Journal of Physical Chemistry*, 66 (1992)
- ⁵ E. KARDEN, P. MAURACHER, F. SCHÖPE : "Electrochemical modelling of lead/acid batteries under operating conditions of electric vehicles"
Journal of Power Sources, n°64, (1997), 175.
 - ⁶ W. PEUKERT, *Elektrotech. Z.*, 18 (1897) 289.
 - ⁷ C. LIEBENOW, *Z. Elektroch.*, 4 (1897) 58.
 - ⁸ C. M. SHEPHERD, *Journal of the Electrochemical Society*, 112 (1965)
 - ⁹ S. BISCAGLIA : "Modélisation de la phase de décharge des accumulateurs au plomb : application à la mesure de l'état de charge"
Thèse Ecole des Mines de Paris, (1992)
 - ¹⁰ W. G. SUNU, B. W. BURROWS : "Mathematical model for design of battery electrodes I. Potential distribution"
Journal of the Electrochemical Society, 129 (1982) 688.
 - ¹¹ W. G. SUNU, B. W. BURROWS : "Mathematical model for design of battery electrodes II. Current density distribution"
Journal of the Electrochemical Society, 131 (1984) 1.
 - ¹² M. MAJA, P. SPINELLI, M. LAZZARI : "Sul progetto di griglie per batterie al piombo"
l'Energia Elettrica, 9 (1986)
 - ¹³ Y. MORIMOTO, Y. OHYA, K. ABE, T. YOSHIDA, H. MORIMOTO : "Computer simulation of the discharge reaction in lead-acid batteries"
Journal of the Electrochemical Society, 135 (1988) 293.
 - ¹⁴ R. GIGLIOLI, A. BUONAROTA, P. MENGA, M. CERAOLO : "Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead acid battery"
EVS 10, (1990) 371.
 - ¹⁵ M. HUGHES, R. T. BARTON, S. A. G. R. KARUNATHILAKA, N. A. HAMPSON : "The estimation of the residual capacity of sealed lead-acid celled using the impedance technique"
Journal of Applied Electrochemistry, 16 (1986) 555.
 - ¹⁶ Z. M. SALAMEH, M. A. CASACCA, W. A. LYNCH : "A mathematical model for lead-acid batteries"
IEEE Transactions on Energy Conversion, 7 (1992) 93.
 - ¹⁷ A. WINSEL, German Pat. 2,254,207 (1973)
 - ¹⁸ J. L. WEININGER, J. L. BRIANT : "State of charge indicator for lead-acid batteries"
Journal of the Electrochemical Society, vol. 129, n°11, (1982)
 - ¹⁹ G. W. VINAL : "*Storage Batteries 4th Edition*"
Wiley NY, (1955)
 - ²⁰ J. AYLOR : "A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs"
IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.39, n°5, (1992)
 - ²¹ CURTIS documentation technique
 - ²² H. AN, E. K. STEFANAKOS : "A state-of-charge indicator for lead-acid batteries in electric vehicles"
VP/CV La Rochelle 93, 96.
-

Bibliographie

- ²³ C. W. DE KREUK, P. J. VAN DUIN : "A computer model for the determination of the residual capacity of (lead-acid) batteries"
EVS 11, (1992) 11.01
- ²⁴ M. KITAGAWA : "Development of battery state of charge indicator for electric vehicles"
EVS 12, vol 1 293. (1994)
- ²⁵ S. K. SONG, K. H. KIM : "A dynamic state-of-charge model for electric vehicle batteries"
EVS 12, vol 2, 519. (1994)
- ²⁶ J. F. RIUTORT : "Etude et réalisation d'une jauge coulométrique universelle destinée au véhicule électrique"
Mémoire CNAM, France, Grenoble, (1994)
- ²⁷ C. RAKOTOMAVO : "Etude par mesure d'impédance de la nature des polarisations à l'électrode positive d'un accumulateur au plomb"
Thèse, Paris VI (1983)
- ²⁸ S. OKAZAKI, S. HIGUCHI, S. TAKAHASHI : "Second-order harmonic in the current response to sinusoidal perturbation voltage for lead-acid battery : an application to a state of charge indicator"
Journal of the Electrochemical Society, vol. 132, n°7, (1985) 1516.
- ²⁹ R. T. BARTON, P. J. MITCHELL : "Estimation of the residual capacity of maintenance-free lead-acid batteries. Part 1. Identification of a parameter for the prediction of state of charge"
Journal of Power Sources, vol. 27, (1989) 287.
- ³⁰ T. GHIARA, G. LIBERTI, M. MARCHESONI, G. SCIUTTO : "Study and design of a low cost system to estimate vehicle battery autonomy"
EVS-11, 11.02 (1992)
- ³¹ S. NUGUES, E. RULLIERE, J. P. YONNET : "State of charge measurement by impedance spectroscopy for traction batteries"
EVS-13, vol 2, 653.
- ³² E. KARDEN, P. MAURACHER, A. LOHNER : "Battery management system for energy-efficient battery operation : strategy and practical experience"
EVS 13, vol 2, 91., (1996)
- ³³ J. F. RIUTORT, E. RULLIERE, E. TOUTAIN : "an improved coulometric gauge for electric vehicles"
EVT'95, 7., (1995)
- ³⁴ Q. GUOGANG, L. JIANMING, J. HANG : "A new battery state of charge indicator for electric vehicles"
EVS 13, vol 2, 631. (1996)

