

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR
SPÉCIALITÉ ÉLECTRONIQUE

Par Habib AL JED

**INFLUENCE DE LA RECHARGE RAPIDE SUR LES
PERFORMANCES DES ACCUMULATEURS LITHIUM DES
VÉHICULES ÉLECTRIQUES DANS LE CADRE DE
L'UTILISATION POSTALE**

Sous la direction de : Jean-Michel VINASSA

Soutenue le 15 Décembre 2014

Membres du jury :

M. François AUGER	Professeur, Université de Nantes, Laboratoire IREENA	Président
Mme. Corinne ALONSO	Professeur, Université de Toulouse, Laboratoire LAAS	Rapporteur
M. Pascal VENET	Professeur, Université de Lyon, Laboratoire AMPERE	Rapporteur
M. Akassewa Tchapo SINGO	Docteur-Ingénieur, SAFT	Examineur
M. Jean-Michel VINASSA	Professeur, Bordeaux INP, Laboratoire IMS	Directeur thèse
M. Olivier BRIAT	Maître de Conférences, Université de Bordeaux, IMS	Co-encadrant
M. André MIEZE	Enseignant chercheur, Ecole EIGSI La Rochelle	Co-encadrant
M. Rémi SIMON	Chef de projets, La Poste / DTC / DMRE, Nantes	Co-encadrant

Titre : Influence de la recharge rapide sur les performances des accumulateurs lithium des véhicules électriques dans le cadre de l'utilisation postale.

Résumé : Cette thèse a pour objectif d'étudier l'influence de la recharge rapide sur le vieillissement des batteries lithium, et son impact sur les performances des véhicules électriques dans le cadre d'une utilisation postale. La première partie est consacrée à la modélisation de batteries lithium par un modèle à circuit électriques équivalent, dont les paramètres sont identifiables par des tests de caractérisation linéaires. La deuxième partie est dédiée à l'étude du vieillissement, et abouti sur un estimateur de vieillissement par l'exploitation des données des tests de vieillissement accélérés. Ensuite, l'utilisation postale est étudiée, et un profil de courant représentatif de la sollicitation réelle de la batterie est proposé. Ce dernier a permis de valider le modèle de la batterie dans le domaine de l'utilisation postale. Ensuite un modèle de véhicules électriques est présenté, il intègre le modèle de batterie, tout en le faisant vieillir en utilisant l'estimateur de vieillissement. Enfin, les différentes stratégies de recharges possibles sont énumérées et comparées. Pour conclure sur leurs influences sur le vieillissement des batteries, et donc les performances de véhicules.

Mots clés : Batterie lithium ; modélisation de batteries ; caractérisation temporelle ; Vieillissement calendaire ; Cyclage actif; Véhicule électrique ; distribution de courrier ; Recharge CC-CV ; Recharge rapide ; Recharge accélérée ; dégradation des performances ; autonomie ; consommation.

Title : Influence of fast charging on the performances of lithium batteries for electric vehicles used in mail delivery missions.

Abstract : This thesis aims to study the influence of fast charging on the aging of lithium batteries, and its impact on the performances of electric vehicles as part of a postal use. The first part is devoted to the modeling of lithium batteries with an equivalent electric circuit model, whose parameters could be identified using linear characterization tests. The second part is dedicated to the study of aging, and results in an aging estimator using data collected from accelerated aging tests programs. Then the postal usage is studied, and a power profile representative of the actual load on the battery is provided. The latter was used to validate the model of the battery in the field of postal use. Then the postal use is studied, and a current profile representative of the real behavior of the battery is provided. This profile was used to validate the model of the battery in the postal use domain. Then a model of electric vehicles is presented, it integrates the battery model, which can simulate the aging state of the battery using the ageing estimator. Finally, the various possible strategies of recharge are listed and compared, which leads to conclusions about their influences on aging of batteries, and the vehicles performance.

Keywords : Lithium batteries ; Battery model ; Time-domain characterization; Calendar ageing ; Cycling ; Electric vehicle ; Mail delivery ; CC-CV recharge ; Fast recharge ; Accelerated recharge ; performance degradation ; autonomy ; Consumption.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur François AUGER pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant ce jury.

Je remercie Madame Corinne ALONSO et Monsieur Pascal VENET d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Leur relecture attentive et leurs remarques intéressantes m'ont beaucoup apporté.

Je tiens à remercier également Monsieur Olivier BRIAT et Monsieur Akassewa Tchapo SINGO d'avoir participé à ce jury, ainsi que pour leurs précieux conseils pendant la thèse.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Jean-Michel VINASSA, directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a accordé en m'intégrant à l'équipe puissance du groupe fiabilité au laboratoire IMS, pour sa disponibilité et ses nombreux encouragements et conseils qui m'ont permis de mener ce travail jusqu'à la fin avec succès.

Je remercie Monsieur André MIEZE pour son encadrement et son accueil à l'école d'ingénieur de La Rochelle, aussi pour m'avoir donné les conditions les plus favorables pour l'aboutissement de ce travail.

Je remercie chaleureusement Monsieur Rémi SIMON pour m'avoir offert l'occasion et les moyens pour réaliser des essais « grandeur nature » avec les véhicules de La Poste. Je tiens aussi à témoigner toute ma gratitude et ma reconnaissance pour les précieux conseils et les encouragements pendant les moments les plus difficiles.

Mes remerciements seraient incomplets si je ne mentionnais pas l'ensemble des membres du laboratoire IMS, en particulier les membres de l'équipe puissance, pour les échanges enrichissants et les moments de convivialité que nous avons partagés: Jean-Yves, Stéphane, Olivier, Nicolas, Ramzi, Akram, Mohamed.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel de l'EIGSI pour le chaleureux accueil qu'ils m'ont réservé, et surtout à Mme Schérazade BENHABIB, M. Frédéric MUTTIN et M. François DUCLAUD pour leurs contributions à mes travaux. Merci également à mes amis et collègues doctorants pour leur convivialité au quotidien : Katia, Tatiana, Anna, Mohammed, Dhaker, Maxime, Samir, Lilia, Lou, Rim, Aurélien, Franck, Vincent.

Je n'oublie pas les collègues de la DMRE de La Poste à qui j'adresse mes remerciements pour leurs précieuses aides pour réaliser les tests sur les véhicules, ainsi que

pour m'avoir très vite intégré dans l'équipe. Sans oublier les facteurs du centre de distribution de La-Chapelle-Sur-Erdre qui ont gentiment accepté de participer de faire partie de la campagne d'essais sur les véhicules électriques.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide de différents financeurs qui, au travers de leur soutien matériel, ont reconnu mon travail et m'ont fait confiance: Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, La Poste, L'École d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels de La Rochelle et l'Institut polytechnique de Bordeaux.

Un grand merci à tous les amis avec qui j'ai pu partager des beaux moments de convivialité, et qui m'ont permis de « décompresser ». Je cite surtout Emma, Adolphe et Tarek qui m'ont supporté pendant toutes ces années, et qui n'ont pas cessé de m'encourager.

Enfin j'adresse mes remerciements les plus affectueux à ma famille ; à mes deux cousines adorables Mireille et Michella qui ont fait le voyage du Liban et Abu Dhabi pour être à mes côtés avant et pendant la soutenance. À mes deux frères qui ont toujours été une source d'inspiration pour moi. Et pour finir je dédicace ce travail à mes chers parents. Merci d'avoir toujours cru en moi, merci pour votre soutien et votre amour inépuisables.

Table des matières

Introduction générale	9
Chapitre 1 - Les accumulateurs à base de lithium	13
1 -Introduction	13
2 -Grandeurs caractéristiques des batteries	15
2.1 -Tension à vide, nominale, chute de tension, seuils	16
2.2 -Capacité nominale, résiduelle.....	16
2.3 -Régime de décharge	17
3 -Principe de fonctionnement et constitution.....	19
3.1 -Constitution matérielle d'un élément	20
4 -Caractérisation électrique des accumulateurs	25
5 -Modélisation des accumulateurs au lithium.....	28
5.1 -Modélisation physico-chimique	29
5.2 -Modélisation de type « boîte noire »	29
5.3 -Modélisation énergétique	31
5.4 -Modélisation par circuits électriques équivalents	31
5.5 -Bilan sur les modèles existants.....	35
6 -Modèle utilisé.....	37
6.1 -Présentation du modèle	38
6.2 -Identification des paramètres du modèle.....	40
6.3 -Intégration du vieillissement	41
7 -Conclusion.....	41
Chapitre 2 - Estimation de l'état de vieillissement de la batterie	43
1 -Introduction	43
2 -Les mécanismes de vieillissement	43
2.1 -Les causes.....	43
2.2 -Facteurs de vieillissement	46
3 -Modélisation du vieillissement	48
3.1 -Modélisation physico-chimique	48
3.2 -Méthodes de fatigue	49
3.3 -Modèles mathématiques	51
3.4 -Conclusion.....	53
4 -Les tests de vieillissement.....	54
4.1 -Introduction	54
4.2 -Procédures de tests	55
4.3 -Conclusion.....	60
5 -Exploitation des données.....	61
5.1 -Machines à vecteurs supports.....	61
5.2 -Estimation des indicateurs de vieillissement par SVM.....	62
6 -Conclusion.....	67
Chapitre 3 - Création des profils de courant représentatifs de l'usage postal	69
1 -Introduction	69
2 -Cycles de conduite de base	70
2.1 -Les cycles réglementaires.....	70
2.2 -Profils de missions représentatifs de l'usage réel.....	72
3 -Profils de mission spécifiques à l'usage postal	73

3.1 -Profil porte à porte 4 arrêts/km de La Poste	74
3.2 -Profils réels de distribution de courrier	76
4 -Comparaison des différents profils	78
4.1 -Comparaison statistique	79
4.2 -Comparaison de la consommation énergétique des profils	80
4.3 -Conclusion.....	83
5 -Profils de sollicitation de la batterie en utilisation postale.....	84
6 -Conclusion.....	89
Chapitre 4 - Identification et validation du modèle de la batterie	91
1 -Introduction	91
2 -Plateformes expérimentales	91
3 -Objectifs	93
4 -Éléments testés	93
5 -Plan d'expériences	94
5.1 -Conditions des tests de caractérisation	95
5.2 -Conditions de tests de cyclage.....	96
6 -Identification du modèle de la batterie	97
6.1 -Profil de caractérisation.....	97
6.2 -Validation du modèle électrique.....	100
6.3 -Validation thermique du modèle	102
6.4 -Impact de la recharge rapide sur le rendement énergétique de la batterie	104
7 -Conclusions	104
Chapitre 5 - Impacts de la stratégie de gestion de la recharge sur le vieillissement des batteries et les performances des véhicules électriques	107
1 -Introduction	107
2 -La recharge.....	107
2.1 -Introduction à la recharge.....	107
2.2 -Paramètres de la gestion de recharge	110
3 -Impact des scénarios de recharge sur le vieillissement de la batterie	111
3.1 -Définition des scénarios de recharge.....	111
3.2 -Facteurs de vieillissement spécifiques aux scénarios.....	114
3.3 -Impact des scénarios de gestion de recharge sur le vieillissement de la batterie	116
4 -Impact des scénarios de recharge sur les performances du véhicule électrique	118
4.1 -Modélisation du véhicule électrique.....	118
4.2 -Impact de l'état de vieillissement de la batterie sur les performances du véhicule électrique	126
5 -Conclusion.....	129
Conclusion générale	132
Tables des figures	135
Table des tableaux	137
Références bibliographiques	139
Annexes	151
SVM	151
1 -Régression linéaire	151
2 -Régression non-linéaire.....	157

Introduction générale

Les véhicules électriques commencent à intégrer le marché grâce aux avantages écologiques et économiques qu'ils peuvent fournir. Handicapés par le manque d'autonomie vis-à-vis des véhicules thermiques, ils sont actuellement destinés à l'utilisation en milieu urbain ou au sein de flottes captives ne demandant pas des longs trajets quotidiens. Les missions de distribution de courrier dans les milieux urbains et ruraux sont parfaitement adaptées à ce type d'utilisation. En France, La Poste a déjà mis en place un plan pour acquérir 10 000 véhicules électriques qui seront déployés dans l'ensemble de ses centres de distribution.

L'optimisation de la gestion de cette flotte constitue un enjeu économique pour l'industriel La Poste. Cette optimisation dépend surtout de l'élément de stockage d'énergie, la batterie, qui est sensible aux conditions d'usage et de recharge, avec des conséquences directes sur les performances globales du véhicule.

L'utilisation de la recharge rapide des batteries peut être un paramètre important dans la stratégie de gestion de la flotte puisqu'elle peut augmenter l'autonomie quotidienne du véhicule électrique. Néanmoins, elle peut contribuer à l'accélération des mécanismes de dégradation à l'intérieur de la batterie, et donc accélérer son vieillissement. La connaissance de l'état de vieillissement de la batterie, des facteurs influents sur le vieillissement ainsi que de leur impact sur les performances du véhicule est primordiale pour l'optimisation de la gestion d'un parc de véhicules électriques.

Le principal objectif de ce travail est d'étudier l'impact de la recharge rapide sur les performances des batteries des véhicules électriques utilisés dans le cadre des missions de distribution de courrier. L'étude se portera sur les accumulateurs à base de lithium, qui présentent les propriétés les plus prometteuses sur le marché parmi les différentes technologies d'accumulateurs, notamment en termes d'énergie et de puissance massique.

Pour réaliser cette étude, il est d'abord nécessaire de disposer d'un modèle de batterie, non seulement décrivant le comportement électrique, mais prenant aussi en compte le vieillissement et les performances énergétiques de la batterie. Ces éléments influent directement sur les performances du véhicule. De plus, dans le but d'être intégré à une modélisation globale de véhicule électrique, le modèle de la batterie doit être constitué du minimum nécessaire d'éléments de façon à minimiser le temps de simulation sans sacrifier la précision. La simplicité de l'identification du modèle doit être également privilégiée. Pour

satisfaire au mieux à ces exigences, la modélisation batterie sera plus tournée vers les performances énergétiques que vers le comportement dynamique.

Un deuxième élément essentiel est l'estimation de l'état de vieillissement de la batterie ou état de santé. C'est une tâche très difficile à réaliser, en vue des moyens qu'il faut mettre en service, que ça soit au niveau financier, matériel, humain ou temporel. En effet, pour étudier le vieillissement d'une technologie de batterie, il faut mener des tests expérimentaux assez longs pour permettre à la batterie de vieillir. Il faut aussi qu'ils soient basés sur un plan d'expérience prenant en compte les différents paramètres d'usage de la batterie, exigeant de réaliser simultanément les tests selon les différentes conditions, et demandant par conséquent un grand nombre de matériels de tests pour cette tâche, dépassant en général les capacités matérielles d'un seul laboratoire de recherche. Ni la durée du projet, ni les moyens mis à disposition ne permettent de réaliser des tels essais. Pour contourner ce problème, la meilleure solution en vue est d'exploiter des données, qui nous sont disponibles, issus des tests de vieillissement sur plusieurs technologies de batteries lithium-ion. En se basant sur ces données, un modèle de l'état de vieillissement sous la forme de 'boite noire' est présenté dans ce document. L'état de vieillissement est représenté par la variation des paramètres du modèle de la batterie (résistance interne et capacité). Le modèle utilise des techniques de régression non-linéaires pour estimer l'état de vieillissement en fonction des 'facteurs de vieillissement', qui sont les variables du plan d'expérience des tests réalisés.

Pour étudier les performances du véhicule et le comportement de la batterie dans le cadre des missions de distribution de courrier, il est nécessaire de modéliser cette utilisation par des profils de mission et de sollicitation de la batterie qui la représentent. Les profils de missions standardisés existants ne sont pas représentatifs de cette application. Pour cela, des véhicules de La Poste, de type Fiat Doblo électrifiés par Micro-Vett, réalisant des missions de distribution de courrier, ont été instrumentés, dans l'objectif de collecter des données chronologiques représentatives de l'usage, parmi lesquelles figurent la vitesse du véhicule et le courant de la batterie. Ces données ont permis de proposer des profils de sollicitation de courant représentatifs de l'utilisation postale. Ils seront utilisés dans le cadre de tests sur des éléments de batterie pour étudier leurs performances dans le cadre de l'utilisation postale. Quant aux enregistrements de vitesse ils serviront à simuler la réalisation des missions de distribution de courrier par des véhicules électriques sur des logiciels de simulation.

Pour identifier et valider le modèle de la batterie, il est nécessaire de réaliser des tests expérimentaux sur des éléments de batteries, du type Lithium-ion polymère, utilisés dans les véhicules électriques en question. Des procédures d'identification sont appliquées aux éléments testés sous différentes conditions couvrant le domaine d'utilisation, pour permettre de modéliser la batterie sur la totalité de la plage d'utilisation.

Enfin, il est aussi nécessaire de modéliser le véhicule électrique afin de pouvoir étudier ses performances selon les différentes conditions d'usage. La modélisation de ce dernier comporte différentes sections : corps du véhicule, motorisation, électronique de puissance embarqués et le système de stockage. Ce dernier n'est autre que le modèle de la batterie présenté ci-dessus. Pour les autres sections, on se base sur les données fournies par le constructeur et présentes dans la littérature pour les véhicules similaires. Le modèle est finalement validé en comparant les profils du courant et de la tension simulée à celles mesurées lors des essais.

En connaissant le modèle de la batterie, l'estimation de son état de vieillissement, le modèle du véhicule et les conditions d'usage du véhicule dans les missions de distribution de courrier, il est désormais possible de traiter le cœur du sujet qui est l'impact de la recharge rapide sur les performances des accumulateurs lithium-ion. En étant dans une vision de gestion optimale du parc de véhicules, il est intéressant d'explorer les différentes stratégies basiques de recharge possibles, en prenant en compte des paramètres supplémentaires autres que la recharge rapide. Ces stratégies dépendent des infrastructures de recharge déjà existantes ou qui apparaîtront dans les prochaines années et de la disponibilité des véhicules. Les infrastructures actuelles existantes permettent de réaliser des recharges normales. Selon la littérature [1]–[3], deux autres types de bornes de recharges pourront être implémentés prochainement : une borne de recharge 'accélérée' de 22 kVA et une borne de recharge 'rapide' de 43 kVA. Nous choisissons donc d'étudier les cas de la recharge rapide et accélérée correspondantes à l'utilisation de ces types de bornes de charge. Un premier paramètre de gestion de la recharge est ainsi défini. Il s'agit du type de la recharge, ce paramètre peut avoir trois valeurs possibles : recharge rapide, recharge accélérée ou recharge normale. Un deuxième paramètre peut être influent sur la gestion de recharge, c'est le temps du début de la recharge 'normale' du véhicule. Deux possibilités se présentent pour ce paramètre : la recharge commence au moment de la restitution du véhicule au centre de distribution du courrier, ou bien elle sera retardée de façon qu'elle s'achève au moment du début de la prochaine tournée. Ce paramètre a une influence sur l'état de charge de la batterie pendant la durée de repos du véhicule, qui est un des facteurs de vieillissement de la batterie.

Les différents scénarios sont étudiés, de façon à identifier des facteurs de vieillissements caractérisant chacun d'eux. Cela permet d'estimer un état de vieillissement en utilisant le modèle du type 'boite-noire' présenté précédemment, représentatif de chaque scénario après une durée d'utilisation fixée. Cet état de vieillissement est intégré par la suite dans le modèle de la batterie du véhicule électrique, permettant de simuler les performances dans les missions de distribution de courrier. Cela permet alors d'étudier l'impact de la stratégie de recharge sur les performances du véhicule en considérant le vieillissement.

Ce document est divisé en cinq parties. Le premier chapitre est consacré à la description générale des accumulateurs lithium-ion, de leurs constituants, de leurs mécanismes de dégradation et de leur modélisation, pour finalement présenter le modèle de la batterie le plus adapté. Dans le second chapitre, un modèle de vieillissement de batterie est présenté puis intégré au modèle de la batterie introduit précédemment. Il est basé sur des données expérimentales issues des tests de vieillissement de batteries. Le troisième chapitre étudie l'utilisation des véhicules électriques dans le cadre de l'application de distribution de courrier, dans lequel il sera montré que cette utilisation ne peut pas être représentée par des profils de mission standards. D'où la nécessité de la création des profils de missions spécifiques à l'utilisation postale, permettant de simuler les missions de distribution de courrier, ou de former des profils de sollicitation des batteries similaires à la réalité. Le quatrième chapitre présente les essais expérimentaux réalisés sur les batteries. Il est formé de deux parties : dans la première le modèle de la batterie est identifié. Dans la deuxième partie, il sera validé des points de vue électrique et énergétique, ainsi l'influence de la recharge rapide sur le rendement énergétique de la batterie sera étudiée. Dans le cinquième chapitre, les différentes stratégies de gestion de la recharge seront présentées, pour finir avec l'influence de chaque stratégie sur l'état de vieillissement de la batterie, en se basant sur le modèle présenté au second chapitre. Ensuite on présente le modèle VE comprenant un modèle de batterie intégrant le vieillissement. Il servira à étudier les performances du véhicule (consommation et autonomie) réalisant des missions de distribution de courrier, tenant compte de l'état de vieillissement en fonction de chaque stratégie de recharge.

Chapitre 1 - Les accumulateurs à base de lithium

1 - Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des batteries à base de lithium qui sont considérées comme les meilleurs candidats disponibles à l'heure actuelle pour former l'élément de stockage d'énergie dans les véhicules électriques. Avant d'entrer dans le cœur du sujet, la première partie de ce chapitre présente la constitution et le principe de fonctionnement des accumulateurs électrochimiques en se focalisant sur les batteries à base de lithium. Ainsi, les différentes technologies de ces derniers seront présentées, en expliquant les avantages et les inconvénients de chacune. Nous rappellerons aussi brièvement les équations régissant les phénomènes électrochimiques responsables du fonctionnement de ces accumulateurs. La deuxième partie commence par un état de l'art de la modélisation des batteries à base de lithium en présentant les différentes approches de modélisation décrites dans la littérature. Une comparaison critique est réalisée entre ces différentes approches pour justifier le choix du modèle adapté à ce travail. À la fin de ce chapitre, nous présentons en détail le modèle retenu pour la suite.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, rappelons rapidement l'historique des technologies utilisées dans les batteries rechargeables. L'un des premiers systèmes de stockage d'énergie est la batterie plomb-acide. Elle a été créée en 1859 et elle est toujours utilisée de nos jours. Cette technologie présente une faible capacité spécifique et elle est donc trop lourde ce qui pénalise son utilisation dans le domaine de l'automobile.

La batterie nickel-cadmium existe depuis les années 1950 et a été un standard technologique pendant de nombreuses années. Cependant, sa densité d'énergie relativement faible et son « effet mémoire » important limitent ses performances. De plus, le cadmium étant un métal très toxique, la commercialisation des batteries Ni-Cd est fortement réglementée depuis 2006.

Cette technologie a été remplacée dans les années 1990 par la batterie Ni-MH (Nickel Métal Hydride). Cette dernière est limitée en termes de densité d'énergie, de performances à basse température et présente un effet mémoire modéré. Elle souffre aussi d'un taux d'autodécharge élevé (30 % par mois), sans oublier les problèmes liés à son recyclage.

La batterie à base de lithium est désormais la technologie la plus utilisée pour les systèmes portables et dans le domaine de l'automobile. En effet, ces batteries n'ont pas

d'effet mémoire, et l'auto décharge est très faible par rapport aux autres technologies (de l'ordre de 10% par an). De plus, le lithium possède un des plus bas potentiels (-3,04 V/ENH) parmi tous les matériaux d'électrode connus (Tableau 1.1). Il possède donc un caractère réducteur très important qui, associé à un oxydant, peut former un couple électrochimique dont la force électromotrice est bien supérieure à celle de tous les autres couples connus.

Matériaux	Potentiel de réduction Standard à 25°C [V/ENH]	Capacité spécifique [Ah/kg]
Li	-3.04	3860
Ca	-2.84	1340
Na	-2.71	1160
Mg	-2.38	2200
Al	-1.66	2980
MH	-0.83	450
Zn	-0.76	820
Fe	-0.44	960
Cd	-0.4	480
Pb	-0.13	260
H₂	0	26590

Tableau 1.1: Caractéristiques des matériaux d'électrodes négatives [4]

Enfin, Le lithium possède une très faible masse volumique ($0,54 \text{ g/cm}^3$), par conséquence, sa capacité spécifique (3860 Ah/kg) est plus élevée que celle des matériaux concurrents en usage, notamment le Métal Hydride (450Ah/kg), le Cadmium (480 Ah/kg) et le Plomb (260 Ah/kg)[5]. Les performances des différents types de batteries peuvent être comparées dans la représentation de la Figure 1.1.

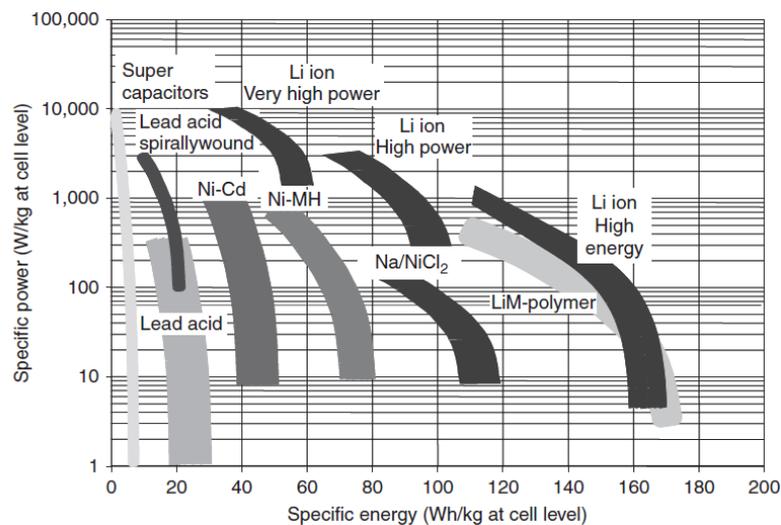


Figure 1.1: Diagramme de Ragone pour les accumulateurs électrochimiques [6]

Ce diagramme, qui représente la puissance spécifique en fonction de l'énergie spécifique, est connu dans la littérature sous le nom de diagramme de Ragone. On y classe les différentes technologies selon le couple puissance spécifique (W/kg) – énergie spécifique (Wh/kg), toutes deux généralement reportées sur une échelle logarithmique. Sur la Figure 1.1, où la densité d'énergie est en échelle décimale, la supériorité des batteries à base de lithium par rapport aux autres technologies apparaît clairement. Les grandeurs dans ce diagramme sont calculées en divisant la puissance maximale et l'énergie totale par la masse de l'élément considéré. Il s'agit donc d'un bon moyen de comparaison relative entre les différentes technologies, mais ce diagramme ne donne pas les vraies valeurs de ces grandeurs. En effet, dans une batterie, il convient de prendre en compte les éléments de protection et d'assemblage, le système de refroidissement ainsi que le système de gestion responsable de la sécurité et de l'équilibrage des éléments. Tous ces constituants augmentent le poids du système batterie et donc diminuent son énergie et sa puissance spécifique. Cependant, les propriétés intrinsèques du lithium-ion en font un accumulateur très intéressant.

2 - Grandeurs caractéristiques des batteries

Les générateurs électrochimiques sont des dispositifs capables de restituer sous forme électrique une énergie stockée chimiquement. On distingue usuellement la pile, pour laquelle les réactions mises en jeu sont irréversibles, de l'accumulateur qui, à l'inverse, est rechargeable. Le terme de batterie désigne quant à lui une association série et/ou parallèle de générateurs élémentaires (piles ou accumulateurs). Dans ce qui suit, nous nous intéresserons exclusivement aux batteries d'accumulateurs.

L'élément est une cellule électrochimique unitaire contenant deux électrodes plongeant dans un électrolyte, il fonctionne spontanément dans le sens générateur lorsque ses électrodes sont mises en contact avec un circuit électrique extérieur.

Le module est un assemblage en série et/ou parallèle de plusieurs éléments de batteries. Le pack est quant à lui l'assemblage des modules de batterie. Le nombre de modules est calculé par rapport à la tension que la batterie doit fournir, et le nombre de branche en parallèle est déterminé par rapport à la puissance maximale que doit fournir la batterie.

Le système batterie correspond à un pack de batterie associé à un système de gestion (dont l'acronyme est BMS pour Battery Management System en anglais). Les principales tâches de ce dernier se résument à l'équilibrage des cellules, à de la gestion thermique, et à de la protection des éléments vis-à-vis des phénomènes de surcharge et de sous-charge qui peuvent s'avérer très dangereux.

2.1 - Tension à vide, nominale, chute de tension, seuils

La tension à vide est la différence de potentiel aux bornes de l'accumulateur en circuit ouvert (à vide). Elle est appelée également force électromotrice. Elle dépend étroitement du couple électrochimique sélectionné pour les deux électrodes, de la température et de l'état de charge de l'accumulateur.

La tension nominale de l'accumulateur est souvent donnée par les constructeurs de batteries comme caractéristique dimensionnante. Elle correspond en général à la tension à vide pour un état de charge de 50% mesurée à température ambiante[7].

La chute de tension est la diminution (respectivement l'augmentation) de la tension observée aux bornes de la batterie lorsque cette dernière est parcourue par un courant de décharge (respectivement de charge). Elle contribue à ses pertes. Plusieurs phénomènes physiques intervenant à l'intérieur de l'accumulateur sont à l'origine de cette chute, tel que les phénomènes de polarisation, de transfert de charge, de diffusion et les contacts ohmiques.

Chaque élément a un domaine de fonctionnement défini par des seuils de tension minimum et maximum, en dehors desquels il ne doit jamais être amené à fonctionner. Cet intervalle correspond à un domaine de stabilité électrochimique dans lequel les mécanismes mis en jeu dans l'accumulateur restent maîtrisés. La sécurité des batteries à base de lithium est particulièrement sensible à cet intervalle. En effet, un dépassement du seuil supérieur de la tension engendre des réactions chimiques exothermiques dans l'accumulateur pouvant mener à l'explosion. On parle dans ce cas du phénomène de surcharge. Dans le cas inverse, un dépassement de la borne inférieure peut conduire à des réactions irréversibles causant la diminution des taux des matériaux actifs et donc la détérioration de l'accumulateur. Ce cas est désigné par le phénomène de sous-charge. Les valeurs des seuils de tension dépendent de la technologie de l'accumulateur. À titre d'exemple, un accumulateur lithium-ion polymère du type NMC possède un intervalle de tension compris entre 2,7 V et 4,2 V.

2.2 - Capacité nominale, résiduelle

La capacité est définie comme la quantité de charge, exprimée en Ah, qu'il est possible d'obtenir d'un accumulateur, initialement chargé, lors d'une décharge complète de l'accumulateur avec un courant constant [8]. Pour un type d'accumulateur donné, la valeur de la capacité varie en fonction de la température et du courant. Différentes lois, notamment les loi de Peukert [9] et celle de Shepherd [10], décrivent l'évolution de la capacité en fonction de ces paramètres. La Figure 1.2 illustre la variation de la capacité en fonction du courant de décharge (figure à gauche) et de la température (figure à droite) dans le cas d'un élément lithium-ion polymère de type NMC [11].

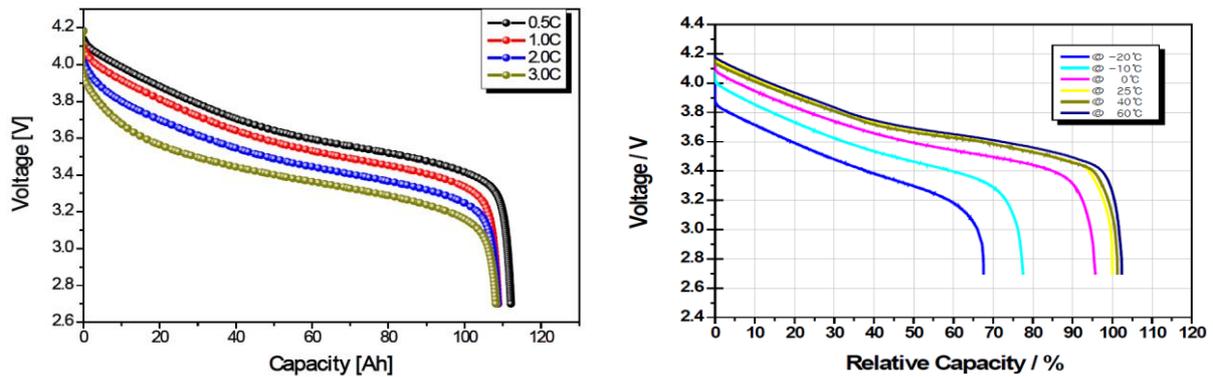


Figure 1.2 : Evolution de la capacité en fonction du courant de décharge (figure à gauche) et de la température (courant à droite) [11].

On désigne par le symbole C_m la capacité obtenue par une décharge de m heures avec un courant constant. Par exemple, lorsqu'on parle d'une capacité C_2 , cela revient à évoquer la quantité de charge obtenue par une décharge de 2 heures à un courant constant de $C_2/2$ Ampère. La détermination de la capacité se fait en général expérimentalement par comptage coulombique c'est-à-dire l'intégration du courant suivant le temps. L'expression de la capacité échangée est donnée par l'Équation 1.1.

Équation 1.1 :

$$C[Ah] = \frac{1}{3600} \int i(t). dt$$

La capacité nominale C_n correspond à la capacité annoncée par le constructeur, obtenue à un régime de décharge nominal et respectant les critères initiaux et finaux du constructeur.

La capacité résiduelle est la quantité de charge qu'il est possible d'obtenir lors d'une décharge complète de l'accumulateur, qui n'est pas forcément totalement chargé, avec un courant constant.

2.3 - Régime de décharge

Il s'agit de représenter le courant constant de décharge d'une façon unique quel que soit la capacité totale de l'accumulateur. Deux approches sont couramment utilisées dans la littérature pour le faire, soit en se référant à la durée de décharge totale, soit en utilisant la capacité nominale de l'accumulateur.

- **Durée de décharge :**

Le régime de décharge peut être représenté par le symbole I_m pour désigner le courant capable de décharger un accumulateur de l'état totalement chargé à l'état totalement

déchargé en m heures. Par exemple, un courant I_{10} est capable de totalement décharger l'accumulateur en 10 heures.

- **Taux de C :**

On utilise souvent aussi une fraction de C pour représenter le régime de décharge. Il s'agit d'exprimer le courant en fonction de la capacité nominale C_n . Un courant ayant une valeur égale à celle de C_n est le régime de décharge référence, en n heures. Les courants peuvent être donc exprimés en fonction de ce courant ($I = k \cdot C_n$).

2.3.1 - État de charge et profondeur de décharge

Désigné par l'acronyme SOC (pour State Of Charge en anglais), il représente le ratio de la quantité de charges électriques présentes dans l'accumulateur par rapport à celle qu'il est potentiellement capable de stocker. Un accumulateur ayant un SOC de 100% est considéré comme étant totalement chargé, un SOC de 0% désignant l'état totalement déchargé. L'état de charge peut être exprimé par l'Équation 1.2.

Équation 1.2 :

$$SOC = \frac{\text{Capacité Résiduelle}}{\text{Capacité totale}} \times 100$$

Toutefois, cette définition porte souvent à interprétations. En effet, la capacité totale de l'accumulateur n'est pas fixe au cours de l'usage. Elle varie en fonction du régime de décharge et de la température, comme montré précédemment, et aussi en fonction du vieillissement. Dans ce document, pour le calcul du SOC, on adopte la valeur de la capacité totale nominale fournie par le constructeur, qui est calculé à température ambiante et avec le régime de décharge de référence (par exemple 0,5C pour les batteries destinées aux véhicules électriques) à l'état neuf de l'accumulateur.

On utilise également souvent la notion de profondeur de décharge. Désignée par l'acronyme DOD (pour Depth Of Discharge en anglais), elle correspond au pourcentage de la quantité de charge déchargée à partir d'une batterie pleinement chargée état plein. Elle est déterminée par l'Équation 1.3.

Équation 1.3 :

$$DOD = 100 - SOC = \frac{\text{Capacité déchargée à partir de l'état pleinement chargé}}{\text{Capacité totale}} \times 100$$

2.3.2 - Grandeurs spécifiques, rendement

Appelée aussi capacité massique, la capacité spécifique d'un accumulateur est le rapport de sa capacité nominal à sa masse. Généralement exprimée en Ah/kg, elle traduit

l'aptitude d'une technologie d'accumulateurs à stocker une quantité d'électricité dans une quantité de matière limitée.

On définit par énergie spécifique (respectivement puissance spécifique) la quantité d'énergie stockée dans l'accumulateur (respectivement la puissance maximum qu'il est capable de délivrer) par unité de poids. Cette grandeur s'exprime usuellement en Wh/kg (respectivement en W/kg). Par analogie, on définit par densité volumique d'énergie le ratio entre la quantité d'énergie stockée dans l'accumulateur (respectivement la puissance maximum qu'il est capable de délivrer) et son volume. Cette grandeur s'exprime usuellement en Wh/l (respectivement en W/l). Le report de ces grandeurs dans le plan de Ragone permet de comparer les différentes technologies batteries comme cela a été précédemment illustré.

Le rendement faradique est défini comme le rapport entre la quantité de charge restituée lors de la décharge de l'accumulateur et celle absorbée lors de la charge. Ce rendement ne peut excéder la limite physique de 1. La quantité de charge ainsi non restituée correspond à la fraction du courant qui contribue aux réactions de bord comme la réduction d'électrolyte dans le cas des accumulateurs Li-ion.

De façon plus classique, on définit également le rendement énergétique qui correspond au rapport entre l'énergie restituée et l'énergie absorbée par l'accumulateur. Il dépend du rendement faradique de l'accumulateur et des pertes liées au passage du courant dans son impédance interne.

3 - Principe de fonctionnement et constitution

Le principe d'un accumulateur électrochimique repose sur l'exploitation de deux couples oxydo-réducteur, Ox_1/Red_1 et Ox_2/Red_2 , se trouvant au niveau de deux électrodes. Leur choix se fait par rapport au potentiel standard du matériau d'électrode et de sa capacité massique. Le potentiel d'électrode est négatif pour les réducteurs (matériaux d'anode) et positif pour les oxydants (matériaux de cathode). Afin d'obtenir un générateur de force électromotrice élevée, il faut associer un réducteur dont le potentiel standard est le plus bas possible à un oxydant dont le potentiel standard est le plus élevé possible. Une fois les deux matériaux d'électrodes sélectionnés, l'enjeu est de trouver un électrolyte adapté, c'est-à-dire inerte vis-à-vis de ces matériaux

Un élément d'accumulateur électrochimique est constitué de deux électrodes plongées dans l'électrolyte permettant aux électrons de circuler d'une électrode à l'autre (Figure 1.3). Les électrodes comportent la matière active responsable des réactions chimiques qui assurent le fonctionnement de l'accumulateur. L'électrolyte joue le rôle du conducteur ionique entre les deux électrodes. Pendant la décharge, une réaction d'oxydation se produit à

l'électrode négative suite au manque d'électrons. De même, en arrivant sur l'électrode positive, les électrons vont produire une réduction à l'interface électrochimique[8].

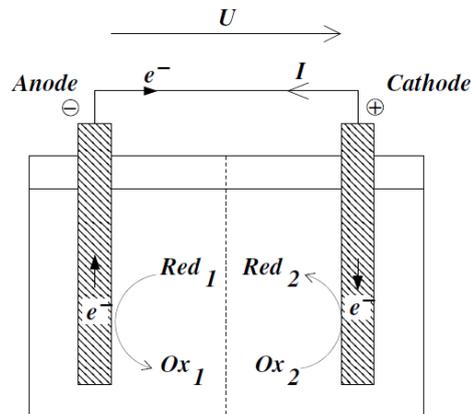


Figure 1.3 : Représentation schématique d'une batterie en décharge

3.1 - Constitution matérielle d'un élément

Comme mentionné ci-dessus, un élément de base d'un accumulateur électrochimique est formé de trois constituants principaux:

- L'anode (ou l'électrode négative): elle fournit les électrons au circuit externe, et subit des réactions d'oxydation pendant la phase de décharge.
- La cathode (ou l'électrode positive): elle accueille les électrons venant du circuit externe (envoyés par l'anode), et subit des réactions de réduction pendant la phase de décharge.
- L'électrolyte assure le transfert de charge, sous forme ionique, dans l'élément entre l'anode et la cathode. En général, il est sous forme liquide, constitué d'eau ou d'autres solvants, avec des sels, des acides ou des composants alcalins afin d'augmenter la conductivité ionique. Cependant, certaines batteries utilisent des électrolytes solides, formant des conducteurs ioniques aux températures de fonctionnement[5].

Une membrane isolante, appelée séparateur, est utilisée pour séparer les électrodes en termes de conduction électrique pour éviter les courts-circuits internes dans l'élément.

Par la suite, on s'intéressera uniquement aux accumulateurs électrochimiques à base de lithium, considérés comme la technologie la plus prometteuse actuellement pour les raisons présentées dans le paragraphe 1 -

3.1.1 - Électrodes

L'usage consiste, particulièrement dans le cas des accumulateurs au lithium, à désigner l'électrode positive par cathode et la négative par anode. On sait qu'une électrode positive est alternativement cathode puis anode au cours d'un cycle constitué d'une décharge suivie d'une charge et que la situation est inverse pour l'électrode négative. L'appellation d'usage, adaptée dans ce manuscrit, se réfère donc au fonctionnement en décharge.

3.1.1.1 - Électrode négative

Selon la constitution de l'électrode négative, on peut distinguer deux types d'accumulateurs : l'association du lithium à un métal forme la famille des accumulateurs lithium-métal, tandis que les anodes réalisées par des matériaux d'insertion lithiés (notamment à base de carbone) constituent la famille des accumulateurs lithium-ion.

Grace à la capacité spécifique théorique élevée du lithium (3860 Ah/kg), les accumulateurs lithium-métal offrent des perspectives très attrayantes. Cependant, dans l'état de l'art actuel, un tel accumulateur ne peut être réalisé avec un électrolyte liquide pour des raisons de sécurité. En effet, une élévation accidentelle de température peut déclencher des réactions redox exothermiques entre le lithium et les composants en solution, menant à un emballement thermique dont la conséquence est la fusion du lithium puis l'explosion de l'accumulateur. D'autres circonstances, tel que des situations de surcharge ou sur-décharge, peuvent mener aussi à un emballement thermique. D'autre part, la réalisation des accumulateurs aux anodes en lithium métallique se confronte à des difficultés à cause de la réactivité du lithium avec l'électrolyte et l'évolution de sa structure au cours du cyclage. En effet, pendant la recharge, une partie du lithium déposé sur l'électrode réagit avec l'électrolyte pour former une couche de passivation. La partie restée métallique de l'électrode, non uniforme, est sujette à la croissance des dendrites. Ces dernières, en se développant, risquent de percer le séparateur, et d'atteindre l'électrode positive, provoquant ainsi un court-circuit interne [4].

Compte-tenu de ces problèmes, l'électrode métallique a été abandonnée au profit des composés d'insertion présentant, une fois lithiés, un potentiel relatif au lithium aussi faible que possible. Cela est possible car les ions lithium peuvent s'insérer de façon réversible dans divers matériaux sans modifier les propriétés mécaniques et électriques. Par exemple, pour les matériaux carbonés de type graphite (LiC_6), le lithium s'insère entre les plans de carbone à un potentiel compris entre 0,02V et 0,3V par rapport au lithium (Tableau 1.2). Cette insertion se traduit par une ionisation partielle des atomes de lithium, d'où vient l'appellation « lithium-ion ». Ce type de batterie dont le fonctionnement est connu sous le nom de « rocking-chair », a été proposé par M. Armand dans les années 70 [12], [13], et puis en 1980 par Lazzari et Scrosati [14]. Le premier accumulateur utilisant une électrode de ce

type a été commercialisé par Sony en 1991, après avoir surmonté le problème de réversibilité qui pénalisait cette technologie [15]. L'utilisation des matériaux d'insertion lithiés cause par contre une baisse de la capacité spécifique théorique (372 Ah/kg), qui peut paraître médiocre en la comparant à celle du lithium métallique (3860 Ah/kg). Mais cette baisse n'est pas pénalisante pour les performances globales de l'accumulateur en termes de capacité spécifique du dispositif complet, car elle reste toujours supérieure à celle des électrodes positives susceptibles d'être utilisés.

Matériaux	Potentiel relatif par rapport au lithium [V]	Capacité spécifique [Ah/kg]
Li-Al	0,2	800
Li _{0,5} C ₆ (coke)	0,2 - 1,3	185
LiC ₆ (graphite)	0,02 - 0,3	372
LiWO ₂	0,3 - 1,4	120
LiMoO ₂	0,8 - 1,4	199
LiTiS ₂	1,5 - 2,7	226

Tableau 1.2: Matériaux d'insertion anodique [4]

3.1.1.2 - Électrode positive

Le choix de l'électrode positive varie selon que l'anode est constituée du lithium métallique (batterie lithium-métal) ou des matériaux d'insertion lithiés (batterie lithium-ion) [16]. Dans le cas de l'utilisation du lithium métallique à l'anode, l'électrode positive n'a pas besoin d'être lithiée. Cette catégorie d'électrodes est baptisée « basse-tension » car leur potentiel relatif au lithium est de l'ordre de 3V. Dans le second cas, l'anode est par contre pauvre en lithium, l'électrode positive doit désormais contenir suffisamment du lithium pour assurer le fonctionnement de l'accumulateur. Les potentiels de cette catégorie d'électrodes sont de l'ordre de 4 V, l'électrode est ainsi appelée électrodes « haute-tension ». Cela étant, rien ne sépare, d'un point de vue théorique, ces deux groupes de matériaux[4]. A l'égard des difficultés de sécurité, mentionnées précédemment qui freinent la commercialisation des accumulateurs lithium-métal, les électrodes « haute-tension » ont connu un meilleur développement au détriment de celles « basse-tension ». Dans ce dernier cas, les matériaux les plus utilisés selon la littérature sont le dioxyde de manganèse (MnO₂) et les dérivées des oxydes de vanadium (V₆O₁₃, V₂O₅ et LiV₃O₈).

Quant aux électrodes « haute-tension », les matériaux les plus courants sont des oxydes de métaux de transition lithiés, plus particulièrement LiCoO₂, LiNiO₂ et LiMn₂O₄. Les deux premiers se caractérisent par une structure en couches, munie d'espaces interstitiels à deux dimensions, tandis que celle de LiMn₂O₄ est de type spinelle, munie d'espaces tridimensionnels.

Les deux oxydes LiCoO_2 et LiNiO_2 sont utilisés comme matériaux d'électrode positive depuis longtemps. Dans un premier temps, c'est l'oxyde de cobalt qui a été privilégié en raison de son potentiel élevé (rapporté au lithium) pouvant atteindre 4,5V. Mais son développement a été freiné par son prix élevé, les problèmes liés à la sécurité et surtout sa toxicité. L'oxyde de nickel d'un prix deux fois moins élevé et d'une capacité spécifique plus importante (220Ah/kg pour le LiNiO_2 contre 180 Ah/kg pour le LiCoO_2) semblait représenter une alternative intéressante. Mais cette perspective s'est heurtée à des difficultés résultant du phénomène suivant : Des ions Ni^{2+} viennent occuper les sites de la structure en couche destinés aux ions Li^+ , provoquant une distorsion de cette dernière et perturbant les processus d'insertion-désinsertion des ions Li^+ . Pour cette raison, les électrodes positives à base d'oxyde de nickel ont été, dans un premier temps, condamnées et les accumulateurs Li-ion équipant les dispositifs portables ont été munis d'électrodes positives à base de LiCoO_2 . L'importance de ce marché a fait de cette technologie un standard. Plus tard, la firme Sanyo a proposé de substituer une partie du nickel par du cobalt, ce qui a permis de fortement diminuer le taux de présence des ions Ni^{2+} [4].

Néanmoins dans le cas des gros systèmes, les considérations économiques empêchent l'oxyde de cobalt de s'imposer au niveau de l'électrode positive à cause de son prix très élevé. Les laboratoires de recherche et les industriels à se sont donc tournés vers les oxydes de manganèse et de nickel. Bien qu'il offre environ 10% de moins de capacité spécifique que le LiCoO_2 , l'oxyde de manganèse lithié LiMn_2O_4 apparaît, a priori, comme un bon candidat grâce à son coût (le prix du manganèse étant de l'ordre du dixième de celui du cobalt) et d'absence de toxicité[16]. Comme les matériaux cités précédemment, l'oxyde de manganèse lithié est aussi sujet à des défaillances. En effet, sa durée de vie, en cyclage ainsi que calendaire, est médiocre surtout à hautes températures. Cela est dû à la solubilité de l'oxyde de manganèse dans l'électrolyte.

Les alliages de matériaux lithiés du type NMC ($\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1-y-z}\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) ou NCA ($\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1-y-z}\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) pénètrent aussi le marché de l'électronique portable et de l'automobile. Les premières cathodes de ce type sont apparues en 1999 [17]. Cette alliage offre une capacité spécifique pouvant atteindre 200 Ah/kg, un potentiel arrivant jusqu'à 4,6V, une sécurité et une cyclabilité améliorées. Ces technologies commencent à intégrer le marché de l'automobile grâce à la commercialisation par des grands fabricants de batteries ; à titre d'exemple, citons SAFT pour le NCA et Kokam pour le NMC.

Enfin, le phosphate de fer lithié (LiFePO_4) commence lui aussi à pénétrer le marché. Il a l'avantage d'être un matériau non toxique et peu coûteux, offrant une capacité spécifique pouvant aller jusqu'à 170 Ah/kg. On peut cependant lui reprocher sa conductivité électronique médiocre [18]. Mais cela n'empêche pas de considérer le phosphate de fer lithié comme un candidat prometteur pour les batteries à base de lithium.

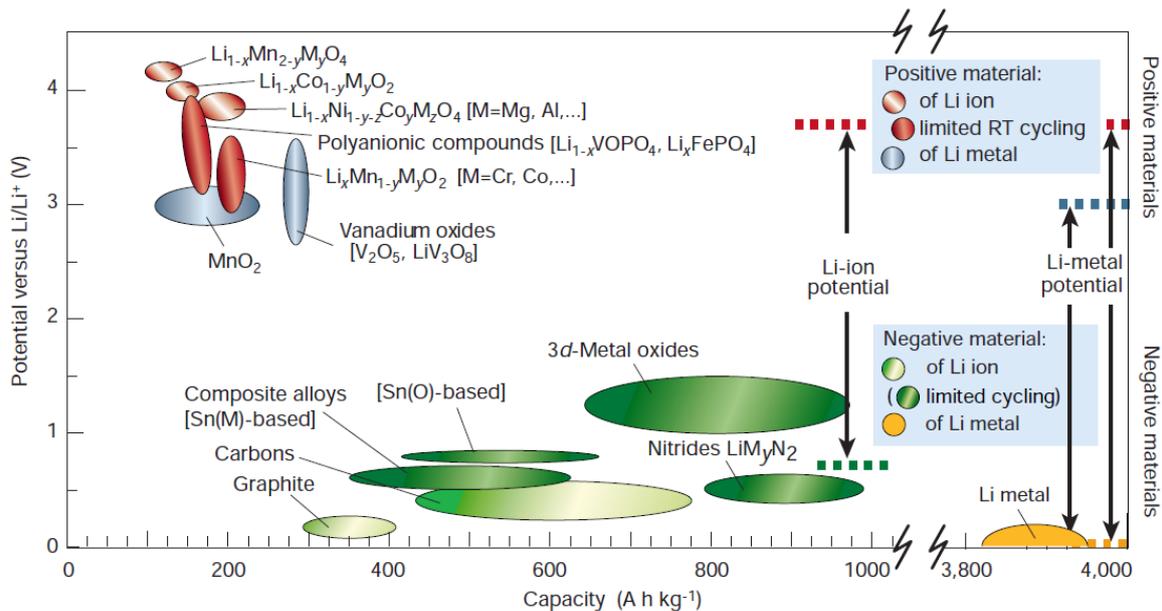


Figure 1.4: Matériaux d'électrodes positives et négatives des batteries au lithium selon leur potentiel relatif par rapport au lithium et leur capacité spécifique [16]

La Figure 1.4 regroupe toutes les associations possibles entre les électrodes positives et négatives selon leurs compositions. Les électrodes sont classées selon leur capacité spécifique (axe des abscisses) et le potentiel relatif par rapport au couple Li/Li⁺ (axe des ordonnées). Cette figure montre que la capacité spécifique des électrodes positives est inférieure à celle des électrodes négatives. La capacité spécifique de l'accumulateur est donc limitée par celle de l'électrode positive. Le choix de l'électrode négative par les constructeurs n'est donc pas lié à la capacité spécifique, mais il se base plutôt sur des critères économiques et de sécurité. C'est pour cela que les électrodes négatives sont souvent à base de graphites ou de carbone, malgré leur faible niveau de capacité spécifique.

Lors de la fabrication des électrodes, les alliages cités précédemment sont reportés sur des feuillards métalliques ayant de bonnes propriétés conductrices électriques. Les métaux utilisés sont la plupart du temps de l'aluminium (pour l'électrode positive) et du cuivre (pour l'électrode négative).

3.1.2 - Électrolyte

Le rôle de l'électrolyte est d'assurer le transport des ions au sein de l'accumulateur. Il existe deux types d'électrolytes: les liquides et les polymères. Les premiers sont les plus utilisés dans les accumulateurs lithium-ion; ils sont formés de solvants organiques ou aqueux auxquels sont ajoutés des sels de lithium. Les polymères sont des électrolytes solides ou gélifiés et peuvent être utilisés dans les accumulateurs lithium-ion et lithium-métal; on parle dans ce cas d'accumulateurs lithium-ion polymère ou lithium-polymère respectivement. Le choix de l'électrolyte doit répondre à plusieurs exigences. Tout

d'abord, il doit avoir une très bonne conductivité ionique sur une large gamme de température (-20 à 60°C), typiquement 10^{-3} S/cm [19]. Il doit être électroniquement isolant pour éviter les phénomènes de court-circuit entre les deux électrodes.. En outre, l'électrolyte doit être stable électro-chimiquement aux potentiels des électrodes positives et négatives (couramment entre 0 et 4,5V par rapport au couple Li^+/Li), et thermiquement jusqu'à plus de 70°C [5]. Il est aussi nécessaire que l'électrolyte choisi soit compatible avec les autres composants de l'accumulateur de façon à ne pas avoir des réactions secondaires parasites. Enfin, il ne faut pas non plus oublier l'enjeu économique et écologique qui joue également un rôle non négligeable dans le choix de l'électrolyte.

Si beaucoup de sels de lithium existent (LiClO_4 , LiBF_4 , LiCF_3SO_3 , ...), les électrolytes les plus utilisés aujourd'hui dans le commerce sont composés de deux à quatre solvants (EC, DMC, DEC et/ou PC) et de l'hexafluorophosphate de lithium (LiPF_6) [20].

Les électrolytes polymères sont réalisés en incorporant les sels de lithium dans des matrices polymères formant ainsi des couches minces. Cette catégorie d'électrolyte présente une conductivité médiocre par rapport aux électrolytes liquides, mais elle est moins réactive au lithium, ce que lui offre une meilleure stabilité permettant de fonctionner à des températures élevée (allant jusqu'à 100°C) [5]. L'état solide de l'électrolyte donne plus de liberté dans la conception de la géométrie de la batterie.

3.1.3 - Séparateurs

Le séparateur constitue une barrière physique entre les deux électrodes dans les batteries lithium-ion et doit donc être un isolant électrique tout en assurant la conductivité ionique nécessaire au fonctionnement de l'accumulateur. Il est constitué d'une membrane polymère à caractère poreux de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur. Les matériaux les plus répandus utilisés dans les séparateurs sont le polyéthylène (PE) et/ou polypropylène (PP). Des séparateurs tri-couches du type PP-PE-PP ont été mis au point pour assurer la fonction de séparateur « intelligent » en fondant aux environs de 120-130°C, bloquant ainsi la diffusion des ions de l'électrolyte en cas d'emballement thermique [5].

Dans le cas des batteries lithium-polymère ou lithium-ion polymères, c'est l'électrolyte polymère qui, en plus de transporter les ions, joue aussi le rôle de séparateur [8].

4 - Caractérisation électrique des accumulateurs

La caractérisation des accumulateurs permet d'étudier leur comportement. Elle permet d'alimenter les valeurs prises par les paramètres des modèles de simulation, et de valider les résultats retournés par ces derniers a posteriori. Les accumulateurs Li-ion présentent en effet des propriétés fortement non-linéaires. Contrairement aux systèmes

linéaires dont la caractérisation en un seul point est suffisante, les systèmes non-linéaires doivent être caractérisés en différents points de fonctionnement judicieusement choisis afin de décrire de façon plus précise leur réponse à un type de sollicitation. Les principales méthodes pour caractériser les accumulateurs sont présentées dans ce qui suit.

4.1.1 - Caractérisation électrique dans le domaine fréquentiel : la spectroscopie d'impédance

La spectroscopie d'impédance est une technique moderne de caractérisation électrique des éléments électrochimiques tels que batteries, piles à combustible et supercondensateurs. Il s'agit d'un essai unique sur une large gamme de fréquences, allant de quelques mHz voire μ Hz jusqu'à plusieurs kHz, qui permet d'observer et de quantifier l'influence des différents phénomènes physiques et chimiques sur le comportement électrique de l'élément.

La spectroscopie d'impédance est, à l'origine, une méthode de caractérisation de systèmes linéaires invariants dans le temps. Or les éléments de stockage tels que les accumulateurs à base de lithium, sont des systèmes non linéaires. Afin de les caractériser par cette méthode, il est nécessaire d'utiliser des signaux de faible amplitude de façon à effectuer l'essai autour d'un point de fonctionnement (V,I) supposé quasi-stationnaire durant le test. De par ces conditions de test, le comportement fréquentiel de l'élément est considéré linéaire et invariant dans le temps.

Elle consiste en la mesure de la réponse en tension (respectivement courant) du système physique soumis à une excitation harmonique en courant (respectivement tension) de faible amplitude autour d'une polarisation statique en courant (respectivement tension) [21]. Dans le cas des accumulateurs, les mesures sont généralement effectuées en appliquant une perturbation de tension autour du potentiel d'équilibre de l'élément, qui n'est autre que l'OCV, afin de limiter la composante en courant continu et ainsi éviter toute dérive de l'état du système lors de la mesure. Certaines études ont toutefois été consacrées à la caractérisation d'accumulateurs Li-ion avec une polarisation en courant statique non nulle, c'est-à-dire, hors équilibre [22].

En examinant la réponse fréquentielle d'un élément représentée dans le plan de Nyquist, plusieurs phénomènes se distinguent (Figure 1.5) :

- Le phénomène de diffusion : à basses fréquences, le phénomène de diffusion est représenté par une droite.
- Les phénomènes de transfert de charge et de double couche : représentés dans le spectre d'impédance par un demi-cercle.

- Une résistance ohmique causant une chute de tension aux bornes de l'accumulateur. La valeur de la résistance correspond à l'intersection entre le spectre d'impédance et l'axe des réels dans le plan de Nyquist.

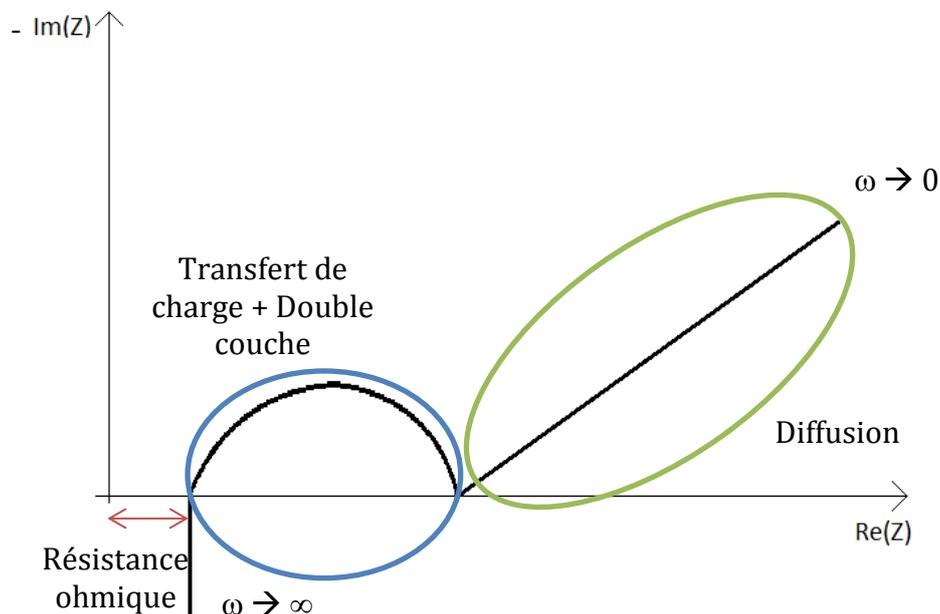


Figure 1.5 : Spectre d'impédance idéal représenté dans le plan de Nyquist

4.1.2 - *Caractérisation électrique dans le domaine temporel*

Les caractérisations à faibles courants peut s'avérer non représentatives du comportement des accumulateurs utilisés dans le secteur des transports qui sont sollicités par des niveaux plus élevés de courant : il est donc nécessaire dans certaines situations d'avoir recours à la caractérisation temporelle, qui permet d'utiliser des forts niveaux de courant [23]. Deux types de caractérisation sont connus dans la littérature : la chronopotentiométrie et la voltampérométrie cyclique. La première technique est plus couramment utilisée, et souvent désignée comme étant la caractérisation temporelle.

4.1.2.1 - *La chronopotentiométrie*

La chronopotentiométrie est un test à courant constant souvent utilisé pour la caractérisation des batteries. Cette technique consiste à suivre l'évolution du potentiel de la cellule au cours du temps lorsqu'on lui applique un créneau de courant à un ou plusieurs niveaux, en charge ou en décharge à différents niveaux de SOC. La mesure de tension se poursuit après l'interruption du courant, ce qui permet de recueillir des informations sur le comportement de l'accumulateur en régime libre. Ces mesures (temps, courant, tension) sont utilisées pour déterminer les caractéristiques de base de la cellule comme la capacité et résistance série équivalente. Il existe de nombreux profils normalisés considérés comme

références, on peut citer EUCAR en Europe [24], USABC, PNGV ou encore FreedomCar [25] aux Etats-Unis et la norme internationale IEC [26]. La chronopotentiométrie sera d'ailleurs bien adaptée à la caractérisation des accumulateurs étudiés dans ce travail de thèse et sera détaillée plus loin dans ce chapitre.

4.1.2.2 - La voltampérométrie cyclique

Cette technique, également appelée voltamétrie cyclique, consiste à faire varier la tension de l'élément de manière constante (dV/dt constant) entre deux valeurs et à mesurer la réponse en courant de l'élément. L'élément est chargé de sa tension initiale à une tension donnée, puis déchargé jusqu'à la tension initiale de l'essai.

Dans le cas des batteries à base de lithium, le comportement évolue au cours de la charge et de la décharge en fonction de l'état de charge. Le cycle doit donc être répété plusieurs fois afin de mettre en évidence des phénomènes électrochimiques. Ce type d'essai est ainsi couramment utilisé afin de caractériser les phénomènes d'oxydo-réduction et de déterminer les potentiels standards d'oxydation et de réduction [27].

4.1.3 - Caractérisation physico-chimique

Les méthodes de caractérisation physico-chimique ante- et post-mortem consistent à analyser l'état des constituants de la cellule avant et après vieillissement ou défaillance. Ce type d'essai permet d'observer l'état d'évolution d'un phénomène bien identifié à un stade défini du vieillissement. Cependant, il présente plusieurs inconvénients et demande la mise en œuvre des moyens importants. Ces tests sont destructifs puisqu'ils nécessitent le désassemblage du composant (en atmosphère inerte afin d'éviter le contact des matériaux avec l'eau ou l'oxygène). De plus, ils ne permettent pas de donner la tendance d'évolution des mécanismes mis en jeu lors du vieillissement, il s'agit plutôt d'une « photographie » de l'état du système à l'instant du test [28]–[31].

5 - Modélisation des accumulateurs au lithium

La simulation est devenue un outil incontournable y compris dans le domaine des accumulateurs électrochimiques. Elle permet notamment d'étudier le comportement des accumulateurs dans le cadre d'une utilisation définie, comme celle du véhicule électrique et hybride. La pertinence des résultats obtenus dépend étroitement de la qualité et du choix du modèle. L'enjeu de la modélisation consiste donc à développer des modèles offrant à la fois des temps de calculs faibles et des niveaux de précision élevés par rapport aux besoins de l'application. Si l'obtention d'une représentation sommaire du comportement des accumulateurs est aisée, la prise en compte fidèle des mécanismes électrochimiques dans les conditions extrêmes s'avère très complexe et s'obtient au détriment de la simplicité et le

temps de calcul du modèle. Un bon choix ne se base donc pas forcément sur la précision du modèle, mais plutôt sur le compromis précision, simplicité, temps de calcul voire facilité d'intégration dans un système plus global. Différentes approches de modélisation existent dont certaines sont présentées dans ce qui suit.

5.1 - Modélisation physico-chimique

Ce type de modélisation est très peu employé dans le domaine du génie électrique. Elle s'appuie sur les principes de la chimie et de la physique pour décrire le comportement précis de la cellule d'accumulateur. Son principal intérêt est qu'elle permet la compréhension des phénomènes limitant les performances des cellules, et les mécanismes fondamentaux de la génération de la puissance, permettant d'améliorer davantage la conception et les processus de construction des accumulateurs.

Dans la littérature, de nombreux travaux présentent des modèles électrochimiques pour les accumulateurs à base de lithium. Les recherches de Newman, Doyle et Pals [32]–[34] constituent les bases de ce type de modélisation. Celle-ci décrit les phénomènes de transport de charges des phases ioniques et électroniques au sein d'une électrode poreuse, transport de matière au sein du conducteur électrolytique et transport des ions lithium au sein de la phase solide d'électrode. On utilise souvent les équations de transport en vue de la structure composite des électrodes. Le modèle se base sur la résolution des équations différentielles couplées pour les différentes dimensions de l'espace. Cela permet, non seulement de calculer précisément la distribution locale en concentration, le potentiel, le courant et la température de l'élément à une échelle microscopique, mais aussi de prédire le comportement de l'élément à l'échelle macroscopique pour en déterminer les grandeurs comme la tension et le courant.

Ces modèles nécessitent la connaissance d'un grand nombre de paramètres pour être précis et fonctionnels (concentration de l'électrolyte, coefficient de diffusion, coefficient de transfert, géométrie des électrodes, etc...). Les constructeurs de batteries étant les seuls à connaître exactement ces paramètres, il est très difficile voire impossible d'avoir accès à ces données. Ce qui complique la mise en œuvre des modèles électrochimiques.

5.2 - Modélisation de type « boîte noire »

Généralement associés à une cartographie multidimensionnelle, ces modèles permettent de relier les réponses possibles du système à un type de stimuli donné, et ceci, indépendamment des mécanismes à l'origine de son comportement. Ils sont ainsi basés sur un principe d'observation.

Il s'agit de représenter l'accumulateur par une boîte noire ayant des entrées et des sorties constituées des grandeurs physiques liées au fonctionnement et aux conditions d'usage. En général, les entrées se composent du courant, de l'état de charge, de la température et de l'état de vieillissement quand il est possible de l'estimer. La grandeur qu'on cherche à estimer en sortie est généralement la tension. La boîte est constituée d'un estimateur capable de prédire les valeurs des sorties en fonction des entrées. Dans la littérature, plusieurs types d'estimateurs existent. Ils peuvent être basés sur des méthodes de régression mathématique non linéaire comme par exemple les machines à vecteurs supports [35]–[37], sur les réseaux de neurones [38]–[40] ou encore sur le principe de la logique floue . Les méthodes sont donc variées, mais le fonctionnement reste le même. Il est basé sur le principe d'apprentissage supervisé à partir des données expérimentales.

- ***Apprentissage supervisé :***

L'apprentissage supervisé est une technique d'apprentissage automatique où l'on cherche à produire des règles à partir d'une base de données.. La base de données d'apprentissage est un ensemble de couples entrée-sortie (x_n, y_n) , avec $1 \leq n \leq N$, $x_n \in X$ et $y_n \in Y$.

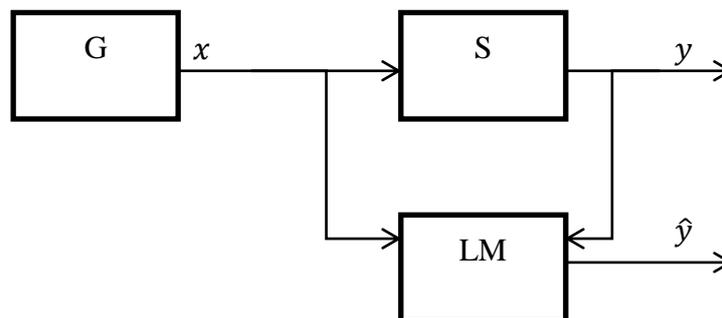


Figure 1.6: Modèle d'apprentissage supervisé[41]

Pendant le processus d'apprentissage décrit dans la Figure 1.6, la machine d'apprentissage (**LM**) observe les paires (x, y) (les données d'apprentissage). Après l'apprentissage, la machine répond par une valeur \hat{y} à n'importe quelle valeur de x à l'entrée générée par le bloc **G**. Le but est d'obtenir une valeur de \hat{y} la plus proche possible de l'observation y fournie par le système **S**[41].

Une fois le processus d'apprentissage achevé, le modèle doit être validé par de nouvelles données expérimentales. La qualité d'estimation du modèle sur un nouveau jeu de données ne doit pas beaucoup différer de celle lors du processus d'apprentissage. Si la différence est notable, on tombe dans le problème de sur-apprentissage, et on perd la capacité de généralisation du modèle [42]. Il faudra donc choisir soigneusement la base de données utilisée pour l'apprentissage de façon à représenter tout le domaine de validité du modèle.

En dehors de la difficulté du choix d'une base de données d'apprentissage permettant au modèle de décrire le comportement global, cette approche présente d'autres inconvénients. En général, le temps de calcul de l'estimateur est relativement long car basé sur de nombreuses équations complexes. De plus, il est difficile d'intégrer un modèle de ce type dans le modèle plus global d'un véhicule électrique. En effet, les modèles de véhicules électriques sont souvent basés sur l'estimation des grandeurs physiques par des équations connues dans les domaines de la mécanique ou du génie électrique.

5.3 - Modélisation énergétique

La modélisation énergétique consiste à modéliser tous les flux énergétiques au sein de l'accumulateur électrochimique sans avoir recours à des équations aux dérivées partielles. Elle traite les flux énergétiques de natures différentes, électrique, thermique ou fluïdique. La méthode la plus connue dans ce domaine est la représentation par Bond Graph qui consiste en une approche systémique [43]. Cette théorie, fondée sur le principe de la conservation de l'énergie, considère le flux d'énergie entre deux sous-systèmes d'un système physique (qui est l'accumulateur) comme le produit de deux variables qui constituent les entrées-sorties du système. Cette approche permet de conserver un lien fort avec les phénomènes physiques, et donne une très bonne estimation des pertes énergétiques occurrentes au niveau de l'accumulateur. Par contre, elle exige une très bonne connaissance de tous les phénomènes physiques, ce qui rend le processus d'identification du modèle très complexe.

5.4 - Modélisation par circuits électriques équivalents

Ce type de modélisation est très utilisé dans le domaine du génie électrique car il se concentre uniquement sur la description du comportement électrique de la batterie. Les modèles sous forme de circuits électriques équivalents peuvent être classés en deux groupes selon qu'ils utilisent ou pas des éléments d'impédance électrochimique.

5.4.1 - Modèles utilisant des composants électriques uniquement

Dans cette partie, les modèles sont composés uniquement d'éléments électriques : source de tension, résistances, capacités et inductances. Ils seront présentés du plus simple au plus complexe. La convention adaptée pour définir le signe du courant de la batterie (I_{bat}) est celle d'un générateur de tension et non pas un récepteur, c'est-à-dire que I_{bat} est positif pendant les phases de décharge.

5.4.1.1 - Modèle de base de type Thévenin

C'est un des modèles les plus utilisés pour une simple représentation du comportement de la batterie ou pour réaliser un premier dimensionnement d'équipements

d'électronique de puissance. Il s'agit de l'association d'une source de tension idéale avec une résistance en série. Cette dernière représente la résistance série équivalente de la batterie (R_{ohm}).

Ce modèle est très simple à mettre en application. Il était déjà utilisé dans la littérature en simulation pour étudier la qualité d'autres modèles plus complexes [44]–[46]. Par contre, il ne tient pas compte de la variation de ses paramètres en fonction de l'état de charge, de la température, du courant ou du vieillissement. Également, le comportement dynamique n'est pas bien représenté avec ce modèle.

Plusieurs améliorations de ce modèle ont été proposées pour prendre en considération l'influence de l'état de charge et du courant sur les paramètres du modèle [46], [47]. Kim et Ha [46] ont proposé une loi de décroissance linéaire de la tension OCV (E) et de la résistance ohmique (R_{ohm}) en fonction du DOD selon les équations suivantes.

Équation 1.4 :

$$E = E_0 - k_E \cdot DOD$$

Équation 1.5 :

$$R_{ohm} = R_0 - k_R \cdot DOD$$

E_0 et R_0 représentent la tension OCV et la résistance ohmique respectivement quand la batterie est totalement chargée, k_E et k_R sont des coefficients constants à déterminer expérimentalement.

Cun et al. [47] ont proposé une autre variante dédiée aux batteries plomb-acide, en considérant que la tension OCV reste constante, et R_{ohm} varie en fonction du SOC et du courant selon les équations ci-dessous.

Équation 1.6 :

$$R_{ohm} = \frac{R_0}{SOC^k}$$

Équation 1.7 :

$$SOC = 1 - \frac{\sum Ah}{C_{10}}$$

avec k est un coefficient qui varie en fonction du courant il sera déterminé en fonction des 3 coefficients k_1, k_2 et k_3 dont les courbes de variation devront être fournies par le constructeur). C_{10} la capacité à 10 heures (en ampères-heures) mesurée à la température de référence donnée par le constructeur et $\sum Ah$ correspond à la totalité des Ampère.heure.

Malgré ces améliorations, ce modèle reste très simpliste et ne prend pas en considération les différents phénomènes physiques agissant sur le comportement dynamique de la batterie. De plus, d'après notre expérience avec les batteries lithium, les lois décrites par l'Équation 1.7 ne représentent pas la variation réelle de la résistance en fonction du SOC, qui sera détaillée plus tard dans ce document.

5.4.1.2 - **Modèle de type Thévenin avec circuit du premier ordre**

Ce modèle est également très courant dans la littérature [44], [46], [48]–[51], il s'agit de l'ajout d'un dipôle RC ($R_t // C_{DC}$) au modèle basique (Figure 1.7) pour mieux modéliser le comportement dynamique de la batterie en introduisant une constante de temps ($\tau = R_t \cdot C_{DC}$).

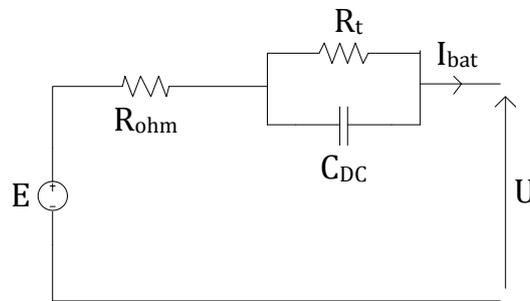


Figure 1.7 : Modèle de type Thévenin avec circuit du premier ordre

R_{ohm} dans ce cas est équivalente à la somme des résistances en série des phases solides et liquides [50], R_t est la résistance générée par le phénomène de transfert de charge à l'interface électrode-électrolyte et C_{DC} représente la capacité de double couche dans les électrodes poreuses [51].

5.4.1.3 - **Modèles améliorés**

En guise d'amélioration, plusieurs travaux ont proposé d'exprimer les paramètres du modèles (E , R_{ohm} , R_t et C_{DC}) en fonction du SOC, de la température et/ou du courant [48], [49], [52]. Les paramètres du modèle de la batterie ne sont donc pas constants, ils varient en fonctions des conditions de fonctionnement. Chaque paramètre du modèle est en général exprimé sous forme d'un tableau de valeurs en fonction des points de fonctionnement. Les valeurs de ce tableau sont calculées en ayant recours aux procédures d'identifications temporelles.

On peut trouver aussi des modèles améliorés utilisant des diodes idéales ayant pour objectif de séparer le fonctionnement en décharge de celui en recharge. En effet, il est constaté que le comportement de la batterie, et donc les paramètres de son modèle, est

différent pendant la phase de recharge que celui pendant la décharge [44], [53]–[55]. Une résistance dans le modèle est donc remplacée par un bloc antiparallèle d'une résistance et une diode par branche comme le montre la Figure 1.8. On désignera une résistance variable par le symbole $\text{---}\diagup\diagdown\text{---}$ et une capacité variable par $\text{---}\text{||}\text{---}$.

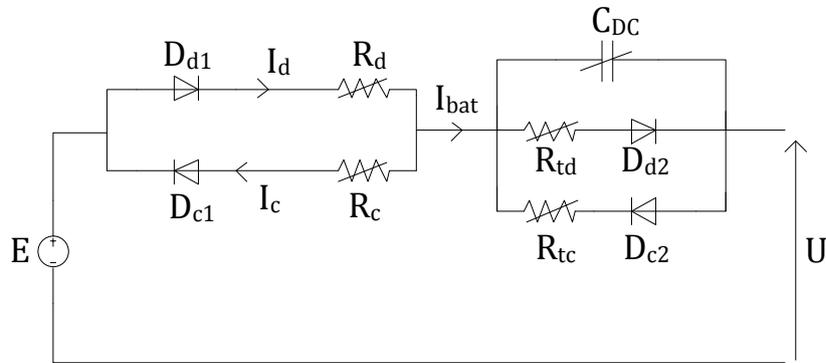


Figure 1.8 : Modèle amélioré dont les paramètres dépendent du point de fonctionnement avec phases de décharge et de charge séparées

D'autres modèles sont proposés dans la littérature pour améliorer la représentation du comportement de l'accumulateur, citons parmi les plus connus le modèle de Zimmerman repris par Capel [56] et le modèle de second ordre présenté par Dubarry [57] ajoutant un dipôle RC supplémentaire au modèle de la Figure 1.7 pour mieux représenter le comportement dynamique de l'élément.

5.4.2 - Modèles à éléments d'impédance électrochimique

Il est difficile de modéliser les phénomènes de transfert de charge, de double couche et de diffusion en utilisant seulement des composants électroniques basiques. Au vu de la forme du spectre d'impédance, il est nécessaire d'avoir recours à des composants spéciaux propres aux phénomènes électrochimiques permettant d'avoir une meilleure reproduction de la réponse fréquentielle de l'accumulateur. Il s'agit de l'impédance de Warburg et des éléments à phase constante (acronyme anglais CPE pour Constant Phase Element).

Ce sont des composants dont l'expression fréquentielle fait intervenir un exposant d'ordre non entier reposant sur le principe de dérivation non entière. L'élément à phase constante est en effet un cas généralisé de la capacité. Son impédance est exprimée dans l'Équation 1.8.

Équation 1.8 :

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Qp^\psi}$$

Le coefficient ψ est l'ordre de dérivation du CPE. Il est compris entre 0 et 1.

Dans le cas extrême où ψ est égal à 1, le CPE correspond à une capacité de valeur Q . Par contre la valeur de 0 correspondrait à une résistance ohmique. L'association en parallèle d'un CPE avec une résistance possède un spectre fréquentiel équivalent à un arc dans le plan de Nyquist. La forme de l'arc dépend directement de la valeur de ψ comme le montre la Figure 1.9. Cela permet d'estimer plus précisément les phénomènes de double couche et de transfert de charge. Lorsque cette dernière est égale à 0.5, on parle d'impédance de Warburg.

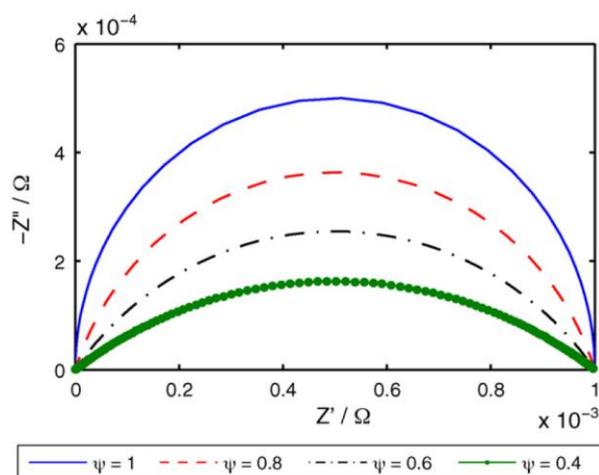


Figure 1.9: Influence de la valeur de ψ sur la forme de la réponse fréquentielle de R//CPE

En revanche, l'utilisation de composants d'ordre non entier comme un CPE ou une impédance de Warburg pose un problème au niveau temporel. En effet, la transformation de Laplace inverse, usuellement utilisée pour repasser du domaine fréquentiel au domaine temporel, n'est pas applicable dans ce cas. Pour passer en mode temporel, il est nécessaire d'approximer l'élément d'ordre non entier par un circuit composé d'un nombre impair de branches R//C [58]. Cette méthode augmente donc le nombre de paramètres à identifier, et avec lui, la complexité du modèle et le temps de calcul nécessaire.

5.5 - Bilan sur les modèles existants

Chacune des approches de modélisation présentées ci-dessus possède des avantages et des inconvénients, surtout au niveau de la précision du modèle, de la simplicité d'utilisation, du paramétrage et de la rapidité du calcul lors des simulations. Pour qu'un modèle soit plus précis, il faut en général augmenter le nombre de paramètres. Cela rend plus difficile l'étape du paramétrage du modèle et augmente son temps de réponse, ce qui peut être un problème si le modèle doit être utilisé pour des simulations en temps-réel ou pour simuler

un cycle de vie complet. En conclusion, le critère de choix du modèle ne porte pas que sur sa précision, mais il constitue plutôt un compromis entre simplicité et précision.

Si on recherche un modèle proche de la réalité, l'approche électrochimique est sans doute la plus précise. Elle prend en compte l'ensemble des phénomènes physiques et chimiques qui se produisent à l'intérieur de l'élément ainsi qu'une très bonne estimation du comportement électrique et thermique de la batterie. Par contre, la difficulté de cette méthode réside dans la nécessité de connaître certains paramètres spécifiques à la fabrication de l'élément, qu'on ne peut avoir que par le fabricant lui-même, ce qui est très difficile à avoir en général. De plus, pour étudier le vieillissement en utilisant des modèles électrochimiques, il faut réaliser des tests destructifs de type autopsie d'élément qui, de plus, nécessitent un type particulier de matériel, dont nous ne disposons pas.

Les modèles de type boîte-noire peuvent être également très précis. Mais ils ne permettent pas de comprendre physiquement le comportement de la batterie. Ils nécessitent aussi une grande base de données, et donc de nombreux essais, pour être bien calibrés. Enfin, en général ce type de modèle est constitué d'un nombre imposant de paramètres, ce qui rend les calculs longs.

Les modèles énergétiques permettent de faire un coupage électrique, chimique et thermique dans la modélisation des accumulateurs électrochimiques. Cela donne une vue générale et rigoureuse du modèle. Mais le principal inconvénient est le temps de calcul vu le très grand nombre d'éléments nécessaires pour réaliser le modèle. Sans oublier la difficulté de l'identification des paramètres du modèle et l'introduction du vieillissement.

Enfin, la modélisation par des circuits électriques équivalents offre des possibilités très attrayantes. Tout d'abord, ces modèles offrent une bonne compréhension du comportement électrique de la batterie. En plus, ils sont faciles à identifier à travers des tests de caractérisation dans le domaine temporel et/ou fréquentiel. La prise en compte du vieillissement peut se faire en changeant les paramètres du modèle en fonction de l'état de santé de la batterie. Il sera montré dans la suite que les procédures mises en place pour l'étude du vieillissement dans les tests du vieillissement accélérés sont parfaitement adaptées à ce type de modélisation. Cependant, le choix des modèles est très varié offrant une grande marge en termes de simplicité et de précision.

Avec le large éventail de choix d'approche de modélisation, la difficulté est de trouver un modèle qui soit un bon compromis précision / complexité d'une part et entre la rapidité de calcul, l'adaptation aux tests réalisés et la facilité de détermination des paramètres d'autre part.

6 - Modèle utilisé

Rappelons d'abord que le modèle de batterie sera utilisé dans le cadre d'un modèle global de véhicule électrique. Il doit donc pouvoir communiquer avec les autres parties du modèle global. Pour cela, les paramètres d'entrée et de sortie du modèle doivent être de nature physique, plus précisément, le courant sera la donnée d'entrée et la tension sera celle de sortie.

De plus, le temps de réponse du modèle est un facteur très important quand il est utilisé dans un autre modèle plus global, car tout retard de calcul est pénalisant pour le système total. Pour cette raison, il est nécessaire que notre modèle soit constitué d'un nombre minimal de paramètres et que leur détermination à chaque itération soit simple et rapide.

Le modèle global de véhicule électrique sera utilisé dans le cadre de ce travail de recherche pour étudier la performance énergétique du véhicule en fonction de son usage, tout en reproduisant le plus fidèlement possible la contribution de chaque partie. Dans notre cas, nous nous focaliserons sur la consommation électrique du véhicule, et donc sur son autonomie. Le critère le plus important dans le choix du modèle de la batterie est donc la fidèle reproduction de son comportement énergétique. Pour cette raison, le modèle de batterie utilisé dans ce manuscrit sera appelé « modèle de performance ».

Le comportement dynamique du modèle de la batterie n'est pas une priorité dans ce cas. En effet, la batterie transmet une puissance électrique au moteur dont le rôle est de la transformer en puissance mécanique. Le moteur, en tant que système mécanique, a un temps de réponse plus long que les systèmes électriques et que la batterie. Il suffit donc que la puissance moyenne délivrée par la batterie, dans un intervalle de temps équivalent au temps de réponse du moteur électrique, soit précise, peu importe la forme du signal de la tension (le courant est imposé). Les phénomènes de transfert de charge et de diffusion, responsables du comportement dynamique de la batterie, peuvent donc ne pas être représentés dans le modèle. Cela permet de diminuer le nombre nécessaire de paramètres, et donc alléger le modèle.

Enfin, le modèle global du système est également réalisé pour simuler l'influence du vieillissement de la batterie sur les performances globales du système. Il est donc nécessaire d'intégrer le vieillissement dans notre modèle.

En conclusion, pour toutes ces raisons, l'approche de modélisation par circuits équivalents nous semble la mieux adaptée. La modélisation électrochimique, entre autres difficultés, privilégie la précision et la complexité au détriment de la rapidité et la simplicité. Les modèles du type boîte noire nécessitent un nombre élevé d'essais expérimentaux pour réaliser un bon apprentissage permettant de bien calibrer le modèle et de le valider sur toute la plage d'utilisation. De plus, la non prise en compte de l'aspect dynamique de la batterie ne

permet pas forcément à trop diminuer le nombre de paramètres du modèle, pour ne pas perdre de précision au niveau de ; l'aspect énergétique. Les modèles énergétiques semblent aussi correspondre à notre cahier de charge, mais ils sont devancés par les circuits équivalents en terme de simplicité et donc de rapidité de calcul. Comme nous le verrons par la suite, on peut diminuer le nombre total des paramètres du modèle par circuits équivalent à trois, sans perdre de précision sur les performances énergétiques.

6.1 - Présentation du modèle

Notre « modèle de performance » s'inspire du modèle de base de type Thévenin et intègre des améliorations proposées par Johnson et al. [52], [55]. Il est constitué d'une source de tension continue idéale (résistance interne nulle), deux diodes idéales (résistance interne et tension de seuil égales à zéro) et deux résistances, comme le montre la Figure 1.10. Chaque diode est associée à une résistance de façon à limiter le passage du courant dans cette dernière dans une seule phase de fonctionnement de la batterie formant ainsi une résistance série équivalente à cette phase de fonctionnement. C'est-à-dire que la résistance R_d , par exemple, n'est traversée par un courant que pendant la phase de décharge ($I > 0$). Durant cette phase, le courant I_d est égal au courant total I de la batterie, et le courant de charge I_c est nul. Cela permet de prendre en compte la différence en performances (chute ohmique et perte joules) entre chaque phase. Des tests expérimentaux (présentés plus tard dans ce document) donnent raison à cette distinction. Les diodes ne jouant qu'un rôle d'interrupteur, trois éléments sont à déterminer dans ce modèle : la tension OCV, R_c et R_d .

Ce modèle est faussement simple car ses trois paramètres principaux (OCV, R_c et R_d) ne sont pas constants ; ils varient en fonction des conditions de fonctionnement de la batterie. Plus précisément, la tension OCV est déterminée en fonction de la température et de l'état de charge. Quant aux résistances, elles sont déterminées en fonction de la température, de l'état de charge et du courant qui les traversent. Le fonctionnement du modèle nécessite donc de connaître les valeurs de ces paramètres en fonction des différentes conditions mentionnées.

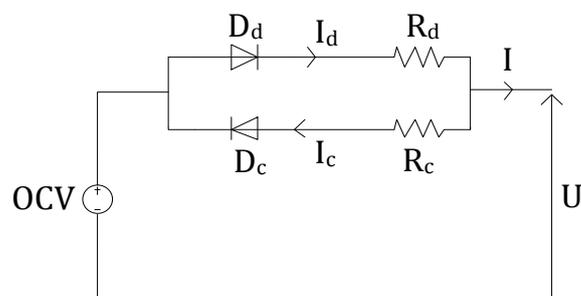


Figure 1.10: Modèle de batterie adapté.

La tension aux bornes de l'élément (U) est calculée par l'Équation 1.9.

Équation 1.9 :

$$U = OCV - R.I ;$$

$$R = R_d \text{ si } I \geq 0$$

$$R = R_c \text{ si } I < 0 .$$

Quant à l'état de charge (SOC) et la profondeur de décharge (DOD), ils sont calculés par les équations suivantes.

Équation 1.10 :

$$DOD = 100 \times \frac{\int I dt}{C_3}$$

Équation 1.11 :

$$SOC = 100 - DOD$$

où C_3 est la capacité de l'élément mesurée en 3 heures de décharge à courant constant.

Au niveau de l'estimation de performances, la grandeur qui compte est la puissance correspondant aux pertes Joule, dissipée dans les deux résistances équivalentes en série.

Équation 1.12 :

$$P_J = R.I^2 ;$$

$$R = R_d \text{ si } I \geq 0$$

$$R = R_c \text{ si } I < 0 .$$

La puissance utile P_U de la batterie est donnée par l'Équation 1.13.

Équation 1.13 :

$$P_U = U.I = OCV.I - P_J$$

6.2 - Identification des paramètres du modèle

Un des avantages de ce modèle est la facilité de l'identification de ses paramètres à partir des tests de caractérisations temporelles. Plusieurs procédures de tests standards existent pour cela. Parmi les plus connus, on peut citer le profil HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization Test) du FreedomCar [59], utilisé dans les programmes de tests expérimentaux sur les batteries aux Etats-Unis, les 'check-up tests' de EUCAR [24], adoptés dans les programmes européens (LIBERAL [60] et HELIOS [61]), et finalement les normes internationales IEC 62660 [26]. Le principe de ces procédures est d'appliquer une succession de créneaux de courant de décharge et de charge d'une durée définie (10 secondes en général) à plusieurs niveaux de courant et de SOC et sous différentes températures. Les créneaux doivent être précédés d'une période de repos (30 minutes en général) pour mesurer la tension à vide OCV. Ensuite, l'élément est déchargé par un courant constant à un autre niveau de SOC pour appliquer de nouveau la succession de créneaux. Cela est répété à plusieurs niveaux de SOC. Il est nécessaire de réaliser les tests de caractérisation dans le cadre d'un plan d'expériences couvrant tout le domaine de fonctionnement de la batterie selon l'application. Dans cette partie, on se focalise sur l'explication du fonctionnement du modèle. Le plan d'expérience et les essais réalisés pour l'identification du modèle seront présentés ultérieurement dans ce document. Un exemple de profil de caractérisation est illustré dans la Figure 1.11.

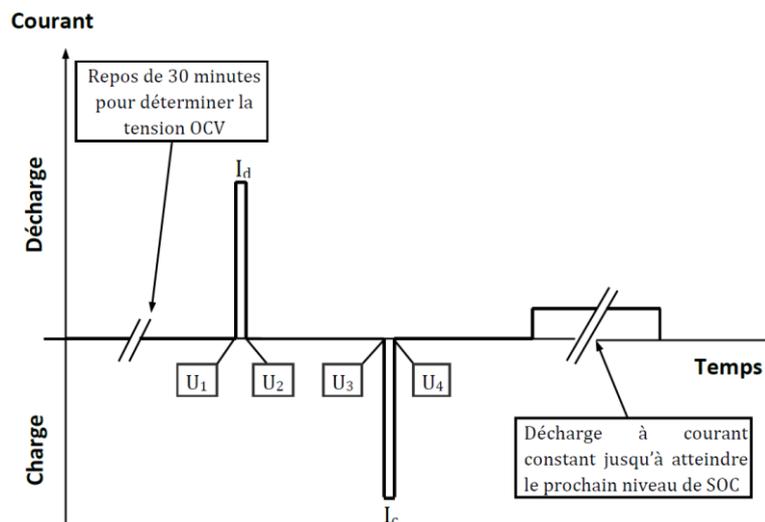


Figure 1.11: Profil de caractérisation temporelle de batterie[24]

La valeur de chaque résistance est déterminée en calculant le rapport entre la surtension résultante du pic de 10 secondes et la valeur du courant, comme indiquée par les équations ci-dessous.

Équation 1.14 :

$$R_d = \frac{U_1 - U_2}{I_d}$$

Équation 1.15:

$$R_c = \frac{U_4 - U_3}{I_c}$$

La tension OCV est égale à U_1 lorsque le pic de décharge est précédée par le temps de repos. Ces tests de caractérisation doivent aboutir finalement à trois tableaux définissant les valeurs des paramètres selon les conditions : un tableau 2-D exprimant la valeur de la tension OCV en fonction de la température et du SOC, et deux tableaux 3-D permettant de déterminer les valeurs des résistances en fonction de la température, du SOC et du courant. Les valeurs des paramètres sont calculées par interpolation à partir de ces tableaux.

6.3 - Intégration du vieillissement

Un autre avantage de ce modèle est celui de l'adaptabilité aux procédures des tests de vieillissement accélérés, ce qui permet d'intégrer le vieillissement dans le modèle. La procédure d'identification des paramètres du modèle est similaire à celles utilisées dans les différents projets qui ont intégré des essais de vieillissement accélérés [59]–[64]. Ces derniers seront présentés en détail dans le chapitre suivant. Les paramètres du modèle sont identifiés, à l'aide de ces essais, à différents états de vieillissement. Cela permet d'établir des tableaux de ces paramètres en fonction du vieillissement de l'élément.

7 - Conclusion

En conclusion, la technologie lithium-ion est actuellement la plus prometteuse parmi les accumulateurs existant sur le marché pour les applications transport. Il est possible de trouver dans la littérature un certain nombre d'informations concernant la constitution, le fonctionnement, la modélisation et le vieillissement des accumulateurs lithium-ion. Les différentes approches de modélisations ont été comparées dans ce chapitre pour faire finalement un choix qui correspond au mieux à l'application. Le modèle choisi permet de bien estimer les pertes énergétiques de l'accumulateur qui ont des conséquences directes sur la consommation énergétique du véhicule électrique. Le modèle demande uniquement le calcul de trois paramètres et il est facilement intégrable dans un modèle global de véhicule électrique. L'identification du modèle se fait à l'aide des procédures d'identification temporelles couramment utilisées. Le modèle permet aussi de prendre en compte l'état de vieillissement de l'accumulateur. En effet l'évaluation du vieillissement est importante pour estimer les performances du véhicule à un état de vieillissement donné. Le prochain chapitre

traitera de l'étude du vieillissement des accumulateurs au lithium en se basant sur des tests de vieillissement.

Chapitre 2 - Estimation de l'état de vieillissement de la batterie

1 - Introduction

L'étude du vieillissement des accumulateurs, et plus particulièrement ceux à base de lithium, constitue une tâche très importante pour optimiser la gestion de la recharge et de l'utilisation d'une flotte de véhicules électriques.

Cette tâche est difficile particulièrement en raison des moyens à mettre en œuvre, coûteux au niveau matériel, humain et en temps. En effet, pour étudier le vieillissement d'une technologie de batterie, il faut mener des tests expérimentaux suffisamment longs pour permettre à la batterie de vieillir et qui soient basés sur un plan d'expérience prenant en compte les différentes conditions d'usage de la batterie. Ce travail dépasse en général les capacités matérielles d'un seul laboratoire de recherche. Dans notre cas, ni la durée du projet, ni les moyens mis à disposition ne permettent de réaliser des tels essais.

Pour contourner ce problème, la meilleure solution est d'exploiter les données, qui nous sont disponibles, issues des tests de vieillissement sur plusieurs technologies de batteries lithium-ion. En se basant sur ces données, un modèle de l'état de vieillissement sous la forme d'une « boîte noire » est présenté dans ce document. L'état de vieillissement est représenté par la variation des paramètres du modèle de la batterie (résistance interne et capacité). Le modèle utilise des techniques de régression non-linéaires pour estimer l'état de vieillissement en fonction des facteurs de vieillissement, qui sont les variables du plan d'expérience des tests réalisés.

2 - Les mécanismes de vieillissement

2.1 - Les causes

Les mécanismes de vieillissement des éléments lithium-ion ont été expliqués dans la littérature. Ils sont souvent cités de manières distinctes selon la partie qu'ils affectent: l'anode, la cathode, l'électrolyte ou le séparateur. Ces phénomènes causent la dégradation des performances des batteries, qui est représentée par la diminution de la capacité résiduelle et l'augmentation de l'impédance. Cette dernière est remplacée dans certaines références par la

diminution de la puissance maximale [65], [66], qui n'est que la conséquence de l'augmentation de la résistance interne. On présente ci-dessous :

2.1.1 - L'évolution de l'interface solide-électrolyte

L'évolution de l'interface solide-électrolyte, désignée par l'acronyme SEI (en anglais : Solid-Electrolyte Interface ou Interphase), est considérée comme étant l'une des principales causes de vieillissement [65], [67]. Des réactions irréversibles, dues à la décomposition de l'électrolyte et à la corrosion de l'anode, se produisent lors des premiers cycles de charge-décharge [65], [68]. Cela donne lieu à la formation d'une couche de passivation sur toute la surface de l'électrode négative à base de graphite. Ces phénomènes à l'origine de la formation de cette couche, causent une perte de la capacité de la batterie et participent également à l'augmentation de l'impédance de l'anode, et par conséquent à celle de la batterie [68]–[72].

Le rôle principal de la SEI est de protéger l'électrode négative contre le phénomène de corrosion. Mais malheureusement, cette couche n'est pas stable, et sa formation continue pendant toute la durée de vie de la batterie, causant ainsi en permanence la diminution de la capacité et l'augmentation de l'impédance.

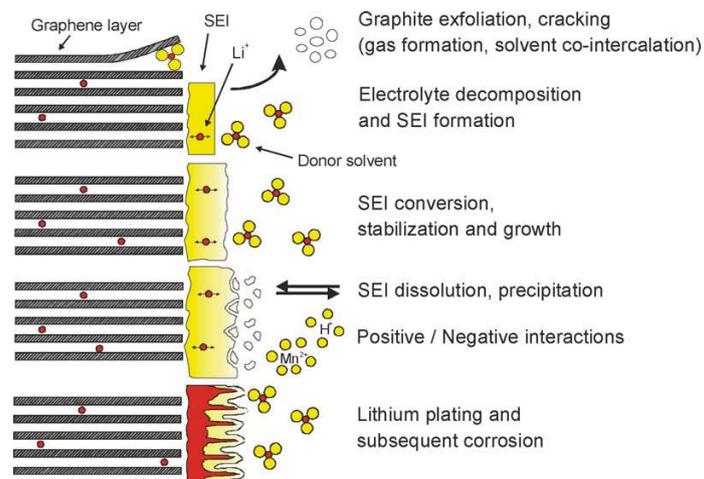


Figure 2.1 : Phénomènes de vieillissement à l'interface électrode négative/électrolyte [65]

2.1.2 - La dissolution des matériaux actifs

Ce phénomène a lieu au niveau de l'électrode positive et de l'électrolyte. Selon la littérature, il est surtout spécifique des cathodes à base d'oxydes de lithium manganèse (LiMn_2O_4) [67], [68], [73]. C'est d'ailleurs cet exemple qui sera pris dans ce qui suit pour son l'explication du phénomène. Deux cas de dissolution ont été identifiés dans la littérature selon le niveau de l'état de charge et toujours à haute température. Aux bas niveaux d'état de

charge, les défauts d'oxygène dans les structures de LiMn_2O_4 affaiblissent les forces de liaisons entre les métaux de transition et l'oxygène, ce qui cause la dissolution du manganèse et la formation d'une spinelle riche en lithium selon l'Equation 2.1 : [68], [73].

Equation 2.1 :



Les ions Mn^{2+} formés peuvent être conduits par l'électrolyte, lorsque ce dernier a un niveau de polarisation élevé, jusqu'au l'électrode négative. Cela cause une perte des éléments actifs, et donc une diminution de la capacité, et éventuellement une augmentation de l'impédance au niveau de l'électrode négative.

Le deuxième cas de dissolution du manganèse se passe aux niveaux élevés d'état de charge. Il correspond à la délithiation par le HF formant ainsi le LiF qui est insoluble selon l'Équation 2.2 . Le HF provient de l'hydrolyse du sel porteur avec les molécules d'eau présentes involontairement dans la batterie [67].

Équation 2.2 :

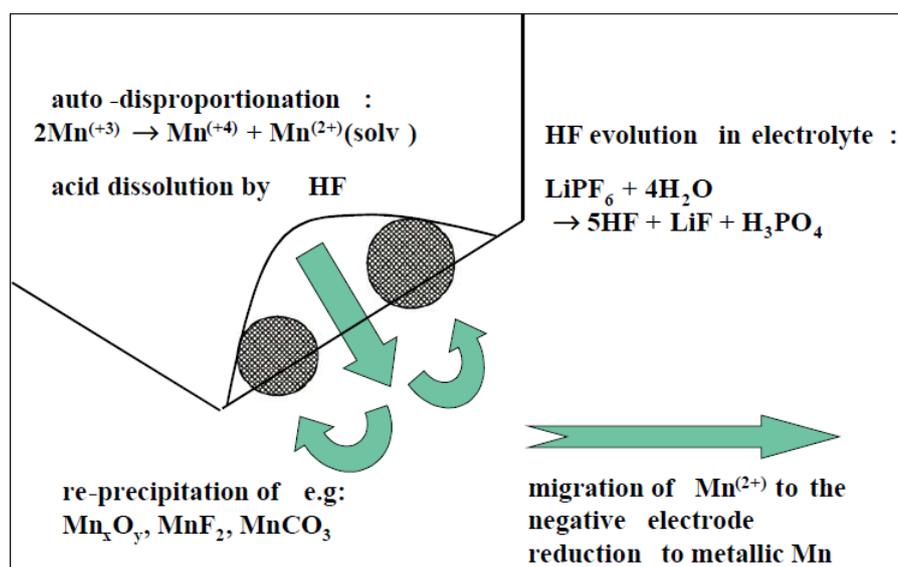


Figure 2.2: phénomène de dissolution de lithium dans une spinelle de lithium manganèse [73]

2.1.3 - La décomposition de l'électrolyte

Des réactions de réduction se produisent dans l'électrolyte lorsqu'il est en contact avec le carbone de l'électrode négative, produisant ainsi la consommation d'une partie des sels et du solvant dans l'électrolyte. Cela est causé par l'instabilité de ce dernier vis-à-vis

du carbone. La réduction de l'électrolyte peut nuire à la capacité, donc à la durée de vie de la batterie, et peut compromettre la sécurité du système en générant des gaz qui augmentent la pression interne de l'élément [68]. Ce phénomène est influent sur les deux premiers expliqués ci-dessus. La passivation du carbone à l'anode par les réactions de réduction avec l'électrolyte accélère le développement de la couche SEI [69]. En même temps, les produits résultants de ces réactions peuvent jouer le rôle de catalyseur dans la dissolution des matériaux actifs [68].

2.1.4 - La dégradation des collecteurs de courant

Le cuivre et l'aluminium sont les matériaux les plus utilisés pour, respectivement, l'électrode négative et l'électrode positive. Ils sont tous les deux sujets à dégradation. L'aluminium est menacé par des piqûres de corrosion. Le cuivre peut se réduire lors des profondes décharges. Il peut ainsi former des dendrites, à la surface de la SEI, capables de transpercer le séparateur causant un court-circuit [68].

2.1.5 - Les changements de phase dans les électrodes

En général, la perte du contact, que ce soit mécanique ou électronique, dans l'électrode mène à une augmentation de l'impédance de l'élément et doit être considéré comme du vieillissement [74]. Les changements du volume au niveau de l'anode, dus à la formation et au développement de la couche SEI et aux différentes autres réactions, sont une source inévitable de perte du contact entre les différents composants de l'électrode (le collecteur de courant, les particules de carbone et les éléments liants) [65]. La porosité de l'électrode négative a un rôle important dans son fonctionnement, elle permet la pénétration de l'électrolyte à l'intérieur de l'électrode. Le changement de volume peut également affecter son fonctionnement. Le cyclage aux valeurs élevées de courant favorise le changement de phase. Le niveau d'état de charge joue également un rôle important lorsqu'il est trop faible ou élevé [68].

2.2 - Facteurs de vieillissement

Plusieurs facteurs peuvent influencer la cinétique des réactions physico-chimiques à l'origine du vieillissement de l'accumulateur. L'identification de ces facteurs n'est pas simple car ces derniers sont nombreux et peuvent être corrélés entre eux. Dans le domaine de l'automobile, les contraintes qui peuvent être prises en compte dans l'étude de vieillissement d'un composant sont classées sous différentes catégories. Elles peuvent être issues de l'environnement du composant (température, humidité, vibration, choc électrostatique, ...) ou de la manière dont ils sont sollicités électriquement [67]. Cette dernière catégorie est traduite par le profil de sollicitation dans le domaine des batteries.

- ***La température (T)***

La température influence la cinétique des réactions intervenant dans une batterie notamment les réactions secondaires telles que les réactions de corrosion [75]. Lorsque la batterie fonctionne à hautes températures, ces réactions secondaires sont favorisées ainsi que les phénomènes de dissolution dans le cas de la SEI à l'anode de la batterie Li-ion. La température devient alors un facteur prépondérant lors du stockage de la batterie pendant de longues durées. Aux basses températures, les réactions de corrosions sont fortement limitées. Cependant, la diminution des propriétés diffusives des matériaux peut conduire à des phénomènes indésirables ; ainsi, lors de la charge des batteries Li-ion, la formation de lithium à l'anode peut avoir lieu et réagir par la suite avec l'électrolyte. [67]

- ***L'état de Charge (SOC)***

L'état de charge d'une batterie reflète les taux d'espèces ioniques présentes au sein des électrodes. Or, la différence de potentiel à l'interface électrode-électrolyte est déduite de ce taux. Selon que cette différence de potentiel est proche ou non du potentiel d'équilibre d'une réaction secondaire, cette réaction est favorisée ou non, et donc peut entraîner la dégradation de l'accumulateur [67], [76], [77].

- ***Le régime de charge et de décharge (I_c et I_D)***

Pendant les phases de décharge ou de charge, la tension de la batterie varie en fonction de la chute de tension causée par le courant et l'impédance interne. Le régime de décharge et de charge est donc limité par les tensions limites de fonctionnement. Un courant maximal est aussi préconisé pour ne pas déclencher des réactions indésirables. De plus, la durée pendant laquelle le courant est appliqué peut aussi influencer l'effet du régime de décharge sur le vieillissement.

- ***La variation de l'état de de charge (ΔSOC)***

C'est la variation de l'état de charge occasionnée lors d'une ou plusieurs décharges (ou charges) successives. Elle est déduite du régime de charge ou de décharge et de la durée pendant laquelle ce régime est imposé [77].

- ***L'état de santé de la batterie***

L'impact de chacun des facteurs, cités ci-dessus, sur le vieillissement est variable en fonction de l'état de santé de la batterie, c'est-à-dire selon l'état d'avancement des phénomènes de vieillissement. En effet, certains phénomènes peuvent augmenter l'influence des facteurs de vieillissement et déclencher d'autres phénomènes de dégradation qui accélèrent le vieillissement de l'élément. Néanmoins, il est difficile de quantifier ce paramètre

et son influence directe sur le vieillissement. Il est plutôt pris en compte implicitement par l'aspect non linéaire des lois de vieillissement [78], [79].

3 - Modélisation du vieillissement

La modélisation du vieillissement d'un système électrochimique a pour objectif de prévoir l'évolution d'un ou plusieurs paramètres (comme la résistance, la capacité,...) en fonction des facteurs de vieillissement cités précédemment. Elle est souvent basée sur des tests expérimentaux de vieillissement, généralement accélérés, permettant de prévoir l'évolution future des performances d'une batterie en fonction de la sollicitation et des conditions d'usages. La précision de cette estimation dépendra de la méthode de modélisation employée et aussi de la représentativité des essais de l'utilisation réelle de la batterie. Plusieurs approches de modélisation existent, elles seront classées dans ce manuscrit en trois catégories différentes : modélisation physico-chimiques des phénomènes de vieillissement, les modèles basés sur le comptage d'évènements et les modèles mathématiques.

Peu importe la méthode utilisée, le modèle de vieillissement est toujours associé à un modèle de comportement de l'accumulateur électrique, souvent représenté par un circuit électrique équivalent. Cette association permet de simuler la dégradation des performances électriques de l'accumulateur.

3.1 - Modélisation physico-chimique

Les modèles physico-chimiques consistent à étudier l'influence des facteurs de vieillissement sur les propriétés physiques et chimiques des accumulateurs comme la diffusion, le transfert de charge et la concentration en lithium des éléments de stockage électrochimiques. Il s'agit de retrouver les relations empiriques liant la dégradation des phénomènes physiques aux facteurs de vieillissement. Les premiers modèles de vieillissement de ce type sont apparus dans les travaux de Doyle et al. en 1993 [80]. Ils ont été développés plus tard par Newman [32], Ramadass [81] ou encore Smith [82].

Ce type de modélisation nécessite une entrée d'informations physiques, que ce soit sous la forme d'une conductivité électrique, d'une courbe de mesures empiriques ou bien d'une loi électrochimique. Cette approche permet d'avoir une bonne compréhension du processus de vieillissement. En revanche, elle est très compliquée à réaliser, demandant des matériaux spéciaux et exigeant des procédés expérimentaux menant à la détérioration des échantillons testés. Elle ne sera donc pas abordée dans le présent manuscrit.

3.2 - Méthodes de fatigue

Connues aussi sous le nom de comptage d'évènements ou de cycles, ces méthodes consistent à comptabiliser le nombre d'évènements apparus avant d'atteindre le critère de fin de vie. La méthode de Wolher, empruntée au domaine de génie mécanique, est sans doute la plus connue dans la littérature parmi les méthodes de fatigues [78]. Elle est connue en particulier pour sa courbe S-N (en anglais : Stress vs. Number of Cycles) qui donne le nombre de cycles qu'un matériau peut réaliser avant la fin de sa vie en fonction d'un facteur de stress comme la température, les vibrations, l'humidité, etc.... La durée de vie d'un composant est donc estimée par l'attribution progressive de la perte de durée de vie liée à des évènements bien définis (cumul des dommages). Elle est représentée par une propriété du composant (capacité de la batterie par exemple) qui diminue au cours du temps.[83].

Dans le domaine des batteries, trois grandeurs peuvent être considérées comme « évènements » ;selon le type des tests de vieillissement accélérés associés. Dans le cas du vieillissement calendaire, l'évènement est le temps exprimé en nombre de jours. Tandis qu'en cyclage actif, le choix est fait entre le nombre d'ampères-heures déchargés ou le nombre de cycles [84]. Ces derniers sont utilisés uniquement lorsque la batterie subit des cycles complets. Un exemple simple donné par Wenzl et al. permet de bien expliquer l'application de la méthode de Wolher sur les batteries [79]. C'est le cas d'une batterie ayant une durée de vie prévue de 10 ans. La prévision de la durée de vie peut être représentée mathématiquement par un facteur compris entre 0 et 1, tel que 0 représente l'état neuf de la batterie et 1 la fin de vie. Ce facteur est égal au rapport « n/N », où N est le nombre total d'évènements qui peuvent survenir pendant la durée de vie et n le nombre d'évènements qui ont déjà eu lieu. Ici, par exemple, $N = 3650$ jours et n est le nombre de jours qui se sont déjà écoulés.

Deux types de courbes de Wöhler sont couramment utilisés aujourd'hui pour estimer la durée de vie des batteries :

- La courbe indiquant le nombre de cycles d'une batterie en fonction de la profondeur de la décharge (DOD) jusqu'à la fin de vie (cyclage). Cette courbe est donnée par certains fabricants de batteries dans les fiches de spécifications. Un exemple de cette courbe est représenté sur la Figure 2.3.
- La courbe illustrant la durée de vie de la batterie en fonction de son état de charge ou de sa température (calendaire).

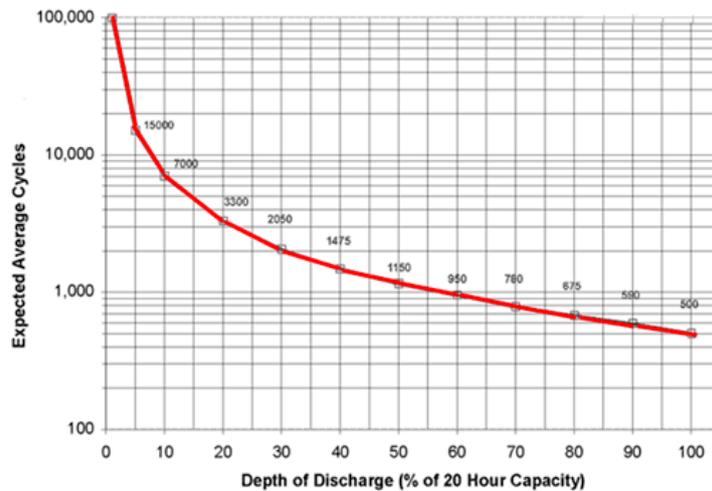


Figure 2.3 : Exemple de courbe de Wöhler représentant le nombre de cycles que la batterie est capable de réaliser en fonction du DOD[83]

Cependant, cette approche ne considère la contrainte que selon un seul paramètre de même valeur tout au long de la vie de la batterie, comme dans le cas d'un cyclage monotone de batterie. Dans le cas d'une sollicitation à une contrainte et plusieurs amplitudes, il faut alors utiliser la règle de Palmgren - Miner [85], [86] qui suppose que les dommages d'amplitudes variables sont additifs. La rupture se produit lorsque la somme des dommages relatifs à chaque amplitude atteint l'unité [87], [88].

Cette approche peut être également appliquée dans les cas plus réalistes où existent plusieurs contraintes et plusieurs amplitudes en utilisant le facteur de sévérité. Ce dernier sert à pondérer chaque évènement choisi. Ce facteur est calculé en fonction des différentes contraintes comme la profondeur de décharge, la température et l'amplitude du courant, chacune pouvant avoir une multitude de valeurs [89]. Le facteur de sévérité est donc donné par une cartographie en fonction des contraintes en question. Un exemple illustratif est présenté par la Figure 2.4.

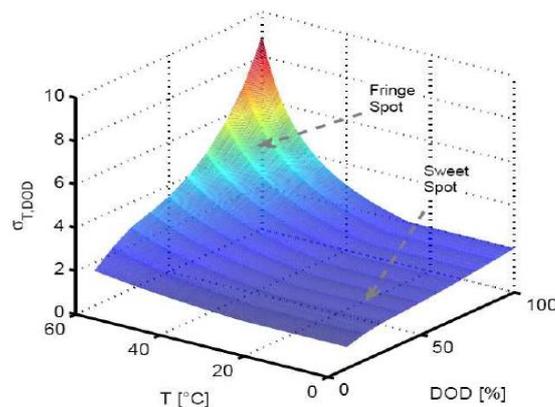


Figure 2.4 : Facteur de sévérité exprimé en fonction de la température et du DOD [89].

Dans le cas, par exemple, où l'évènement choisi est la valeur d'ampères-heures déchargés, le comptage se fait en multipliant la quantité d'Ah par le facteur de sévérité déduit de la cartographie de la Figure 2.4 en fonction des facteurs de vieillissement.

3.3 - Modèles mathématiques

Le principe des modèles mathématiques ressemble à celui des modèles physico-chimiques qui est d'estimer la dégradation de performance de la batterie en fonction des facteurs de vieillissement. Ces deux techniques se distinguent dans leur mise en œuvre. L'approche des modèles physico-chimiques se base sur la résolution d'équations décrivant les phénomènes responsables de la dégradation de la batterie. Elle traite le vieillissement de point de vue microscopique. Tandis que les modèles mathématiques reposent sur des méthodes de résolution numériques et statistiques sans tenir compte des mécanismes de vieillissement à l'intérieur de la batterie. Le vieillissement est donc considéré comme une boîte noire ayant comme entrées les facteurs de vieillissement et comme sorties les indicateurs de vieillissement.

La réalisation d'un modèle mathématique nécessite plusieurs étapes qu'on peut résumer par les points suivants :

- la collecte de données par l'utilisateur qui recueille le maximum de mesures des paramètres d'entrée (température, profil de courant demandé...) et des propriétés de sortie (tension de la batterie, résistance ...) qui seront nécessaires au modèle,
- l'analyse et le prétraitement des données pour qu'elles puissent être utilisables par la méthode mathématique choisie,
- l'apprentissage (supervisé) du modèle qui est construit en analysant les données et en minimisant l'erreur entre les valeurs estimées par le modèle et les valeurs réelles (étape détaillée plus tard dans ce chapitre),
- le test du modèle pour s'assurer de sa validité. Cela se fait en introduisant dans le modèle une série de données non utilisées dans l'étape d'apprentissage. Le modèle est considéré valide si l'erreur entre les réponses données par le modèle et les valeurs réelles est inférieure à un seuil à définir.

Pour résumer, les modèles mathématiques sont essentiellement des boîtes noires utilisant des jeux particuliers d'équations mathématiques non-linéaires. La nature de l'élaboration et la résolution des équations dépend de la méthode utilisée. Les réseaux de neurones artificiels et la logique floue font partie des techniques les plus connues dans la littérature parmi celles appliquées au cas de la modélisation du vieillissement des accumulateurs [90], [91]. Un réseau de neurones artificiels (RNA) est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques. C'est une technique de modélisation basée sur une approche statistique. Plus

précisément, un RNA est un modèle qui se base sur des données pour la simulation d'entrée/sortie du système. Une des caractéristiques particulières d'un RNA est sa capacité à apprendre des expériences et des modèles puis de s'adapter en conséquence. La logique floue (fuzzy logic) a un fonctionnement comparable aux RNA et est utilisée en intelligence artificielle. Elle a été utilisée dans des domaines aussi variés que l'automatisme, la robotique, le contrôle aérien, l'environnement, la médecine ou encore l'assurance. Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous et, à l'inverse de la logique booléenne, elle permet à une condition d'être dans un état autre que vrai ou faux.

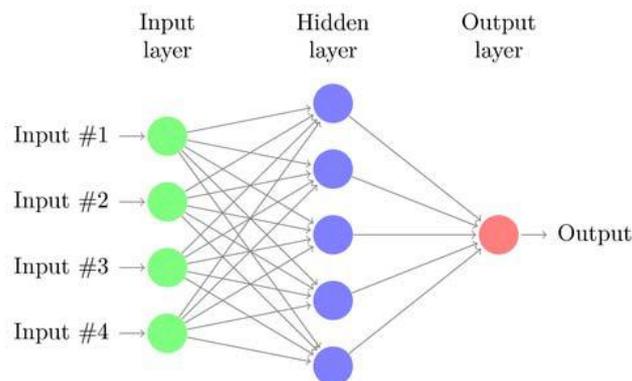


Figure 2.5 : Fonctionnement d'un réseau de neurones ayant une seule couche cachée [92]

La Figure 2.5 illustre un exemple de fonctionnement d'un réseau de neurones ayant une seule couche cachée. Ce réseau est basique et inadapté aux systèmes non-linéaires complexes. Pour avoir plus de précision, il faut suffisamment augmenter le nombre des couches cachées. En général, 2 couches cachées sont nécessaires pour la modélisation d'un élément de batterie lithium avec prise en compte de son vieillissement [91].

Ces techniques dépassent les limites des approches conventionnelles en extrayant les informations désirées directement à partir des données. Néanmoins, ces méthodes nécessitent un nombre de paramètres d'entrée très important et de ce fait une structure capable de réaliser l'apprentissage ainsi que de traiter ces données pour réaliser la modélisation. En plus de la complexité élevée de ces modèles, il a été montré dans la littérature que leur validation est très délicate dans le domaine des conditions expérimentales des essais de vieillissement [93]–[95][93]–[95].

Les machines à vecteurs supports (Acronyme en anglais SVM pour : Support Vector machines), peu connues dans le domaine de batteries, semblent être bien adaptées à une utilisation dans le cadre de la modélisation du vieillissement par le principe de la boîte noire. Tout d'abord, elle bénéficie d'une structure très allégée, basée sur une équation mathématique une fois l'apprentissage fini. De plus, elles sont connues pour la propriété d'approximation universelle qui permet de réaliser plus facilement l'extrapolation [36], [96].

Sans oublier les problèmes des optimums locaux présents dans les méthodes RNA et de logique floue, et qui n'existent pas pour le SVM. Pour ces raisons, dans ce travail, nous avons choisi la méthode SVM pour l'estimation du vieillissement. Elle sera expliquée en détail par la suite.

3.4 - Conclusion

Rappelons que notre objectif est de trouver une méthode de prise en compte du vieillissement fiable, et en même temps qui permet une implémentation facile dans un modèle de comportement de la batterie. Celui-ci doit pouvoir être à son tour implémenté dans un modèle plus global de véhicule électrique. Le modèle de vieillissement doit être généralisable et permettre une extrapolation fiable pour toutes les conditions d'usages réelles. Il doit être également léger et interagir facilement avec le modèle de comportement de la batterie. La Figure 2.6 illustre le mode de fonctionnement entre le modèle de vieillissement à réaliser, le modèle de fonctionnement et les tests expérimentaux à réaliser.

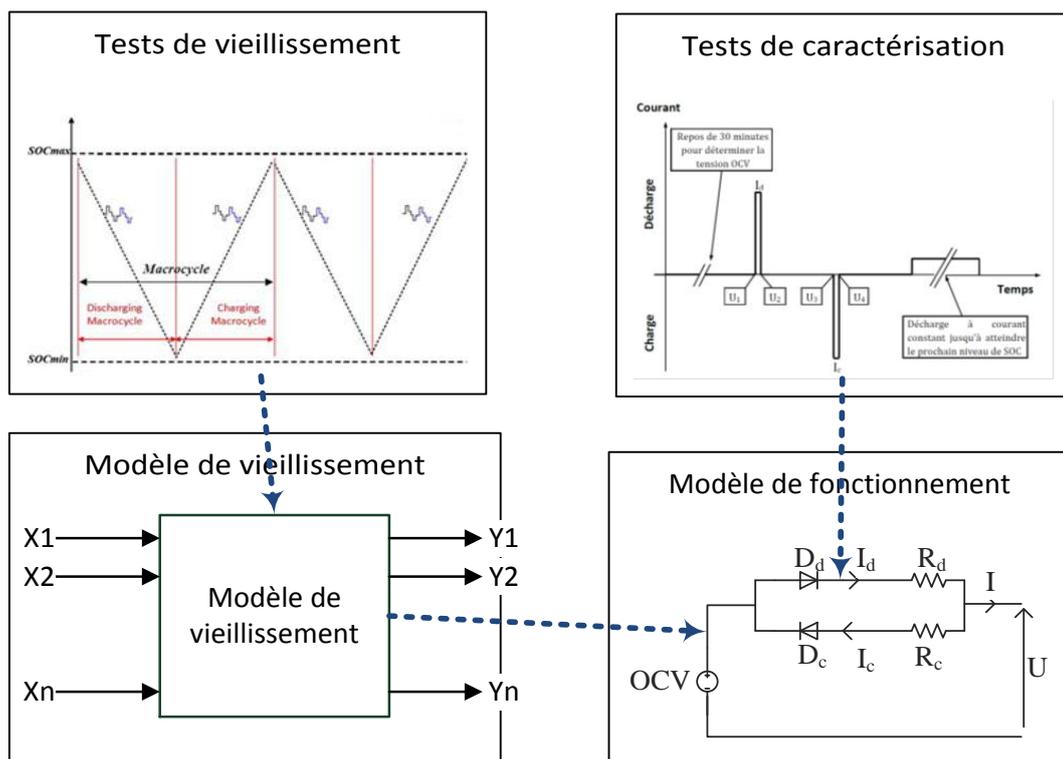


Figure 2.6 : Relation entre le modèle de vieillissement et le modèle de fonctionnement de la batterie

Comme montré ci-dessus, plusieurs approches sont possibles pour modéliser le vieillissement d'un accumulateur lithium-ion. Les méthodes physico-chimiques sont les plus précises et permettent une bonne compréhension des mécanismes de dégradations à l'intérieur

de l'élément, responsables de la dégradation des performances. Par contre, ces méthodes exigent des ressources matérielles et humaines très spécifiques et s'appuient sur des tests destructifs de type analyse post-mortem. De plus, l'implémentation des telles méthodes de vieillissement dans un modèle plus global de comportement est très lourde. Un nombre élevé d'équations est nécessaire pour arriver à estimer la dégradation de performance de la batterie.

Quant aux méthodes de fatigue, leur intégration dans un modèle plus global est plus simple. Ces méthodes ont montré leur efficacité quand il s'agit d'estimer la durée de vie d'une batterie dans des conditions où un seul facteur varie. Dans le cas d'une utilisation réelle, où tous les facteurs de vieillissement sont susceptibles de changer, cette méthode peut utiliser la pondération de la durée de vie basée sur cartographie de facteur de sévérité en fonction des différents facteurs de vieillissement. Par contre, pour avoir une telle cartographie, simulant la sévérité des conditions réelles, un plan d'expérience très complexe des essais de vieillissement est nécessaire pour couvrir tous les domaines de l'utilisation réelle.

Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'estimer le vieillissement dans ce projet à l'aide des méthodes mathématiques. Ces méthodes considèrent le vieillissement (et non pas la batterie) comme une boîte noire. Les relations entre les indicateurs (diminution de la capacité et augmentation de la résistance) et les facteurs de vieillissement sont déterminées grâce à des techniques mathématiques et statistiques de résolution. La méthode SVM est utilisée dans notre cas.

Cette méthode SMV nécessite une quantité de données importante pour être fiable. Un jeu de données issues d'une campagne de tests de vieillissement convient parfaitement à cette technique. Il permet de réaliser l'apprentissage et puis le test du modèle compte tenu de l'étendue des conditions d'utilisation. Nous allons par la suite rappeler le principe des tests de vieillissement, ainsi que les principaux programmes internationaux, européens et français menés dans le cadre des applications automobiles.

4 - Les tests de vieillissement

4.1 - Introduction

La réalisation des tests expérimentaux sur les batteries li-ion pour réaliser l'étude du vieillissement est une tâche qui demande beaucoup de temps, de ressources humaines et financières. Plusieurs programmes de recherche au niveau national et international travaillent sur le développement de procédures expérimentales spécifiques et ont déjà acquis un nombre considérable des données. Néanmoins, ces données, issus des procédures de tests variées, ne sont pas toujours comparables [25]. En plus, il est très difficile d'y accéder vu le caractère confidentiel de la majorité de ces programmes.

Les premières ont été établies en 1996 aux Etats-Unis par le programme USABC [64]. Elles ont été complétées par le partenariat pour les véhicules de nouvelles génération (Acronyme : PNGV pour Partnership for New Generation Vehicles) [62] en 2001 puis par FreedomCAR [59] en 2003 et finalement par le programme sur les véhicules hybrides en 2010 [97]. Au niveau européen, les premières procédures sont apparues en 1998, et elles étaient créées par EUCAR [24]. Elles ont été appliquées plus tard au niveau d'un programme européen de vieillissement accéléré appelé LIBERAL [60] de 2002 jusqu'au 2006, et finalement appliquées avec quelques modifications dans un deuxième programme HELIOS [61] qui a débuté en 2009 et qui est en cours jusqu'aujourd'hui. Il existe également des procédures spécifiques développées au Japon au sein du programme Li-EAD à partir de l'année 2007 soutenu par l'organisation NEDO [98]. Pour terminer avec les programmes français sur le vieillissement, on peut citer SIMSTOCK et SIMCAL [99], [100]. La philosophie générale dans ces tests est d'obtenir suffisamment des données dans un temps limité pour étudier le vieillissement tout en accélérant les processus de vieillissement [25]. Dans la suite, les différentes procédures de tests seront comparées.

4.2 - Procédures de tests

Deux catégories de tests sont nécessaires pour étudier le vieillissement des accumulateurs en général : les tests de vieillissement accéléré et les tests de caractérisation. Les premiers ont pour but d'accélérer le vieillissement pour obtenir des résultats en un temps raisonnable en agissant sur les facteurs accélérateurs mais sans déclencher de mécanismes de dégradation autres que ceux présents lors de l'usage réel de la batterie. Les tests de caractérisation ont pour objectif de mesurer les paramètres de la batterie influencés par le vieillissement.

4.2.1 - Procédures de vieillissement accéléré

4.2.1.1 - Les tests de vieillissement calendaire

Ces tests sont conçus pour évaluer la dégradation des éléments résultant de l'avancement du temps sous une utilisation minimale. En règle générale, ils sont réalisés sur plusieurs éléments sous différentes conditions de tests. Pour un, ou une association d'éléments, les facteurs de stress, qui sont la température et l'état de charge, sont maintenu constants (ou quasi constant pour le SOC) tout au long du test. Les tests sont réalisés en général à des températures égales ou supérieures à la température ambiante parce la cinétique des mécanismes de vieillissement s'accélère avec l'augmentation de la température. Néanmoins, certains programmes s'intéressent aux basses températures, comme dans le cas de Liberal[60].

Pour maintenir l'état de charge constant, deux approches sont possibles. La première, utilisée dans les programmes européens et français [60], [61], [100] consiste à stocker les éléments testés en circuit ouvert. Ils ne seront connectés que lors des tests de contrôle périodique réalisés toutes les 4 à 6 semaines. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle néglige le phénomène d'autodécharge entre deux tests de contrôle périodique. La deuxième approche, utilisée dans les programmes américains, consiste à maintenir l'état de charge à une valeur constante en appliquant quotidiennement un profil de décharge/charge qui dure 6 minutes [59], [62], [97]. Ce dernier est constitué d'un pic de décharge, un pic de recharge et finalement le maintien de la tension au niveau souhaité en appliquant un courant de l'ordre de $C/100$.

4.2.1.2 - *Les tests de cyclage actif*

Les tests de vieillissement en cyclage actif consistent à appliquer un profil de sollicitation électrique intensif à la batterie de manière répétitive. On définit à ce niveau deux types de cycles : les microcycles et les macrocycles. Le choix de ces profils détermine les paramètres étudiés.

- *Les microcycles*

Il s'agit de profils en courant ou en puissance, de courte durée, appliqués répétitivement à la batterie. Les microcycles sont censés représenter une certaine réalité d'utilisation. Ils peuvent être classés en deux catégories selon l'application qu'ils visent : pour véhicules électriques ou pour véhicules hybrides.

- *Les macrocycles*

Le macrocycle est une succession de microcycles permettant le balayage d'une fenêtre d'état de charge (ΔSOC).

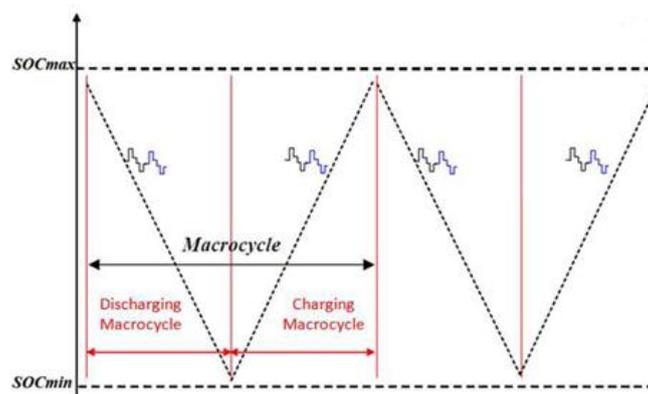


Figure 2.7: Illustration d'un macrocycle [101]

Dans le cas des véhicules électriques, les batteries fonctionnent sur une très grande proportion de la plage de l'état de charge pour avoir le maximum d'autonomie. Les batteries utilisées en général sont de type haute-énergie, et sont donc capable d'emmagasiner une grande quantité d'énergie au détriment de la puissance. Pour respecter cette particularité, les microcycles dédiés à tester les batteries des voitures électriques sont limités en courant ou puissance maximale, et le niveau de SOC à la fin est différent de celui au début du cycle. Par contre, les batteries utilisées dans les véhicules hybrides sont sollicitées en puissance par des valeurs élevées de courant relativement à la capacité et fonctionnent sur une plage limitée de SOC.

Parmi ces profils de cyclages actifs, on distingue de plus ceux dont la charge à la fin des microcycles est équilibrée ou non, c'est-à-dire selon que l'énergie électrique dissipée en décharge égale ou pas celle récupérée en recharge.

- ***Les profils non équilibrés***

Cette catégorie de profils est destinée au test des batteries des véhicules électriques ou hybrides avec extension d'autonomie, qui fonctionnent sur une large plage de SOC. Dans ce cadre, le groupe de recherche U.S. Advanced Battery Consortium (USABC), propose un profil en puissance pour le cyclage déduit de la simulation d'un véhicule électrique sur un cycle de conduite FUDS (Federal Urban Driving Schedule). Un profil simplifié, déduit du profil issu du cycle FUDS, est aussi proposé dans le cadre de cette étude. Ce profil, appelé Dynamic Stress Test (DST) est représenté sur la Figure 2.8 [64]. Ce dernier est plus court (360 secondes contre 1400 pour le FUDS) et plus simple à réaliser sur un banc de test de batteries car il est constitué des créneaux rectangulaires de puissance. Ce dernier est devenu une référence pour le cyclage actif des batteries. Les procédures du PNGV [62] et celles du programme américain sur les véhicules hybrides [97] ont adapté des profils de cyclage non équilibrés basés sur le DST.

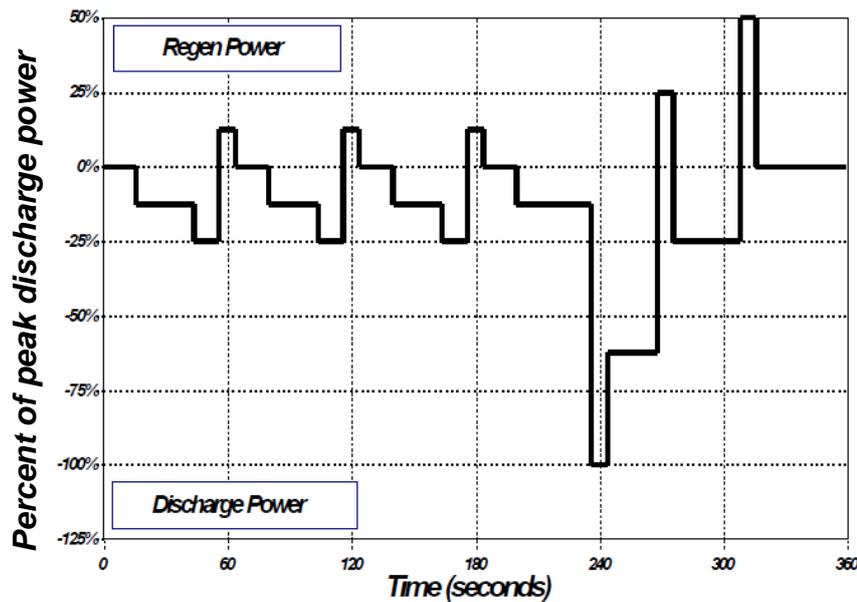


Figure 2.8: Profil de cyclage DST de l'USABC ($P > 0$ correspond à la recharge) [64]

Au niveau européen, les procédures de cyclage utilisées dans le programme Helios [61], actuellement en cours, sont uniquement des profils non équilibrés, et qui s'inspirent du DST. Elles sont par contre définies en courant et varient selon que l'application nécessite des batteries d'énergie ou de puissance.

- ***Les profils équilibrés***

Au niveau des programmes de tests américains, le premier microcycle équilibré en énergie est défini dans le manuel de PNGV [62], il était repris et développé dans le programme FreedomCar [59]. Il est constitué des microcycles équilibrés en charge, formés de deux niveaux de décharge et deux niveaux de recharge comme l'indique la Figure 2.9.

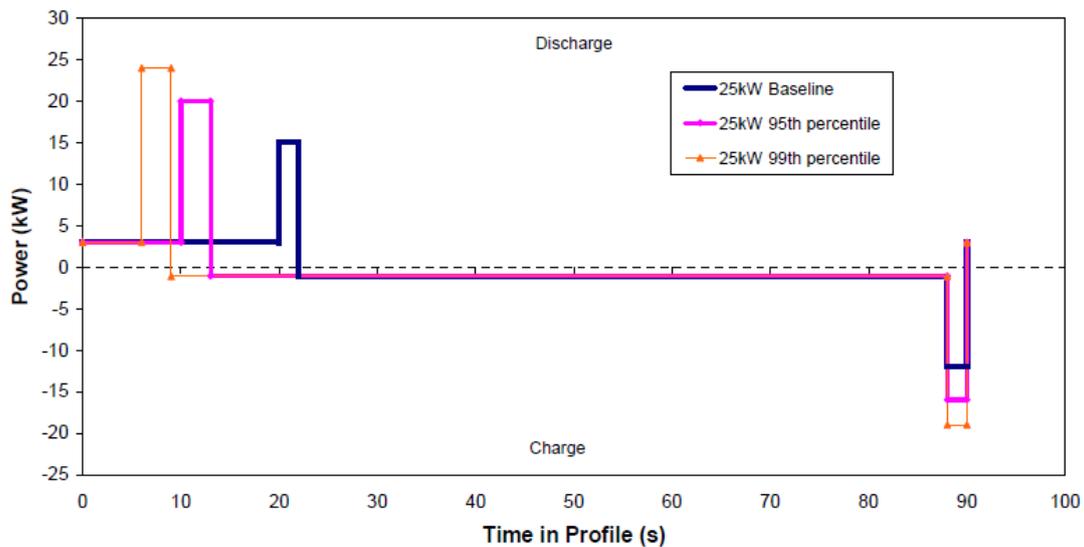


Figure 2.9: Microcycle équilibré issu du programme FreedomCar[59]

Il existe deux approches pour assurer l'équilibre de charge. La première, adoptée par les américains, prend en considération les pertes pendant un cycle de charge / décharge. La quantité d'énergie déchargée doit être égale au produit de la quantité chargée par le rendement énergétique de la charge estimé à 0,9. La deuxième approche, utilisée dans les programmes européens, ne tient pas compte de ce paramètre.

4.2.2 - Les tests de caractérisation

Ces tests constituent une étape indispensable dans la démarche des tests de vieillissement. C'est grâce à eux que les caractéristiques de l'accumulateur sont mesurées tout au long des tests, permettant ainsi de suivre leur évolution en fonction du vieillissement et de différentes conditions de tests. Ils sont appliqués une fois avant le commencement du test de vieillissement accéléré, puis régulièrement pendant le déroulement du test. La période de temps les séparant doit être suffisamment grande pour permettre aux caractéristiques d'évoluer et suffisamment petite pour bien observer la forme de l'évolution des paramètres en question. Cette période est généralement de 4 à 6 semaines.

Parmi les différentes méthodes de caractérisation présentées dans le premier chapitre, on retrouve principalement des tests de caractérisation temporelle du type chronopotentiométrie. Chaque programme a son propre test de caractérisation adapté à l'application visée. Ces profils sont devenus des références pour les tests de caractérisation des accumulateurs de types lithium-ion. Citons parmi les plus connus le profil HPPC de FreedomCar [59] et le profil de caractérisation créé par EUCAR puis utilisé dans LIBERAL [24]. Ce dernier est représenté sur la Figure 2.10.

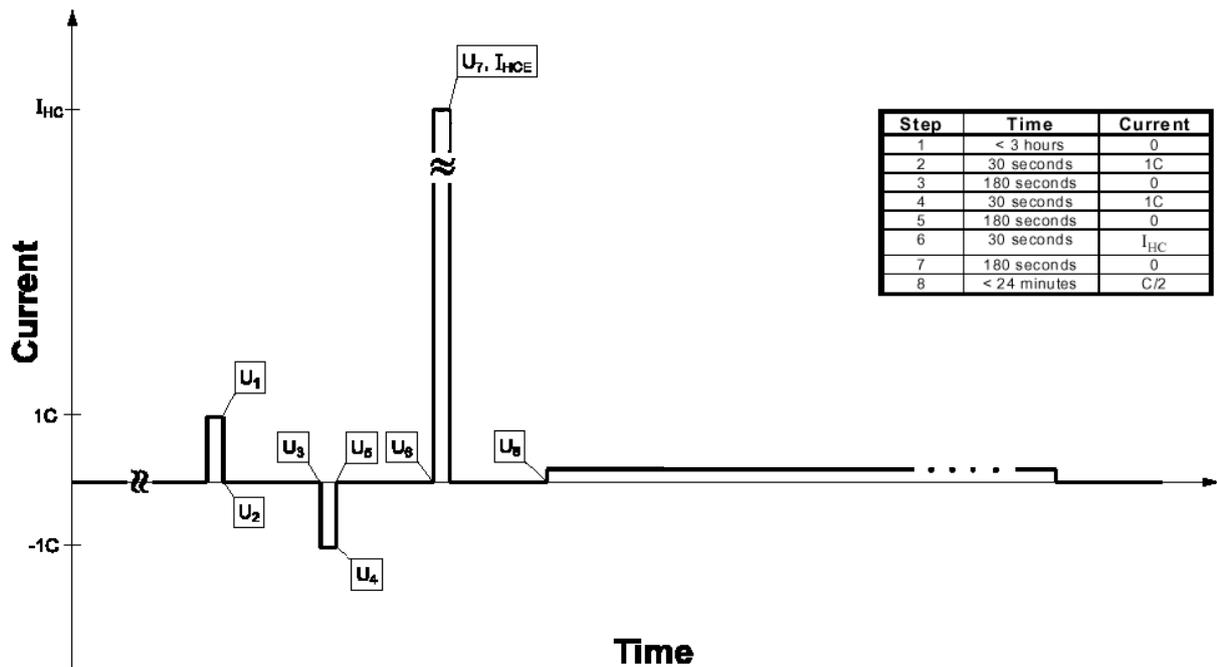


Figure 2.10 : Profil de caractérisation issu de EUCAR et utilisé dans LIBERAL [24]

Néanmoins, les tests de caractérisation de type spectroscopie d'impédance commencent à être aussi utilisés pour les tests de vieillissement. C'est le cas du programme français Simcal [100].

4.3 - Conclusion

Les différents programmes de tests de vieillissement accélérés ont tous le même objectif, celui d'obtenir suffisamment de données dans un temps limité pour étudier le vieillissement. Cela se réalise en usant la batterie de manière significative, aboutissant typiquement à la diminution de la valeur de sa capacité de 20% [25]. Les paramètres mesurés pour suivre l'évolution de la dégradation de l'état de l'élément sont aussi les mêmes dans tous les programmes, sans que les procédures de mesures soient identiques. Il s'agit de la tension à vide, la capacité, la résistance interne et la puissance maximale.

Les facteurs d'accélération du vieillissement, pris en compte dans les différents programmes, sont variés. Dans les procédures de vieillissement calendaire, il s'agit de la température et l'état de charge qui sont utilisés dans tous les programmes. Dans les procédures de cyclage actif, les facteurs étudiés sont la température (commun à tous les programmes), le courant maximal du profil de cyclage et la quantité d'électricité en décharge cumulée ou «charge-throughput» (dans les programmes européens et français), la puissance maximale des profils de cyclage et l'«energy-throughput» (dans les programmes américains et Japonais). Ces différences dans les facteurs exigent une très grande prudence avant de comparer les résultats de ces programmes.

Le profil de cyclage peut être défini en courant ou en puissance. Le profil de cyclage en puissance, adopté dans les tests américains [59], [62], [64], [97] et Japonais [98], représente plus justement les conditions d'utilisation de la batterie dans un véhicule électrique ou hybride. Cependant, lors des tests de cyclage en laboratoire avec un profil défini en puissance, la gestion de l'état de charge de la batterie est problématique et difficilement maîtrisable, surtout lorsqu'il s'agit de plusieurs éléments associés en série et/ou en parallèle. C'est pourquoi, une grande partie des études de vieillissement est réalisée avec un profil de cyclage défini en courant [60], [61].

On peut remarquer qu'aucun de ces programmes ne prend en compte l'influence de la recharge sur le vieillissement. Elle peut être prise en compte en réalisant sur des éléments (ou modules) différents tests de cyclage comprenant de la recharge rapide. Les seuls paramètres qui varient d'un profil de cyclage à un autre sont celles de la recharge (la valeur du courant, et la méthode de la recharge). Cela permettrait d'étudier l'influence de la recharge rapide sur les performances des batteries. Cet aspect sera traité plus tard dans ce document.

5 - Exploitation des données

5.1 - Machines à vecteurs supports

Pour déterminer les lois de vieillissement, une technique de régression mathématique est utilisée : la régression à l'aide des machines à vecteurs support (Acronyme en Anglais : SVM pour Support Vector Machine). Le choix s'est porté sur cette technique pour sa nature non-linéaire et sa capacité de généralisation [36]. En effet, les techniques linéaires se sont avérées insuffisantes pour l'estimation du vieillissement des accumulateurs de types lithium-ion [102]. La SVM est basée sur un noyau qui a pour rôle de rendre le problème linéaire à l'aide d'une projection dans un autre espace (gaussien ou exponentiel).

Avant de commencer notre étude, définissons les termes suivants pour la suite :

- n : le nombre d'observations,
- p : le nombre d'entrées,
- q : le nombre des sorties.

La matrice des entrées, de dimension $n \times (p+1)$, a une première colonne représentative des constantes égales à 1 et s'écrit :

$$\bullet \quad \mathcal{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{1} & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

La matrice des sorties mesurées, de dimension $n \times q$, s'écrit :

$$\bullet \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nq} \end{bmatrix}$$

La matrice des sorties estimées, de dimension $n \times q$, s'écrit:

$$\bullet \quad \hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{11} & \cdots & \hat{y}_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{y}_{n1} & \cdots & \hat{y}_{nq} \end{bmatrix}$$

5.1.1 - Introduction

Les « Support Vector Machines » (SVM) ont été présentées pour la première fois par Vapnik en 1995 [41], [103] pour résoudre les problèmes de classification et d'estimation des fonctions non-linéaires. Elles ont déjà été appliquées dans des domaines variés, parmi lesquels la finance [104], [105], la vision par ordinateur [106], [107], la recherche d'informations [108], la modélisation des émissions polluantes en automobile [109] et finalement la modélisation des batteries lithium-ion [35], [36].

C'est un nouveau type de machine d'apprentissage supervisé basé sur la théorie d'apprentissage statistique. Comparées aux réseaux de neurones, les SVM présentent un avantage important : elles donnent une solution optimale globale et non pas des solutions locales. En plus, les SVM présentent une propriété d'approximation universelle, c'est-à-dire qu'elles sont capables d'approximer toute fonction continue dans un espace compact [96]. Pour ces raisons les SVM peuvent être choisies pour l'estimation des facteurs de vieillissement. Le fonctionnement des SVM est expliqué en détail dans les annexes à la section □.

5.2 - Estimation des indicateurs de vieillissement par SVM

Pour la suite, nous définissons par le terme « indicateurs de vieillissement » les paramètres suivants : la résistance de décharge (qui augmente), la résistance de charge (qui augmente) et la capacité (qui diminue). L'objectif de l'étude est donc de trouver des lois mathématiques qui permettent d'estimer ces indicateurs, désignés par $\hat{\mathcal{Y}}$ en fonction des facteurs de vieillissement choisis, désignés par x , comme l'indique la Figure 2.11. Les facteurs de vieillissement sont le temps de cyclage ou de stockage, la température, le courant efficace du cyclage, la fenêtre de SOC lors du cyclage, l'état de charge lors du stockage. On

ajoute à ces paramètres d'entrée, l'état de charge actuel de la batterie qui est un paramètre nécessaire pour l'estimation de la résistance.

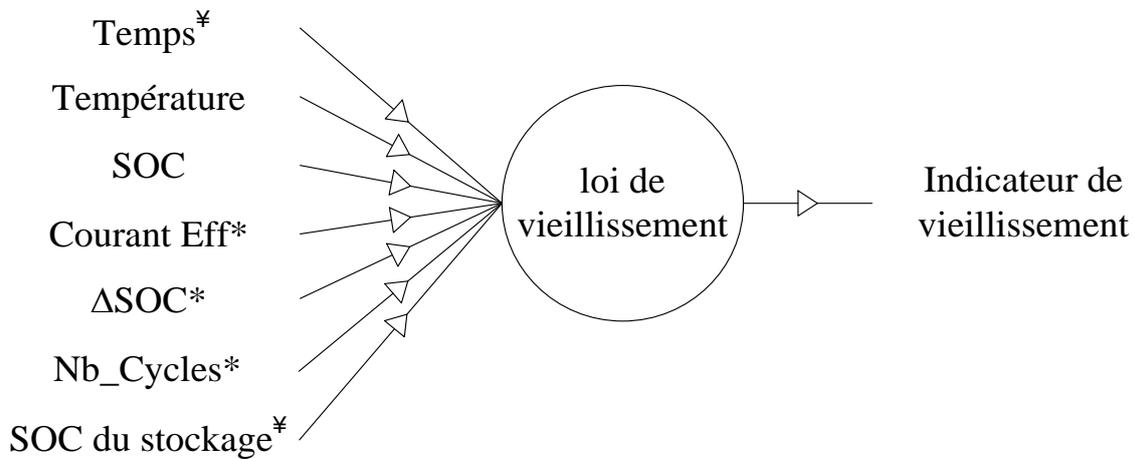


Figure 2.11 : Relation entre un indicateur de vieillissement et sa loi de vieillissement basée sur les facteurs de vieillissement qui sont les paramètres d'entrée (* propres au cyclage, ‡ propre au calendrier).

Mathématiquement, le problème se résume à résoudre l'Équation 2.3.

Équation 2.3 :

$$\widehat{y}_j = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_j, x_i) + b \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_j, x_i) + b$$

En s'appuyant sur l'Équation 2.3, l'estimation de chacun des indicateurs de vieillissement passe par la résolution de l'Équation 2.4 ci-dessous :

Équation 2.4

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K(x_1, x'_1) & \cdots & K(x_1, x'_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K(x_n, x'_1) & \cdots & K(x_n, x'_k) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} (\alpha_{11} - \alpha_{11}^*) \\ \vdots \\ (\alpha_{k1} - \alpha_{k1}^*) \end{bmatrix} + b$$

où k est le nombre des vecteurs supports.

Dans notre cas, le noyau choisi est le 'gaussien'. Il est décrit par: $k(x, x') = e^{-\frac{\|x-x'\|^2}{2\sigma^2}}$. Le problème est donc rendu linéaire et sa résolution revient à chercher les termes α, α^* et b optimaux en minimisant l'erreur quadratique entre la valeur estimée et la valeur réelle mesurée.

5.2.1 - Conditions des tests

Les données sont issues d'un programme d'essais de vieillissement accéléré (LIBERAL). Les éléments testés sont variés en fonction de leur composition chimique et de leur capacité. Les éléments retenus pour construire le modèle appartiennent à deux familles technologiques : lithium à base de nickel ou à base de magnésium. On traite les deux familles de la même manière en supposant que leur comportement vis-à-vis du vieillissement est similaire. Cette hypothèse sera validée par la suite en montrant que la qualité du modèle est indifférente en fonction de la technologie des éléments.

Les éléments testés ont les capacités suivantes : 26 Ah, 30 Ah, 32 Ah, 40 Ah et 45 Ah. Pour uniformiser le traitement, on procède à la normalisation de la capacité et du courant. Pour chaque élément, la capacité est donc divisée par la capacité initiale mesurée lors de la première caractérisation, rendant ainsi toutes les capacités comparables. Le régime en courant de charge-décharge en fraction de C est donné relativement à la capacité initiale..

Les conditions de tests de vieillissement par cyclage sont données dans le Tableau 2.1. Seulement les valeurs de la température et du courant sont données, sachant qu'il reste une 3^{ème} variable qui est le ΔSOC . Cette dernière est égale à 0,01 lorsque le courant est de 1C, à 0,02 lorsque le courant est égal à 2C, à 0,2 lorsque le courant est égal à 5C et peut avoir une valeur de 0,1 ou de 0,2 lorsque le courant est égal à 10C.

$I_{max} \backslash T$	0	15	30	40	45	60
1C				X	X	
2C				X	X	X
5C	X	X	X	X	X	
10C	X		X	X		

Tableau 2.1: Valeurs du courant maximal et de la température pour les tests de cyclage

Quant au vieillissement calendaire, différentes combinaisons de température et de SOC sont réalisées. Elles sont groupées par le Tableau 2.1. Les températures utilisées comme on peut le remarquer sont plus élevées que les conditions réelles. Cela est fait pour accélérer le vieillissement des éléments testés.

SOC \ T	35	45	55	60
1C				
30	X	X		X
50		X		X
70		X		X
90		X	X	X
100	X	X	X	X

Tableau 2.2: Conditions des tests de vieillissement calendaire

Ces tests sont interrompus toutes les 6 semaines pour réaliser un test de caractérisation temporelle dont le profil est montré dans la Figure 2.10. La capacité et les résistances de décharge et de charge sont mesurées durant cette étape. La capacité est mesurée par une décharge totale à 1C. Quant aux résistances, elles sont calculées suite à des créneaux de courant de 10 secondes en décharges et charges alternées. Ces créneaux sont réalisés aux niveaux de SOC suivant : 90% - 80% - 70% - 60% - 50% - 40% - 30% - 20% et 10%.

5.2.2 - Résultats

Les données sont groupées en deux catégories selon le type de vieillissement : en cyclage ou en calendaire. Comme indiqué précédemment, les variables d'entrées du modèle varient en fonction de la nature des tests de vieillissement. Les facteurs de vieillissement retenus sont :

- Vieillissement par cyclage : nombre de cycles, température, courant maximal et Δ SOC,
- Vieillissement calendaire : temps (en jours), température et état de charge en stockage.

Tous les indicateurs de vieillissement sont bien estimés par notre modèle, que ce soit pour le vieillissement en cyclage ou en calendaire. La Figure 2.12 illustre une comparaison entre les valeurs estimées par le modèle en traits continus et les valeurs mesurées par des petits cercles en rouge. Deux exemples sont illustrés, celui à gauche représente l'évolution de la capacité relative en cyclage en fonction de nombre de cycles pour différentes conditions. La figure à droite représente l'évolution de la résistance relative de décharge mesurée à 50% de SOC en fonction de nombre de cycles pour différentes conditions.

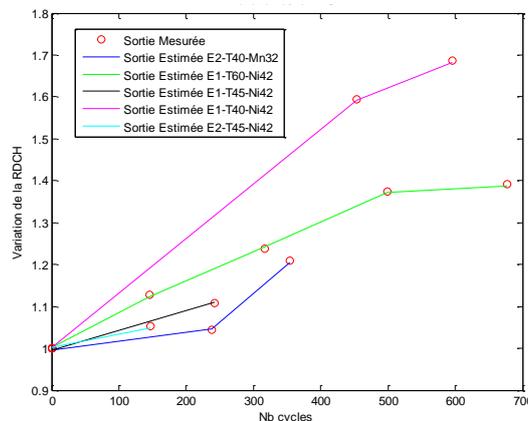


Figure 2.12: Variations de la capacité (à gauche) et de la résistance de décharge (à droite) en fonction de nombre du cycles (comparaison mesures / estimation)

5.2.3 - Validation du modèle

Pour juger la qualité de l'estimation, on se réfère au coefficient de détermination R^2 et à celui de prédiction Q^2 . Ces deux coefficients sont souvent utilisés pour juger la qualité d'une régression. R^2 est appliqué aux données d'apprentissage, il juge donc la qualité d'apprentissage du modèle. Tandis que Q^2 s'applique aux données non utilisées dans le processus d'apprentissage pour juger l'aptitude du modèle à extrapoler et pour valider une zone de fonctionnement plus vaste que celle de l'apprentissage [41]. Les valeurs que peuvent avoir ces deux coefficients sont comprises entre 0 et 1. Si elles s'approchent de 0, cela indique que le modèle est très mauvais, et au contraire, plus la valeur s'approche de 1, meilleure est la qualité du modèle. Dans le domaine de la physique, où la mesure est précise et les phénomènes sont stables, on pourra estimer que les données sont fortement corrélées si R^2 et Q^2 sont supérieurs à 0,9 [110]. Cette valeur sera utilisée comme seuil de validation de notre modèle.

R^2 / Q^2	Résistance interne [Ohm]	Capacité [Ah]
Cyclage	0,984 / 0,951	0,995 / 0,991
Calendaire	0,979 / 0,952	0,996 / 0,991

Tableau 2.3: Tableau récapitulatif des résultats de SVM

Le Tableau 2.3 montre la qualité des estimations, en apprentissage ou en test, est bonne car la valeur de R^2 et Q^2 est toujours supérieur à 0.95. Une autre méthode plus visuelle peut être utilisée pour montrer la qualité du modèle. C'est la représentation des sorties estimées en fonction des valeurs réelles (Figure 2.13).

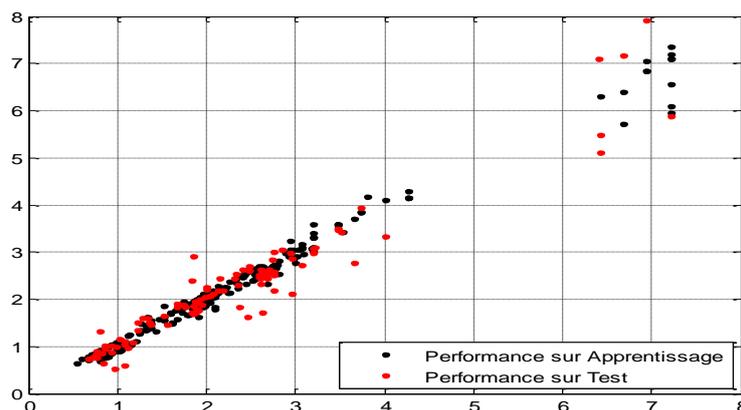


Figure 2.13: représentation des valeurs estimées de la résistance de décharge en fonction des valeurs mesurées lors des tests de cyclage

La Figure 2.13 représentant les valeurs estimées de la résistance de décharge en fonction de celles mesurées suit une droite très proche de la première bissectrice. Cela signifie

que l'estimation est réussie. On retrouve la même forme de courbe pour les autres indicateurs de vieillissement (capacité et résistance de charge).

6 - Conclusion

Une nouvelle méthode d'estimation du vieillissement est présentée dans ce chapitre. Elle s'appuie sur des données issues des tests de vieillissement accélérés sur des éléments lithium-ion. La méthode est basée sur le principe de modélisation du type « boîte-noire ». C'est-à-dire, on cherche à estimer la dégradation des indicateurs de vieillissement en fonction des facteurs de vieillissement sans prendre en compte les phénomènes physiques qui les lient. L'estimation des sorties se fait à partir de machines à vecteurs supports SVM, qui est une méthode de régression non linéaire se basant sur un noyau de type gaussien.

Cette méthode a donné des bons résultats d'estimation sur les données d'apprentissage ainsi que de test. Cela valide le modèle sur la totalité du domaine des conditions d'essais. Faute de temps et de ressources matérielles, des essais supplémentaires de vieillissement n'ont pas pu être réalisés dans le cadre de ce projet pour valider le modèle sur la totalité du domaine de l'utilisation réelle.

Ce modèle sera utilisé dans ce document pour estimer la diminution de la capacité et l'augmentation des résistances internes à cause du vieillissement. Ces dernières, issues de ce modèle de vieillissement, agiront sur les paramètres du modèle électriques de l'accumulateur lithium-ion en question, permettant alors d'intégrer le vieillissement dans le modèle de comportement de l'accumulateur lithium-ion présenté dans le chapitre 1. Ce dernier sera à son tour intégré dans un modèle plus global du véhicule électrique pour étudier l'impact du vieillissement de la batterie sur les performances du véhicule dans le cadre de l'utilisation postale.

Chapitre 3 - Création des profils de courant représentatifs de l'usage postal

1 - Introduction

La connaissance des performances des véhicules dans le cadre d'une utilisation spécifique est primordiale pour l'optimisation de la gestion d'une flotte de véhicule. Pour cela, on s'intéressera dans ce chapitre à la spécificité de l'utilisation des véhicules de La Poste servant à la distribution du courrier. Il est nécessaire de bien caractériser cette utilisation par des profils de mission pour pouvoir mieux étudier le comportement des véhicules, et surtout les performances de la batterie pour cette utilisation particulière.

Des profils de mission « standards » existent pour tester les performances des véhicules, citons les NEDC européen, le 10-15 MODE Japonais ou le FTP-75 Américain. Ces profils sont des cycles homologués créés à la base pour mesurer la consommation et les émissions polluantes des véhicules et ne représentent pas forcément la réalité de l'utilisation des véhicules [111]–[113]. Dans cette optique, de nombreux travaux ont été réalisés pour trouver des cycles plus représentatifs de utilisation réelle des véhicules selon les différents types d'usage (urbain, extra-urbain, rural) [113]–[117]. Cependant, compte tenu des spécificités de l'usage du véhicule électrique pour une utilisation de distribution de courrier, les profils classiques ne sont pas adaptés.

Un profil porte à porte est utilisé à La Poste [118] pour simuler une utilisation très sévère pendant les missions de distribution de courrier. Cela permet de tester les performances des véhicules dans des conditions extrêmes d'utilisation. Mais des profils spécifiques de l'utilisation postale restent nécessaires pour représenter l'application de distribution de courrier. Dans cet objectif, des véhicules ont été instrumentés pour collecter des paramètres chronologiques (vitesse, courant, tension batterie) nécessaires à la construction des cycles.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons les profils de missions standards les plus utilisés et susceptibles de se rapprocher de l'utilisation postale, ainsi qu'un profil représentatif de l'usage réel en zone urbaine comme élément de comparaison avec les profils postaux. La comparaison portera sur deux aspects : statistique et énergétique. Elle permettra de valider la distinction de l'utilisation postale en regard des profils standards et représentatifs de l'usage réel. Enfin, nous terminerons par la création d'un profil de courant, représentatif de la sollicitation de la batterie pour cet usage spécifique.

2 - Cycles de conduite de base

Pour étudier l'usage, nous nous baserons sur la comparaison du profil de vitesse lors de l'utilisation postale avec les différents cycles de conduites connus, pour permettre de repérer cette application par rapport à ce qui est standard. Avant de commencer, il est indispensable de définir ce qu'est un cycle de conduite (ou profil de mission), pour citer ensuite les différents profils de vitesse utilisés pour cette tâche. Selon P. Degobert [119], pour pouvoir contrôler l'application des règlements relatifs à la pollution automobile, il a été nécessaire de concevoir des procédures standardisées de roulage des véhicules. Des cycles ont alors été créés pour répondre à ce besoin, mais également pour mesurer les émissions de l'échappement et la consommation de carburant des véhicules conventionnels. Un cycle de conduite correspond alors à un déroulement de vitesses en fonction du temps réalisé sur banc à rouleaux.

2.1 - Les cycles réglementaires

Il s'agit des cycles de conduite développés dans le but de mesurer les émissions polluantes des véhicules thermiques. Ils ont généralement été construits pour reproduire les conditions réelles de circulation mais n'ont pas vocation à décrire l'ensemble des conditions d'utilisation des véhicules. De fait, ces cycles sont nécessairement courts et simplifiés, compte tenu de leur objectif de reproductibilité et de fiabilité élevée des résultats, pour des tests de type "contrôle ou mesure par rapport à des valeurs limites". Dans la suite, les principaux cycles réglementaires représentant des conditions d'usage urbaines ou à faibles vitesses sont présentés.

2.1.1 - Cycle réglementaire européen (ECE15)

Le cycle ECE15 se caractérise par un profil en segments de droite limitant de ce fait la description des transitoires. Il a une extension extra-urbaine EUDC, formant un ensemble connu sous le nom de NEDC. Le cycle se compose de 4 km de circulation urbaine (à 18,7 km/h de moyenne) et de 7 km en extra- ou périurbain (à 62,6 km/h de moyenne). Le cycle urbain a été construit à partir de mesures de cinématiques de véhicules circulant à Paris en 1962. Les rapports de boîte de vitesse sont imposés aux paliers de vitesse.

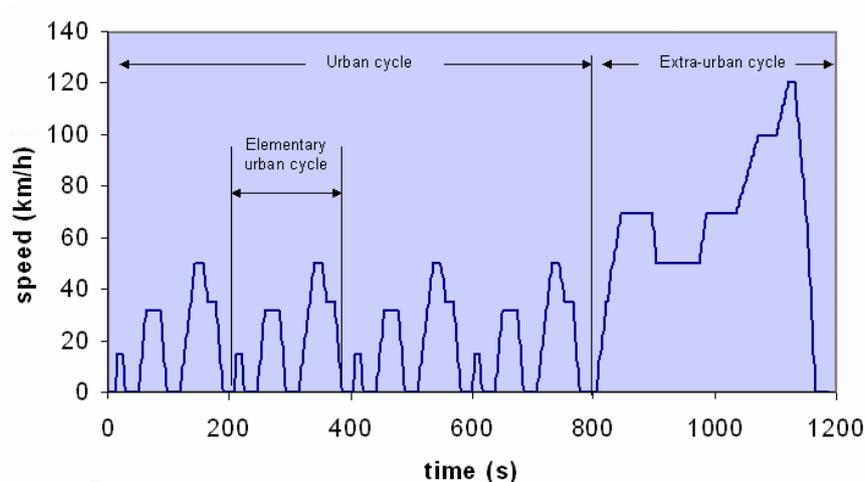


Figure 3.1: Le cycle ECE15 et son extension extra-urbaine

2.1.2 - Cycle FTP75 américain

Le cycle FTP75 (pour Federal Test Procedure, ou UDDS pour Urban Dynamometer Driving Schedule) est utilisé aux États-Unis ainsi que dans de nombreux pays d'Amérique latine, en Corée du sud, à Taiwan, pour contrôler les émissions des véhicules légers. Ce cycle a été créé en 1972 pour simuler un parcours urbain de 18 km à 34 km/h de moyenne (vitesse maximale de 91 km/h). Les arrêts représentent 20% de la durée. Il se compose d'une phase 1 (FTP72-1) avec démarrage moteur froid après repos du véhicule une nuit entière à 20°C, d'une phase 2 enchaînée à la première (FTP72-2), et d'une phase 3, répétition de la phase 1 et effectuée 10 mn après la phase 2, donc moteur chaud.

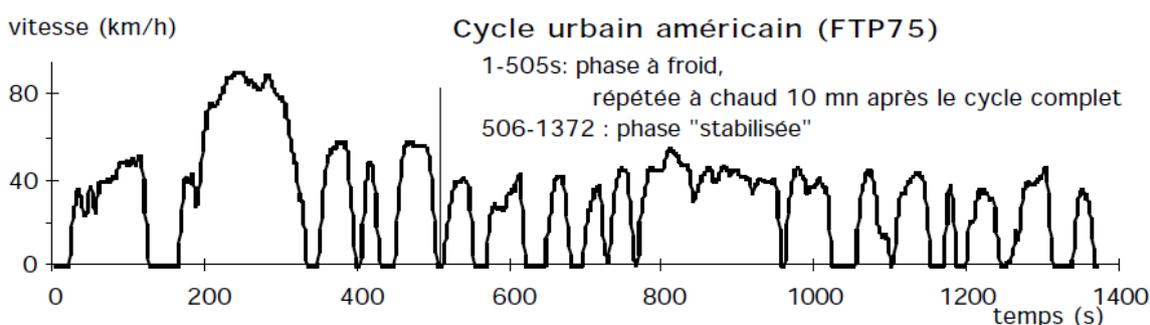


Figure 3.2 : Cycle UDDS américain [115]

2.1.3 - Cycle Japonais 10-15 MODE

Le cycle japonais 10-15 MODE est composé de deux cycles de conduite distincts. Le cycle '10 MODE' est un cycle de conduite à basse vitesse en milieu urbain, tandis que le cycle 15 MODE est un cycle extra-urbain à une vitesse plus élevée.. Comme

pour l'essai européen, il est formé de segments de droite limitant ainsi la description transitoire.

- **Cycle 10 MODE (urbain)**

Il représente la conduite à basse vitesse en milieu urbain congestionné. Il dure 135 secondes et se compose d'une série d'accélération et de décélération. La vitesse maximale est de 40 km/h, tandis que la vitesse moyenne est de 17,7 km/h.

- **Cycle 15 MODE (extra-urbain)**

Ce cycle modélise une conduite sur route en milieu extra-urbain où la vitesse est plus élevée que précédemment. Il est de 231 secondes et se compose d'une série d'accélération et de décélération à des vitesses plus élevées que le cycle 10 MODE. La vitesse maximale est de 70 km/h, tandis que la vitesse moyenne est de 33.88 km/h. Il est inclus dans notre étude parce que les niveaux de vitesse correspondent au milieu rural constituant une partie non négligeable des tournées de distribution de courrier.

- **Cycle 10-15 MODE (combiné)**

C'est la combinaison des deux cycles précédents. En effet, le cycle 10 MODE est répété trois fois puis suivi par un cycle unique de 15 MODE. Lorsque le test est réalisé pour mesurer les émissions d'un moteur thermique, un cycle MODE 15 est réalisé avant le cycle combiné pour permettre de faire monter le moteur en température. Les mesures des émissions se font au démarrage du cycle combiné [120].

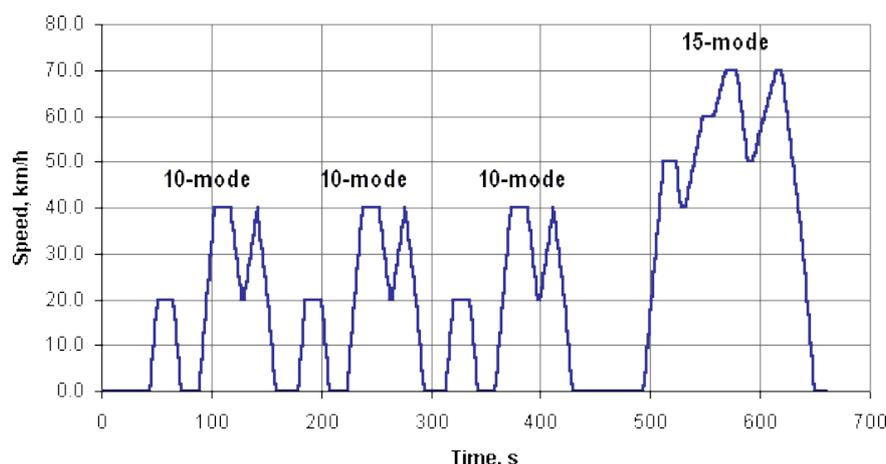


Figure 3.3 : Cycle 10-15 MODE [121]

2.2 - Profils de missions représentatifs de l'usage réel

Il est montré dans la littérature que les cycles réglementaires ne représentent pas l'utilisation réelle d'un véhicule [113], [115], [122], ce qui sera confirmé plus tard dans ce

document par des comparaisons faites sur les critères statistiques des cycles ainsi que sur la consommation énergétique de chacun. Plusieurs travaux, cherchant à définir des profils représentatifs de l'usage réels, existent aujourd'hui. Ces cycles ont été élaborés suite à des tests réalisés sur des flottes de véhicules circulant dans milieux urbains, extra-urbains ou sur autoroute. On peut citer les cycles Artemis européens [114], les cycles Japonais [123] les cycles suisses [116] et les cycles grecs ADC [117]. Pour la suite, le cycle Artemis urbain (Figure 3.4) a été jugé particulièrement intéressant. Son point fort est qu'il prend en compte les différentes situations de trafic en milieu urbain. Il a une vitesse moyenne de 17,5 km/h et une fréquence d'arrêt de 4,7 arrêts/km, très proche de la fréquence moyenne d'arrêts lors des missions de distribution de courrier (4 arrêts/km).

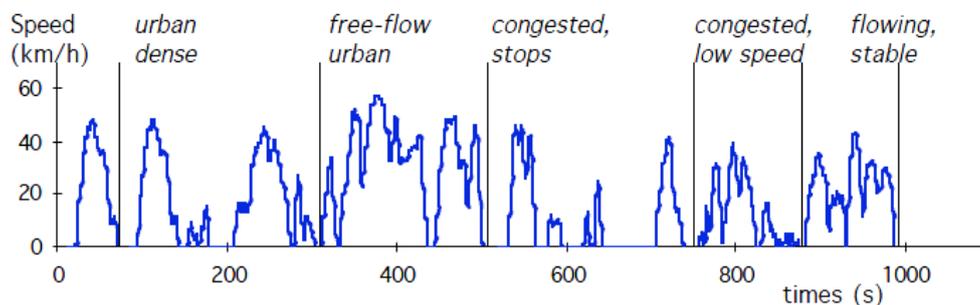


Figure 3.4 : Le cycle urbain d'Artemis [114]

3 - Profils de mission spécifiques à l'usage postal

Les profils de missions présentés ci-dessus ne sont pas représentatifs de l'usage réel des véhicules de La Poste dans les missions de distribution de courrier. En effet, ce type de mission se caractérise par le nombre élevé d'arrêts réalisés par le facteur pour accomplir sa mission. Cela se traduit par un grand nombre de phases d'accélération et de décélération, induisant des conséquences sur la consommation énergétique du véhicule, comme cela sera montré plus tard dans ce chapitre.

Deux types de profil seront présentés dans ce cadre d'étude : le profil porte à porte 4 arrêts/km et les profils représentatifs des missions de distribution de courrier. Le premier est utilisé pour simuler une conduite ultra agressive pendant la distribution de courrier. Il constitue un outil important de test des véhicules répondant aux appels d'offres lancés par La Poste pour l'achat des véhicules dédiés à la distribution de courrier. Les autres profils qui seront présentés sont représentatifs des missions de distribution de courrier, prenant en compte le comportement du conducteur (conduite agressive, normale et éco-conduite). Ils sont obtenus suite à une campagne d'essais sur des véhicules réalisant des missions réelles de distribution de courrier.

3.1 - Profil porte à porte 4 arrêts/km de La Poste

Le profil porte à porte 4 arrêts/km (PAP4AK) est utilisé à La Poste pour simuler la conduite la plus sévère pendant les missions de distribution de courrier. Les véhicules de La Poste sont testés avec ce profil lors des appels d'offres pour comparer leurs performances dans les conditions extrêmes. Il est constitué de 4 phases de 'stop-and-go' dans une distance d'un kilomètre. Cela correspond au nombre moyen d'arrêts par kilomètre dans une mission de livraison du courrier.

La principale différence entre ce profil et les autres est que les valeurs de la vitesse dépendent des caractéristiques et des performances maximales du véhicule. Conventionnellement, les profils de mission sont constitués d'un groupe de couples temps-vitesse bien définis, indépendamment du véhicule testé. Pour le PAP4AK, les valeurs des couples temps-vitesse sont déterminées pour un certain véhicule après la réalisation du cycle par ce dernier. En effet, comme l'indique la Figure 3.5, on définit seulement la distance et la vitesse maximale de chaque phase 'stop-and-go'.

Les phases 'stop-and-go' couvrent 250 mètres chacune et sont séparées par des pauses de 30 secondes. Une phase est composée de trois étapes :

- Une accélération maximale traduite par l'appui à fond sur la pédale d'accélérateur. Cette étape s'achève en atteignant la vitesse maximale de la phase.
- Le maintien de la vitesse à la limite maximale de chaque phase (40 – 50 – 50 – 55 km/h).
- Une décélération dont le début dépend de la distance restante avant d'atteindre les 250 m de chaque phase. Comme on peut le voir sur la Figure 3.5 , le début de cette étape est à 35 m de la fin pour la première phase, 40 m pour la deuxième ainsi que la troisième et 45 m pour la quatrième. La décélération commence en appuyant au maximum sur la pédale de frein et doit s'achever par un arrêt du véhicule à la marque de 250 m.

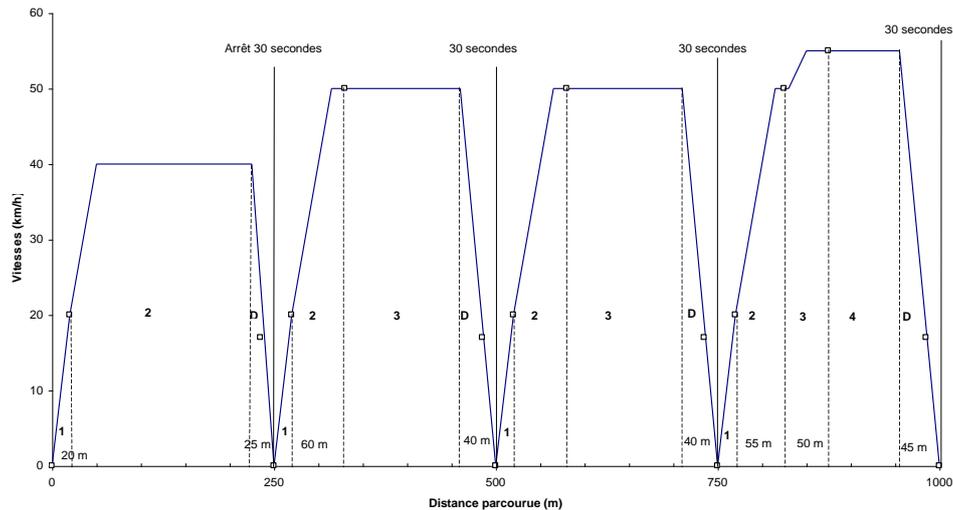


Figure 3.5: Cycle théorique du porte à porte 4 arrêts/km

Pour étudier les caractéristiques du cycle PAP4AK, il est donc nécessaire de choisir un véhicule avec lequel le profil sera réalisé afin d'obtenir les valeurs de la vitesse en fonction du temps spécifique au véhicule. Ce dernier est le Fiat Doblo électrifié par Micro-Vett. Il est équipé d'un moteur asynchrone de 30 kW, alimenté par un système de batterie formé de la mise en série de 60 cellules lithium-ion de type NMC Kokam de capacité nominale 100 Ah. Ces éléments seront étudiés plus en détail dans les prochains chapitres. Dans cette partie nous nous focalisons sur les profils de missions et leurs impacts sur les performances du véhicule.

Le véhicule en question est équipé d'un capteur de vitesse optique sur une roue arrière (Figure 3.6) et permet l'acquisition d'une valeur de vitesse toutes les 100 millisecondes. Le test est réalisé sur un terrain plat d'un kilomètre de longueur, avec un marquage au sol tous les 250 mètres.

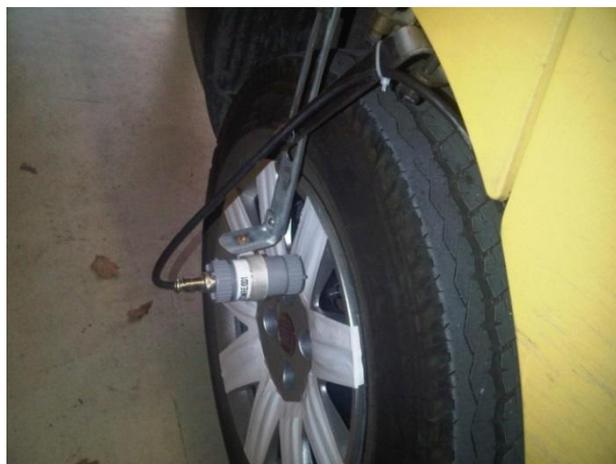


Figure 3.6: Capteur optique de la vitesse du véhicule

La figure Figure 3.7 montre l'évolution de la vitesse enregistrée lors de la réalisation de 3 cycles PAPKAK consécutifs par la Fiat Doblo. La figure de gauche représente la vitesse en fonction du temps et celle de droite la vitesse en fonction de la distance.

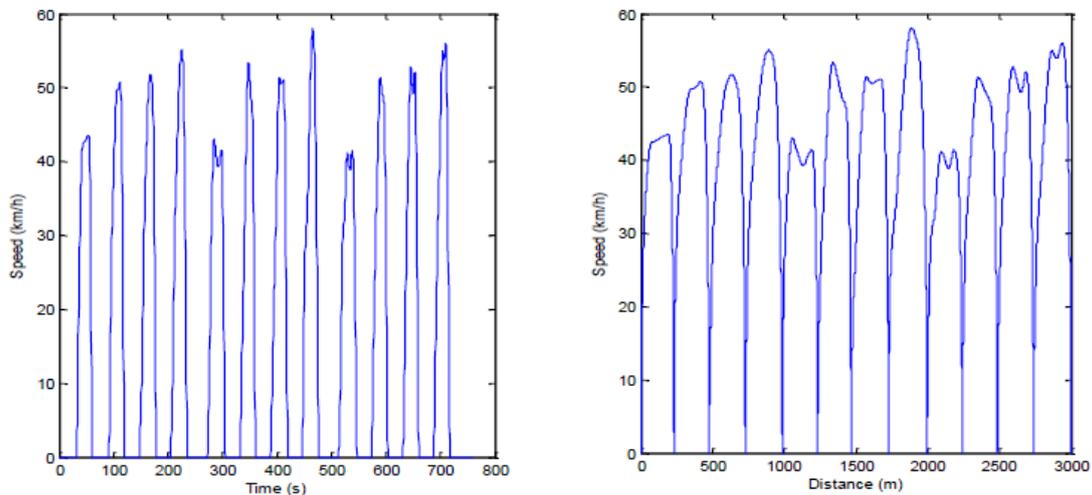


Figure 3.7: Evolution de la vitesse enregistrée lors de 3 cycles PAP4AK consécutifs (fonction du temps (gauche) et de la distance(droite))

3.2 - Profils réels de distribution de courrier

Pour étudier l'utilisation réelle pendant les missions de distribution de courrier, des véhicules ont été instrumentés dans l'objectif de mesurer la vitesse et le comportement de la batterie pendant ces missions. Le profil de vitesse, servira en premier temps comme outil de comparaison de l'utilisation postale avec d'autres profils standard. Il sera aussi utilisé dans l'outil de simulation pour représenter l'application en question. Pour ce qui concerne la batterie, le courant et la tension sont enregistrés. La sollicitation réelle de la batterie en courant permettra de créer des profils typiques de courant de courte durée ayant les mêmes caractéristiques du profil réel, représentant ainsi la sollicitation de la batterie dans le cadre de l'utilisation postale. La tension peut servir pour la validation du modèle de la batterie plus tard.

3.2.1 - Essais expérimentaux

Les essais expérimentaux sur les véhicules électriques dans ce projet ont été réalisés au centre de distribution de courrier de La Poste sur la commune de La Chapelle-Sur-Erdre en Loire-Atlantique. Les tournées de distribution dans ce centre se caractérisent par la présence d'une partie rurale et d'une partie urbaine comme dans la majorité des cas dans les différents centres de distribution de courrier. Elles sont considérées représentatives de l'utilisation standard des véhicules postaux par le service spécialisé à La Poste.

La première partie des essais consiste à équiper chacun des cinq véhicules électriques du centre de distribution d'un capteur de vitesse réalisant une acquisition de la vitesse par seconde. Ce capteur (Figure 3.8) enregistre aussi la position GPS du véhicule, permettant ainsi d'analyser en détail les trajets des véhicules. On obtient en fin de journée le parcours quotidien de chaque véhicule avec son profil de vitesse.



Figure 3.8: Capteur de vitesse et sa sonde GPS installée sur le toit du véhicule

Cet appareil fournit des informations permettant de caractériser les tournées comme on peut le voir à la Figure 3.9 : la durée et la distance de la tournée, la vitesse moyenne, la vitesse maximale et le profil de vitesse. En s'appuyant sur ces informations on peut choisir la tournée la plus représentative, c'est-à-dire ayant les valeurs caractéristiques les plus proches des moyennes des 5 tournées.

Une fois la tournée sélectionnée, un véhicule électrique instrumenté est mis à la disposition du facteur pour la réalisation de sa tournée pendant une durée de deux semaines. Pendant la première semaine, le véhicule est conduit de manière « agressive ». La conduite agressive correspond à de fortes accélérations, l'utilisation excessive du freinage mécanique et donc une grande fluctuation dans la valeur de la vitesse au cours du temps. Cela correspond aux pires cas de conduites réelles. Au contraire, pendant la deuxième semaine, le conducteur agit plus calmement en appliquant les principes de l'éco-conduite de voitures électriques, se basant sur l'application d'accélération de faible niveau et l'utilisation du freinage électrique plutôt que mécanique quand cela est possible en lâchant simplement la pédale de l'accélérateur. Cela permet de diminuer la consommation en réinjectant du courant dans la batterie par freinage récupératif quand cela est possible.

Le type de conduite est dépendant du comportement humain, facteur qui sera pris en compte dans notre étude. Il pourra avoir deux valeurs possibles : « conduite agressive » ou « éco-conduite ». Ces deux types seront comparés dans la suite avec les profils de mission standard et le PAP présentés précédemment. Les essais sur véhicules vont permettre d'avoir des profils réels de missions correspondant à chaque type de conduite, qui seront utilisés plus tard pour étudier l'influence du comportement humain pendant la conduite

sur le vieillissement des batteries. Les résultats permettront aux gestionnaires de flottes de former leur conducteur à un type de conduite minimisant le vieillissement des accumulateurs.

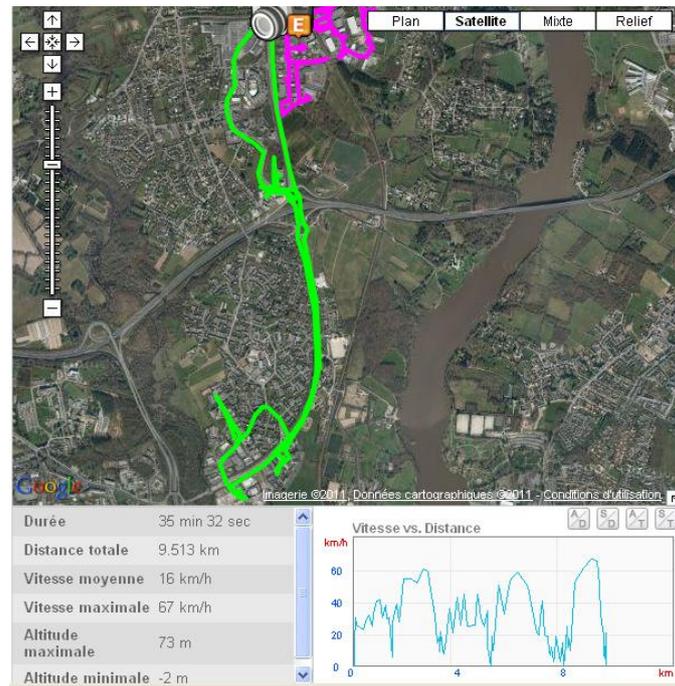


Figure 3.9: Exemple d'informations fournies par le capteur GPS

Le véhicule qui est le sujet des essais expérimentaux (Fiat Doblo) est instrumenté de la manière suivante :

- **capteur de vitesse** par comptage de passage de bandes réfléchissantes via un émetteur-récepteur infra-rouge installé sur une des roues arrière (Figure 3.6). Les mesures fournies par ce capteur sont plus précises que celles données par le GPS utilisé dans les premières expérimentations,
- **capteur de courant** de type à effet Hall installée à la sortie du pack batterie,
- **capteur de tension** installé également à la sortie du pack batterie,
- **Capteurs de température** : thermocouples placés sur le bord du pack batterie et sur le capot du véhicule pour la température ambiante.

Tous ces capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition autonome placée dans la voiture.

4 - Comparaison des différents profils

Il est nécessaire de réaliser une comparaison entre l'utilisation postale des véhicules en mission de distribution de courrier et les différents profils de missions connus. Cela va permettre de situer l'utilisation postale par rapport à ces profils en termes de sévérité

d'utilisation. Le premier aspect de comparaison se fait par rapport aux propriétés statistiques de l'utilisation pour tirer les points de ressemblances et de différences avec les profils standards. Le second aspect de comparaison est celui de la demande énergétique qui a une influence directe sur la consommation totale du véhicule.

4.1 - Comparaison statistique

Pour mieux comprendre la particularité de l'utilisation des véhicules dans les missions postale de distribution du courrier et pour pouvoir la situer par rapport aux cycles standards, il est nécessaire de réaliser une comparaison statistique entre cette utilisation et les différents cycles. Selon la littérature [113], [114], [116], [124], les critères les plus utilisés pour la comparaison des cycles de conduite sont les suivants:

- vitesse moyenne globale [km/h] : c'est la vitesse moyenne calculée sur tout le cycle,
- vitesse maximale [km/h] : c'est la vitesse maximale atteinte pas le véhicule,
- vitesse moyenne de roulage [km/h] : c'est la vitesse moyenne calculée uniquement lors des phases de roulage, c'est-à-dire en excluant les phases d'arrêts,
- pourcentage d'arrêts [%] : c'est le pourcentage du temps d'arrêts du véhicule par rapport au temps total mis pour la réalisation du cycle,
- accélération moyenne [m/s^2] : c'est l'accélération moyenne calculée que sur les accélérations positives,
- accélération maximale [m/s^2] : accélération maximale atteinte.

Le Tableau 3.1 représente une comparaison chiffrée entre les caractéristiques des différents profils d'utilisation.

Cycle	Vit. moy. glob. (km/h)	Vit. max. (km/h)	Vit. moy. roul. (km/h)	Pourc. arrêts (%)	Acc. moy. (m/s^2)	Accel. max (m/s^2)
ECE-15	18.7	50	27.7	26.1	0.75	1.04
UDDS	25.78	91.2	39	37.95	0.51	1.50
10-15 MODE	22.72	70	33.107	31.375	0.57	0.79
Artemis urb.	17.5	57.7	23.92	27.7	0.77	2.36
PAP4AK	15.42	55	20.56	24.983	1,22	2.83
Dist. normale	14.85	71.35	18.05	32.45	0.68	2.27
Dist. agres.	21.09	74.32	27.47	27.21	0.84	2.76

Tableau 3.1: Comparaison statistique entre les différents profils de conduite

D'après ce tableau, on peut constater que l'utilisation du véhicule dans les missions de distribution du courrier se distingue par les valeurs élevées d'accélération. Seul le cycle Artemis présente des valeurs comparables avec celles de l'utilisation postale. Les phases d'accélération proposées par les cycles standards sont très légères, et ne peuvent pas être représentatives de l'application en question. Ces phases ont des conséquences directes sur la consommation énergétique du véhicule comme il sera montré dans la suite.

4.2 - Comparaison de la consommation énergétique des profils

Dans cette partie, on calculera la consommation énergétique des différents profils. La puissance et l'énergie nécessaires pour assurer la réalisation de chaque profil sont estimées en se basant sur un modèle longitudinal de la dynamique du véhicule basé sur les équation 3.1 et 3.2 [113], [125]–[127]. Dans ce modèle, on ne considère que la puissance appliquée au niveau des roues du véhicule. Les puissances intermédiaires entre les roues et la batterie (transmission, boîte de vitesse, moteur, convertisseur statique, auxiliaires véhicule) ne sont pas pris en compte dans ce chapitre.

La puissance appliquée au niveau des roues du véhicule provient des forces mécaniques agissantes dans la direction du mouvement. Il s'agit de la puissance de traction P_{trac} . Les forces contribuant à cette puissance sont la force responsable du mouvement, produit de la masse du véhicule par la dérivée de la vitesse, les frottements aérodynamiques F_{aero} , les frottements dus au roulement F_{roul} , et finalement la force de la pesanteur F_{pes} qui dépend de l'angle d'inclinaison de la route. Les équations régissant le mouvement sont les suivantes :

Équation 3.1 :

$$P_{trac} = \left(m \cdot \frac{dv}{dt} + F_{aero} + F_{roul} + F_{pes} \right) \cdot v$$

Équation 3.2 :

$$E_{trac} = \int_0^t \left(m \cdot \frac{dv}{dt} + F_{aero} + F_{roul} + F_{pes} \right) \cdot v \cdot dt$$

Équation 3.3 :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_f \cdot C_x (v + v_v)^2$$

Équation 3.4 :

$$F_{roul} = (C_s + C_v \cdot v) \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta$$

Équation 3.5 :

$$F_{pes} = m \cdot g \cdot \sin \theta$$

ρ est la masse volumique de l'air, S_f la surface frontale du véhicule, C_x le coefficient de trainée, C_s et C_v les coefficients sec et visqueux (respectivement) du frottement dû au roulement, v la vitesse du véhicule, v_v la vitesse du vent dans le sens opposé au mouvement du véhicule, m la masse du véhicule, g l'accélération de la pesanteur et θ l'angle d'inclinaison de la route. Les paramètres utilisés sont ceux qui correspondent au véhicule Fiat Doblo. Les valeurs des paramètres utilisés dans notre modèle sont données dans le Tableau 3.2.

ρ	S_f	C_x	C_s	C_v	v_v	m	g	θ
1.28 kg/m ³	3 m ²	0.31	10 ⁻² N	10 ⁻⁴ N.s/m	0 m/s	1800 kg	9.81 m/s ²	0

Tableau 3.2: Paramètres du modèle de véhicule électrique utilisé

Pour simplifier l'étude, on se positionne dans le cas où le vent n'agit pas dans la direction du mouvement ($v_v = 0$) et le véhicule roule sur une trajectoire parfaitement horizontale ($\theta = 0$) comme le montre les valeurs dans le tableau.

Finalement, la consommation spécifique de chaque cycle est calculée en divisant l'énergie de traction ($E_{trac} = \int_0^t (m \cdot \frac{dv}{dt} + F_{aero} + F_{roul} + F_{pes}) \cdot v \cdot dt$ appliquée pour $v > 0$) par la distance totale parcourue lors de la réalisation du cycle. Cette valeur correspond aux barres bleues dans la Figure 3.10. Les barres rouges correspondent à la consommation due aux pertes ($\int_0^t (F_{aero} + F_{roul} + F_{pes}) \cdot v \cdot dt$), c'est-à-dire la consommation totale à laquelle on retranche le terme lié à l'accélération

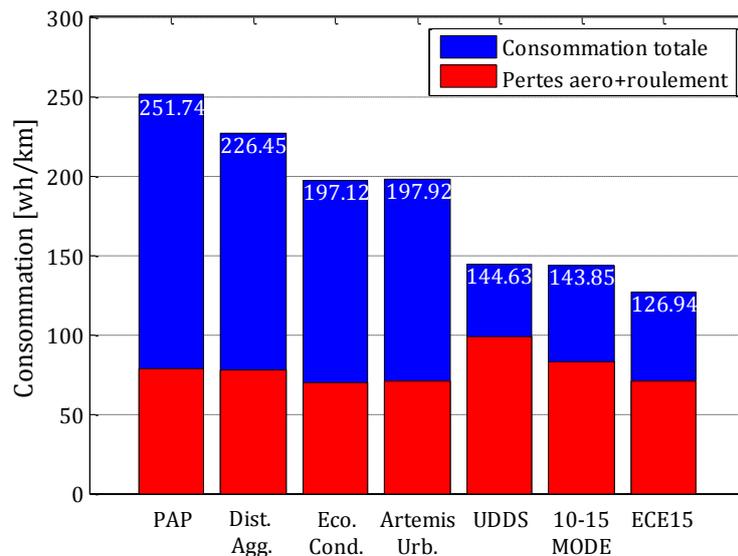


Figure 3.10 : Comparaison de la consommation moyenne des profils postaux avec les profils standards

La comparaison montre que les profils de missions cités ci-dessus peuvent être classés en trois groupes selon leur consommation. Le premier groupe, formé des profils de missions standards (UDDS, 10-15 MODE et le ECE15) présente les niveaux de consommation les plus faibles, ce qui est logique en raison des faibles niveaux d'accélération (voir Tableau 3.1). Cette catégorie de profils sous-estime donc la consommation réelle et ne peut pas être adaptée pour étudier l'utilisation postale. La deuxième catégorie est formée du cycle Artemis urbain, qui représente la conduite réelle en milieu urbain et des tournées de distribution de courrier en éco-conduite. La troisième catégorie est constituée des tournées avec une conduite agressive et du cycle PAP. La répartition des tournées de distribution en deux catégories de consommation différentes en fonction du type de conduite montre que le comportement humain a des conséquences non négligeables qu'il faut prendre en compte dans l'étude de l'application postale.

- ***Récupération d'énergie par freinage***

Rappelons que l'étude ne prend en considération que l'énergie nécessaire pour fournir le couple moteur aux roues et pour la compensation des pertes aérodynamiques et de roulement. Cette énergie peut être classée en deux catégories : récupérable sous forme d'énergie électrique ou non. Les pertes constituent une énergie perdue, et ne peuvent en aucun cas être restituées à la batterie. Elles constituent la partie rouge des barres dans la Figure 3.10. Quant à l'énergie cinétique, elle peut être restituée en partie à la batterie lorsque la machine électrique fonctionne en mode générateur lors des phases de décélération. Cette partie est représentée en bleu. On peut remarquer que la proportion de la partie non récupérable par rapport à l'énergie totale consommée est très élevée dans la catégorie des profils standards (notamment pour l'UDDS à cause de la vitesse moyenne de roulage élevée) contrairement aux deux autres catégories. Autrement dit, les missions de l'application postale et la conduite en milieu urbain se caractérisent par une grande proportion d'énergie récupérable (de l'ordre de 60%). Dans le cas idéal, où le rendement de la chaîne de traction et de la batterie est égal à 1, l'énergie égale à la différence entre la consommation totale et les pertes aérodynamique et du roulage est totalement récupérable sous forme de freinage électrique rechargeant donc la batterie. Cela se réalise dans les phases de décélération où le couple développé par le moteur agit dans le sens inverse à la rotation, ce qui correspond au fonctionnement en mode générateur. La consommation totale du véhicule se réduirait donc aux pertes.

Néanmoins, cela est très loin de la réalité. La proportion de l'énergie récupérée par freinage électrique est très faible, voire négligeable. Le pourcentage de récupération observé pendant les tournées réalisées avec le véhicule électrique instrumenté est égal à 5,8% indépendamment du type de conduite. En effet, plusieurs facteurs contribuent à la diminution de ce pourcentage. Tout d'abord, des pertes énergétiques, donc non récupérables, existent au niveau de la chaîne de traction et de la batterie. Ensuite, une très grande partie de l'énergie

pendant les phases de décélération est dissipée par le freinage mécanique sous forme de frottements et pertes calorifiques. En outre, pour que la conduite du véhicule ne diffère pas de celle d'un véhicule conventionnel, le couple de freinage maximal pouvant être développé par le moteur électrique est limité à une valeur équivalente à celle d'un moteur thermique. Donc même en lâchant la pédale d'accélérateur à haute vitesse, le couple de freinage électrique, et donc le courant de recharge de la batterie, sont limités. L'élément principal responsable donc de la décélération et de l'arrêt du véhicule est le freinage mécanique. La Figure 3.11 illustre un exemple du courant enregistré lors d'une mission de distribution du courrier avec une conduite agressive.

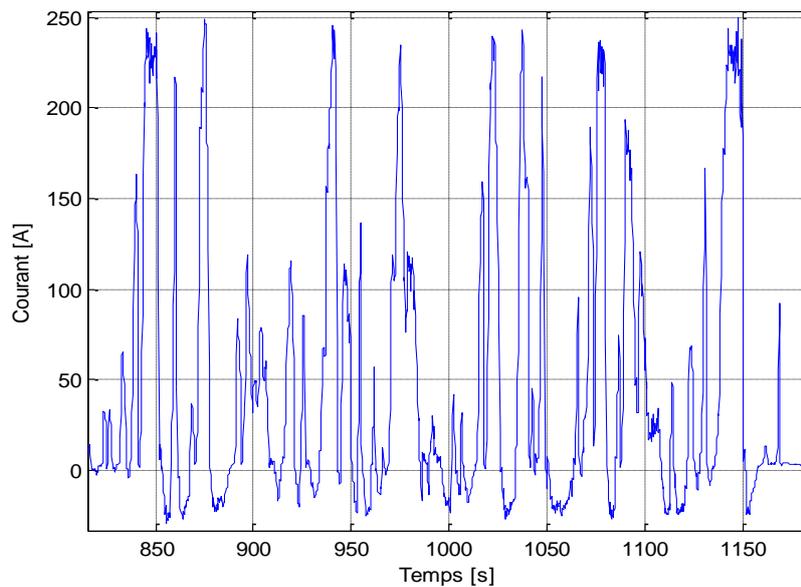


Figure 3.11 : Courant de la batterie enregistré pendant une tournée de distribution de courrier en conduite agressive

On peut voir clairement le faible niveau négatif du courant de recharge par rapport à la décharge. La recharge récupératrice ne peut donc pas être considérée comme une recharge rapide dans notre cas.

4.3 - Conclusion

Pour récapituler, l'étude comparative des différents cycles a montré que l'utilisation du véhicule dans l'application de distribution de courrier est spécifique et ne peut pas être représentée par les profils de missions standards. En effet, la consommation énergétique nécessaire pour le déplacement du véhicule dans l'utilisation postale, ou en appliquant le profil PAP4AK, est supérieure de 40 et 70% (selon le type de conduite) à celle des profils de missions standards et de 20% à l'utilisation urbaine représentée par le cycle Artemis. Hormis le caractère très énergivore de cette application, la façon de conduire est un facteur important qu'il faut également prendre en compte. Une conduite agressive peut mener

à une augmentation de la consommation de l'ordre de 20% par rapport à une conduite normale ou éco-conduite.

Étant l'unique source d'énergie dans un véhicule électrique, le fonctionnement de la batterie est associé par au profil d'utilisation du véhicule. Chaque type d'utilisation se traduit par une sollicitation différente de la batterie. Une utilisation exigeante en termes de consommation et d'accélération se traduit logiquement par un profil de sollicitation ayant une valeur efficace élevée et des créneaux de courant d'amplitude importante. Cela entraîne des conséquences sur les performances de la batterie, notamment l'autonomie et la durée de vie.

Pour ces raisons, il est désormais nécessaire de créer des profils de sollicitation de la batterie, issus des tests sur les véhicules réalisant les missions de distribution de courrier, pour caractériser l'utilisation postale, tout en prenant en compte le type de conduite.

5 - Profils de sollicitation de la batterie en utilisation postale

Pour étudier le comportement de la batterie dans le cadre de l'utilisation postale, il est nécessaire de créer un profil de courant représentatif de cette utilisation et l'appliquer aux batteries via un banc de tests. En disposant d'un modèle parfait de batterie, on pourrait se contenter d'utiliser les données réelles issues des enregistrements lors des essais expérimentaux, pour simuler l'évolution réelle de la batterie au cours de l'usage. Or les modèles sont imparfaits, voir même approximatifs, si bien qu'on compte beaucoup sur la simulation sur banc (Hardware In the Loop) pour avoir une expérimentation à la fois représentative de l'usage et moins contraignante que l'essai réel. Ce type de simulation est plus simple à réaliser que les essais réels et a le mérite d'avoir le même niveau de précision sur la réponse de la batterie. On peut aussi vouloir évaluer les effets d'un vieillissement accéléré sur banc à condition de maîtriser le facteur d'accélération de vieillissement. Pour toutes ces raisons, on a intérêt à proposer un profil de courant à la fois représentatif de l'utilisation postale, répétable et facilement réalisable sur un banc de tests de batteries. Il doit également permettre de déterminer le comportement élémentaire de la batterie en étant constitué de créneaux de courant séparés.

Pour créer ce profil, il faut se baser sur la sollicitation de la batterie lors de l'utilisation réelle des véhicules. Dans le cas où les véhicules électriques n'ont pas encore intégré la flotte ou qu'il n'est pas possible de réaliser des tests sur ces véhicules électriques, la procédure à suivre consiste à étudier le profil d'utilisation en vitesse. L'étude commence par l'enregistrement de la vitesse sur des véhicules thermiques réalisant les mêmes missions que les véhicules électriques sont sensés réaliser une fois déployés. Un ou plusieurs profils de

vitesse type représentatifs de l'usage sont créés à partir de ces enregistrements. Ces profils sont ensuite appliqués à un modèle de véhicule électrique via un logiciel de simulation qui fournit le profil de sollicitation typique de la batterie. La représentativité de ce profil dépend alors de la qualité du modèle du véhicule électrique.

Dans le cas où les véhicules électriques ont déjà intégré la flotte, on peut directement enregistrer la sollicitation de la batterie des véhicules électriques en mission postale. Ces enregistrements seront désignés par la suite par le terme $I_{r\acute{e}el}$ et sont groupés en deux catégories en fonction de la conduite : agressive ou normale. Le profil en courant représentatif est alors créé à partir de ces enregistrements en utilisant les méthodes classiques du génie électrique et de traitement du signal.

Pour choisir la forme du profil du courant, nous nous sommes basés sur la sollicitation de la batterie pendant la réalisation du profil PAP4AK (Figure 3.12). Il s'agit des pics de courant à deux niveaux. Le premier niveau, représentant la phase d'accélération, est élevé, non stable et augmente en fonction du temps. Le deuxième niveau est plus faible et représente la phase de maintien de la vitesse. Tous les pics sont suivis par une recharge issue du freinage récupératif.

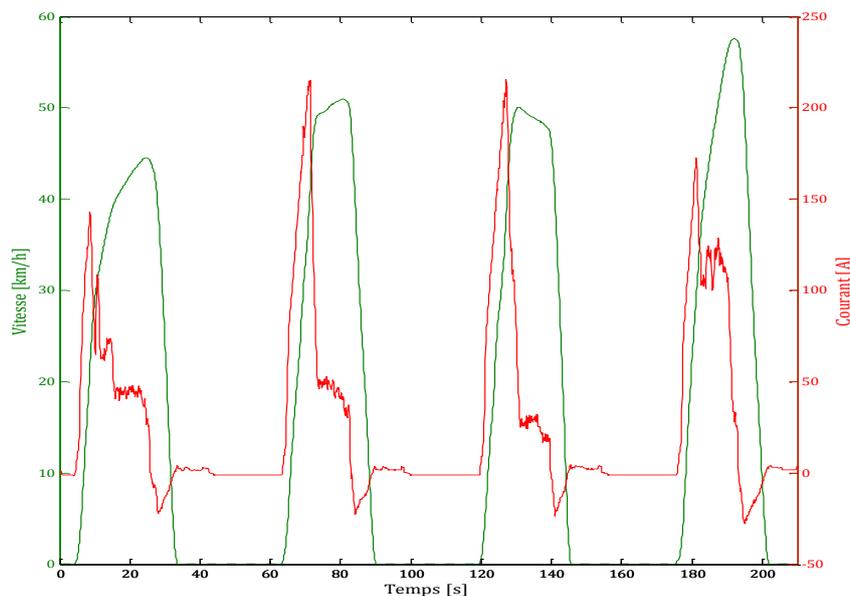


Figure 3.12 : Vitesse du véhicule et courant de la batterie lors de la réalisation du profil PAP4AK

Pour que le profil soit facilement réalisable sur banc de test, il est nécessaire qu'il soit plutôt constitué de pics de courant de forme rectangulaire suffisamment large. Pour simplifier, les pics choisis sont formés d'un seul niveau de courant et le freinage récupératif est représenté par un seul créneau de courant négatif séparé des autres. Finalement, notre profil est constitué de trois créneaux rectangulaires consécutifs de décharge, un créneau de

recharge, suivi d'un quatrième créneau de décharge, comme l'illustre la Figure 3.13. Nous nous sommes limités à trois niveaux de décharge (I1 et I5 sont du même niveau) pour correspondre au cycle PAP4AK. La durée de ce microcycle est fixée à 150 secondes. Il sera désigné par la suite par le terme I_{cycle} .

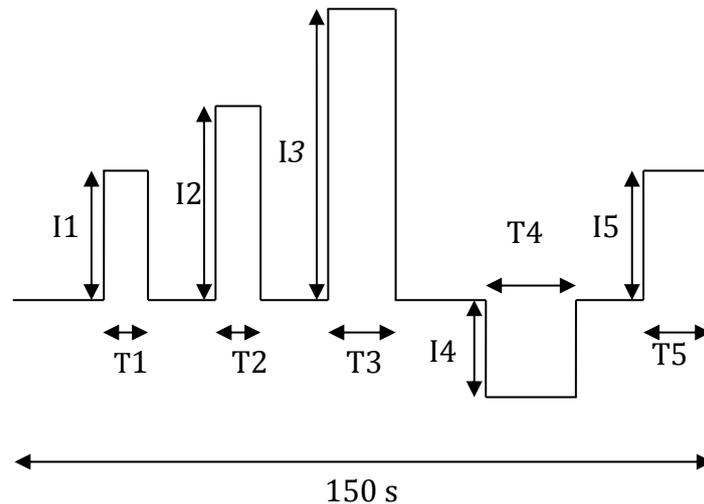


Figure 3.13: Profil théorique de sollicitation de la batterie

Pour que ce profil représente bien l'usage réel, ses caractéristiques doivent correspondre à celles du courant enregistré lors de la réalisation des tournées de distribution de courrier. Selon Morita et al. [98], pour qu'un microcycle ait la même influence sur le vieillissement de la batterie qu'un courant réel qu'il doit représenter, il faut qu'il génère une quantité de chaleur équivalente à la réalité. Cette condition peut être satisfaite en ayant un courant efficace égal à celui du courant. Le pourcentage de temps d'arrêt sera quant à lui un paramètre d'optimisation parmi d'autres.

Pour mieux représenter la sollicitation réelle, trois paramètres supplémentaires sont utilisés. Les critères d'optimisation sont donc les suivants

- la valeur moyenne du courant : désignée par la notation $\langle . \rangle$, elle influence sur la vitesse de décharge de la batterie ; plus la valeur moyenne du courant est élevée, plus rapidement la batterie sera déchargée. Elle est calculée par les Équation 3.6 et Équation 3.7:

Équation 3.6 :

$$\langle I_{cycle} \rangle = \frac{1}{150} \int_0^{150} I_{cycle}(t) \cdot dt$$

Équation 3.7 :

$$\langle I_{réel} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I_{réel}(t) \cdot dt ; T \text{ est la durée totale du cycle réel ;}$$

- la variance : désignée par $var(.)$, elle sert à mesurer la dispersion du courant autour de sa valeur moyenne. Elle est calculée par l'Équation 3.8 :

Équation 3.8 :

$$var(I) = \frac{1}{T} \int_0^T (I(t) - \langle I \rangle)^2 \cdot dt$$

- le taux de recharge : désigné par $\tau_{rech}(.)$, c'est le rapport des ampères-heures chargés totaux sur les ampères-heures déchargés totaux de la batterie. Elle est calculée par l'Équation 3.9 :

Équation 3.9 :

$$\tau_{rech}(I) = \left| \frac{\int_0^T I_{cha}(t) \cdot dt}{\int_0^T I_{dech}(t) \cdot dt} \right|$$

- La valeur efficace : désignée par $(.)_{eff}$, elle est équivalente à la valeur du courant continu qui dissipera la même quantité de chaleur que $I(T)$ à travers une résistance sur une durée T. Elle est calculée par :

Équation 3.10

$$(I)_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I(t))^2 dt}$$

On se trouve donc face à un problème d'optimisation multi-objectifs avec 10 paramètres à optimiser: I1, I2, I3, I4, I5, T1, T2, T3, T4 et T5 de façon à minimiser les quatre fonction objectives suivantes, qui ne sont autre que les erreurs absolues sur les quatre critères d'optimisations choisis :

Équation 3.11 :

$$f_{obj_1} = |\langle I_{cycle} \rangle - \langle I_{réel} \rangle|$$

Équation 3.12 :

$$f_{obj_2} = |var(I_{cycle}) - var(I_{réel})|$$

Équation 3.13 :

$$f_{obj_3} = |\tau_{rech}(I_{cycle}) - \tau_{rech}(I_{réel})|$$

Équation 3.14 :

$$f_{obj_4} = |(I_{cycle})_{eff} - (I_{réel})_{eff}|$$

La résolution classique des problèmes d'optimisations multi-objectifs passe par la transformation du problème, quand cela est possible, en cas mono-objectif dont la résolution est plus aisée. En d'autres termes, il faut remplacer les quatre fonctions à minimiser par une seule appelée la fonction « coût » d'optimisation. Dans notre cas, il s'agit de transformer les Équation 3.11 à Équation 3.14 en expressions d'erreurs relatives au lieu d'erreurs absolues pour pouvoir les additionner entre elles. La fonction coût à minimiser est donc la somme des erreurs relatives des quatre critères d'optimisation. Elle s'écrit sous la forme suivante :

Équation 3.15 :

$$f_{coût} = \left| \frac{I_{cycle} - I_{réel}}{I_{réel}} \right| + \left| \frac{var(I_{cycle}) - var(I_{réel})}{var(I_{réel})} \right| + \left| \frac{\tau_{rech}(I_{cycle}) - \tau_{rech}(I_{réel})}{\tau_{rech}(I_{réel})} \right| + \left| \frac{(I_{cycle})_{eff} - (I_{réel})_{eff}}{(I_{réel})_{eff}} \right|$$

Pour récapituler, le problème se résume donc à trouver la meilleure combinaison de paramètres du cycle (I1, I2, I3, I4, I5, T1, T2, T3, T4 et T5) de façon à minimiser l'Équation 3.15.

Rappelons que cette méthode sert à trouver deux microcycles optimaux, un représentatif de la sollicitation de la batterie lors des missions de distribution de courrier avec une conduite normale et l'autre avec une conduite agressive. Le Tableau 3.3 suivant affiche les quatre paramètres d'optimisation relatifs à chaque type de conduite et issus des données collectées sur les véhicules électriques instrumentés.

	$\langle I_{réel} \rangle$	$var(I_{réel})$	$\tau_{rech}(I_{réel})$	$(I_{réel})_{eff}$
Conduite normale	26.31 A	3256.7	6.36 %	51.71 A
Conduite agressive	35.94 A	4649.8	6.38 %	77.07 A

Tableau 3.3 : Comparaison des paramètres de la conduite normale et agressive

Finalement, le problème est résolu à l'aide de l'outil d'optimisation 'Global Optimization' du logiciel Matlab en utilisant deux techniques consécutivement : les algorithmes génétiques [128], [129] puis la méthode du gradient descendant [130]. La valeur de la fonction coût dans les deux cas est inférieure à 0,001, ce qui valide la correspondance entre ces microcycles optimisés et l'utilisation réelle de la batterie, selon les critères

d'optimisation cités ci-dessus. La Figure 3.14 illustre le microcycle résultant de l'optimisation et représentatif de la conduite agressive lors des missions de distribution de courrier. Il sera appliqué aux éléments lithium-ions pour réaliser des tests de cyclage représentatifs de l'utilisation réel.

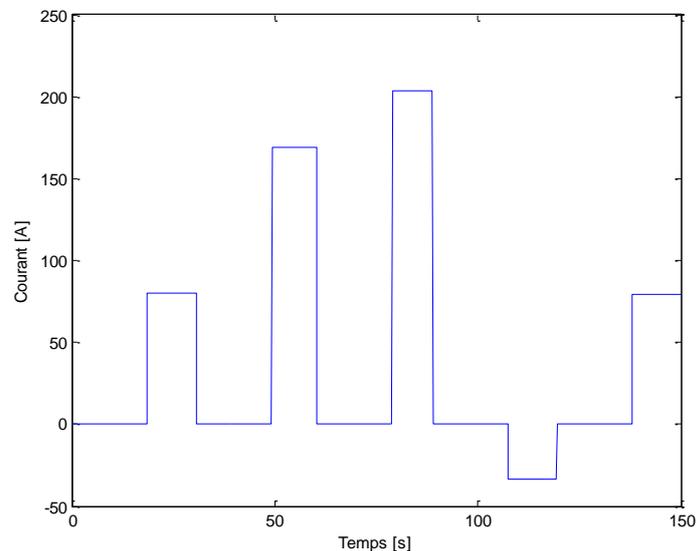


Figure 3.14: Profil de cyclage de la batterie déterminé en fonction de la sollicitation réelle de la batterie lors de la réalisation des missions postales en conduite agressive.

6 - Conclusion

Pour quantifier correctement l'évolution de comportement et des performances de la batterie d'un véhicule électrique, la simulation logicielle est souvent abandonnée au profit d'expérimentations sur banc à la fois représentatives de l'usage et moins contraignantes que l'essai réel. Pour cela, on a besoin des profils de sollicitation de la batterie typiques de l'usage postal, répétables et facilement réalisables sur un banc de tests de batteries. Cet usage ne peut pas être représenté par les profils de missions standards ni par ceux qui représentent l'usage réel du véhicule en milieu urbain. Il est donc nécessaire de développer des profils représentatifs de cette application particulière.

Pour arriver à créer ce profil en partant de la réalité, nous nous sommes basés sur la sollicitation de la batterie lors de l'utilisation des véhicules en missions de distributions de courrier. Les profils résultant sont sous forme de pics de courant, s'inspirant du profile PAP4AK, et ayant les propriétés statistiques et électriques similaires à celle de l'usage réel. Il s'est avéré aussi que le type de conduite a une influence sur la consommation de la batterie. Pour cela, deux types de profils de sollicitation ont été développés, chacun caractérisant un type de conduite éco-conduite ou conduite agressive.

Ces profils seront appliqués à la batterie sur un banc de test pour étudier son comportement lors de cette utilisation. Plusieurs variantes seront créées, permettant d'étudier l'influence de la recharge rapide sur le rendement de la batterie. Les procédures et les résultats seront présentés dans le prochain chapitre.

Chapitre 4 - Identification et validation du modèle de la batterie

1 - Introduction

Les tests expérimentaux menés sur les véhicules électriques ont permis de modéliser l'utilisation de la batterie dans les missions de distribution de courrier. Des microcycles représentatifs de cet usage ont été élaborés pour être appliqués sur des éléments de batterie.

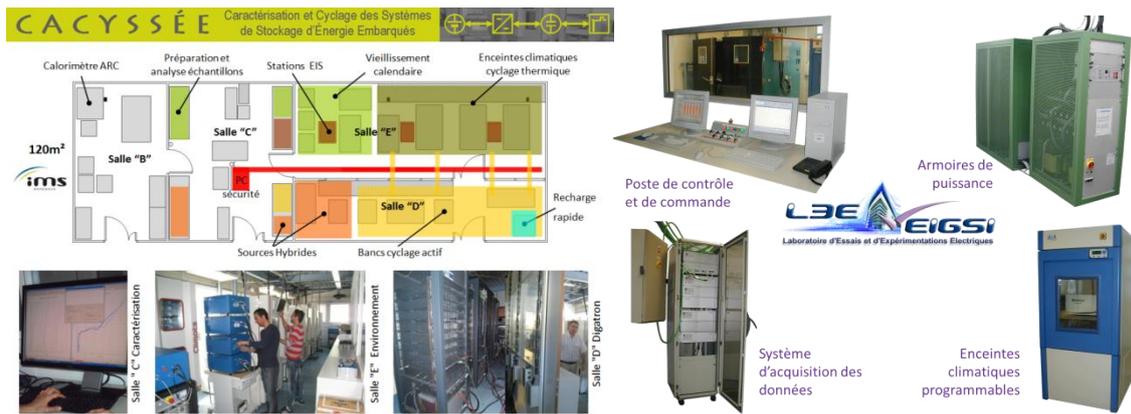
Pour identifier et valider le modèle de la batterie, il est nécessaire de réaliser des tests expérimentaux sur des éléments de batterie, du type lithium-ion polymère, utilisés dans les véhicules électriques en question. Des procédures d'identification sont appliquées aux éléments testés sous différentes conditions couvrant le domaine d'utilisation, pour permettre de modéliser la batterie sur la totalité de la plage d'usage.

2 - Plateformes expérimentales

Pour la réalisation des essais expérimentaux, nous avons eu recours aux deux plateformes suivantes :

1. Laboratoire d'Essais et d'Expérimentations Electriques (L3E) de l'école d'ingénieur EIGSI de La Rochelle ;
2. la plateforme CACYSSÉE, pour CARactérisation et CYclage des Systèmes de Stockage d'Énergie Embarqués, au sein du Laboratoire IMS à Talence.

Toutes les deux rassemblent un ensemble d'équipements lourds permettant la conduite de campagnes d'essais de vieillissement accélérés en cyclage actif et en calendrier destinés aux éléments du type batteries et supercondensateurs. La Figure 4.1 en donne un petit aperçu. La description des principaux constituants est donnée dans ce qui suit.



- **Bancs de charge-décharge à forts niveaux de courant**

Ces bancs sont des sources de courant programmables dont les performances atteignent ± 400 A permanent, ± 1000 A crête pour des tensions allant jusqu'à 70 V. Les possibilités offertes par le logiciel de contrôle-acquisition autorisent des essais très complets de longue durée suivant des profils en courant, tension ou puissance. Pour autant, les performances en temps de montée du courant (1.5ms de 0 à 400 A), en vitesse de commutation charge-décharge et en précision de mesure sont remarquables. Un nombre important de voies de mesures en tension et en température pouvant être associées à chaque élément individuellement complètent le dispositif.

- **Stations électrochimiques**

Ces stations de travail dédiées aux cellules électrochimiques sont centrées autour d'analyseurs d'impédance spécialisés associés à des potentiostats-galvanostats, voire à des amplificateurs (de $\pm 3V$ à $\pm 20V$, de $\pm 10A$ à $\pm 100A$) pour mesurer avec précision les très faibles impédances jusqu'à $10\mu\Omega$ dans la gamme $10\mu Hz$ - $100kHz$. En complément de la caractérisation dans le domaine fréquentiel, ces appareils permettent la réalisation de tests spécifiques à l'électrochimie, comme la voltammétrie cyclique. En plus du logiciel de contrôle-acquisition, un utilitaire propose la détermination de schémas équivalents.

- **Environnement sécurité (enceintes climatiques, étuves, centrale d'alarme)**

Les éléments de stockages peuvent être cantonnés dans un environnement contrôlé grâce à des enceintes climatiques (-60 + $180^{\circ}C$) et des étuves ($+35$, $+200^{\circ}C$). L'ensemble des installations est surveillé en permanence par une centrale d'alarme incendie et gaz qui complète un dispositif redondé de monitoring des grandeurs électriques et thermiques au plus près des éléments ou modules sous test.

3 - Objectifs

Les tests expérimentaux menés sur les éléments de batterie dans le cadre de ce projet ont plusieurs objectifs. Tout d'abord, des tests de caractérisation ont pour vocation d'identifier le modèle de la batterie décrit dans le premier chapitre. L'élément est sollicité par une succession de créneaux de courant en charge et en décharge sous différentes températures et différents niveaux d'état de charge.

Ensuite, des tests de cyclage ont été réalisés sur les éléments de batterie. Ces tests sont composés d'alternances des phases de décharge et de charge. Les phases de décharge sont constituées des microcycles représentatifs de l'usage réel, présentés dans le chapitre 3. Tandis que les phases de charge sont réalisées par l'application d'un courant constant, plusieurs niveaux de charge ont été appliqués. Ces tests de cyclage sont réalisés pour étudier l'influence de la recharge sur le rendement énergétique de la batterie et pour valider thermiquement le modèle électrique établi dans le domaine de l'utilisation.

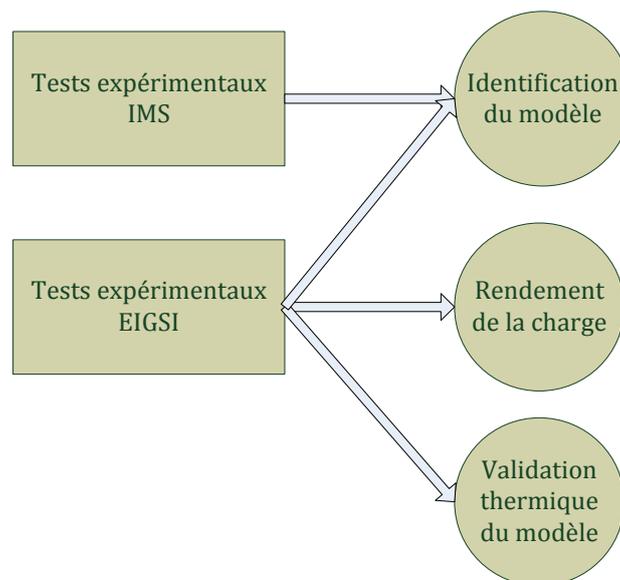


Figure 4.2 : Objectifs des tests expérimentaux en fonctions des plateformes d'essais

Comme le montre la Figure 4.2, les tests réalisés à l'IMS servent à identifier le modèle de la batterie et les essais conduits à l'EIGSI visent à quantifier le rendement de la charge et à valider le modèle thermique.

4 - Éléments testés

Les tests sont réalisés sur des éléments lithium-ion polymère dite « haute-énergie » ayant une capacité de 100 Ah. Il s'agit des mêmes éléments que ceux constituant la batterie du véhicule électrique fiat-Doblo, qui est la cible de notre étude. Dans tous les essais, le courant, la

tension et la température de l'élément qui sont mesurés (Figure 4.3). La fréquence d'acquisition varie en fonction des tests.

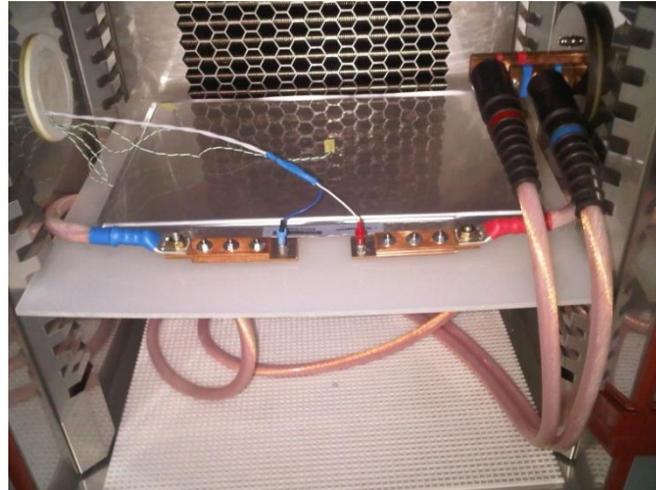


Figure 4.3 : Element 100 Ah sous test dans son enceinte climatique

Ces éléments peuvent supporter un courant de décharge allant jusqu'à 300 A en continu (3 C) et de charge allant jusqu'à 200 A en continu (2 C). Le Tableau 4.1 résume les caractéristiques physiques et les conditions de fonctionnement de cet élément. À noter que les valeurs sont mesurées à $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ et à une humidité de $60\% \pm 25\%$.

Épaisseur	7 mm
Longueur	450 mm
Largeur	325 mm
Masse	2,25 kg
Tension OCV	3,7 V (mesurée après 6h de repos après une charge à 0.2C jusqu'à un SOC de 40%)
Capacité	110 Ah (décharge CC à 0.5C)
Tensions limites	2,7 V – 4,2 V
Courant maximal en décharge	300 A continu – 500 A crête (<10 s)
Courant maximal en charge	200 A
Plage de températures de fonctionnement en charge	0°C -> 45°C
Plage de températures de fonctionnement en décharge	-20°C -> 60°C

Tableau 4.1 : Caractéristiques des éléments testés

5 - Plan d'expériences

Avant de commencer les tests expérimentaux, il est nécessaire de réaliser un « rodage » des éléments neufs. Il s'agit d'une répétition de plusieurs cycles de

décharge/charge de l'élément jusqu'à la stabilisation de sa capacité. La décharge est réalisée en appliquant un courant constant de $C/2$ jusqu'à 2,9V, pendant que la charge se fait en deux phases : courant constant à $C/3$ jusqu'à la tension limite supérieure (4,2 V), puis la tension est maintenue constante et le courant diminue jusqu'à un seuil, ici $C/20$, qui quand il est atteint, désigne la fin de la recharge totale de la batterie. Pour tous les éléments, on remarque que la capacité se stabilise au bout du huitième cycle de décharge/charge à une valeur comprise entre 113 et 114 Ah.

Comme cela a été évoqué précédemment, les essais expérimentaux comprennent des tests de caractérisation temporelle et des tests de cyclage. Le plan d'expériences et les conditions de tests de chacun des deux essais seront expliqués ci-dessous.

5.1 - Conditions des tests de caractérisation

Les tests de caractérisation servent à identifier le modèle de la batterie. Il est donc nécessaire que les conditions de ces tests couvrent le domaine de l'utilisation de la batterie lors de son fonctionnement dans les véhicules électriques. Les facteurs choisis pour déterminer les conditions d'utilisation sont : la température, le courant et l'état de charge. Dans le cadre de l'utilisation postale, la batterie est sensée fonctionner dans une plage de température allant de 0°C à 35°C. Les températures négatives ne sont pas prises en compte car selon les préconisations du constructeur, il faut éviter de charger la batterie à moins de 0°C. En conséquence, l'utilisation des véhicules électriques dotés de ces batteries est déconseillée aux températures négatives, sauf s'ils sont équipés d'un système de climatisation de batterie. Les valeurs extrêmes de la gamme de température choisie (0°C et 35°C) sont logiquement retenues comme températures de tests. Une troisième valeur intermédiaire de 20°, correspondant au fonctionnement courant de la batterie, est également sélectionnée.

Dans un véhicule électrique, toute la plage de l'état de charge de la batterie est exploitée pour assurer un maximum d'autonomie. Le niveau maximal peut atteindre le 100%, cas d'une recharge complète de la batterie. Pour le niveau minimal, il s'agit souvent d'un seuil fixé entre 10% et 20% de SOC. En effet, pour éviter les décharges profondes, connues pour leur effet nuisible sur la durée de vie et la sécurité de la batterie, lorsque le niveau minimal de SOC est atteint, le véhicule se met en arrêt pour interdire toute décharge supplémentaire. La valeur de 10% est donc retenue comme valeur minimale de SOC pour les tests d'identification. Enfin, pour bien décrire le comportement de l'élément sur toute la plage d'état de charge, les mesures sont réalisées sur des niveaux de SOC régulièrement espacés de 15% entre 100% et 10%.

Concernant les valeurs du courant utilisées dans les tests de caractérisation temporelle, elles sont aussi choisies de façon à prendre en compte toute la plage de la sollicitation de la batterie. En effet, les tests réalisés sur les véhicules électriques, présentés

dans le chapitre précédent, montrent que les valeurs maximales du courant sollicitant la batterie pendant les phases de décharge atteignent 250 A. Tandis que le courant ne dépasse pas le seuil de 50 A pendant les phases de charge que ce soit par le freinage récupératif ou bien par la recharge normale. Néanmoins, pour prévoir les recharges rapides, durant lesquelles le courant peut dépasser 150 A, on choisit de caractériser l'élément sur toute la plage de fonctionnement en mode charge, limitée à 200 A. Pour résumer, l'élément sera identifié avec des valeurs de courant allant de 0 jusqu'à 250 A en décharge et jusqu'à 200 A en charge. Cela permet d'étudier le comportement du modèle en fonction du courant de la batterie.

5.2 - Conditions de tests de cyclage

Les tests de cyclage sont réalisés pour valider le modèle de la batterie et pour étudier l'influence de la recharge rapide sur le rendement énergétique de la batterie. Le seul paramètre qui varie dans ces tests est donc le niveau de courant de recharge. La température est fixée à 35°, pendant que toute la plage de SOC sera balayée.

Le profil de cyclage est une succession de phases de décharges avec des phases de charges. Les phases de décharge consistent en une répétition de microcycles représentatifs de l'usage postier, présentés dans le chapitre 3 (Figure 3.14). Un des objectifs du cyclage étant de tester l'efficacité énergétique de la recharge, le pic de recharge récupératif dans le cycle est remplacé par une période de repos. Quant à la phase de recharge, elle consiste en une charge à courant constant de 75 A ou bien de 150 A. Ces valeurs correspondent aux recharges accélérée, rapide respectivement et seront expliquées en détail dans le chapitre suivant.

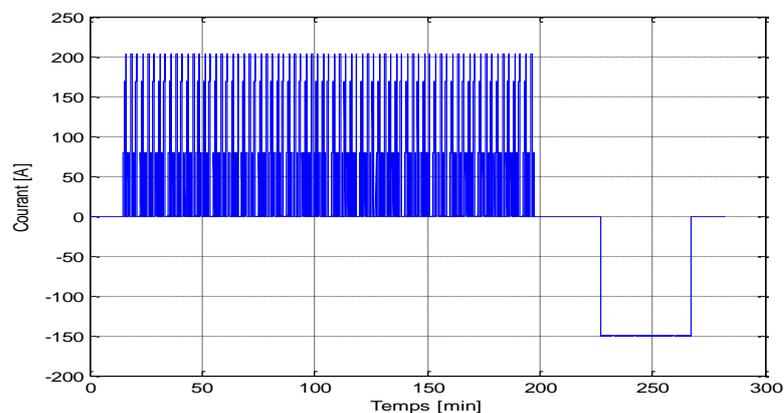


Figure 4.4: Profil de cyclage avec recharge rapide du type CC à 150 A

La Figure 4.4 illustre le profil de cyclage réalisé avec une recharge rapide : CC 150 A. Les phases de recharge et celle de décharge sont séparées par une pause de 30 minutes.

6 - Identification du modèle de la batterie

L'identification des modèles d'accumulateurs électrochimiques est faite à l'aide d'un des tests de caractérisation présentés dans le paragraphe 3.1 du premier chapitre. Il s'agit de choisir une technique qui correspond au mieux à la nature du modèle choisi. Rappelons que le modèle retenu dans le cadre de ce projet est constitué d'une source de tension et de deux résistances variables. L'absence d'éléments ayant une impédance complexe ne lui permet pas de prendre en compte le comportement de l'accumulateur pendant les phases transitoires du fonctionnement. Par conséquent, il est inutile d'utiliser des techniques d'identification qui visent à étudier la dynamique de l'accumulateur dans le domaine fréquentiel. Les tests de caractérisation de type temporelle correspondent bien à la nature du modèle. Il reste à créer un profil de caractérisation bien adapté à l'accumulateur.

6.1 - Profil de caractérisation

Plusieurs procédures de tests standards existent pour réaliser une caractérisation temporelle. Parmi les plus connues, on peut citer :

- le profil de HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization Test), issu du consortium FreedomCar [59], qui adopté dans les programmes sur les batteries aux Etats-Unis,
- les 'check-up tests' du consortium EUCAR [24], utilisés dans les programmes européens dont LIBERAL [60] et HELIOS [61],
- les normes internationales, et notamment IEC 62660 -1 et -2 [26].

Rappelons que le principe de ces procédures est d'appliquer une succession de créneaux de courant de décharge et de charge d'une durée définie (10 secondes en général) à plusieurs niveaux de courant. À la fin de chaque profil de caractérisation, il faut que la quantité d'Ampère heure consommée par les créneaux de décharge soit égale à celle fournie par les créneaux de charge, pour que le niveau de SOC soit le même au début et à la fin du profil. Cela doit se répéter pour les différents niveaux de SOC et de température choisis.

Les créneaux de courant constituant le profil de caractérisation adopté dans ce projet ont des valeurs multiples de 50 A. Pour les créneaux de décharge, les cinq niveaux choisis sont : 50 A, 100 A, 150 A, 200 A et 250 A. Pour les créneaux de charge, il n'y a que 4 niveaux de valeurs : 50 A, 100 A, 150 A et 200 A. Le profil est constitué de 10 créneaux de courant au total : cinq de décharge et cinq de charge (dont 2 créneaux de 200 A). Trois minutes de repos les séparent les uns des autres. Les phases de décharge et de charge sont alternées. Tous les créneaux ont une durée de 10 secondes, sauf le dernier créneau de charge de 200 A qui dure 12,5 secondes et ne sert qu'à équilibrer les Ampère.heure déchargés et

chargés. Aucune mesure n'est réalisée pendant ce créneau. Le Tableau 4.2 montre la succession des créneaux dans le profil d'identification adopté.

N° créneau	Durée (s)	Niveau de courant (A)	Charge cumulée (A.s)
1	10	50	500
	180	0	500
2	10	-50	0
	180	0	0
3	10	100	1000
	180	0	1000
4	10	-100	0
	180	0	0
5	10	150	1500
	180	0	1500
6	10	-150	0
	180	0	0
7	10	200	2000
	180	0	2000
8	10	-200	0
	180	0	0
9	10	250	2500
	180	0	2500
10	12.5	-200	0

Tableau 4.2 : Succession des créneaux du profil d'identification

La valeur positive du courant représente une décharge et la négative une charge. La dernière colonne du Tableau 4.2 représente le cumul de charge déchargée ou chargée lors du profil, exprimé en Ampère.seconde. La Figure 4.5 illustre le profil de caractérisation décrit et utilisé pour identifier le modèle de la batterie.

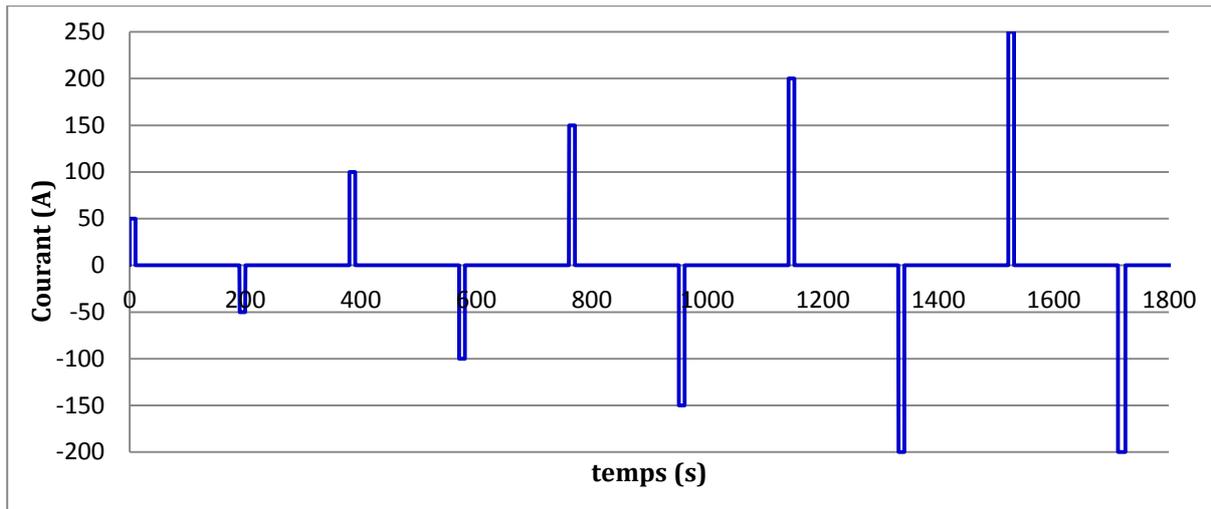


Figure 4.5 : Profil de caractérisation temporelle

Les valeurs de résistance interne du modèle sont calculées à l'aide des créneaux de courant. Pour une température T_x , un état de charge SOC_x , et un courant I_x , la résistance est égale au rapport entre la chute de tension résultante du créneau de 10 secondes et la valeur du courant. La Figure 4.6 illustre la variation de la tension de l'élément pendant l'application d'un créneau de courant de décharge. Les instants utilisés pour mesurer la chute de tension sont celui juste avant (U_{Ini}) et à la fin (U_{Fin}) du créneau. L'équation permet de calculer la résistance.

Équation 4.1 :

$$R_{T_x, SOC_x, I_x} = \left| \frac{U_{Fin} - U_{Ini}}{I_x} \right|$$

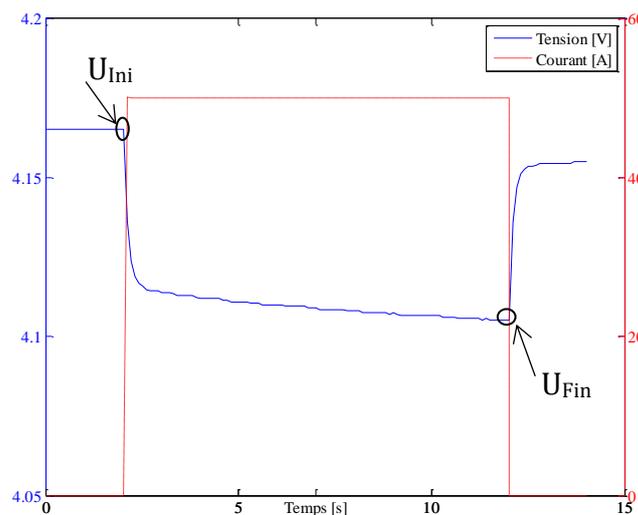


Figure 4.6 : Tension de l'élément pendant un créneau de décharge de 50 A à $T=20^{\circ}\text{C}$ et $SOC=100\%$.

Une période de repos de 30 minutes précède le profil pour mesurer la tension OCV. Cette période permet à l'élément d'atteindre un équilibre électrochimique. La différence de potentiel mesurée à ses bornes est égale dans ce cas à la tension OCV. Puis, le profil est appliqué à l'élément qui est déchargé par un courant constant ($C/2$) jusqu'à un nouvel état de charge inférieur de 15% au précédent. Cela est répété aux différents niveaux d'état de charge définis dans le plan d'expérience. La température est maintenue constante ($\pm 3^\circ\text{C}$) lors d'une caractérisation à l'aide d'une enceinte thermique. La Figure 4.7 illustre le profil d'identification complet allant de 100% jusqu'à 10% de SOC et la tension correspondante de l'élément à une température constante.

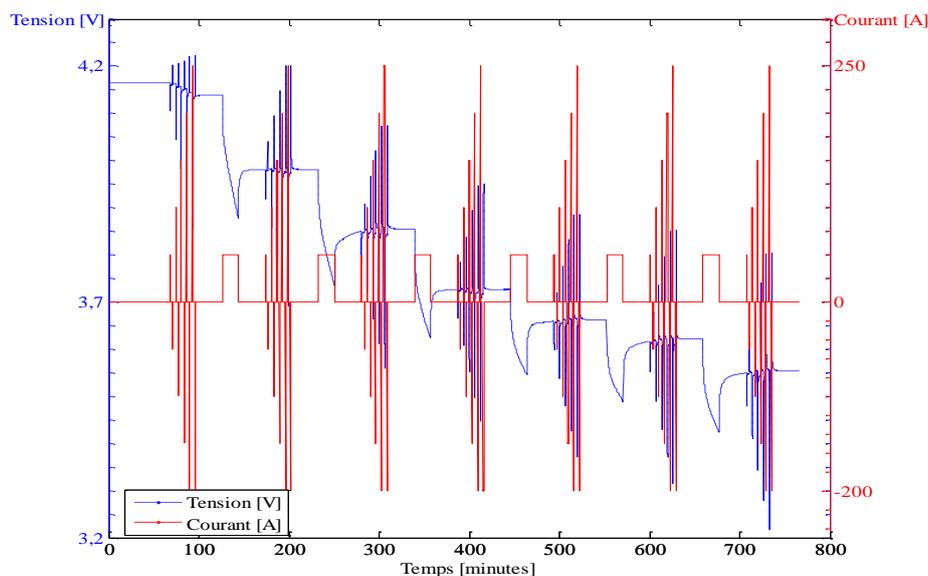


Figure 4.7: Profil du courant et variation de la tension d'un élément lors de son identification à température constante

6.2 - Validation du modèle électrique

Ces tests de caractérisation permettent de déterminer la tension à vide (OCV) en fonction du SOC et de la température ainsi que les résistances de charge et de décharge en fonction du SOC, de la température et du courant. Les résultats regroupés aboutissent finalement à trois tableaux définissant les valeurs des paramètres du modèle en fonction des conditions : un tableau 2-D exprimant la valeur de la tension OCV en fonction de la température et du SOC, et deux tableaux 3-D permettant de déterminer les valeurs des résistances en fonction de la température, le SOC et le courant. Contrairement aux modèles analytiques, les valeurs des paramètres sont calculées par interpolation à partir des tableaux. La variation de la résistance interne et de la tension OCV en fonction du DOD sont présentées par les Figure 4.8 a) et b).

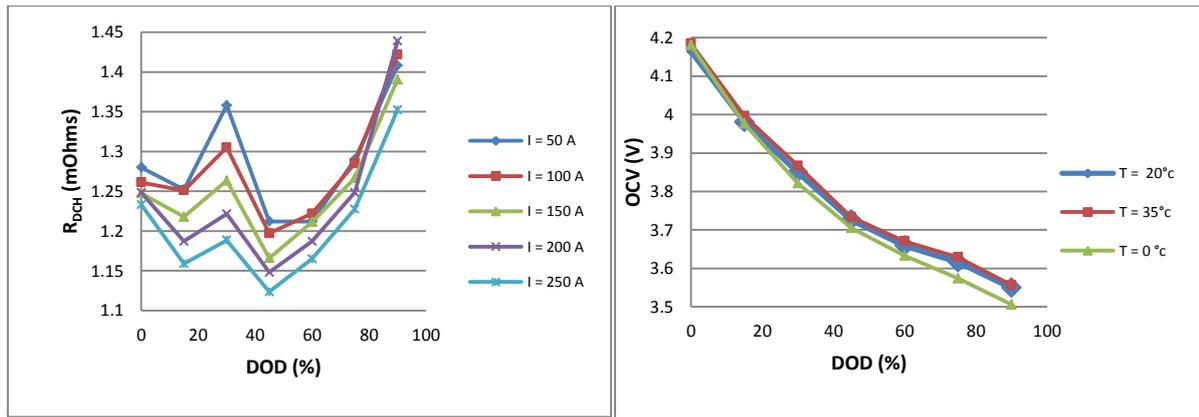


Figure 4.8: a) Résistance de décharge en fonction du DOD à 20°C pour différents niveaux de courant - b) Tension OCV en fonction du DOD pour trois températures

Le modèle retenu a été présenté au chapitre 1 et illustré par la Figure 1.10. Connaissant les conditions initiales de la batterie, la température et le profil du courant, il est possible d'estimer l'évolution de la tension. En effet, le SOC peut être calculé en fonction de sa valeur initiale et du courant. Une fois calculé, ayant la valeur de la température et du courant à un instant donné, les paramètres du modèle peuvent être calculés à partir des cartographies résultant des tests de caractérisations. Ensuite, les lois qui régissent le fonctionnement de la batterie, décrites par les Équation 1.9 à Équation 1.11, sont appliquées ce qui permet de calculer sa tension.

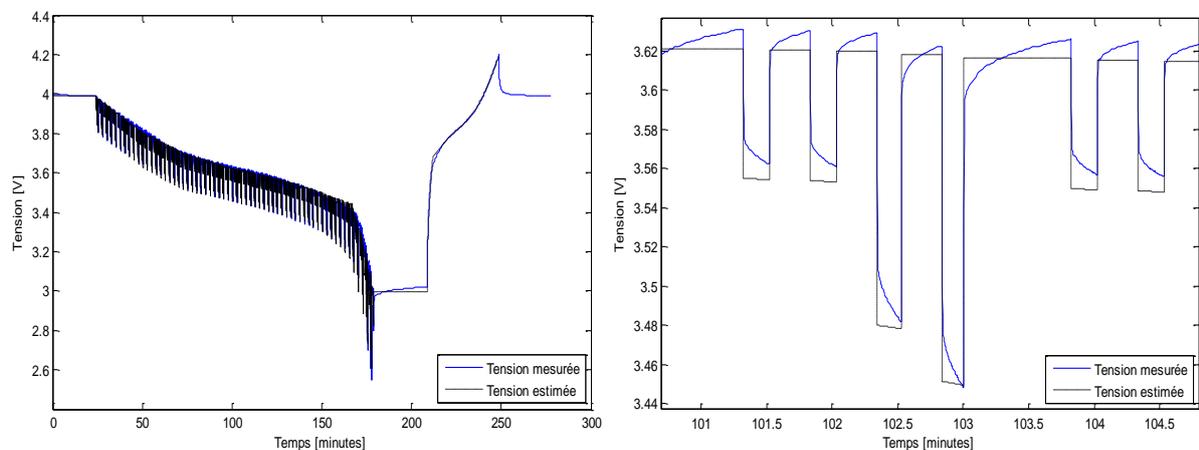


Figure 4.9 : Comparaison entre la tension mesurée et celle estimée : (a) sur toute la plage de SOC (b) zoom sur quelques créneaux de courant

La tension mesurée lors des tests de caractérisation est comparée à celle estimée par le modèle suite à une excitation par un profil de cyclage complet (décharge / charge) illustré par la Figure 4.4. La Figure 4.9 propose une comparaison entre ces deux tensions. A gauche, Figure 4.9 a), la variation des deux tensions est représentée pour toute la durée du profil de cyclage amenant l'élément d'un SOC de 100% jusqu'à 0%. Les allures des deux tensions se suivent et leurs valeurs sont égales lorsque le courant est nul. Cela valide notre

modèle de source de tension basé sur la cartographie de l'OCV en fonction du SOC et de la température. La Figure 4.9 (b), à droite, est un zoom pour trois créneaux successifs du profil. Elle présente une comparaison des deux profils de tension pendant les créneaux de courant. Cela permet de juger la capacité de nos modèles de résistances internes, basés sur des cartographies, à estimer la chute de tension.

6.3 - Validation thermique du modèle

Il est montré dans la littérature que le comportement électrochimique des éléments lithium-ion est influencé par leur température. Il est donc nécessaire de prendre en compte le comportement thermique de la batterie dans la modélisation à travers un couplage thermique-électrochimique [34], [131], [132]. Cela a permis d'identifier les phénomènes physiques et chimiques responsables de la génération de chaleur dans les éléments. Dans la littérature, plusieurs travaux ont traité cette problématique, à commencer par Bernardi *et al.* [133] qui a présenté six phénomènes à l'origine de la chaleur présente dans la batterie et de la variation de sa température : les réactions chimiques, les changements de la capacité calorifique du système, les changements de phase, les phénomènes de relaxation (nommés phénomènes de mixage), le travail électrique et l'échange de chaleur avec l'entourage. Il a ainsi établi une équation d'équilibre de chaleur qui est devenue une référence pour la modélisation thermique des batteries. Ces travaux ont été complétés par Doyle et Newman qui l'ont appliqué au cas d'une batterie Li-ion et qui ont présenté un modèle électrochimique couplé avec un modèle thermique [33], [80] devenu la référence du couplage électrochimique-thermique jusqu'aujourd'hui.

En s'appuyant sur les travaux cités ci-dessus, Gu et al. [134], [135], Srinivasan et al. [136], Sato et al. [137] ainsi que Al Hallaj et al. [138], [139] ont présenté une explication détaillée du comportement thermique des batteries Li-ion, en séparant les flux de chaleur générés comme suit :

- chaleur réversible : effet entropique qui vient principalement des réactions chimiques,
- chaleur irréversible : causée par la déviation du potentiel des électrodes par rapport au point d'équilibre ; elle est aussi appelée chaleur de polarisation dans d'autres références [137],
- chaleur ohmique : générée par la résistivité des matériaux actifs dans les électrodes lorsque le courant n'est pas nul.

Il faut noter que dans ces travaux, les effets des phénomènes de mixages et de changements de phases ne sont pas pris en compte parce qu'ils sont considérés négligeables. Les équations décrivant les relations entre ces flux de chaleurs s'écrivent comme suit :

Équation 4.2 :

$$Q_T = Q_R + Q_P + Q_O$$

Q_T représente la chaleur totale générée par la batterie, Q_R la chaleur réversible qui accompagne les réaction chimique dans la batterie, Q_P est la chaleur de polarisation (irréversible) et Q_O est la chaleur ohmique. Les 2 derniers termes sont irréversibles et exothermiques. La chaleur réversible Q_R peut être exo- ou endothermique et s'écrit comme indiqué par:

Équation 4.3 :

$$Q_R = T\Delta S$$

où T est la température absolue et ΔS est la variation de l'entropie. Selon Sato et al., Q_R est linéaire en fonction du courant, positive (exothermique) en phase de décharge et négative (endothermique) en phase de charge.

Par conséquent, la chaleur totale dégagée par la batterie pendant une phase de décharge est différente de celle pendant la charge. Il ne faut donc pas traiter les deux phases de la même manière pour le calcul des pertes. C'est la raison principale pour laquelle on a choisi de mettre deux résistances internes dans le modèle électrique de la batterie, chacune étant dédiée à une phase. Elles sont censées dissiper les pertes énergétiques dans la batterie équivalentes à Q_T . Pour valider le modèle d'un point de vue énergétique, on compare l'échauffement de la batterie avec les pertes Joule estimées, dissipées dans les résistances (Équation 1.12).

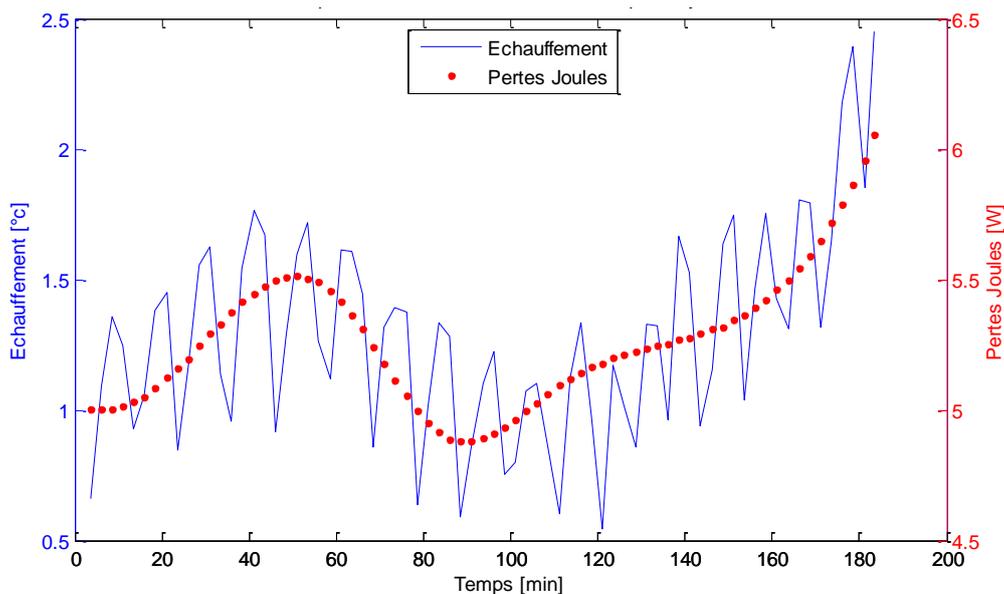


Figure 4.10: Comparaison entre l'échauffement de l'élément et les pertes Joule estimées

Cette comparaison, illustrée par la Figure 4.10, montre que l'estimation de la chaleur simulée par le modèle de fonctionnement est proportionnelle à l'échauffement mesuré de l'élément.. Cela valide le fait que les modèles de résistances internes choisis permettent d'estimer les pertes énergétiques dissipées dans les batteries, dont la connaissance est nécessaire pour l'estimation de la consommation énergétique du véhicule électrique plus tard dans ce document.

6.4 - Impact de la recharge rapide sur le rendement énergétique de la batterie

À partir des tests de cyclage, on peut calculer le rendement énergétique des différents types de recharges appliquées pendant les tests ; rapide (courant de 150 A), accélérée (courant de 75 A) et standard (courant de 30A). Le rendement énergétique de la batterie est le rapport entre l'énergie déchargée de la batterie en l'amenant d'un état de charge initiale (100% dans notre cas) à un état de charge final (0% dans notre cas), et l'énergie fournie à la batterie pour la ramener à son état de charge initial [26]. Il est calculé par la formule suivante :

Équation 4.4

$$\eta_{\text{énerg}} = \frac{\int_{\text{dech}} I.U.dt}{\int_{\text{rech}} I.U.dt}$$

Ces essais ont montré que le type de la recharge influe sur le rendement de la batterie. Il est égal à 90,57% pour une recharge rapide, à 92,81% pour une recharge accélérée, et à 93,66% pour la recharge normale. En augmentant le courant lors de la recharge de la batterie, on contribue à la diminution du rendement énergétique de la recharge de la batterie, et donc à l'augmentation de la consommation.

7 - Conclusions

Dans ce chapitre, les essais expérimentaux menés sur les batteries ont été présentés. Des tests de caractérisation temporelles basés sur un plan d'expérience prenant en compte le domaine d'utilisation réelle du véhicule ont permis d'identifier le modèle électrique de la batterie. Les paramètres de ce modèle sont dépendants de la température, de l'état de charge et du courant. Des tests de cyclage, basés sur un profil de courant représentant l'utilisation postale, ont permis de valider le modèle expérimentalement du point de vue électrique et énergétique.

L'influence de la recharge sur le rendement énergétique de la batterie a également été étudiée dans ce chapitre à l'aide des tests de cyclage, comprenant les mêmes

profils de décharge, mais des profils de charge différents. Les profils de décharge sont constitués d'une succession de microcycles de courant représentant la sollicitation réelle de la batterie lors de missions de distribution de courrier. Quant aux phases de charge, il s'agit soit de charges à courant constant de 150 A ou de 75 A, soit d'une charge standard (CCCV 0.3C-4.2V-C/20).

Pour conclure, ce modèle permet d'estimer précisément le comportement électrique ainsi que les pertes énergétiques des batteries. Les pertes Joule calculées au niveau des résistances du modèle justifient l'échauffement des éléments au cours du cyclage réalisés à l'aide d'un profil représentant l'utilisation réelle de la batterie.

Chapitre 5 - Impact de la recharge sur le vieillissement batterie et les performances du véhicule électrique

1 - Introduction

Dans les précédents chapitres, nous avons présenté et validé un modèle de comportement de batterie ainsi qu'une méthode d'estimation du vieillissement adaptée à ce modèle. Cette dernière est totalement adaptée au modèle présenté puisqu'elle permet d'estimer les paramètres du modèle en fonction du vieillissement. Utilisé dans un modèle plus global de véhicule électrique, cela doit permettre d'étudier l'influence du vieillissement de la batterie sur les performances du véhicule.

Nous allons étudier dans ce chapitre le cas d'un gestionnaire de flotte de véhicules électriques en se focalisant sur la gestion de la recharge de la batterie. Plusieurs scénarios envisageables seront étudiés en montrant l'influence de chacun d'eux sur le vieillissement de la batterie, et donc sur les performances des véhicules. Ces scénarios sont élaborés en fonction des paramètres contrôlables de la recharge. Le but est d'aider à l'optimisation de la recharge des batteries afin de minimiser leur vieillissement en tenant compte de l'utilisation réelle des véhicules.

2 - La recharge

2.1 - Introduction à la recharge

Une batterie peut être rechargée par différentes méthodes, en fonction de sa chimie, de l'application et de la rapidité de recharge désirée [5]. Dans l'application automobile, un chargeur intégré au véhicule assure la recharge des batteries en général. Néanmoins, il est possible de recharger la batterie par des chargeurs extérieurs capables de charger plus rapidement que les chargeurs intégrés limités par leur puissance.

On distingue plusieurs catégories de recharge en fonction de leur rapidité : recharge standard, recharge accélérée (ou semi-rapide) et recharge rapide. Par définition, une recharge rapide est capable de charger une batterie vide à un état plein (SOC=100%) en moins d'une heure [5], [140]. Pour cela, le courant de charge doit être supérieur à 1C. Une recharge standard est censée assurer la recharge complète de la batterie sans accélérer les mécanismes

de dégradation liés à l'échauffement. La procédure peut différer d'une technologie de batterie à l'autre, mais elle est souvent donnée par le constructeur. Il s'agit d'une recharge lente qui dure entre 5 et 8 heures pour recharger totalement une batterie vide. La recharge dite accélérée ou semi-rapide, est une méthode intermédiaire plus rapide que la recharge standard grâce à un régime de charge souvent inférieur à 1C. Les recharges rapides et accélérées ne sont pas conçues pour réaliser des recharges complètes mais servent à prolonger l'autonomie du véhicule [2]. Cela permet d'étendre l'utilisation des véhicules électriques aux domaines extra-urbains et autoroutiers.

Les méthodes de recharge se distinguent par leur profil à tension constante (Acronyme CV pour Constant Voltage en anglais) ou bien à courant constant (Acronyme CC pour Constant Current en Anglais).

La stratégie de recharge standard des accumulateurs la plus répandue, au-delà de la seule technologie lithium-ion, est la charge CCCV (Constant Current – Constant Voltage) [141]. Cette stratégie consiste à appliquer dans un premier temps à l'élément une charge à courant constant ou phase CC. La tension aux bornes de l'accumulateur augmente progressivement jusqu'à atteindre le seuil de tension limite choisi en fonction du type et de la technologie de l'accumulateur (aux alentours de 4,2 V pour les accumulateurs Li-ion et Li-ion Polymère). Ce seuil atteint, la phase CV intervient pour terminer le processus de charge à tension constante, appelé usuellement « floating ». L'arrêt de la charge peut ensuite être déterminé par différents critères comme la durée de la phase CV ou bien, plus classiquement, l'atteinte d'une valeur seuil du courant de charge, par exemple C/20. Dans ce travail, nous retiendrons le critère du seuil de courant pour lequel nous considérons que l'accumulateur est complètement chargé. Un exemple typique est illustré par la figure Figure 5.1.

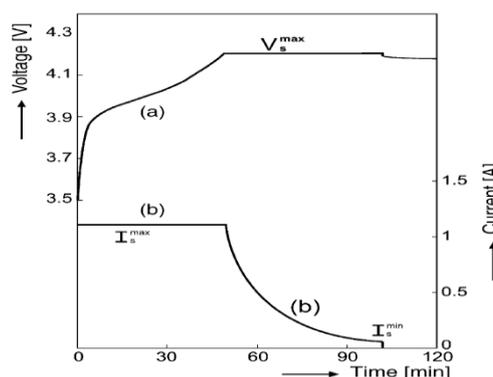


Figure 5.1 : Exemple de profil de charge CCCV (1C – 4,2 V – C/20) [142]

Cette méthode permet d'associer les avantages de la charge CV (rapidité de la recharge, courant final de charge faible) à ceux de la charge CC (bonne utilisation de la puissance de la source de charge), tout en diminuant les inconvénients de chacune : puissance

élevée de la source à tension constante, nécessité d'une régulation de courant (I constant), rythme de charge lent, tension forte en fin de charge [141].

Pour les recharges accélérées et rapides, ce sont plutôt des profils de type CC ou CV qui sont utilisés. Les profils de charge à tension constante sont très simples à appliquer et permettent de transférer une quantité maximale d'Ah à la batterie dans un temps minimal. Cependant, ils peuvent générer des courants très élevés susceptibles d'endommager les accumulateurs, surtout ceux à base de lithium. Il est donc indispensable de limiter le courant pendant la recharge. La recharge par CC réduit les risques de surintensité en maintenant le courant à une valeur acceptable pour la batterie. La charge s'achève quand la tension de la batterie atteint la valeur limite supérieure indiquée par le constructeur (4,2 V pour un élément Li-ion ou Li-ion polymère). Par conséquent elle ne permet pas de recharger complètement la batterie dont l'état de charge à la fin de la procédure est compris entre 80 et 85 % de SOC (selon le courant utilisé).

Différentes méthodes issues de la technique CCCV sont présentées dans la littérature sous la dénomination de recharge rapide ou accélérée. On peut citer la « boost charging » et la CCCV par paliers. La première, présentée par Notten et al [142], consiste à ajouter une phase supplémentaire de CC, voire de CV, de courte durée au début d'une recharge CCCV tout en permettant au courant d'atteindre des valeurs élevées (Figure 5.2, courbes a et b). Selon les auteurs, cette méthode ne contribue pas à l'accélération du vieillissement de la batterie si la tension limite supérieure n'est pas dépassée (Figure 5.2, courbe a). Dans la méthode CCCV par palier, il s'agit de réduire la valeur du courant utilisé dans la phase CC par paliers, en utilisant des courants élevés au début du processus afin d'accélérer le processus de charge [143].

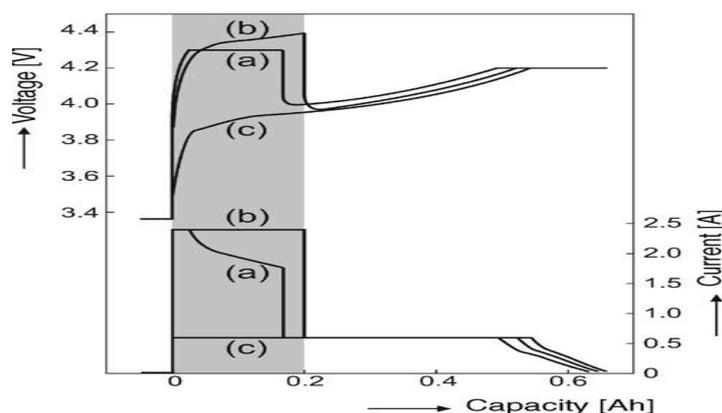


Figure 5.2 : Allure du courant (bas) et de la tension (haut) lors du boostcharging d'un élément Li-ion (courbes a et b) et lors d'une recharge standard CCCV (courbe c) [142]

Ces deux méthodes, ainsi que toute méthode basée sur la CCCV, s'achèvent par une partie CV de floating pour terminer la charge. Cette partie est nécessaire pour permettre à la batterie d'atteindre un niveau de SOC de 100% mais elle dure très longtemps relativement

à une recharge rapide (2 heures environ). Cette méthode fait donc partie des méthodes dites accélérées et non pas rapides selon la classification utilisée dans ce document.

Les stratégies de recharge par impulsions, connues pour leur capacité à améliorer la durée de vie des batteries plomb-acide, se sont montrées inefficaces vis-à-vis des batteries à base de lithium [144], [145]. Il est même déconseillé d'appliquer des créneaux de courant de valeurs élevées successivement pour ne pas accélérer les mécanismes de vieillissement.

2.2 - Paramètres de la gestion de recharge

2.2.1 - Types de recharge en fonction des infrastructures

Pour la recharge standard, la méthode la plus adaptée pour la plupart des technologies et notamment pour le li-ion et li-ion polymère est la CCCV. Elle permet de recharger totalement la batterie en limitant les mécanismes de vieillissement. Elle est réalisée par des chargeurs embarqués dans les véhicules électriques de 3kW, adaptés aux branchements domestiques des réseaux électriques 230V, 16 A.

Concernant les recharges accélérée et rapide, la méthode choisie pour les simulations dans ce document est la CC puisqu'elle répond aux critères de rapidité de charge, de sécurité et de coût de mise en œuvre dans les chargeurs. Ces deux types de recharge sont assurés par des chargeurs non embarqués dans les véhicules électriques. Pour la recharge accélérée ce sont des chargeurs triphasés de 22 kVA (courant de ligne de 32 A maximum). La recharge rapide est assurée par des chargeurs triphasés de 43 kVA (courant de ligne de 64A maximum) [1]–[3].

2.2.2 - Détails des procédures de recharge choisies

On suppose que les recharges accélérée et rapide durent 30 minutes au maximum. La recharge s'arrête au-delà de ce temps même si la batterie n'a pas encore atteint la condition d'arrêt de recharge.

Le système de batterie installé dans les véhicules testés est formé de 60 éléments de lithium-ion polymère de 100 Ah reliés en série. La tension maximale autorisée pour la batterie est égale à 252 V (4,2 x 60). Les profils de recharge sont les suivants :

- recharge standard (Rch_Std): courant constant de 12 A (3kw / 230 V) jusqu'à atteindre 250 V puis maintien de la tension à 250 V jusqu'à atteindre un courant de 5 A (C/20),
- recharge accélérée (Rch_Acc): courant constant de 75 A (22kVA x cos ϕ / 230 V) jusqu'à atteindre 250 V ou jusqu'à 30 minutes maximum,

- recharge rapide (Rch_Rap): Courant constant de 150 A ($43\text{kVA} \times \cos \varphi / 230 \text{ V}$) jusqu'à atteindre 250 V ou jusqu'à 30 minutes maximum.

2.2.3 - Instants de démarrage de la recharge standard

Lors de la restitution après mission d'un véhicule électrique, pour décider le démarrage ou pas de la recharge de sa batterie, deux paramètres interviennent : l'état de charge et l'instant de démarrage de la recharge. Comme présenté au Chapitre 2 - 2.2 - , l'état de charge de la batterie est une donnée influant sur son vieillissement calendaire. Choisir à quel moment il faut recharger la batterie peut donc avoir un impact sur son vieillissement.

En tenant compte de ces paramètres, deux cas se présentent pour le choix du démarrage de la recharge standard :

- Std_1 : commencer la recharge standard dès que le véhicule est restitué. L'état de charge de la batterie au repos sera égal à 100% dans ce cas.
- Std_2 : commencer la recharge la nuit de façon à ce qu'elle soit terminée juste avant la prochaine utilisation du véhicule. Lors du repos du véhicule, l'état de charge de la batterie n'est pas à 100%.

3 - Impact des scénarios de recharge sur le vieillissement de la batterie

3.1 - Définition des scénarios de recharge

3.1.1 - Tournée de distribution

Une tournée de distribution typique se déroule en deux parties pendant la matinée. Le point de départ et d'arrivée est le même : le centre de distribution de courrier. La durée moyenne enregistrée est de 4 heures et 30 minutes pendant lesquelles le véhicule reste 30 minutes en pause dans le centre entre les deux parties de la tournée. C'est la durée moyenne mise à profit pour effectuer le rechargement en colis ou en courriers de la deuxième partie de la tournée. Pendant l'après-midi, le véhicule n'est pas utilisé. La distance totale parcourue moyenne au cours d'une tournée de distribution est de 30 km.

3.1.2 - Semaine type

Pendant une semaine normale, les tournées de distribution sont réalisées six fois par semaine. Néanmoins, pendant une année, le véhicule n'est pas régulièrement utilisé sur cette base-là. Pendant les journées de vacances, de congés et de maintenance, le véhicule est

gardé au repos. La batterie subit dans ce cas un vieillissement du type calendaire au lieu du cyclage.

Il est donc indispensable de bien calculer la proportion d'utilisation du véhicule par rapport au temps du repos sur une base annuelle. En tenant compte de ce qui précède, on suppose que le nombre moyen de journées de fonctionnement d'un véhicule par an est égal à 264 jours/an. Ce nombre est équivalent à 5 journées de distribution hebdomadaire. Enfin, on considère qu'une semaine type de travail est constituée de 5 journées de distribution de courrier et de 2 journées de repos.

3.1.3 - Scénarios de recharge possibles

D'après les paramètres de gestion de la recharge expliqués ci-dessus, cinq scénarios de recharge sont envisageables. Ils seront illustrés sur la base d'une simulation d'une semaine typique de travail.

- Premier scénario (SC1)

Une recharge accélérée est appliquée quotidiennement pendant la pause de 30 minutes. Une recharge normale est nécessaire une fois toutes les semaines. Elle commence directement après la dernière distribution de la semaine (Recharge Std_1). La Figure 5.3 illustre la variation du SOC de la batterie pendant une semaine typique avec le scénario SC1.

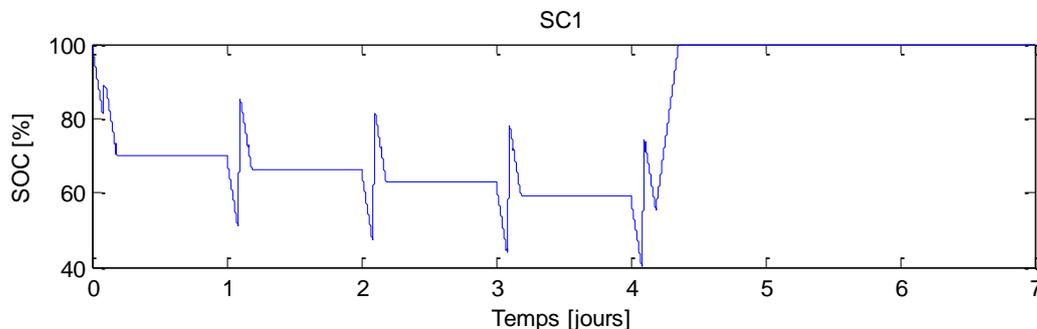


Figure 5.3 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC1

- Second scénario (SC2)

Similaire à SC1, à la seule différence que l'instant démarrage de la recharge standard est repoussé à la fin de la semaine (Figure 5.4). Il est programmé dans la dernière nuit de la semaine de façon à ce que la recharge se termine juste avant le début de la première tournée de la semaine suivante (Recharge Std_2).

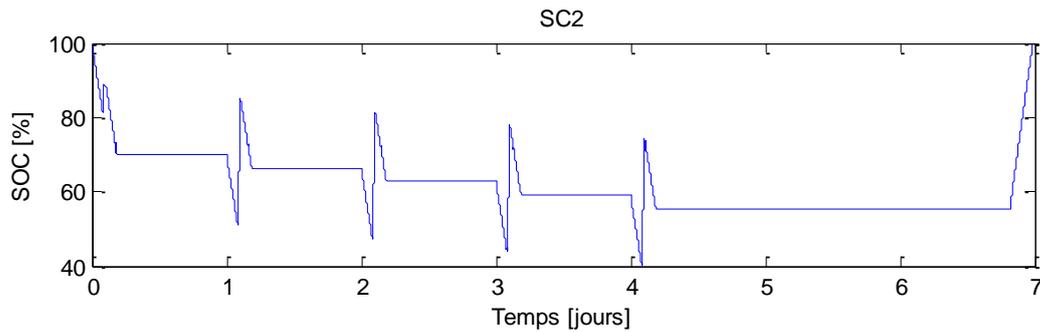


Figure 5.4 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC2

- Troisième scénario (SC3)

Une recharge rapide est appliquée quotidiennement pendant la pause de 30 minutes de la matinée. Cette recharge est suffisante pour restituer à la batterie toute l'énergie nécessaire pour une journée. Comme le montre la Figure 5.5 , il n'est pas nécessaire de réaliser une recharge normale avec ce scénario.

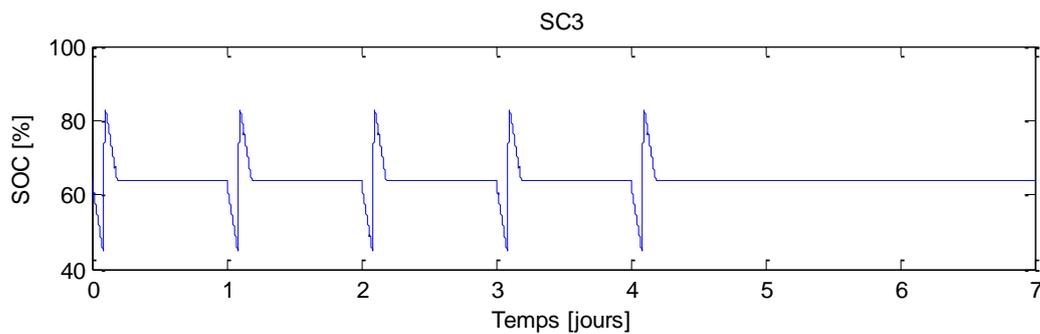


Figure 5.5 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC3

- Quatrième scénario (SC4)

Aucune recharge n'est réalisée pendant la pause de la matinée. Le véhicule est chargé quotidiennement par une recharge standard selon la procédure Std_1 (Figure 5.6).

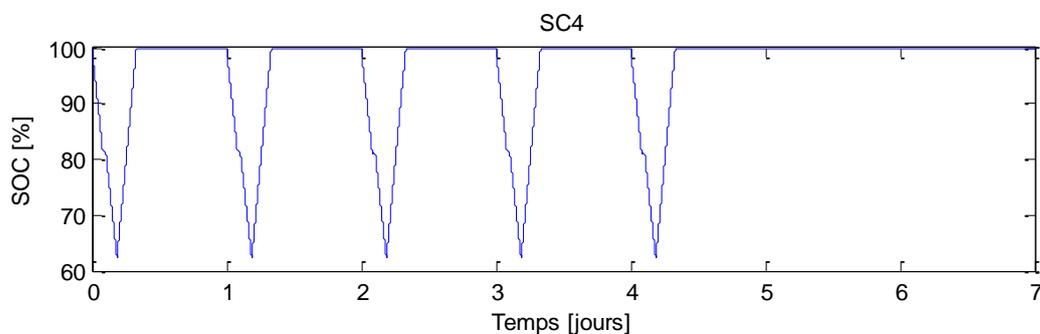


Figure 5.6 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC4

- Cinquième scénario (SC5)

Comme l'indique la Figure 5.7, il est similaire au SC4 avec une seule différence résidant dans l'instant de démarrage de la recharge normale pour laquelle c'est la procédure Std_2 qui est utilisée.

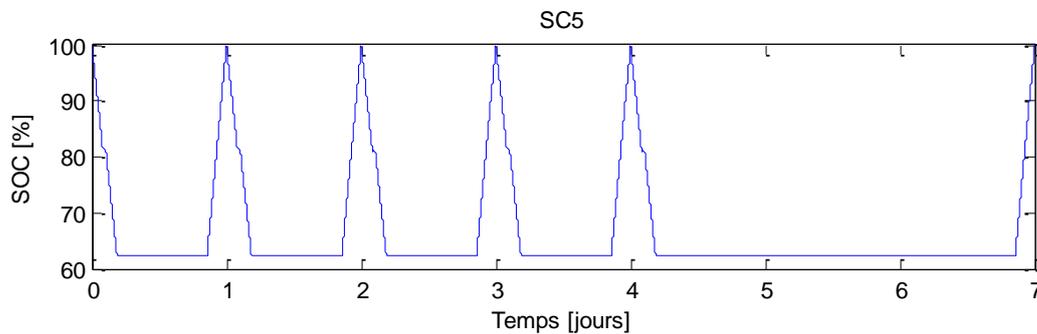


Figure 5.7 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC5

Les deux derniers scénarios SC4 et SC5 sont les seuls qui ne nécessitent pas d'action sur les infrastructures de recharge. La recharge est normalement assurée par le biais d'un chargeur intégré au véhicule, donc par l'intermédiaire d'une prise de courant 230V / 16A classique. Cela est considéré comme un grand avantage de point de vue financier par rapport aux trois autres scénarios qui nécessitent un surdimensionnement du raccordement électrique lié à la recharge rapide ou accélérée. Cela engendre des coûts supplémentaires pour le gérant d'une flotte de véhicule électrique.

3.2 - Facteurs de vieillissement spécifiques aux scénarios

Les conditions d'utilisation de la batterie sont différentes d'un scénario à l'autre. Afin d'estimer le vieillissement de la batterie en fonction de chaque cas d'utilisation, il est indispensable de connaître les facteurs de vieillissement (voir Figure 2.11) spécifiques à chaque scénario. Les facteurs sont représentés par leur valeur moyenne estimée pour une utilisation sur un mois. Ils sont calculés de la manière suivante :

- Nombre de cycles par mois : un cycle est équivalent à la quantité d'Ah nécessaire pour décharger la batterie de 80% de SOC[60], soit donc 88 Ah dans notre cas. Le nombre de cycles par mois est donc la quantité d'Ah déchargé de la batterie dans un mois divisée par 88 Ah. C'est un facteur de vieillissement spécifique au modèle de vieillissement en cyclage.
- Courant efficace : calculé suivant l'Équation 3.10 sur la période d'une semaine. C'est un facteur de vieillissement spécifique au modèle de vieillissement en cyclage.
- Delta SOC : c'est la différence entre les niveaux le plus haut et le plus bas du SOC pour chaque scénario. C'est un facteur de vieillissement spécifique au modèle de vieillissement en cyclage.

- SOC stockage : c'est la moyenne du SOC lorsque la batterie est au repos calculée sur une semaine. C'est un facteur de vieillissement spécifique au modèle de vieillissement calendaire.
- Nombre de jours de stockage par mois : c'est la durée totale pendant laquelle la batterie est au repos durant un mois, exprimée en jours. C'est un facteur de vieillissement spécifique au modèle de vieillissement calendaire.

Ils sont considérés invariants d'un mois à un autre pour chaque scénario. Le Tableau 5.1 résume les facteurs de vieillissement résultant des cinq scénarios :

	Nb Cycles / mois	Courant efficace	Delta SOC	SOC stockage	Nb jours stockage / mois
SC1	8,65	40,55 A	59,67 %	80,39 %	25,67
SC2	8,65	40,55 A	59,67 %	60,5 %	25,67
SC3	8,65	52,67 A	37,6 %	63,85 %	26,36
SC4	8,65	29,12 A	37,6 %	100 %	11,6
SC5	8,65	29,12 A	37,6 %	62,34 %	11,6

Tableau 5.1 : Facteurs de vieillissement en fonction des scénarios

Le facteur température pris en compte est différent chaque mois, suivant la Figure 5.8 qui représente la température moyenne des quatre dernières années de la ville de Nantes [146]. Ce facteur est utilisé dans les deux modèles de vieillissement (cyclage et calendaire).

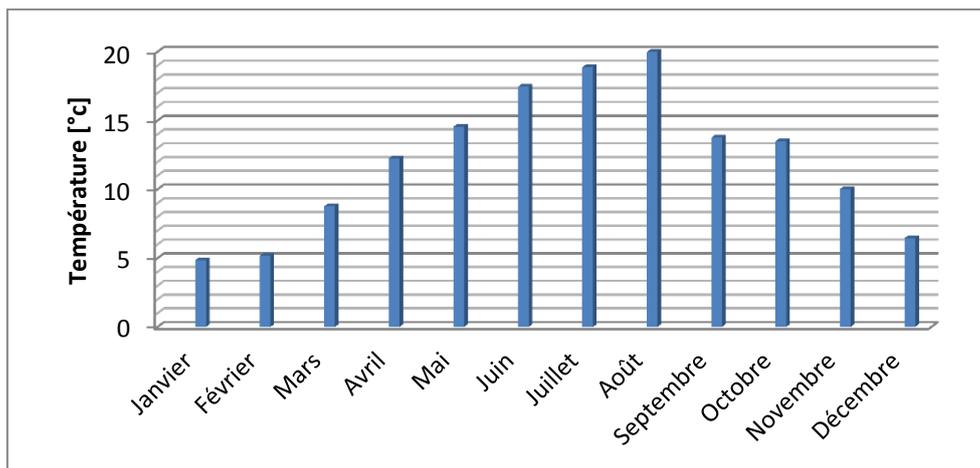


Figure 5.8 : Températures moyennes mensuelles prises en compte dans l'estimation du vieillissement (ville de Nantes)

3.3 - Impact des scénarios de gestion de recharge sur le vieillissement de la batterie

Suite à la connaissance des facteurs de vieillissement spécifique à chaque scénario, les trois indicateurs de vieillissement spécifiques aux scénarios sont estimés en utilisant le modèle de vieillissement présenté au chapitre 2. Ces indicateurs sont représentés sous forme de pourcentage de variation par rapport à leurs valeurs initiales. Les deux modèles de vieillissement cyclage et calendaire sont combinés. Les estimations sont faites à la fréquence d'une par mois pour respecter le domaine de validité du modèle. En effet, les tests de caractérisation lors des essais de vieillissement étaient réalisés toutes les 6 semaines. La durée minimale d'estimation choisie (4 semaines) semble donc cohérente.

Pour chaque estimation, les facteurs de vieillissement sont mis à jour. Le nombre de jours de stockage et le nombre de cycles réalisés sont équivalents au nombre de mois multiplié par la valeur moyenne (Tableau 5.1). La température est modifiée en fonction du mois, comme indiqué dans le paragraphe précédent. Les autres facteurs de vieillissement ne varient pas d'un mois à une autre. La variation de chaque indicateur de vieillissement est égale à la somme de la variation causée par le cyclage avec celle du stockage. La Figure 5.9 illustre une comparaison, obtenue par simulation, de la variation des indicateurs de vieillissement en fonction de chaque scénario sur une durée de 4 ans.

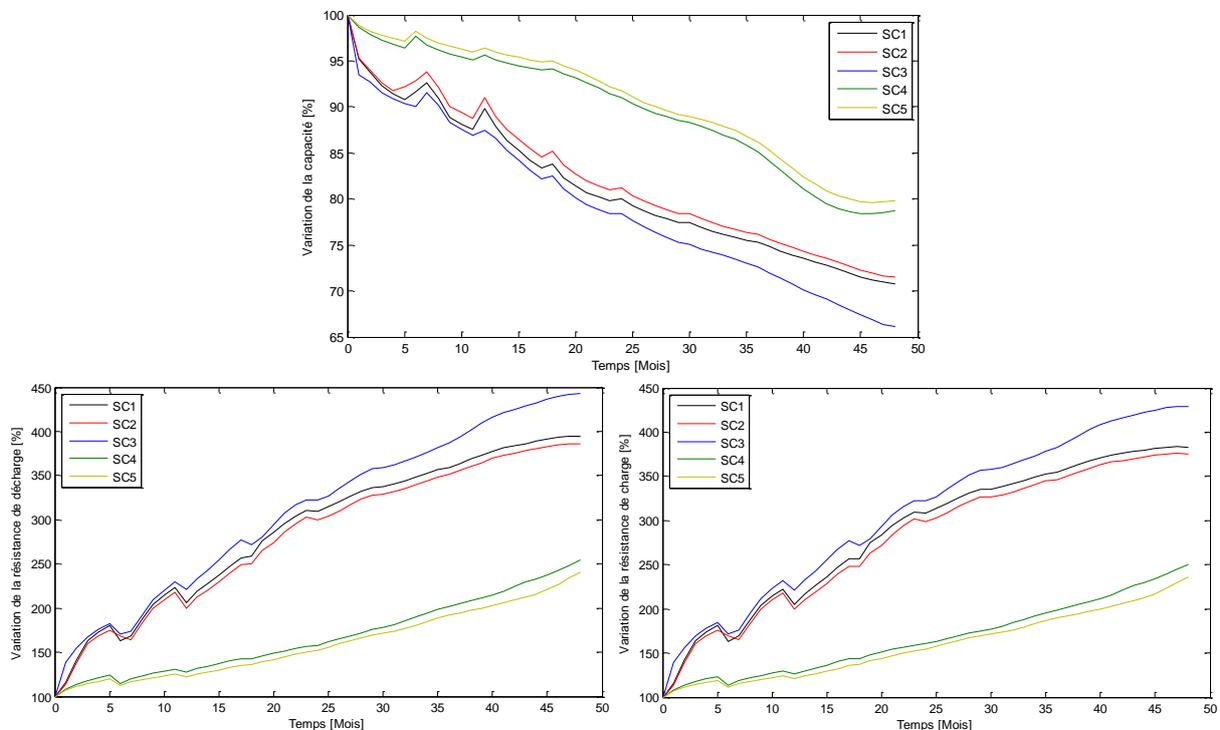


Figure 5.9 : Variation des indicateurs de vieillissement sur une durée de 4 ans pour chaque scénario (a) capacité – (b) résistance de décharge – (c) résistance de charge

À première vue, on peut remarquer que la cinétique de variation des indicateurs de vieillissement des trois premiers scénarios est beaucoup plus rapide que celle des deux derniers. La capacité atteint 80% de sa valeur initiale au bout de 20 mois environ pour SC1, SC2 et SC3, alors qu'avec les deux derniers scénarios, cette même perte de capacité n'est atteinte qu'au bout de 42 mois (3,5 ans). En effet, dans les trois premiers scénarios, on utilise de la recharge accélérée (SC1 et SC2) ou de la recharge rapide (SC3) contrairement aux SC4 et SC5 qui n'utilisent que la recharge standard. Cela semble indiquer que les recharges accélérées ou rapides contribuent grandement à l'accélération du vieillissement.

De plus, on comparant les trois premiers scénarios ensemble, on constate que les courbes spécifiques au SC3 commencent à se démarquer de celles des deux premiers scénarios à partir du 20^{ème} mois. Cela nous confirme que la charge rapide a plus d'influence sur le vieillissement que la recharge accélérée.

Au contraire, les pertes de performances lors de SC1 et SC2 évoluent de la même manière. Leurs indicateurs de vieillissement sont quasiment-identiques au cours du temps. L'instant de démarrage de la recharge standard hebdomadaire, qui est le paramètre qui les différencie, est donc peu influent en comparaison de la recharge accélérée.

Pour déduire l'influence de l'instant de début de la recharge standard sur le vieillissement, c'est SC4 et SC5 qu'il faut comparer. Les indicateurs de vieillissement évoluent plus rapidement pour SC4 que pour SC5. Le commencement de la recharge standard quotidienne directement après la restitution du véhicule contribue donc à l'accélération du vieillissement de la batterie. C'est le vieillissement calendaire qui augmente quand la batterie est chargée à 100% de SOC sans être utilisée.

Pour conclure, le scénario 5 est celui pour lequel la batterie vieillit le plus lentement, contrairement au scénario 3 qui conduit à une accélération importante du vieillissement. Il est donc déconseillé d'utiliser de la recharge rapide ou accélérée. De plus, la recharge standard doit débiter le plus tard possible de façon à ce qu'elle soit terminée juste avant la prochaine utilisation du véhicule. Des programmeurs de recharge peuvent être utilisés dans ce cas. Leur rôle est d'activer la charge quotidiennement à la fin de la nuit. En supposant le véhicule soit utilisé le matin à partir de 8h, et sachant qu'une charge standard dans le cadre de SC5 dure 5 heures au maximum, la charge peut être programmée pour débiter à 3h chaque matin. Cette période correspondant aux heures creuses de consommation électriques, elle peut être mise à profit par le gérant du parc pour optimiser le coût de la recharge sans pénaliser le vieillissement.

4 - Impact des scénarios de recharge sur les performances du véhicule électrique

4.1 - Modélisation du véhicule électrique

4.1.1 - Bilan énergétique

Pour étudier l'influence du vieillissement de la batterie sur les performances globales du véhicule, un modèle de véhicule électrique est nécessaire. Avant de procéder à la modélisation, nous avons établi un bilan énergétique pour mieux comprendre la distribution de l'énergie consommée et la nature des différentes pertes (Figure 5.10).

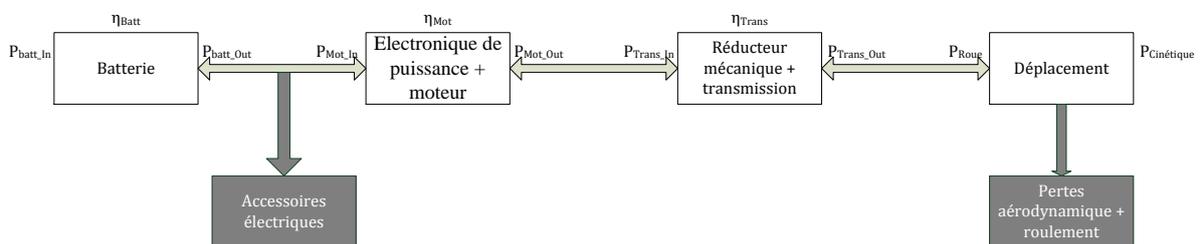


Figure 5.10: Distribution du flux énergétique dans les différents composants d'un véhicule électrique

L'unique source d'énergie dans le VE est la batterie d'accumulateurs. En sortie de la chaîne de traction, l'énergie cinétique, de nature mécanique, permet de déplacer le véhicule à la vitesse demandée.

À un instant t donné, quand le véhicule, de masse m , est en mouvement à une vitesse v , la puissance cinétique est égale à :

Équation 5.1 :

$$P_{Cinétique} = m \cdot v \cdot \frac{dv}{dt}$$

La puissance cinétique provient de la puissance appliquée aux roues après avoir retranché les pertes aérodynamiques et les frottements dus au roulement. Ces deux derniers dépendent de la forme du véhicule, de la nature de ses roues, des données météorologique (température et humidité) et de la nature de la route (cf. Chapitre 3 - 4.2 -). L'équation de la puissance appliquée aux roues est donc la suivante :

Équation 5.2

$$P_{roues} = P_{Cinétique} + p_{aérodynamique} + p_{roulement}$$

L'origine de la puissance mécanique appliquée aux roues est le moteur électrique. Il fournit à sa sortie une puissance mécanique, qui est transmise par un système de transmission mécanique (accouplements, boîte ou réducteur de vitesse et arbre de transmission). Une partie de cette puissance mécanique est perdue lors de sa transmission principalement à cause des frottements. La puissance à la sortie du moteur s'écrit donc sous la forme suivante :

Équation 5.3

$$P_{Mot_Out} = P_{roues} + p_{transmission}$$

Le rendement du système de transmission est donc égal à l'équation suivante :

Équation 5.4

$$\eta_{Trans} = \frac{P_{roues}}{P_{Mot_Out}} = \frac{P_{roues}}{P_{roues} + p_{transmission}}$$

Le machine électrique tournante transforme la puissance électrique en mécanique (mode moteur) et inversement (mode générateur). Plusieurs types de pertes sont présents lors de son fonctionnement (pertes fer, pertes cuivre, pertes mécaniques,...) et leurs valeurs sont dépendantes du point de fonctionnement de la machine. À l'entrée de la machine, un convertisseur statique de l'énergie électrique de type onduleur assure le lien avec la batterie et bien sur le réglage de la vitesse et/ou du couple moteur. Dans notre modélisation, on traite la machine et l'onduleur comme un seul composant. En mode moteur, la puissance électrique fournie par la batterie est transformée par ce bloc en une puissance mécanique nécessaire pour le déplacement du véhicule. Lorsque l'accélération du véhicule est négative, le moteur fonctionne en mode générateur et transforme la puissance mécanique reçue en électrique. Cette dernière est transmise, via le convertisseur (en mode redresseur) à la batterie pour la charger. Finalement, l'Équation 5.5 résume la relation entre les puissances en jeu dans le bloc machine + convertisseur où l'origine des pertes est spécifiée (machine ou convertisseur):

Équation 5.5 :

$$P_{Mot_In} = P_{Mot_Out} + p_{machine} + p_{convertisseur}$$

Le rendement du bloc est ainsi défini par l'égalité suivante :

Équation 5.6 :

$$\eta_{Mot} = \frac{P_{Mot_Out}}{P_{Mot_In}} = \frac{P_{Mot_Out}}{P_{Mot_Out} + p_{machine} + p_{convertisseur}}$$

La puissance électrique produite par la batterie est transmise par un bus DC basse-tension pour être répartie aux différents consommateurs. Le bloc machine + convertisseur est le consommateur principal sur le bus basse-tension (BT). Le reste de la puissance fournie est transférée par un convertisseur DC/DC (abaisseur de tension) à un autre bus continu très basse-tension (TBT), sur lequel sont reliés une batterie TBT, le contrôleur, et tous les accessoires électriques du véhicule. Pour simplifier, on décompose la puissance produite par la batterie en deux groupes : la puissance P_{Mot_In} fournie au bloc machine + convertisseur DC/AC et la puissance $P_{Accessoires}$ qui regroupe la puissance consommée par les accessoires électriques, le convertisseur DC/DC, ainsi que les pertes dissipées par les deux bus BT et TBT. Le bilan de puissance à la sortie de la batterie s'écrit sous la forme suivante :

Équation 5.7

$$P_{Batt_Out} = P_{Mot_In} + P_{Accessoires}$$

Enfin, la batterie est également le siège de pertes lors de son fonctionnement. En y ajoutant la puissance électrique retrouvée à sa sortie, on obtient la puissance électrochimique. On a montré dans le chapitre précédent que les pertes de la batterie peuvent être ramenés aux pertes Joule dissipées par une résistance série équivalente.

En se basant sur la répartition d'énergie décrite par le bilan énergétique ci-dessus, on constate que le modèle de VE peut être décomposé en quatre grands blocs: le châssis du véhicule (pour modéliser les pertes aérodynamique et pneumatiques), la boîte de vitesse et la ligne de transmission mécanique, le groupe moteur + convertisseur et enfin la batterie. Les accessoires seront modélisés par une charge dissipant une puissance constante égale à la puissance moyenne mesurée à l'entrée du convertisseur DC/DC sur le véhicule (250 W). Pour compléter la modélisation du véhicule, un bloc contrôleur s'ajoute aux quatre blocs consommateurs cités. Ce dernier simule le conducteur du véhicule et assure la commande du moteur et des différents éléments.

4.1.2 - Modélisation du VE sous AMESim

AMESim (Advanced Modeling Environment for performing Simulations of engineering systems) est un logiciel de simulation pour la modélisation et l'analyse de systèmes 0D multi-domaines. Il offre un environnement de simulation pour modéliser et analyser les systèmes intelligents multi-domaines et prédire leurs performances. Les composants du modèle sont décrits en se basant sur les lois de la physique sous forme d'équations analytiques qui représentent le comportement réel hydraulique, pneumatique, électrique ou mécanique du système. Notre choix s'est porté sur ce logiciel en raison de la richesse de ses bibliothèques et de son aspect incontournable dans le domaine automobile. Le modèle de véhicule électrique est basé principalement sur la bibliothèque IFP Drive créée par

l'IFP Energies Nouvelles. Il est constitué de cinq principaux sous-systèmes : le bloc moteur électrique + convertisseur DC/AC, le bloc forme et configuration du véhicule (aspect aérodynamique + pneumatique), le bloc conducteur + contrôleur, le bloc transmission mécanique + réducteur de vitesse et enfin le bloc batterie.

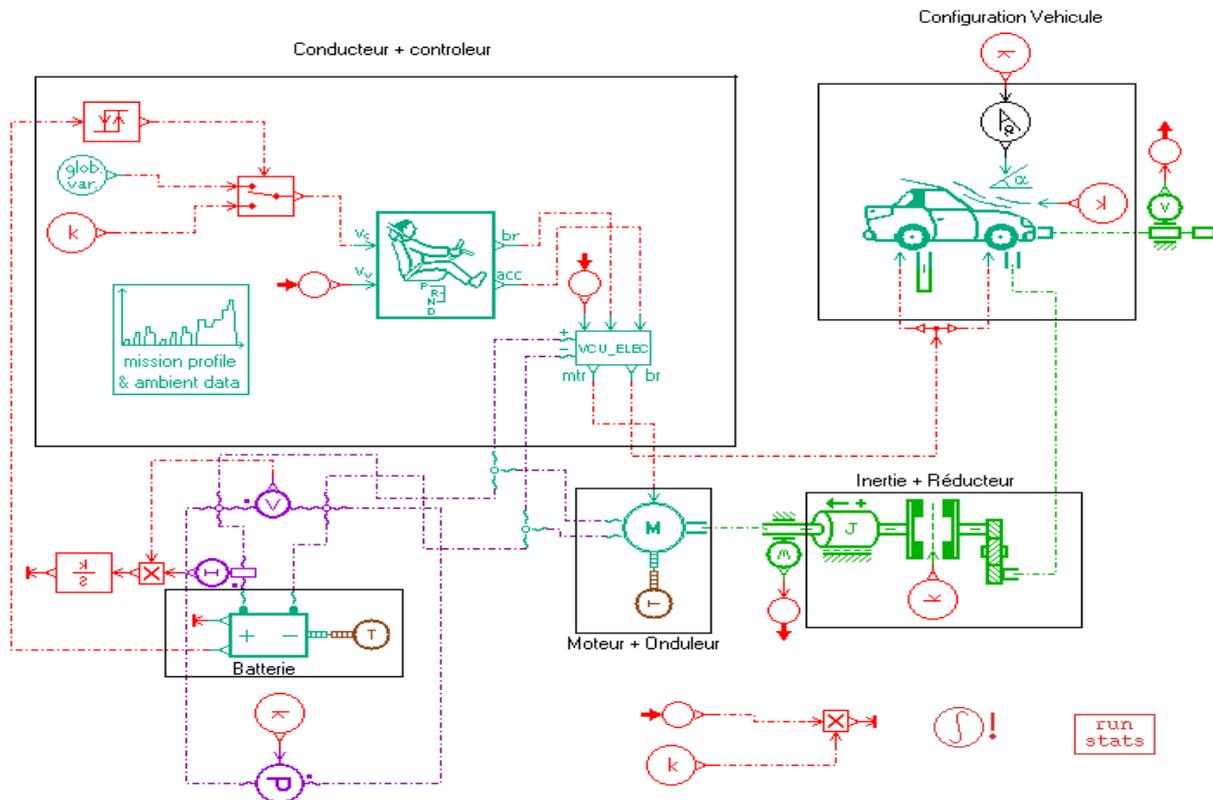


Figure 5.11 : Modèle de véhicule électrique sous AMESim

4.1.2.1 - Bloc moteur + Convertisseur

Le véhicule électrique à modéliser (Fiat Doblo Micro-vett) est équipé d'un moteur asynchrone triphasé de puissance nominale de 30kW, 60kW maximum pendant 2 minutes (type Ansaldo A*H207B42G000) associé à un onduleur de tension (type Ansaldo I1H130HG000). Notre objectif est de pouvoir reproduire le plus fidèlement possible son fonctionnement ainsi que ses pertes. Ils sont tous les deux ramenés à un seul élément (Figure 5.12). Les entrées du modèle sont la tension continue du pack batterie appliquée au convertisseur, le régime moteur et la température. Les sorties sont le couple développé par le moteur, le courant à la sortie du convertisseur et les pertes de ce bloc en fonction du point de fonctionnement.

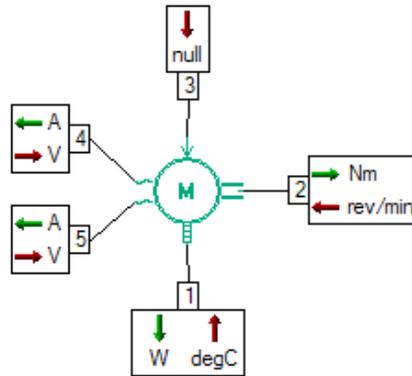


Figure 5.12 : Bloc moteur + convertisseur

Pour définir complètement son fonctionnement, ce bloc a besoin de 3 cartographies 2-D :

1. *Couple maximal* en fonction de la vitesse de rotation ou régime du moteur (tr/min) et de la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur (V) : cette cartographie est basée sur la courbe de puissance maximale en fonction du régime moteur fournie dans le document des caractéristiques techniques du moteur (Figure 5.13).

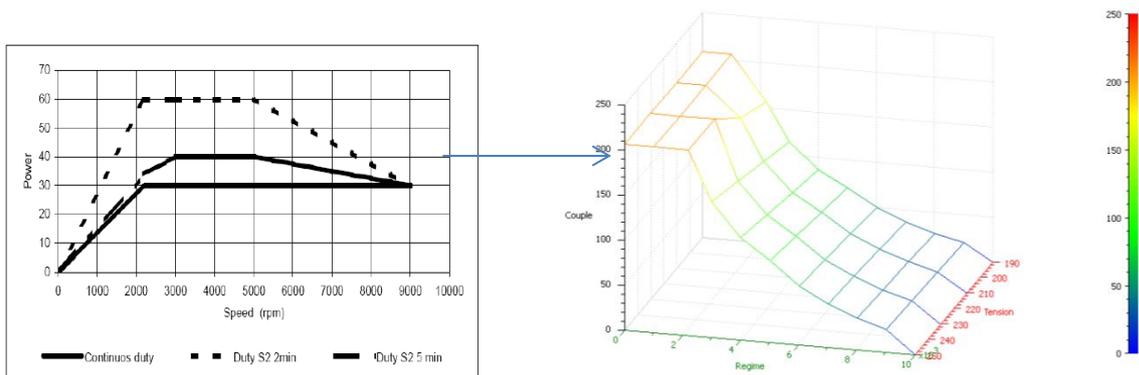


Figure 5.13 : Cartographie du couple maximale déduite de la courbe de la puissance maximale

2. *Couple minimal* (mode freinage) en fonction de la vitesse de rotation ou régime du moteur (tr/min) et de la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur (V). En théorie, elle est l'image de la cartographie du couple maximal. Néanmoins, en réalité cette valeur n'est jamais atteinte. Comme expliqué dans le chapitre 3, la proportion entre la quantité d'Ah chargés et ceux déchargés est égale à 5,8%. Le couple moteur n'est pas exploité à son maximum pour la récupération d'énergie. La valeur constatée du rapport entre les valeurs maximales de courant de charge et celui de décharge est de 13%. Pour représenter cette proportionnalité dans notre modèle, la cartographie du

couple minimale est équivalente à celle du couple maximale multipliée par un facteur de -0.13.

3. *Puissance perdue* en fonction du couple et de la vitesse de rotation : cette cartographie est déterminée à partir de la cartographie du rendement du moteur multiplié par celui de l'onduleur en fonction du point de fonctionnement (régime, couple). Elle est l'équivalent de la somme de $p_{machine}$ et $p_{convertisseur}$ retrouvés dans l'Équation 5.5.

4.1.2.2 - *Forme et configuration du véhicule*

Dans cette partie, on précise toutes les données relatives au véhicule telles que : la masse du véhicule, sa surface frontale, ses coefficients aérodynamiques, l'inertie des roues, les dimensions des pneus et le couple maximum de freinage. Ces paramètres contribueront aux pertes aérodynamiques, aux frottements dus au roulement et au freinage mécanique représentés dans le dernier bloc du bilan énergétique illustré par la Figure 5.10.

En sortie, on peut recueillir la vitesse du véhicule, la vitesse de rotation des roues, la distance parcourue, l'accélération du véhicule, le couple de freinage sur les roues avant et sur les roues arrière.

4.1.2.3 - *Le bloc conducteur + contrôleur*

Dans cette partie du modèle, on définit le profil de mission qui est l'entrée principale de notre simulation. Il est introduit sous forme d'un fichier de données contenant un tableau chronologique des valeurs de vitesses à réaliser. Un modèle de conducteur traduit ces valeurs de vitesse en deux signaux d'enfoncement de pédale : accélération et freinage. Le calculateur quant à lui, transforme ces signaux en commandes de la machine électrique tout en régulant le régime moteur pour obtenir la vitesse de rotation souhaitée (Figure 5.14).

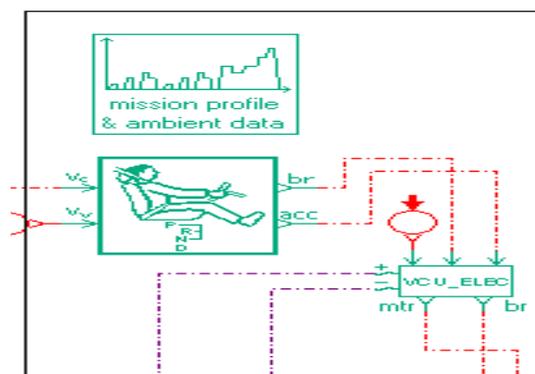


Figure 5.14. Composition du bloc conducteur + contrôleur

4.1.2.4 - Transmission mécanique et réducteur de vitesse

Cette partie, illustrée par la Figure 5.15, est nécessaire pour simuler les pertes mécaniques résultantes de l'accouplement entre le moteur, le réducteur de vitesse et l'arbre de transmission. Le rendement de ce bloc est fixé à 95% indépendamment du point de fonctionnement selon les valeurs trouvées dans la littérature [6], [125], [126].

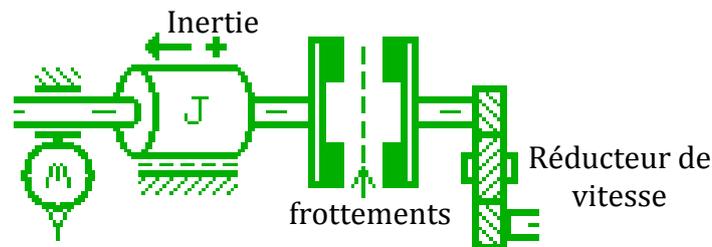


Figure 5.15 : Composition du bloc de transmission mécanique et de réduction de vitesse

Le réducteur de vitesse sert comme organe d'accouplement entre la machine électrique et l'arbre de transmission. En réalité, une boîte de vitesse existe sur le véhicule (la boîte de vitesse d'origine), mais le rapport de transformation est fixé. Elle a donc le même fonctionnement qu'un simple réducteur de vitesse sauf qu'elle est plus lourde et donc augmente l'inertie du groupe moteur + transmission. Pour compenser cette augmentation d'inertie par rapport à un réducteur de vitesse, une inertie est ajoutée sur l'arbre de transmission dans notre modèle comme le montre la Figure 5.15.

4.1.2.5 - Modèle de la batterie

Dans AMESim, le modèle de la batterie a comme entrée le courant et la température et comme sortie la tension, le SOC et les pertes (Figure 5.16).

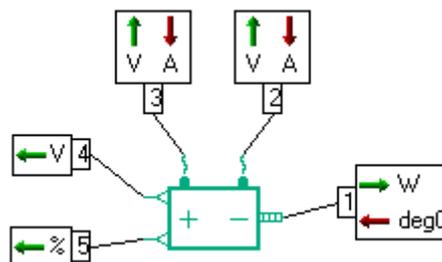


Figure 5.16. Détail des entrées/sorties du bloc batterie

Ce modèle est basé sur un regroupement de plusieurs éléments en parallèle et en série (Figure 5.17). Un élément est modélisé par une source de tension (caractérisant la tension OCV) en série avec une résistance.

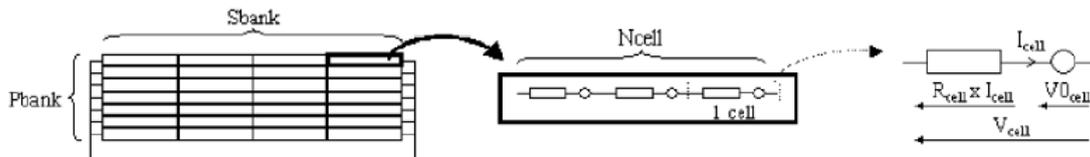


Figure 5.17. Modèle du pack batterie sous AMESim

La source de tension et la résistance interne sont dépendantes du SOC et de la température. Leurs valeurs sont calculées par l'interpolation de cartographies 2-D. Pour que le modèle corresponde à celui présenté dans le chapitre 1 (Figure 1.10), des modifications sur le modèle d'AMESim ont été faites :

- une deuxième résistance est ajoutée de façon qu'une entre en jeu pendant la décharge uniquement et l'autre seulement pendant la charge,
- une dépendance en courant en plus du SOC et de la température est ajoutée au modèle de résistance interne.

4.1.3 - Validation expérimentale du modèle

Pour valider le modèle, le profil de mission est défini par les valeurs de vitesse enregistrées lors d'une tournée de distribution réalisée avec le VE instrumenté (présenté dans le chapitre 3). On compare le courant dans la batterie mesuré lors des essais avec celui simulé par le modèle. Cette validation est suffisante en considérant que le modèle de la batterie est déjà validé (voir chapitre 4). L'allure de tension et du courant de la batterie correspondant à la réalité, la consommation qu'on cherche à estimer sera donc validée.

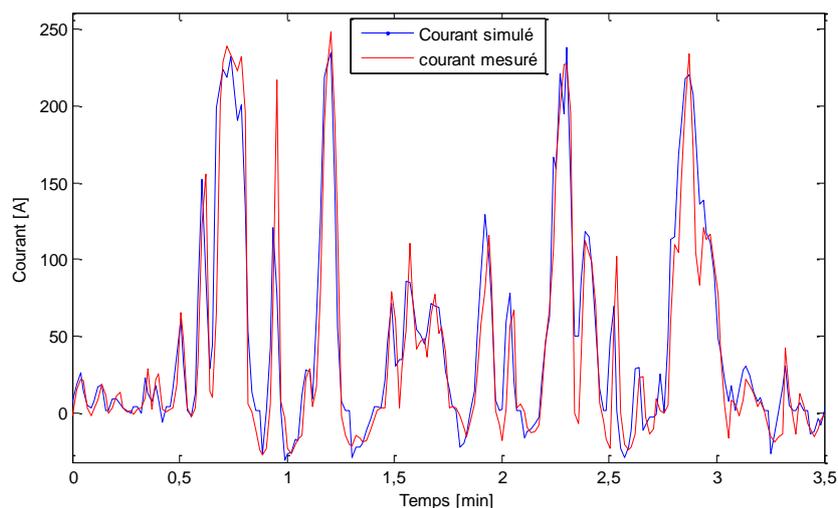


Figure 5.18 : Comparaison des courants mesuré et simulé (modèle VE sous AMESim)

La Figure 5.18 illustre une comparaison de ces deux courants en fonction du temps. On remarque que le courant simulé est très proche de celui mesuré en termes d'ordre

de grandeur et de dynamique. De plus, le Tableau 5.2 ci-dessous propose une comparaison des valeurs remarquables de ces deux signaux.

	Valeur moyenne	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur efficace	Taux de recharge
Courant mesuré	35,73 A	261,18 A	-35,11 A	76,82 A	6,36%
Courant simulé	36,37 A	267,65 A	-34,31 A	73,45 A	6,12%

Tableau 5.2 : Comparaison des valeurs remarquables des courants mesuré et simulé

Finalement, qu'elle soit graphique ou bien sur la base des valeurs remarquables, la comparaison des courants mesuré et simulé valide bien notre modèle de VE qui sera utilisé pour simuler les tournées de distribution de courrier dans la suite.

4.2 - Impact de l'état de vieillissement de la batterie sur les performances du véhicule électrique

Le modèle de VE présenté ci-dessus permet de simuler le fonctionnement du véhicule à un état de vieillissement fixe et selon un profil de mission spécifié. Pour prendre en compte le vieillissement, les simulations seront réalisées pour différentes valeurs des paramètres du modèle de la batterie (la capacité et les deux cartographies de résistances) correspondant aux différents états de vieillissement. Chaque simulation consiste à reproduire un profil de mission de distribution de courrier répétitivement en partant d'un niveau de SOC à 100% jusqu'à atteindre 20% de SOC. Ce dernier est le niveau minimal de sécurité afin d'éviter les décharges profondes. Quant au profil de mission utilisé, il s'agit des données de vitesse enregistrées lors de la conduite agressive de manière à pouvoir calculer l'autonomie du véhicule dans des conditions réalistes. La Figure 5.19 illustre un exemple de variation du SOC de la batterie et de la vitesse du véhicule lors d'une simulation réalisée.

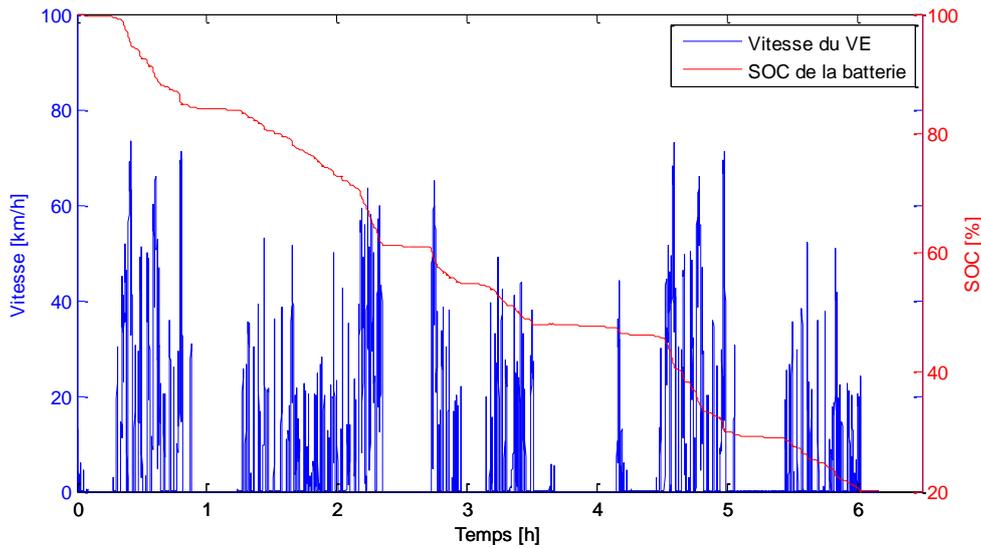


Figure 5.19 : Simulation de la vitesse du véhicule et du SOC batterie (profil de conduite agressive)

Pour quantifier l'impact du vieillissement sur les performances du véhicule électrique, nous avons réalisé un nombre important de simulations, 21 au total, dont les conditions sont synthétisées dans le Tableau 5.3. Une simulation est identifiée par un état de vieillissement donné lié à l'utilisation d'un scénario de recharge pendant un nombre d'années. Le profil de mission étant figé au cas de la conduite agressive dont la modélisation a été validée dans la première partie de ce paragraphe.

Scénarios\Temps	0	1 an	2 ans	3 ans	4 ans
SC1	Sim_1	Sim_2	Sim_3	Sim_4	Sim_5
SC2		Sim_6	Sim_7	Sim_8	Sim_9
SC3		Sim_10	Sim_11	Sim_12	Sim_13
SC4		Sim_14	Sim_15	Sim_16	Sim_17
SC5		Sim_18	Sim_19	Sim_20	Sim_21

Tableau 5.3 : Bilan des simulations réalisées à différents états de vieillissement pour les scénarios de recharge envisagés

Les variables de sortie des simulations représentant les performances du véhicule sont la consommation énergétique du véhicule et son autonomie. L'impact du vieillissement sur les performances du véhicule est donc représenté par la variation de ces deux facteurs. Pour une batterie neuve (pas de vieillissement), la consommation estimée du véhicule est égale à 350 Wh/km, et son autonomie est égale à 57,7 km (Sim_1). Les Figure 5.20 et Figure 5.21 illustrent la variation de ces deux paramètres en fonction des années et selon le scénario de recharge adopté.

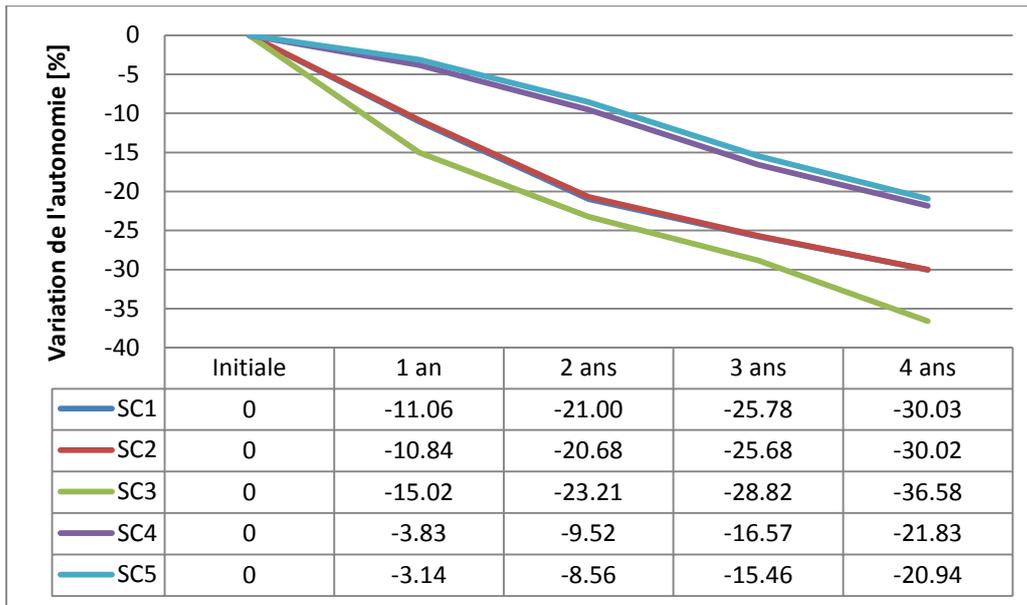


Figure 5.20 : Variation de l'autonomie (%) du VE au cours des années selon le scénario de recharge adopté

L'autonomie estimée correspond à la distance parcourue par le véhicule avec 80% du SOC de la batterie, en réalisant des missions de distribution de courrier. La comparaison des courbes de la variation de l'autonomie en fonction du temps pour les différents scénarios, illustrée par la Figure 5.20, n'est qu'une image de la variation de la capacité en fonction du temps (Figure 5.9). C'est avec le scénario 3 que l'autonomie diminue le plus rapidement, elle n'est plus que de 40 km au bout de 3 ans. Quant aux scénarios 1 et 2, l'autonomie diminue à 40 km au bout des 4 ans. Par contre, en utilisant les scénarios 4 et 5, l'autonomie reste au-dessus des 45 km après 4 ans.

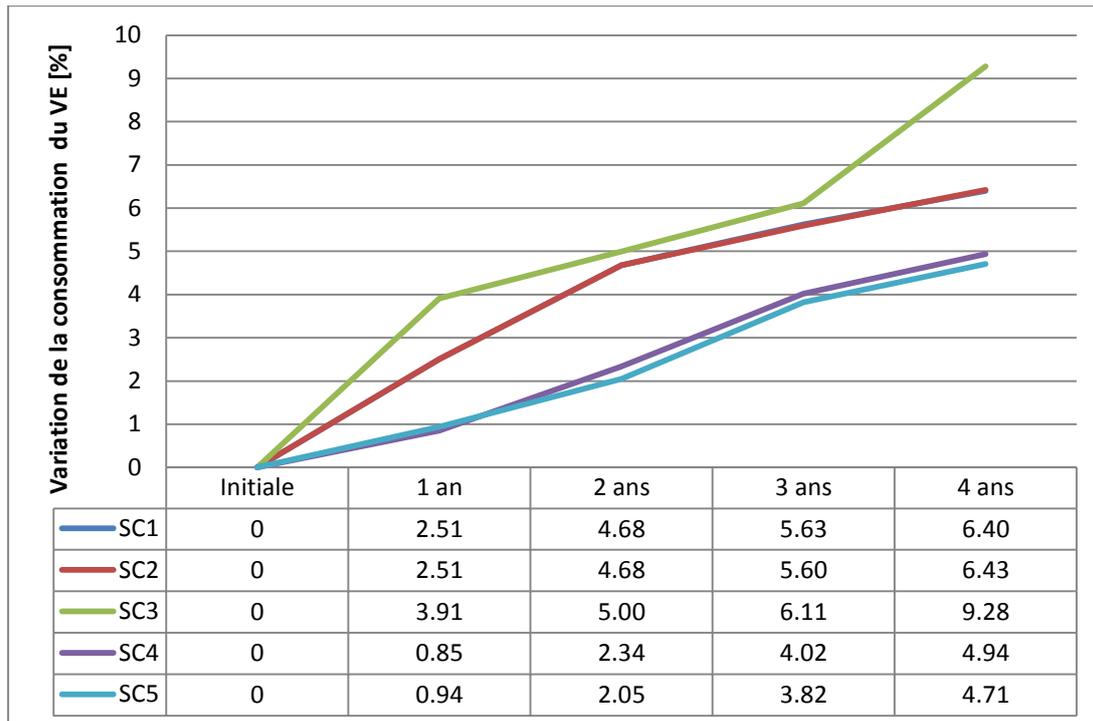


Figure 5.21 : Variation de la consommation (%) du VE aux cours des années et selon le scénario de recharge adapté

Concernant la consommation, il s'agit de l'énergie moyenne par km fournie par la batterie pendant toute la simulation. On suppose que les rendements de tous les autres composants du véhicule restent invariables en fonction du temps. On s'intéresse uniquement à la contribution du vieillissement de la batterie à l'augmentation de la consommation du véhicule. On constate qu'avec le vieillissement, la consommation augmente jusqu'à 9% au bout de 4 ans en utilisant le scénario 3 (Figure 5.21). Cette augmentation est liée directement à celle des résistances internes de la batterie qui induit une augmentation des pertes Joule.

5 - Conclusion

Dans ce chapitre, différents modes de gestion de la recharge de la batterie sont présentés sous la forme de cinq scénarios. Deux paramètres varient d'un scénario à l'autre : le type de recharge et l'instant de démarrage de la recharge standard lorsqu'elle est utilisée. Le choix du type de recharge se fait entre recharge standard, accélérée ou rapide. Les deux dernières durent 30 minutes maximum. La recharge rapide permet de fournir l'énergie quotidienne nécessaire pour le véhicule, et donc aucun autre type de charge s'est nécessaire. Tandis qu'avec la charge accélérée, il est nécessaire d'utiliser une recharge standard à la fin de chaque semaine. Le dernier choix est d'utiliser quotidiennement une recharge standard lorsque le véhicule n'est pas utilisé. Le positionnement temporel du début de cette dernière,

qu'elle soit utilisée seule ou en support à recharge accélérée, est une donnée importante qui a des conséquences sur le vieillissement.

Le courant efficace de la batterie, l'état de charge et le temps de stockage varient en fonction des scénarios. Ces derniers agissent directement sur la cinétique du vieillissement de la batterie. En se basant sur le modèle de vieillissement présenté dans le deuxième chapitre, les variations de la capacité et celles des résistances internes de la batterie sont estimées en fonction des scénarios. Il est montré que l'utilisation de la recharge rapide suscite une amplification importante du vieillissement de la batterie au cours du temps. La recharge accélérée participe elle aussi à ce phénomène, moins que la recharge rapide, mais plus que la recharge standard. Quant au deuxième paramètre, l'instant de démarrage de la recharge standard, il est conseillé, d'après nos simulations, de retarder au maximum le démarrage de la recharge. Le but est d'éviter de stocker la batterie à 100% de SOC.

Enfin, un modèle de véhicule électrique est proposé dans ce chapitre, prenant en compte tous les composants existant dans le véhicule. Il est réalisé en utilisant le logiciel AMESim et validé en comparant le courant demandé à la batterie en simulation à celui mesuré. La comparaison s'est montrée satisfaisante, et le modèle est utilisé pour simuler les performances du véhicule en fonction de l'état du vieillissement de la batterie. Cela permet de voir plus concrètement l'impact de la stratégie de gestion de la recharge de la batterie sur les performances du véhicule dans le cadre de l'utilisation postale. C'est d'ailleurs ce qui a été fait à l'occasion d'une importante campagne de simulation destinée à couvrir un large domaine de variation de deux paramètres : le type de scénario de recharge et le nombre d'années d'utilisation du véhicule en mission. A chaque couple (scénario de recharge, nombre d'années) correspond un nouveau modèle de batterie prenant en compte l'état de vieillissement. L'estimation de l'autonomie et la consommation, correspondantes au couple choisi, se fait en intégrant ce modèle de batterie dans celui du VE. Les simulations ont logiquement montré les performances du véhicule sont directement liées à l'état de vieillissement de la batterie. Les plus grandes dégradations de performances sont retrouvées là où le vieillissement est le plus prononcé. Enfin, le type de recharge et l'instant de démarrage de la recharge standard impactent aussi les performances du véhicule de la même manière que le vieillissement de la batterie.

Conclusion générale

Le travail effectué lors de cette thèse s'est inscrit dans un cadre industriel et scientifique exigeant. L'électrification des véhicules est en plein essor, avec ses perspectives de réduction des émissions automobiles mais également ses limites. L'intégration de batteries lithium-ion au sein des véhicules représente un grand défi particulièrement en raison de la dégradation de ses performances due au vieillissement. Cet aspect est essentiel que ce soit du point de vue du constructeur, pour effectuer un bon dimensionnement ou optimiser la gestion de l'énergie dans le véhicule, mais également du point de vue du gestionnaire d'une flotte de véhicules électriques sur laquelle notre étude s'est focalisée. Le travail a donc consisté à proposer une méthode de quantification de l'influence du type de recharge sur le vieillissement et donc sur la diminution des performances de la batterie d'un véhicule électrique selon un profil de mission postale..

Dans la première partie de ce mémoire, l'effort s'est porté sur la présentation de la modélisation des accumulateurs lithium-ion. D'abord, le fonctionnement de l'accumulateur a été expliqué à travers la présentation des différents éléments constitutifs. Par la suite, un état de l'art a été proposé sur les différentes méthodes de modélisation regroupées en quatre catégories principales. Parmi elles, la modélisation par circuits électriques équivalents a été choisie pour le compromis qu'elle offre entre la précision, la simplicité et la rapidité de calcul. Les méthodes d'identification de ce type de modélisation ont ensuite été présentées. Enfin, nous avons présenté le modèle de batterie qui est adopté dans le manuscrit et la méthode de caractérisation appropriée pour son identification. Il s'agit de l'association d'une source de tension avec deux résistances, une pour le fonctionnement en charge et l'autre en décharge. Des dépendances en état de charge, en température et en courant sont intégrées au modèle pour représenter le fonctionnement de la batterie dans l'intégralité du domaine d'utilisation.

Le second chapitre porte sur l'étude du vieillissement de la batterie. Nous y avons introduit les mécanismes et les facteurs influant sur le vieillissement des accumulateurs électrochimiques. Les différentes méthodes de modélisation de vieillissement connues dans la littérature sont discutées et comparées. Elles sont regroupées dans trois catégories : modélisation physico-chimique, méthodes de fatigue et modélisation mathématique. La dernière catégorie est celle qui est choisie dans ce document car elle permet d'exploiter une banque de données issues des tests de vieillissement mise à notre disposition et permet aussi une intégration facile au modèle électrique choisi. La méthode s'appuie sur une technique de régression non-linéaire basée sur les « machines à support vecteurs » (SVM). Elle a permis d'estimer les indicateurs de vieillissement (variation de la capacité et des deux résistances du modèle électrique) en fonction des facteurs de vieillissement identifiés.

Le troisième chapitre traite le cas de l'utilisation postale des véhicules électriques. Une comparaison est réalisée entre les profils de vitesse lors de la distribution de courrier et les profils de missions utilisés usuellement pour tester les performances de véhicules en utilisation urbaine (ECE-15, FTP-72, Mode 10-15 et Artemis). Elle montre que l'utilisation postale ne peut être représentée par aucun des profils de mission connus. En effet, les nombreuses phases d'arrêt et d'accélération qui la caractérisent mènent à une augmentation de la consommation énergétique et agissent en conséquence sur la sollicitation de la batterie. Des tests expérimentaux réalisés sur les véhicules électriques La Poste ont permis d'avoir des relevés de vitesse et les profils de courant et de la tension pendant les missions de distribution de courrier. À l'aide de ces données, nous avons reconstitué un profil de courant de courte durée, réalisable sur un banc d'essais de batterie et ayant les mêmes propriétés que la sollicitation réelle. Ensuite, dans le quatrième chapitre, les essais expérimentaux menés sur les batteries sont présentés. Des tests de caractérisation basés sur un plan d'expérience prenant en compte le domaine d'utilisation réelle du véhicule (température et état de charge) ont permis d'identifier le modèle électrique de la batterie présenté dans le premier chapitre. De plus, le modèle est validé expérimentalement sur toute la plage d'utilisation du point de vue électrique et énergétique. La validation électrique est faite en comparant la tension estimée, suite à une sollicitation par le profil représentatif de l'utilisation postale, à celle mesurée au niveau de la batterie du véhicule. Quant à la validation énergétique, elle est réalisée à l'aide d'une comparaison entre les pertes Joule simulées et l'échauffement mesuré de la batterie. Enfin, l'étude de l'influence du profil de charge sur le rendement énergétique de la batterie a été réalisée. Trois profils de charge sont comparés : deux charge à courant constant à 150 A ou à 75 A et une charge standard CCCV (0,3C - 4,2 V - C/20). L'augmentation de la valeur du courant participe à la diminution du rendement énergétique. Ces valeurs sont intégrées dans la suite lors des simulations des différents scénarios de recharge.

Dans le dernier chapitre, l'impact de la stratégie de recharge sur le vieillissement des batteries et sur les performances des véhicules est traité. Tout d'abord, cinq scénarios de gestion de la recharge sont présentés. Il s'agit des scénarios les plus envisageables dans le cadre de la gestion d'une flotte en fonction des infrastructures de recharge. Trois types de recharge sont pris en compte : recharge rapide (43 kVA), accélérée (22 kVA) et normale (3 kW). En utilisant le modèle de vieillissement déterminé précédemment, la variation des paramètres de la batterie est estimée au cours de 4 ans d'utilisation selon les scénarios de recharge. Il est montré que l'utilisation des recharges rapide et accélérée augmente la cinétique du vieillissement des accumulateurs lithium-ion par rapport à une recharge standard. De plus, il est conseillé de retarder le démarrage de la recharge standard, quand elle est utilisée, de manière à ce qu'elle se termine juste avant la prochaine utilisation du véhicule. Un modèle de VE a aussi été présenté et validé dans ce chapitre. Il a été utilisé pour étudier

l'impact des scénarios sur les performances du véhicule qui sont la consommation énergétique et l'autonomie. On trouve une similarité entre l'impact des scénarios sur les performances du VE et celui sur le vieillissement des batteries.

Les résultats de simulation de l'impact de la stratégie de recharge sur le vieillissement des batteries et sur les performances du véhicule sont satisfaisants. Cependant, ils sont basés sur un modèle de vieillissement d'une technologie de batterie Li-ion qui ne correspond plus à celle des véhicules actuels de La Poste. De plus, ce modèle n'a été validé qu'au niveau cellule. Or, dans un véhicule électrique, la batterie est constituée de plusieurs éléments contrôlés par un BMS. Ce dernier intervient en permanence pour réaliser l'équilibrage des éléments. Par conséquent, le profil de sollicitation de la batterie diffère de celui au niveau des éléments les constituants. Cela pourrait avoir une influence sur le vieillissement. La prochaine étape de ces travaux consistera donc à poursuivre la validation du modèle de vieillissement de la batterie, sur un pack complet de batterie soumise aux conditions réelles d'utilisation des véhicules dans le cadre de la distribution de courrier.

Tables des figures

Figure 1.1: Diagramme de Ragone pour les accumulateurs électrochimiques [6]	14
Figure 1.2 : Evolution de la capacité en fonction du courant de décharge (figure à gauche) et de la température (courant à droite) [11].	17
Figure 1.3 : Représentation schématique d'une batterie en décharge	20
Figure 1.4: Matériaux d'électrodes positives et négatives des batteries au lithium selon leur potentiel relatif par rapport au lithium et leur capacité spécifique[16].....	24
Figure 1.5 : Spectre d'impédance idéal représenté dans le plan de Nyquist	27
Figure 1.6: Modèle d'apprentissage supervisé[41]	30
Figure 1.7 : Modèle de type Thévenin avec circuit du premier ordre	33
Figure 1.8 : Modèle amélioré dont les paramètres dépendent du point de fonctionnement avec phases de décharge et de charge séparées.....	34
Figure 1.9: Influence de la valeur de ϕ sur la forme de la réponse fréquentielle de R//CPE	35
Figure 1.10: Modèle de batterie adapté.....	39
Figure 1.11: Profil de caractérisation temporelle de batterie[24].....	40
Figure 2.1 : Phénomènes de vieillissement à l'interface électrode négative/électrolyte [65].....	44
Figure 2.2: phénomène de dissolution de lithium dans une spinelle de lithium manganèse [73].....	45
Figure 2.3 : Exemple de courbe de Wöhler représentant le nombre de cycles que la batterie est capable de réaliser en fonction du DOD[83].....	50
Figure 2.4 : Facteur de sévérité exprimé en fonction de la température et du DOD [89].....	50
Figure 2.5 : Fonctionnement d'un réseau de neurones ayant une seule couche cachée [92].....	52
Figure 2.6 : Relation entre le modèle de vieillissement et le modèle de fonctionnement de la batterie	53
Figure 2.7: Illustration d'un macrocycle [101]	56
Figure 2.8: Profil de cyclage DST de l'USABC (P>0 correspond à la recharge) [64].....	58
Figure 2.9: Microcycle équilibré issu du programme FreedomCar[59]	59
Figure 2.10 : Profil de caractérisation issu deEUCAR et utilisé dans LIBERAL [24].....	60
Figure 2.11 : Relation entre un indicateur de vieillissement et sa loi de vieillissement basée sur les facteurs de vieillissement qui sont les paramètres d'entrée (* propres au cyclage, ¥ propre au calendrier).	63
Figure 2.12: Variations de la capacité (à gauche) et de la résistance de décharge (à droite) en fonction de nombre du cycles (comparaison mesures / estimation)	65
Figure 2.13: représentation des valeurs estimées de la résistance de décharge en fonction des valeurs mesurées lors des tests de cyclage	66
Figure 3.1: Le cycle ECE15 et son extension extra-urbaine	71
Figure 3.2 : Cycle UDDS américain [115].....	71
Figure 3.3 : Cycle 10-15 MODE [121]	72
Figure 3.4 : Le cycle urbain d'Artemis [114].....	73
Figure 3.5: Cycle théorique du porte à porte 4 arrêts/km.....	75
Figure 3.6: Capteur optique de la vitesse du véhicule	75
Figure 3.7: Evolution de la vitesse enregistrée lors de 3 cycles PAP4AK consécutifs (fonction du temps (gauche) et de la distance(droite))	76
Figure 3.8: Capteur de vitesse et sa sonde GPS installée sur le toit du véhicule	77
Figure 3.9: Exemple d'informations fournies par le capteur GPS	78
Figure 3.10 : Comparaison de la consommation moyenne des profils postaux avec les profils standards	81
Figure 3.11 : Courant de la batterie enregistré pendant une tournée de distribution de courrier en conduite agressive.....	83
Figure 3.12 : Vitesse du véhicule et courant de la batterie lors de la réalisation du profil PAP4AK	85
Figure 3.13: Profil théorique de sollicitation de la batterie	86
Figure 3.14: Profil de cyclage de la batterie déterminé en fonction de la sollicitation réelle de la batterie lors de la réalisation des missions postales en conduite agressive.....	89
Figure 4.1 : Plateformes expérimentales : a) CACYSSÉE – IMS ; b) L3E – EIGSI	92
Figure 4.2 : Objectifs des tests expérimentaux en fonctions des plateformes d'essais.....	93
Figure 4.3 : Element 100 Ah sous test dans son enceinte climatique.....	94
Figure 4.4: Profil de cyclage avec recharge rapide du type CC à 150 A.....	96
Figure 4.5 : Profil de caractérisation temporelle	99
Figure 4.6 : Tension de l'élément pendant un créneau de décharge de 50 A à T=20°C et SOC=100%.	99
Figure 4.7: Profil du courant et variation de la tension d'un élément lors de son identification à température constante	100

Figure 4.8: a) Résistance de décharge en fonction du DOD à 20°C pour différents niveaux de courant -.....	101
Figure 4.9 : Comparaison entre la tension mesurée et celle estimée :.....	101
Figure 4.10: Comparaison entre l'échauffement de l'élément et les pertes Joule estimées	103
Figure 5.1 : Exemple de profil de charge CCCV (1C – 4,2 V – C/20) [142].....	108
Figure 5.2 : Allure du courant (bas) et de la tension (haut) lors du boostcharging d'un élément Li-ion (courbes a et b) et lors d'une recharge standard CCCV (courbe c) [142].....	109
Figure 5.3 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC1	112
Figure 5.4 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC2	113
Figure 5.5 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC3	113
Figure 5.6 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC4	113
Figure 5.7 : Variation du SOC pendant une semaine typique avec le scénario SC5	114
Figure 5.8 : Températures moyennes mensuelles prises en compte dans l'estimation du vieillissement (ville de Nantes)	115
Figure 5.9 : Variation des indicateurs de vieillissement sur une durée de 4 ans pour chaque scénario (a) capacité – (b)résistance de décharge – (c) résistance de charge	116
Figure 5.10: Distribution du flux énergétique dans les différents composants d'un véhicule électrique	118
Figure 5.11 : Modèle de véhicule électrique sous AMESim.....	121
Figure 5.12 : Bloc moteur + convertisseur	122
Figure 5.13 : Cartographie du couple maximale déduite de la courbe de la puissance maximale	122
Figure 5.14. Composition du bloc conducteur + contrôleur	123
Figure 5.15 : Composition du bloc de transmission mécanique et de réduction de vitesse	124
Figure 5.16. Détail des entrées/sortie du bloc batterie	124
Figure 5.17. Modèle du pack batterie sous AMESim	125
Figure 5.18 : Comparaison des courants mesuré et simulé (modèle VE sous AMESim)	125
Figure 5.19 : Simulation de la vitesse du véhicule et du SOC batterie (profil de conduite agressive)	127
Figure 5.20 : Variation de l'autonomie (%) du VE au cours des années selon le scénario de recharge adopté ..	128
Figure 5.21 : Variation de la consommation (%) du VE aux cours des années et selon le scénario de recharge adapté	129

Table des tableaux

Tableau 1.1: Caractéristiques des matériaux d'électrodes négatives [4].....	14
Tableau 1.2: Matériaux d'insertion anodique [4].....	22
Tableau 2.1: Valeurs du courant maximal et de la température pour les tests de cyclage.....	64
Tableau 2.2: Conditions des tests de vieillissement calendaire.....	65
Tableau 2.3: Tableau récapitulatif des résultats de SVM.....	66
Tableau 3.1: Comparaison statistique entre les différents profils de conduite.....	79
Tableau 3.2: Paramètres du modèle de véhicule électrique utilisé.....	81
Tableau 3.3 : Comparaison des paramètres de la conduite normale et agressive.....	88
Tableau 4.1 : Caractéristiques des éléments testés.....	94
Tableau 4.2 : Succession des créneaux du profil d'identification.....	98
Tableau 5.1 : Facteurs de vieillissement en fonction des scénarios.....	115
Tableau 5.2 : Comparaison des valeurs remarquables des courants mesuré et simulé.....	126
Tableau 5.3 : Bilan des simulations réalisées à différents états de vieillissement pour les scénarios de recharge envisagés.....	127

Références bibliographiques

- [1] J. Perrin, "Le Programme Véhicules Electriques de l'Alliance Renault-Nissan", Dans *Forum de la CRE*, 2010.
- [2] Chademo, "Role of Fast Charging", 2013. [En Ligne]. Disponible: <http://www.chademo.com/wp/role/charging/>. [consulté: 23-02-2013].
- [3] L. NEGRE, "Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés »", 2011.
- [4] J. Robert & J. Alzieu, "Accumulateurs - Accumulateurs au lithium", *Tech. l'Ingénieur, Trait. Convert. Mach. électriques*, pp. 1–15, 2004.
- [5] D. Linden & T. B. Reddy, Eds., "*Handbook of batteries*", 3rd ed. McGraw-Hill, 2002.
- [6] G. Pistoia, "*Electric and Hybrid Vehicles - Power Sources, Models, sustainability, Infrastructure and the Market*", 1st ed. Elsevier, 2010.
- [7] G. E. Products, Ed., "*Rechargeable Batteries Applications Handbook*". Butterworth-Heinemann, 1998.
- [8] H. A. Kiehne, Ed., "*Battery Technology Handbook*", 2nd ed. Breckerfeld,, Germany: Expert Verlag, 2003.
- [9] D. Doerffel & S. Sharkh, "A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries", *J. Power Sources*, vol. 155, pp. 395–400, Jun. 2005.
- [10] W. X. Shen, C. C. Chan, E. W. C. Lo, & K. T. Chau, "Estimation of battery available capacity under variable discharge currents", *J. Power Sources*, vol. 103, no. February 2001, pp. 180–187, 2002.
- [11] Kokam, "SLPB (Superior Lithium Polymer Battery) Technical Specification", KD07-RD14-03, 2009.
- [12] M. Armand, "*Fast ion transport in solids: solid-state batteries and devices*". Amsterdam, London, New York: Elsevier, 1973, p. 665.
- [13] M. Armand, D. W. Murphy, J. Brodhead, & B. C. H. Steele, "*Materials for Advanced Batteries*". Plenum Press, 1980.
- [14] M. Lazzari & B. Scrosati, "A Cyclable Lithium Organic Electrolyte Cell Based on Two Intercalation Electrodes", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 127, no. 3, pp. 773–774, 1980.
- [15] Y. Nishi, "Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future", *J. Power Sources*, vol. 100, pp. 101–106, Nov. 2001.

- [16] J. M. Tarascon & M. Armand, "Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries.", *Nature*, vol. 414, no. 6861, pp. 359–67, Nov. 2001.
- [17] Z. Liu, A. Yu, & J. Y. Lee, "Synthesis and characterization of $\text{LiNi}_{(1-x-y)}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ as the cathode materials of secondary lithium batteries", *J. Power Sources*, vol. 81, pp. 416–419, 1999.
- [18] S.-Y. Chung, J. T. Bloking, & Y.-M. Chiang, "Electronically conductive phospho-olivines as lithium storage electrodes.", *Nat. Mater.*, vol. 1, no. 2, pp. 123–128, Oct. 2002.
- [19] K. Xu, "Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries.", *Chem. Rev.*, vol. 104, no. 10, pp. 4303–4418, Oct. 2004.
- [20] D. Aurbach, Y. Talyosef, B. Markovsky, E. Markevich, E. Zinigrad, L. Asraf, J. Gnanaraj, & H. Kim, "Design of electrolyte solutions for Li and Li-ion batteries: a review", *Electrochim. Acta*, vol. 50, no. 2–3, pp. 247–254, Nov. 2004.
- [21] B. Le Gorrec & C. Montella, "*Handbook of Electrochemical Impedance Spectroscopy: Electrical Circuits Containing CPEs*". 2011.
- [22] J.-P. Diard, B. Le Gorrec, & C. Montella, "EIS study of electrochemical battery discharge on constant load", *J. Power Sources*, vol. 70, pp. 78–84, 1998.
- [23] M. Montaru & S. Pelissier, "Frequency and Temporal Identification of a Li-ion Polymer Battery Model Using Fractional Impedance", *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. l'Institut Français du Pétrole*, vol. 65, no. 1, pp. 67–78, Nov. 2009.
- [24] EUCAR, "Specification of test Procedures for Hybrid electric Vehicle Traction Batteries", 1998.
- [25] M. Conte, F. V. Conte, I. D. Bloom, K. Morita, T. Ikeya, & J. R. Belt, "Ageing Testing Procedures on Lithium Batteries in an International Collaboration Context", Dans *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, 2010.
- [26] IEC, "Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 1: Performance testing", 62660-1, 2010.
- [27] X. Wang, M. Iyoda, T. Nishina, & I. Uchida, "Microelectrode investigation of the lithium redox behavior in plasticized polymer electrolytes", *J. Power Sources*, vol. 68, pp. 487–491, 1997.
- [28] B. Stiaszny, J. C. Ziegler, E. E. Krauß, J. P. Schmidt, & E. Ivers-Tiffée, "Electrochemical characterization and post-mortem analysis of aged $\text{LiMn}_2\text{O}_4\text{-Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2})\text{O}_2/\text{graphite}$ lithium ion batteries. Part I: Cycle aging", *J. Power Sources*, vol. 251, pp. 439–450, Apr. 2014.
- [29] B. Stiaszny, J. C. Ziegler, E. E. Krauß, M. Zhang, J. P. Schmidt, & E. Ivers-Tiffée, "Electrochemical characterization and post-mortem analysis of aged $\text{LiMn}_2\text{O}_4\text{-}$

- NMC/graphite lithium ion batteries part II: Calendar aging", *J. Power Sources*, vol. 258, pp. 61–75, Jul. 2014.
- [30] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, & M. Wohlfahrt-Mehrens, "Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study", *J. Power Sources*, vol. 262, pp. 129–135, Sep. 2014.
- [31] K. Vediappan, Y. N. Jo, S.-J. Park, H.-S. Kim, & C. W. Lee, "Analysis of Thermal Aging and Structural Stability of $\text{Li}[\text{Li}_x(\text{Ni}_{0.3}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.6})_{1-x}]\text{O}_2$ ($x = 0.11$) Cathode Active Material for Rechargeable Li-Ion Batteries", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 9S2, p. 09MB04, Sep. 2012.
- [32] J. Newman, K. E. Thomas, H. Hafezi, & D. R. Wheeler, "Modeling of lithium-ion batteries", *J. Power Sources*, vol. 119–121, pp. 838–843, Jun. 2003.
- [33] M. Doyle, "Comparison of Modeling Predictions with Experimental Data from Plastic Lithium Ion Cells", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 143, no. 6, p. 1890, 1996.
- [34] C. R. Pals & J. Newman, "Thermal Modeling of the Lithium / Polymer Battery", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 10, pp. 3282–3288, 1995.
- [35] B. Pattipati, C. Sankavaram, & K. R. Pattipati, "System Identification and Estimation Framework for Pivotal Automotive Battery Management System Characteristics", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. - Part C Appl. Rev.*, vol. 41, no. 6, pp. 869–884, 2011.
- [36] W. Junping, C. Quanshi, & C. Binggang, "Support vector machine based battery model for electric vehicles", *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 7–8, pp. 858–864, May 2006.
- [37] L. Chu, F. Zhou, & J. Guo, "Investigation of cycle life of li-ion power battery pack based on LV-SVM", *Simulation*, pp. 1602–1605, 2011.
- [38] A. Eddahech, O. Briat, N. Bertrand, J.-Y. Delétage, & J.-M. Vinassa, "Behavior and state-of-health monitoring of Li-ion batteries using impedance spectroscopy and recurrent neural networks", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 487–494, Nov. 2012.
- [39] M. Sarvi & M. a. S. Masoum, "A neural network model for Ni-Cd batteries", Dans *Proceedings of the 43rd International Universities Power Engineering Conference*, 2008, vol. 1, no. 2, pp. 1–5.
- [40] C. Cai, D. Du, Z. Liu, & H. U. A. Zhang, "Modeling And Identification Of Ni-Mh Battery Using Dynamic Neural Network", Dans *Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2002, no. November, pp. 1594–1600.
- [41] V. N. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory*, 2nd ed. New-York: Springer-Verlag, 1995.

- [42] S. Tufféry, "*Data Mining et statistique décisionnelle: L'intelligence dans les bases de données*". Editions TECHNIP, 2005, p. 379.
- [43] R. Saisset, "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques.", thèse de doctorat de l'INP Toulouse, 2004.
- [44] H. L. Chan & D. Sutanto, "A New Battery Model for use with Battery Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems", Dans *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference*, 2000, vol. 00, no. c, pp. 470–475.
- [45] M. Ceraolo, "New Dynamical Models of Lead – Acid Batteries", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 1184–1190, 2000.
- [46] Y. Kim & H. Ha, "Design of Interface Circuits With Electrical Battery Models", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 1, pp. 81–86, 1997.
- [47] J.-P. Cun, J.-N. Fiorina, M. Fraisse, & H. Mabboux, "The Experience Of a UPS Company in Advanced Battery Monitoring", Dans *Proceeding of IEEE 18th Telecommunications Energy Conference*, 1996, pp. 646–653.
- [48] M. Dubarry, N. Vuillaume, & B. Y. Liaw, "From Li-Ion Single Cell Model to Battery Pack Simulation", Dans *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Control Applications*, 2008, no. 808, pp. 708–713.
- [49] B. Y. Liaw, G. Nagasubramanian, R. G. Jungst, & D. H. Doughty, "Modeling of lithium ion cells — A simple equivalent-circuit model approach", *Solid State Ionics*, vol. 175, pp. 835 – 839, 2004.
- [50] M. W. Verbrugge & R. S. Conell, "Electrochemical and Thermal Characterization of Battery Modules Commensurate with Electric Vehicle Integration", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 149, no. 1, pp. A45–A53, 2002.
- [51] L. Gao, S. Liu, R. A. Dougal, & S. Member, "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation", *Packag. (Boston, Mass.)*, vol. 25, no. 3, pp. 495–505, 2002.
- [52] V. H. Johnson, "Battery performance models in ADVISOR", *Engineering*, vol. 110, pp. 321–329, 2002.
- [53] Z. M. Salameh, M. A. Casacca, & W. A. Lynch, "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 1, pp. 93–98, 1992.
- [54] M. A. Casacca & Z. M. Salameh, "Determination of Lead-Acid Battery Capacity Via Mathematical Modeling Techniques", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 7, no. 3, pp. 442–446, 1992.
- [55] V. H. Johnson, A. A. Pesaran, & B. Court, "Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries", Dans *Proceedings of the 17th Electric Vehicle Symposium*, 2000, pp. 1–15.

- [56] A. Capel, "Mathematical model for the representation of the electrical behaviour of a lithium cell", Dans *Proceedings of IEEE 32nd annual Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 2001, pp. 1976–1981.
- [57] M. Dubarry & B. Y. Liaw, "Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries", *J. Power Sources*, vol. 174, no. 2, pp. 856–860, Dec. 2007.
- [58] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-guth, & D. U. Sauer, "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy . II : Modelling", *J. Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5349–5356, 2011.
- [59] Environmental Idaho National Engineering and Laboratory, "FreedomCAR Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles", *DOE/ID-11069*, 2003.
- [60] LIBERAL, "Test Procedure 3rd Draft - Issue 2", *Lithium Batter. Eval. Res. - Accel. Life test Dir.*, 2004.
- [61] HELIOS, "Deliverable 3.2 : calendar & cycling ageing test procedures", *High energy Lithium-IOn Storage*, 2011.
- [62] D. of Energy, "PNGV Battery Test Manual", 2001.
- [63] W. Liu, C. Delacourt, C. Forgez, & S. Pelissier, "Study of graphite / NCA Li-ion Cell Degradation During Accelerated Aging Tests - Data Analysis of the SimStock Project", pp. 1–6, 2011.
- [64] USABC, "Electric Vehicle Battery Test Procedures - Rev. 2", *United States Adv. Batter. Consort.*, 1996.
- [65] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, & A. Hammouche, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries", *J. Power Sources*, vol. 147, pp. 269–281, Sep. 2005.
- [66] M. Dubarry, V. Svoboda, R. Hwu, & B. Y. Liaw, "Capacity and power fading mechanism identification from a commercial cell evaluation", *J. Power Sources*, vol. 165, pp. 566–572, 2007.
- [67] M. Montaru, "Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages", thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [68] P. Arora, R. E. White, & M. Doyle, "Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 145, no. 10, pp. 3647–3667, 1998.
- [69] M. Broussely, S. Herreyre, P. Biensan, P. Kasztejna, K. Nechev, & R. . Staniewicz, "Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions", *J. Power Sources*, vol. 97–98, pp. 13–21, Jul. 2001.

- [70] M. Broussely, "*Advances in Lithium-Ion Batteries*". Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 393–432.
- [71] M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme, P. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, & R. J. Staniewicz, "Main aging mechanisms in Li ion batteries", *J. Power Sources*, vol. 146, no. 1–2, pp. 90–96, Aug. 2005.
- [72] M. Broussely, M. Perelle, J. McDowall, G. Sarre, & J. Martaeng, "Lithium Ion : The Next Generation of Long Life Batteries - Characteristics , Life Predictions , and Integration into Telecommunication Systems", Dans *Telecommunications Energy Conference, 2000. INTELEC. Twenty-second International*, 2000, pp. 194–201.
- [73] M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, & J. Garche, "Aging mechanisms of lithium cathode materials", *J. Power Sources*, vol. 127, pp. 58–64, 2004.
- [74] Y. Wang, X. Guo, S. Greenbaum, J. Liu, & K. Amine, "Solid Electrolyte Interphase Formation on Lithium-Ion Electrodes: A Li Nuclear Magnetic Resonance Study", *Electrochem. Solid-State Lett.*, vol. 4, no. 6, pp. 68–70, 2001.
- [75] G. Dillenseger, "Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours", Université Montpellier II, 2004.
- [76] C. G. Motloch, T. C. Murphy, R. A. Sutula, & T. J. Miller, "Overview Of PNGV Battery Development And Test Programs", *2nd Int. Adv. Automot. Batter. Conf.*, 2002.
- [77] I. Bloom, B. W. Cole, J. J. Sohn, S. A. Jones, E. G. Polzin, V. S. Battaglia, G. L. Henriksen, C. Motloch, R. Richardson, T. Unkelhaeuser, D. Ingersoll, & H. L. Case, "An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells", *J. Power Sources*, vol. 101, pp. 238–247, 2001.
- [78] D. U. Sauer & H. Wenzl, "Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems—Using lead-acid batteries as example", *J. Power Sources*, vol. 176, no. 2, pp. 534–546, Feb. 2008.
- [79] H. Wenzl, I. Baring-gould, R. Kaiser, B. Yann, P. Lundsager, J. Manwell, A. Ruddell, & V. Svoboda, "Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery", *J. Power Sources*, vol. 144, pp. 373–384, 2005.
- [80] M. Doyle, T. F. Fuller, & J. Newman, "Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium / Polymer / Insertion Cell", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 6, pp. 1526–1533, 1993.
- [81] P. Ramadass, B. Haran, R. White, & B. N. Popov, "Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells", *J. Power Sources*, vol. 123, no. 2, pp. 230–240, Sep. 2003.
- [82] K. Smith, M. Earleywine, E. Wood, & A. Pesaran, "Comparison of Battery Life Across Real-World Automotive Drive-Cycles", Dans *Proceedings of the 7th Battery Power Conference*, 2011.

- [83] Mpoweruk.com, "Battery Life", <http://www.mpoweruk.com/life.htm>, 2005. [En Ligne]. Disponible : <http://www.mpoweruk.com/life.htm>. [Accessed: 01-Jan-2012].
- [84] L. Serrao, Z. Chehab, Y. Guezennec, & G. Rizzoni, "An Aging Model of Ni-MH Batteries for Hybrid Electric Vehicles", Dans *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2005, pp. 78–85.
- [85] A. Palmgren, "Durability of ball bearings", *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, vol. 68, pp. 339–341, 1924.
- [86] M. A. Miner, "Cumulative damage in fatigue", *J. Appl. Mech.*, vol. 12, pp. 159–164, 1945.
- [87] S. Zengah, "Comparative Study of Fatigue Damage Models Using Different Number of Classes Combined with the Rainflow Method", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 446–451, 2013.
- [88] Z. Hashin, "A Reinterpretation of the Palmgren-Miner Rule for Fatigue Life Prediction", *J. Appl. Mech.*, vol. 47, no. 2, p. 324, 1980.
- [89] a. Di Filippi, S. Stockar, S. Onori, M. Canova, & Y. Guezennec, "Model-based life estimation of Li-ion batteries in PHEVs using large scale vehicle simulations: An introductory study", *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2010.
- [90] T. Parthiban, R. Ravi, & N. Kalaiselvi, "Exploration of artificial neural network [ANN] to predict the electrochemical characteristics of lithium-ion cells", *Electrochim. Acta*, vol. 53, no. 4, pp. 1877–1882, Dec. 2007.
- [91] I. Li, W. Wang, S. Su, & Y. Lee, "A Merged Fuzzy Neural Network and Its Applications in Battery State-of-Charge Estimation", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 3, pp. 697–708, Sep. 2007.
- [92] A. Eddahech, O. Briat, & J.-M. Vinassa, "Neural Networks Based Model and Voltage Control for Lithium Polymer Batteries", Dans *Proceedings of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, 2011, pp. 645–650.
- [93] R. G. Jungst, G. Nagasubramanian, H. L. Case, B. Y. Liaw, A. Urbina, T. L. Paez, & D. H. Doughty, "Accelerated calendar and pulse life analysis of lithium-ion cells", *J. Power Sources*, vol. 121, pp. 870–873, 2003.
- [94] B. Y. Liaw, R. G. Jungst, G. Nagasubramanian, H. L. Case, & D. H. Doughty, "Modeling capacity fade in lithium-ion cells", *J. Power Sources*, vol. 140, pp. 157–161, 2005.
- [95] P. Singh, R. Vinjamuri, X. Wang, & D. Reisner, "Fuzzy logic modeling of EIS measurements on lithium-ion batteries", *Electrochim. Acta*, vol. 51, no. 8–9, pp. 1673–1679, Jan. 2006.

- [96] W. Junping, Q. Chen, & Y. Chen, "RBF Kernel Based Support Vector Machine with Universal Approximation and Its Application", Dans *Proceedings of the international Symposium on neural networks*, 2004, no. 2003, pp. 512–517.
- [97] INL, "Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicles", 2010.
- [98] K. Morita, M. Akai, & Hisashi Hirose, "Development of Cycle Life Test Profiles of Lithium-ion Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles", Dans *The 24th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, 2009.
- [99] A. Delaille, S. Grolleau, F. Duclaud, J. Bernard, R. Revel, S. Péliissier, E. Redondo-Iglesias, J.-M. Vinassa, A. Eddahech, C. Forgez, M. Kassem, S. Joly, D. Porcellato, P. Gyan, S. Bourlot, & M. Ouattara-Brigaudet, "Simcal project: calendar aging results obtained on a panel of 6 commercial Li-ion cells", Dans *224th ECS Meeting*, 2013.
- [100] G. Sébastien, M.-C. Belen, A. DELAILLE, P. GYAN, J.-M. VINASSA, O. BRIAT, & A. EDDAHECH, "the french SIMCAL research network for modelling of Energy Storage System calendar ageing in EVs and HEVs - EIS Analysis", Dans *221st ECS Meeting*, 2012, vol. 9, no. 2006.
- [101] J. Hafsaoui & F. Sellier, "Electrochemical model and its parameters identification tool for the follow up of batteries ageing", Dans *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, 2010, no. 12.
- [102] H. Al Jed, A. Mize, J.-M. Vinassa, & R. Simon, "Mathematical modeling of aging factors for Li-ion battery cells", Dans *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1–4.
- [103] V. N. Vapnik, "An Overview of Statistical Learning Theory", *IEEE Transactions Neural Networks*, vol. 10, no. 5, pp. 988–999, 1999.
- [104] T. B. Trafalis & H. Ince, "Support vector machine for regression and applications to financial forecasting", Dans *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks*, 2000, no. x, pp. 348–353.
- [105] J. Yan-xia, H. Wang, & Q.-F. Xie, "Classification Model of Companies ' Financial Performance Based on Integrated Support Vector Machine", Dans *Proceedings of the 16th International Conference on Management Science & Engineering*, 2009, pp. 1322–1328.
- [106] M. Pontil & A. Verri, "Support Vector Machines for 3D Object Recognition", *IEEE Trans. Pattern Anal. Intell.*, vol. 20, no. 6, pp. 637–646, 1998.
- [107] N. Dalal & B. Triggs, "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection", Dans *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 2005, vol. 1, pp. 886–893.
- [108] R. L. Cilibrasi & P. M. B. Vitanyi, "The Google Similarity Distance", *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 370–383, 2007.

- [109] M. Ezzeddinne, N. Lefebvre, & R. Lengellé, "An Exact Solution to Support Vector Mixture", *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 27, pp. 241–245, 2007.
- [110] Jacob Cohen, "*Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*". Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1988, pp. 273–406.
- [111] B. Y. Liaw & M. Dubarry, "From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation", *J. Power Sources*, vol. 174, no. 1, pp. 76–88, Nov. 2007.
- [112] J. Groot, "Statistic Method for Extraction of Synthetic Load Cycles for Cycle life Tests of HEV Li-ion Batteries", Dans *Proceedings of the 24th IEEE electric Vehicles Symposium*, 2009.
- [113] S. Shahidinejad, E. Bibeau, & S. Filizadeh, "Statistical Development of a Duty Cycle for Plug-in Vehicles in a North American Urban Setting Using Fleet Information", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 8, pp. 3710–3719, Oct. 2010.
- [114] M. André, "The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions", *Sci. Total Environ.*, vol. 334–335, pp. 73–84, Dec. 2004.
- [115] R. Joumard, M. André, R. Vidon, P. Tassel, & C. Pruvost, "Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières", 1999.
- [116] P. de Haan & M. Keller, "Real-world driving cycles for emission measurements : ARTEMIS and Swiss cycles", 2001.
- [117] E. Tzirakis, K. Pitsas, F. Stournas, & S. Zannikos, "Vehicle Emissions And Driving Cycles: Comparison Of The Athens Driving Cycle (ADC) With Ece-15 And European Driving Cycle (EDC)", *Glob. NEST J.*, vol. 8, no. 3, pp. 282–290, 2006.
- [118] H. AL Jed, A. Mieke, R. Simon, & J. Vinassa, "An electric vehicle model and a driving cycle for mail delivery use", Dans *Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011.
- [119] P. Degobert, "*Automobile et pollution*". Editions OPHRYS, 1992, p. 516.
- [120] T. J. Barlow, S. Latham, I. S. Mccrae, & P. G. Boulter, "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions", 2009.
- [121] DieselNet, "Emission Test Cycles: Japanese 10-15 Mode", 2013. .
- [122] M. Dubarry, V. Svoboda, R. Hwu, & B. Y. Liaw, "A roadmap to understand battery performance in electric and hybrid vehicle operation", *J. Power Sources*, vol. 174, no. 2, pp. 366–372, Dec. 2007.
- [123] DieselNet, "Emission Test Cycles: Japanese JC08 Cycle", 2014. .

- [124] K. Brundell-Freij & E. Ericsson, "Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns", *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 10, no. 3, pp. 213–229, May 2005.
- [125] M. Ehsani, Y. Gao, & A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid electric, and Fuel cell Vehicles - fundamentals, Theory, and Design*, 2nd ed. Taylor and Francis Group, 2010.
- [126] K. Popp & W. Schiehlen, *Ground Vehicle Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [127] O. Briat, "Contribution à la conception et à l'intégration d'un accumulateur cinétique d'énergie dans une plate-forme de test pour véhicules électriques à source hybride", thèse de doctorat de l'Université Bordeaux 1, 2002.
- [128] N. Barnier & P. Brisset, "Optimisation par algorithme génétique sous contraintes", *Tech. Sci. Informatiques*, vol. 18, no. 1, pp. 1–29, 1999.
- [129] N. F. Mcphee & W. B. Langdon, *Field Guide to Genetic Programming A Field Guide to Genetic Programming*. 2008.
- [130] A. Zerbinati, "Algorithme à gradients multiples pour l'optimisation multiobjectif en simulation de haute fidélité Application à l'aérodynamique compressible", Université de Nice-Sophia Antipolis, 2013.
- [131] L. Song & J. W. Evans, "Electrochemical-Thermal Model of Lithium Polymer Batteries", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 147, no. 6, pp. 2086–2095, 2000.
- [132] W. Fang, O. J. Kwon, & C. Wang, "Electrochemical – thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three-electrode cell", *Int. J. Energy Res.*, vol. 34, pp. 107–115, 2010.
- [133] D. Bernardi, E. Pawlikowski, & J. Newman, "A General Energy Balance for Battery Systems", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 10, pp. 5–12, 1985.
- [134] W. B. Gu & C. Y. Wang, "Thermal-Electrochemical Coupled Modeling of Lithium-Ion cell", Dans *ECS Proceedings*, 2000, pp. 748–762.
- [135] W. B. Gu & C. Y. Wang, "Thermal-Electrochemical Modeling of Battery Systems", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 147, no. 8, pp. 2910–2922, 2000.
- [136] V. Srinivasan & C. Y. Wang, "Analysis of Electrochemical and Thermal Behavior of Li-Ion Cells", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 150, no. 11, pp. 98–106, 2003.
- [137] N. Sato, "Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles", *J. Power Sources*, vol. 99, pp. 70–77, 2001.
- [138] S. Al-Hallaj, R. Venkatachalapathy, J. Prakash, & J. R. Selman, "Entropy Changes Due to Structural Transformation in the Graphite Anode and Phase Change of the LiCoO₂ Cathode", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 147, no. 7, pp. 2432–2436, 2000.

- [139] S. Al-hallaj & J. R. Selman, "Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle / hybrid electric vehicle applications", *J. Power Sources*, vol. 110, pp. 341–348, 2002.
- [140] V. Svoboda, "Batteries: Fast Charging", Dans *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 2009, pp. 434–442.
- [141] C. Peutot, "Chargeurs de batteries", *Tech. l'ingénieur*, vol. e3 994, 2001.
- [142] P. H. L. Notten, J. H. G. O. H. Veld, & J. R. G. Van Beek, "Boostcharging Li-ion batteries: A challenging new charging concept", *J. Power Sources*, vol. 145, no. 1, pp. 89–94, Jul. 2005.
- [143] R. N. Methekar, V. Ramadesigan, R. D. Braatz, V. R. Subramanian, & S. Louis, "Optimum Charging Profile for Lithium-ion Batteries to Maximize Energy Storage and Utilization", *ECS Trans.*, vol. 25, no. 35, pp. 139–146, 2010.
- [144] P. M. Novak, D. A. Wetz, & B. Shrestha, "Fast Recharge of Electrochemical Energy Storage Devices at Pulsed Elevated Rates", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 40, no. 10, pp. 2416–2424, Oct. 2012.
- [145] F. Savoye, "Impact des impulsions périodiques de courant sur la performance et la durée de vie des accumulateurs lithium-ion et conséquences de leur mise en œuvre dans une application transport", Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [146] Nantes-meteo.fr, "Nantes Météo", 2013. .
- [147] A. Smola, "Regression Estimation with Support Vector Learning Machines", 1996.
- [148] A. Smola, "Learning with kernels", Technischen Universitat Berlin, 1998.
- [149] H. W. Kuhn & A. W. Tucker, "Nonlinear Programming", Dans *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1951.

➤ Annexes

➤ SVM

1 - Régression linéaire

L'approximation linéaire de la fonction $y = f(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \chi$ nous amène à choisir $\mathbf{w} \in \chi$ et $b \in \mathcal{R}$ tel que :

Expression I

$$f(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

où $\langle \cdot, \cdot \rangle$ constitue un produit scalaire

- **Critère d'optimisation**

Il existe plusieurs critères de performances pour déterminer la solution optimale. Nous allons considérer ici le cas où l'on souhaite trouver une fonction $f(\mathbf{x})$ qui possède au plus un écart ε par rapport à y , tout en choisissant la fonction la plus régulière possible. Le choix de cette fonction la plus régulière possible se traduit par la minimisation de $\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2$ [103].

Le problème se ramène donc à un problème de minimisation quadratique et consiste à minimiser le terme $\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2$ sous les contraintes :

Expression II :

$$\|y_i - (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b)\| \leq \varepsilon, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Expression III :

$$(\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - y_i \leq \varepsilon, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Ces deux expressions définissent un « tube » comme l'illustre la Fig. I, de largeur 2ε , et dans lequel nous souhaitons que les observations se trouvent.

Les contraintes (Expression II et Expression III) ne peuvent pas être toujours vérifiées, les observations ne peuvent pas toujours se situer à l'intérieur du tube. Une solution

à ce problème sera donc de tolérer l'existence d'un certain nombre d'observations à l'extérieur du tube en les pénalisant.

Une fonction coût nommée ε -insensitive et notée $|\cdot|_\varepsilon$ a été proposée pour pénaliser ces points par Smola [147], [148]. Cette fonction coût possède la forme décrite à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** .

On a :

Expression IV

$$|y - f(\mathbf{x})|_\varepsilon = 0 \quad \text{si } |y - f(\mathbf{x})| \leq \varepsilon$$

Expression V

$$|y - f(\mathbf{x})|_\varepsilon = |y - f(\mathbf{x})| - \varepsilon \quad \text{ailleurs}$$

La pénalisation des points en dehors du tube est illustrée à la Fig. I.

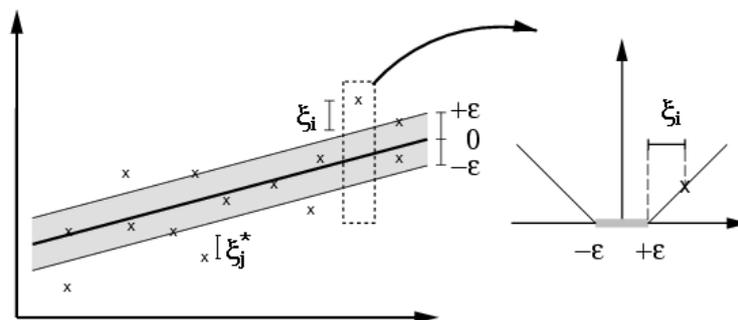


Fig. I : Pénalisation des points en dehors du tube par la fonction ε -Insensitive [148]

L'introduction de cette nouvelle hypothèse tolérant l'existence d'observations à l'extérieur du tube se traduit par l'écriture du problème primal sous sa forme la plus générale suivante :

Expression VI

$$\text{Minimiser } \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*)$$

Sous les contraintes :

Expression VII

$$y_i - (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) \leq \varepsilon + \xi_i, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Expression VIII

$$(\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Expression IX

$$\xi_i \geq 0, \quad \xi_i^* \geq 0, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Il s'agit donc d'un problème de minimisation quadratique sous contraintes.

- **Problème primal :**

Afin de minimiser l'Expression VI sous les contraintes décrites par les Expression VII, Expression VIII et Expression IX il faut introduire les paramètres de Lagrange $(\alpha_i, \alpha_i^*, \beta_i, \beta_i^*)$. Le Lagrangien associé au problème primal sera :

Expression X

$$\begin{aligned} L(\mathbf{w}, b; \boldsymbol{\alpha}^{(*)}, \boldsymbol{\beta}^{(*)}, \boldsymbol{\xi}^{(*)}) = & \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^n (\beta_i \xi_i + \beta_i^* \xi_i^*) \\ & - \sum_{i=1}^n \alpha_i (\varepsilon + \xi_i - (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b)) \\ & - \sum_{i=1}^n \alpha_i^* (\varepsilon + \xi_i^* + (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b)) \end{aligned}$$

Les paramètres de Lagrange introduits sont positifs ou nuls, il faut minimiser le Lagrangien par rapport à $\mathbf{w}, b, \boldsymbol{\xi}$ et le maximiser par rapport aux multiplicateurs de Lagrange. Le problème dual s'exprime alors de la façon suivante :

Expression XI

$$\max_{\boldsymbol{\alpha}^{(*)}, \boldsymbol{\beta}^{(*)}} W(\boldsymbol{\alpha}^{(*)}, \boldsymbol{\beta}^{(*)}) = \max_{\boldsymbol{\alpha}^{(*)}, \boldsymbol{\beta}^{(*)}} \left[\min_{\mathbf{w}, b, \boldsymbol{\xi}^{(*)}} L(\mathbf{w}, b, \boldsymbol{\xi}^{(*)}; \boldsymbol{\alpha}^{(*)}, \boldsymbol{\beta}^{(*)}) \right]$$

La notation (*) indique que l'équation dans laquelle apparaît (.)(*) doit être vérifiée pour les variables (.) et (.)*.

En minimisant le Lagrangien par rapport aux paramètres $\mathbf{w}, b, \boldsymbol{\xi}$, on obtient les conditions d'optimalité suivantes :

Expression XII

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} = 0 \Rightarrow \mathbf{w} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \mathbf{x}_i$$

Expression XIII

$$\frac{\partial L}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0$$

Expression XIV

$$\frac{\partial L}{\partial \xi_i^{(*)}} = 0 \Rightarrow \alpha_i^{(*)} + \beta_i^{(*)} = C$$

• **Problème dual :**

En introduisant les conditions d'optimalité dans les Expression XII, Expression XIII Expression XIV dans le Lagrangien (Expression X), puis en réintroduisant le résultat dans l'Expression XI, le problème dual devient de maximiser :

Expression XV

$$-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i$$

Donc de minimiser :

Expression XVI

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle + \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) - \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i$$

Sous les contraintes suivantes:

Expression XVII

$$0 \leq \alpha_i^{(*)} \leq C, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Expression XVIII

$$\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0$$

• **Paramètres de l'hyperplan optimal et conditions de Karush-Kuhn-Tucker :**

Cette résolution donne accès aux valeurs des multiplicateurs de Lagrange (α_i, α_i^*) qui, introduits dans l'Expression XII, conduisent au paramètre \mathbf{w} optimal.

Expression XIX

$$\mathbf{w}^{opt} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{opt} - \alpha_i^{opt*}) \mathbf{x}_i$$

L'hyperplan optimal a pour équation. $f(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}^{opt}, \mathbf{x} \rangle + b^{opt}$. Il reste donc à déterminer b^{opt} pour résoudre le problème d'optimisation.

En effet le paramètre b^{opt} ne peut pas être déterminé à partir de la résolution du problème dual (Expression XV - Expression XVIII). Pour le calculer, il faut exploiter les conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [149]. Ces conditions indiquent qu'à l'optimum, les produits des multiplicateurs de Lagrange $(\alpha_i, \alpha_i^*, \beta_i, \beta_i^*)$ avec les contraintes correspondantes (Expression VII - Expression IX) doivent s'annuler, ce qui se traduit par :

$$\alpha_i (\varepsilon + \xi_i - (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b)) = 0$$

$$\alpha_i^* (\varepsilon + \xi_i^* + (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b)) = 0$$

$$\beta_i \xi_i = 0$$

$$\beta_i^* \xi_i^* = 0$$

Or, on a $\alpha_i^{(*)} + \beta_i^{(*)} = C$ d'après l'Expression XIV, ce qui mène à :

Expression XX

$$\alpha_i (\varepsilon + \xi_i - (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b)) = 0$$

Expression XXI

$$\alpha_i^* (\varepsilon + \xi_i^* + (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b)) = 0$$

Expression XXII

$$(C - \alpha_i) \xi_i = 0$$

Expression XXIII

$$(C - \alpha_i^*) \xi_i^* = 0$$

Ces conditions (KKT) permettent de faire quelques conclusions :

- Seuls les individus ayant des multiplicateurs de Lagrange $\alpha_i^{(*)} = C$ peuvent être à l'extérieur du tube ($\xi_i^{(*)} > 0$).
- Pour tous les individus, le produit $\alpha_i \alpha_i^*$ est nul, donc si l'un est non nul, l'autre sera nécessairement nul, ou encore les deux seront nuls.
- D'après les Expression XX et Expression XXI, les points qui sont à l'intérieur du tube possèdent nécessairement les deux multiplicateurs de Lagrange nuls.
- Finalement pour $\alpha_i^{(*)} \in]0, C[$, les écarts $\xi_i^{(*)}$ (Expression XXII et Expression XXIII) s'annulent, d'autre part le second facteur des Expression XX et Expression XXI s'annule, ce qui signifie que les points correspondants sont exactement sur le tube. Un tel individu sera sur la borne supérieure du tube si le multiplicateur α_i est non nul et sur la borne inférieure si α_i^* est non nul :

$$\alpha_i^{(*)} \in]0, C[\text{ et les Expression XX et Expression XXI} \Rightarrow \xi_i^{(*)} = 0$$

$$\alpha_i \in]0, C[\text{ et } \xi_i = 0 \text{ et l'Expression XVIII} \Rightarrow \varepsilon - (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b) = 0$$

$$\alpha_i^* \in]0, C[\text{ et } \xi_i = 0 \text{ et l'Expression XIX} \Rightarrow \varepsilon + (y_i - \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b) = 0$$

Les vecteurs supports seront les individus à multiplicateurs de Lagrange non nuls.

La répartition des points par rapport à l'hyperplan séparateur et aux deux hyperplans constituant le tube est donc parfaitement connue grâce aux valeurs des multiplicateurs de Lagrange. Le calcul de b permet la détermination complète de l'hyperplan optimal. Il sera fait à partir des points situés sur le tube, on a donc :

Expression XXIV

$$b^{opt} = y_i - \langle \mathbf{w}^{opt}, \mathbf{x}_i \rangle - \varepsilon \text{ si } \alpha_i \in]0, C[$$

Expression XXV

$$b^{opt} = y_i - \langle \mathbf{w}^{opt}, \mathbf{x}_i \rangle + \varepsilon \text{ si } \alpha_i^* \in]0, C[$$

La solution par machine à vecteurs supports se caractérise par le fait qu'elle est parcimonieuse car le nombre de vecteurs supports, qui définit la complexité de la solution, est faible par rapport au nombre d'observations. En effet, les points à l'intérieur du tube sont à multiplicateurs de Lagrange nuls et ne contribuent pas à la détermination finale de la solution (calcul de w^{opt} et b^{opt}). Cette caractéristique provient directement de l'utilisation de la fonction ε -sensitive comme fonction coût.

2 - Régression non-linéaire

Nous allons maintenant considérer l'approximation de fonctions non linéaires. On introduit une fonction $\Phi : \mathcal{R}^d \rightarrow H$, qui projette les données de l'espace initial dans l'espace des caractéristiques, de dimension plus grande où une régression linéaire sera possible. Le problème sera considéré comme un problème de régression linéaire classique, il suffit de remplacer x_i par $\Phi(x_i)$.

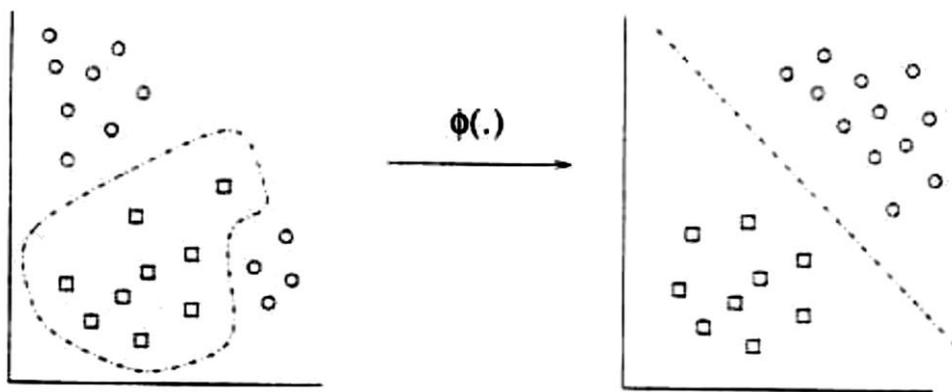


Fig. II : Projection des entrées dans un hyperplan de plus grande dimension, à l'aide de la fonction $\Phi(\cdot)$, pour se ramener au cas linéaire

En appliquant ce critère SVM dans l'espace transformé, le problème à résoudre est le suivant :

Expression XXVI

$$\triangleright \text{Minimiser } \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*)$$

Sous les contraintes suivantes:

Expression XXVII

$$y_i - (\langle w, \Phi(x_i) \rangle + b) \leq \varepsilon + \xi_i, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Expression XXVIII

$$(\langle \mathbf{w}, \Phi(\mathbf{x}_i) \rangle + b) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Expression XXIX

$$\xi_i \geq 0, \quad \xi_i^* \geq 0, \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

Ce problème se résout d'une façon classique en introduisant les paramètres de Lagrange. Le problème dual revient à minimiser:

Expression XXX

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) \langle \Phi(\mathbf{x}_i), \Phi(\mathbf{x}_j) \rangle + \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) - \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i$$

Sous les mêmes contraintes que dans le cas linéaire, décrites par les Expression XVII Expression XVIII. Il n'est pas nécessaire d'identifier Φ pour réaliser la régression non linéaire présentée ci-dessus. Il suffit en effet de sélectionner un noyau K et de considérer la formulation suivante :

Expression XXXI

Minimiser

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) k(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) + \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) - \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i$$

Sous les contraintes décrites par les Expression XXVII à Expression XXIX, le problème revient à une minimisation quadratique sous contraintes similaire à celui décrit par l'Expression XVI. Sa résolution permet d'obtenir les valeurs des $\alpha_i^{(*)}$ et puis \mathbf{w}^{opt} :

Expression XXXII

$$\mathbf{w}^{opt} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{opt} - \alpha_i^{opt*}) \Phi(\mathbf{x}_i)$$

Expression XXXIII

$$f(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}^{opt}, \Phi(\mathbf{x}) \rangle + b^{opt}$$

En introduisant \mathbf{w}^{opt} dans $f(\mathbf{x})$ on obtient :

Expression XXXIV

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{opt} - \alpha_i^{opt*}) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b^{opt}$$

Le calcul de b^{opt} est traité de la même façon que dans le cas linéaire à partir des vecteurs supports qui se trouvent sur le tube :

Expression XXXV

$$b^{opt} = y_i - \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{opt} - \alpha_i^{opt*}) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \varepsilon \text{ si } \alpha_j \in]0, C[$$

Expression XXXVI

$$b^{opt} = y_i - \sum_{i=1}^n (\alpha_i^{opt} - \alpha_i^{opt*}) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + \varepsilon \text{ si } \alpha_j^* \in]0, C[$$

En pratique b^{opt} sera calculé à partir de tous les vecteurs supports qui se trouvent sur le tube et une moyenne sera faite pour minimiser l'erreur de calcul.

Finalement, la résolution du problème de régression non linéaire s'est transformée en une régression linéaire grâce à l'astuce du noyau, qui en lui-même fait la force des machines à vecteurs supports.