



Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité

Arnaud Devie

► To cite this version:

Arnaud Devie. Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité. Energie électrique. Université Claude Bernard - Lyon I, 2012. Français. NNT: . tel-00783338

HAL Id: tel-00783338

<https://theses.hal.science/tel-00783338v1>

Submitted on 31 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 231-2012

Année 2012

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON

Délivrée par

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

ÉCOLE DOCTORALE EEA
ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE,
AUTOMATIQUE DE LYON

DIPLÔME DE DOCTORAT
Mention : GEP

(arrêté du 7 août 2006)

soutenue publiquement le 13 novembre 2012

par

Arnaud Devie

Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides.

Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité

Thèse dirigée par Pascal Venet et Serge Pelissier

préparée conjointement au laboratoire Ampère, UCBL et au LTE, IFSTTAR



JURY

<i>Rapporteurs :</i>	Stephan ASTIER	- LAPLACE (Toulouse)
	Stéphane RAËL	- GREEN (Nancy)
<i>Président :</i>	Bernard MULTON	- SATIE (ENS Cachan - Bretagne)
<i>Examineurs :</i>	Elie DURCIK	- EDF R&D
	Emmanuel BOUTLEUX	- AMPERE (Lyon)
<i>Directeurs :</i>	Pascal VENET	- AMPERE (Lyon)
	Serge PÉLISSIER	- IFSTTAR (Bron)

Mahalo

Un grand mahalo¹ à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux de thèse. Je pense en premier lieu à mes directeurs de thèse, Pascal Venet et Serge Pélissier, qui ont pensé le sujet de thèse et apporté leurs connaissances afin de mettre ces travaux sur les bons rails. Je souhaite à tous les doctorants d’avoir un duo d’encadrant aussi agréable. Je pense aussi à Maxime Montaru dont les travaux ont lancé les miens.

Mahalo également à toutes les personnes qui ont pu répondre à nos interrogations dans les champs disciplinaires abordés par ces travaux. Je pense ici notamment à Guy Clerc et Emmanuel Boutleux d’AMPERE, Allou Samé et Etienne Come de l’IFSTTAR.

Mahalo aux ingénieurs qui ont apporté leur soutien technique à cette thèse, Eduardo Redondo-Iglesias et Bruno Jeanneret de l’IFSTTAR, Pascal Bevilacqua d’AMPERE.

Mahalo aussi à Alaa Hijazi, Nordine Maherzi et Anne-Laure Allègre dont les travaux m’ont servi pour concevoir l’une des réalisations de cette thèse.

Mahalo aux dizaines de membres d’AMPERE et de l’IFSTTAR qui se sont portés volontaires pour me permettre de réaliser les enregistrements d’usage réel sur les vélos à assistance électrique, ainsi qu’à Gilles Rousseau d’Irisbus pour le partage des données du projet Hybus.

Aloha² à tous mes collègues d’AMPERE et de l’IFSTTAR.

Aloha en particulier à ceux avec qui j’ai partagé un bureau, Jean-Pierre Roumégoux, jeune retraité de l’IFSTTAR, et Thibault Chailloux, Oualid Messal, An Li, Alaa Hilal, Jonathan et Yanis.

Enfin, mahalo à la Région Rhône-Alpes pour le soutien financier accordé qui nous a permis de conduire sereinement nos travaux de recherche.

Je dédie ce manuscrit à ma famille.

Aloha...

1. Mahalo = merci en hawaïen

2. Aloha = salut en hawaïen

TITRE

Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité.

RESUME

De nouvelles architectures de traction (hybride, électrique) entrent en concurrence avec les motorisations thermiques conventionnelles. Des batteries Lithium-ion équipent ces véhicules innovants. La durabilité de ces batteries constitue un enjeu majeur mais dépend de nombreux paramètres environnementaux externes. Les outils de prédiction de durée de vie actuellement utilisés sont souvent trop simplificateurs dans leur approche.

L'objet de ces travaux consiste à caractériser les conditions d'usage de ces batteries (température, tension, courant, SOC et DOD) afin d'étudier avec précision la durée de vie que l'on peut en attendre en fonction de l'application visée. Différents types de véhicules électrifiés (vélos à assistance électrique, voitures électriques, voitures hybrides, et trolleybus) ont été instrumentés afin de documenter les conditions d'usage réel des batteries. De larges volumes de données ont été recueillis puis analysés au moyen d'une méthode innovante qui s'appuie sur la classification d'impulsions de courant par l'algorithme des K-means et la génération de cycles synthétiques par modélisation par chaîne de Markov.

Les cycles synthétiques ainsi obtenus présentent des caractéristiques très proches de l'échantillon complet de données récoltées et permettent donc de représenter fidèlement l'usage réel. Utilisés lors de campagnes de vieillissement de batteries, ils sont susceptibles de permettre l'obtention d'une juste prédiction de la durée de vie des batteries pour l'application considérée. Plusieurs résultats expérimentaux sont présentés afin d'étayer la pertinence de cette approche.

MOTS CLES

Véhicule électrique, véhicule hybride, classification, partitionnement, K-means, chaîne de Markov, cycle synthétique, impulsion de courant, batteries Lithium-ion, durée de vie, analyse de l'usage, vieillissement.

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE

Ampère UMR CNRS 5005
UCBL, Bat. Omega 3ème
43, boulevard du 11 Novembre 1918
69622 Villeurbanne Cedex, France

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE D'ACCUEIL

IFSTTAR Bron - LTE
25, av. François Mitterrand, Case24
69675 Bron Cedex, France

TITLE

Characterization of Lithium-ion batteries usage in electric and hybrid electric vehicles applications.

ABSTRACT

Lithium-ion batteries are being used as energy storage systems in recent electric and hybrid electric vehicles coming to market. Current cycle-life estimation techniques show evidence of discrepancy between laboratory results and real-world results.

This work is aimed at characterizing actual battery usage in electrified transportation applications. Factors such as temperature, State Of Charge, Depth Of Discharge, current and voltage have to be carefully considered for accurate cycle-life prediction within a given application. Five electrified vehicles have been studied (two electric bicycles, one light EV, one mainstream HEV and one Heavy-Duty trolleybus). These vehicles have been equipped with sensors and data-logger and then test-driven on open roads under real-world conditions. Large amounts of data have been stored and later processed through an innovative method for analysis of actual usage. This method relies on data mining based on K-means clustering and synthetic duty cycle generation based on Markov chain modeling.

Resulting synthetic cycles exhibit features similar to those observed on the large original datasets. This enables accurate prediction of cycle-life through realistic ageing trials of Lithium-ion batteries. Several experimental results are presented in order to assess the fitness of this method.

KEYWORDS

EV, HEV, classification, data clustering, K-means, Markov chain, duty profile, synthetic cycle, duty pulse, Lithium-ion batteries, cycle-life, usage analysis, ageing.

LABORATORY NAME AND ADDRESS

Ampère UMR CNRS 5005
UCBL, Bat. Omega 3ème
43, boulevard du 11 Novembre 1918
69622 Villeurbanne Cedex, France

HOST LABORATORY NAME AND ADDRESS

IFSTTAR Bron - LTE
25, av. François Mitterrand, Case24
69675 Bron Cedex, France

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Importance de la mobilité	1
1.1.1	Collective	2
1.1.2	Individuelle	2
1.1.3	Indirecte	3
1.2	La contrainte énergétique et matérielle	5
1.2.1	L'avenir des énergies fossiles	6
1.2.1.1	Pétrole	6
1.2.1.2	Autres carburants	8
1.2.2	Production électrique	11
1.2.3	Minerais	12
1.2.3.1	Les Métaux du Génie Electrique	13
1.2.3.2	Les Terres rares	13
1.2.3.3	Les Autres matériaux requis	14
1.3	Conclusion et motivation du travail de thèse	15
2	Fondements	17
2.1	Systèmes de stockage de l'énergie électrique	17
2.1.1	Batteries	17
2.1.1.1	Fonctionnement	18
2.1.1.2	Matériaux d'anode	22
2.1.1.3	Matériaux de cathode	23
2.1.1.4	Electrolytes, séparateur et additifs	23
2.1.1.5	Opportunité économique	24
2.1.2	Supercondensateurs	27
2.1.3	Autres dispositifs	28
2.2	Architectures véhicules	30
2.2.1	Hybrides (VEH)	31
2.2.2	Electriques (VE)	32
2.3	Vieillessement et fiabilité	34
2.3.1	Champs d'application	34
2.3.2	Cas des batteries	36
2.3.2.1	Influence de la température ambiante	39
2.3.2.2	Influence de la profondeur de décharge (DOD)	42
2.3.2.3	Influence de l'état de charge (SOC)	44
2.3.2.4	Influence du protocole de charge	46
2.3.2.5	Influence du niveau de courant	47
2.3.2.6	Composition des matériaux actifs	48
2.3.2.7	Composition de l'électrolyte	48
2.3.2.8	Influences croisées	49
2.3.2.9	Conclusions	50
2.4	Modélisation de l'usage	51
2.4.1	Besoins	51
2.4.2	Cycles normalisés	51
2.4.2.1	Cycles réglementaires	51

2.4.2.2	Cycles représentatifs de l'usage	53
2.4.2.3	Cas des véhicules électrifiés	54
2.4.3	Approches existantes	56
2.5	Conclusion	61
3	Méthodes	63
3.1	Recueil de données	65
3.1.1	Instrumentation	67
3.2	Préparation des données	70
3.3	Classification	73
3.3.1	Choix de la distance	74
3.3.2	Choix du nombre de classes	74
3.3.3	Résultat de la classification	75
3.4	Reconstruction de cycle	79
3.4.1	Modélisation par chaîne de Markov	79
3.4.2	Application aux profils de courant	81
3.4.2.1	Analyse statistique des transitions	81
3.4.2.2	Chaîne de Markov	82
3.4.2.3	Génération de séquences	84
3.5	Conclusion	85
4	Résultats	87
4.1	Vélos à assistance électrique	88
4.1.1	Assistance fixe - moteur roue	88
4.1.1.1	Description du véhicule	88
4.1.1.2	Description de l'expérimentation	89
4.1.1.3	Sollicitations typiques	91
4.1.1.4	Cycles représentatifs	94
4.1.2	Assistance proportionnelle - système Panasonic	98
4.1.2.1	Description du véhicule	98
4.1.2.2	Description de l'expérimentation	99
4.1.2.3	Sollicitations typiques	100
4.1.2.4	Cycles représentatifs	104
4.1.3	Conclusions	107
4.2	Véhicules électriques	109
4.2.1	Quadricycle urbain - Aixam Megacity	109
4.2.1.1	Description du véhicule	109
4.2.1.2	Description de l'expérimentation	110
4.2.1.3	Sollicitations typiques	112
4.2.1.4	Cycles représentatifs	120
4.3	Véhicules hybrides	123
4.3.1	Toyota Prius	123
4.3.1.1	Description du véhicule	124
4.3.1.2	Description de l'expérimentation	125
4.3.1.3	Sollicitations typiques	125
4.3.1.4	Cycles représentatifs	134
4.4	Véhicules lourds	137
4.4.1	Trolleybus Irisbus	137
4.4.1.1	Description du véhicule	137

4.4.1.2	Description de l'expérimentation	138
4.4.1.3	Sollicitations typiques	139
4.4.1.4	Cycles représentatifs	144
4.5	Conclusion	146
5	Validation Expérimentale	147
5.1	Etudes individuelles sur les impulsions	147
5.1.1	Comparaison de trois impulsions	150
5.1.2	Influence de la forme	152
5.1.3	Influence de la température	156
5.1.4	Influence du niveau de courant	157
5.2	Apport potentiel des Super-Condensateurs	159
5.3	Cas appliqué	161
6	Conclusion	167
6.1	Conclusions générales	167
6.2	Perspectives	168
A	Simulation de rentabilité économique et durabilité associée	171
A.1	Hypothèses	171
A.2	2012	173
A.2.1	Voiture	173
A.2.2	Deux roues	176
A.3	2020	178
A.4	Conclusion	181
B	Revue bibliographique de la dégradation des batteries Lithium-ion	183
B.1	Influence de la température	183
B.2	Influence de la profondeur de décharge (DOD)	186
B.3	Influence de l'état de charge (SOC)	187
B.4	Influence de la tension de charge	188
B.5	Influence du niveau de courant	189
C	Cycles normalisés dans le domaine du transport	191
C.1	Cycles US	192
C.2	Cycles Europe	196
C.3	Cycles Japon	197
C.4	Cycles Chine	198
C.5	Uniformisation	199
C.6	Véhicules Lourds	200
C.7	Récapitulatif	203
D	Détails des paramètres utilisés pour l'analyse des différents véhicules	205
D.1	Vélos à assistance électrique	206
D.1.1	Assistance fixe - moteur roue	206
D.1.2	Assistance proportionnelle - système Panasonic	207
D.2	Véhicules électriques	208
D.2.1	Quadricycle urbain - Aixam Megacity	208
D.3	Véhicules hybrides	209
D.3.1	Toyota Prius	209

D.4 Véhicules lourds	210
D.4.1 Trolleybus Irisbus	210
Liste des Abréviations	211
Bibliographie	213

Introduction

Sommaire

1.1 Importance de la mobilité	1
1.1.1 Collective	2
1.1.2 Individuelle	2
1.1.3 Indirecte	3
1.2 La contrainte énergétique et matérielle	5
1.2.1 L'avenir des énergies fossiles	6
1.2.2 Production électrique	11
1.2.3 Minerais	12
1.3 Conclusion et motivation du travail de thèse	15

Dans cette introduction, j'entends souligner l'ampleur de la crise énergétique qui se dresse devant nous pour cette première moitié du 21^e siècle ainsi que l'impact que cela aura sur la mobilité des individus et des marchandises. Dans un contexte de nécessaire préservation des ressources (minières), ce mémoire traitera de l'emploi de systèmes de stockage de l'énergie (SSE) dans le cadre du transport électrifié comme substitut aux carburants conventionnels (essence, gazoil, GPL¹). L'accent sera mis sur l'étude de systèmes existants dans l'optique de prédire la durée de vie du dispositif. Cette démarche s'inscrit dès lors dans le cadre de la maximisation de la ressource en lien avec l'application visée.

1.1 Importance de la mobilité

L'hypermobilité, car c'est bien de ça dont il s'agit, est une invention et un besoin moderne. S'il faut reconnaître que l'Homme a toujours eu besoin de se déplacer pour assurer sa survie d'abord, puis pour développer ses relations avec d'autres communautés ensuite (commerce, tourisme,...), il faut aussi comprendre que le 20^{me} siècle a été marqué par un accroissement sans précédent de la population et de ses besoins de mobilité [OCDE 2011]. L'avion, le train, le bateau, le vélo et la voiture sont autant d'inventions récentes dont l'essor a permis à pratiquement chaque être humain sur cette planète de quitter, temporairement comme définitivement, la contrée exigüe qui l'a vu naître. L'avion, le train, les cargos et les camions sont autant d'inventions récentes dont la raison d'être est de favoriser les échanges matériels moyennes et longues distances afin de permettre à ceux qui détiennent suffisamment de richesse de bénéficier de tout ce que cette planète a à offrir. L'économie toute entière est aujourd'hui assise sur la disponibilité de moyens de transport aux capacités colossales (9 tonnes de matières par an et par habitant en moyenne, et de 16 à 40 tonnes dans les pays développés) [Fischer-Kowalski 2011]. En 2009, en France, les dépenses de transport (marchandise, salariés, ...) ont représenté 18% du PIB, 80% de cette somme étant liée au transport routier [SOeS 2010].

1. Gaz de Pétrole Liquéfié

Zone géographique	Distance moyenne par jour (km)	Part moyenne des TC (%)	Part moyenne des VP (%)	Part moyenne des vélos (%)
USA-Océanie	11,8	5	92,8	2,2
Grandes Asie	11	42	48,1	9,9
Amérique du Sud	10,3	50	47,6	2,4
Europe de l'Ouest	7,9	25	67,9	7,1
Afrique	7,5	42	56,1	1,9
Moyen Orient	7,3	14	82,1	3,9
Asie	7	39	42	19
Europe de l'Est	6,6	60	36,9	3,1
France	5,9	18	80	2,0

TABLE 1.1 – Part modale des modes mécanisés dans différentes zones géographiques [Joly 2003]

1.1.1 Collective

Transport Urbain

La part modale des transports en commun dans les agglomérations du Monde dépend en grande partie de la densité de population de ladite agglomération. Elle dépend également du niveau de richesse par habitant et des politiques locales mises en oeuvre. On peut noter, d'après le tableau 1.1, que la part des modes non motorisés (vélo et assimilé) parmi les modes mécanisés (tout véhicule) dépasse rarement les 10% à l'exception de quelques agglomérations asiatiques pauvres.

Avion

Le trafic aérien dans le monde est en croissance soutenue (certaines zones géographiques connaissent une croissance à 2 chiffres) [Schimm 2011]. On dénombrait 5,04 milliards de passagers en 2010, soit près d'un vol par personne alors même que la majeure partie des gens n'a pas accès financièrement à ce mode de transport. Sur une base annuelle, le fret aérien a lui atteint 91 millions de tonnes de marchandises, soit l'équivalent de 15kg par individu à l'échelle de la planète. La croissance du fret aérien s'exprime à 2 chiffres sur le plan mondial. Un tel succès doit certainement beaucoup à l'absence de taxe sur le carburant utilisé (kérosène) ainsi que sur l'amnistie octroyée au transport aérien par le protocole de Kyoto. Ainsi, le mode de transport le plus énergivore et le plus polluant [Jancovici 2004] apparaît-il comme le plus favorisé par les politiques publiques.

1.1.2 Individuelle

Voiture

En 1769, Joseph Cugnot, ingénieur militaire français, conçoit et réalise un fardier d'artillerie, mû par une machine à vapeur à deux cylindres. L'aventure automobile a commencé en France, où les premières expériences réussies ont eu lieu en 1873. Un succès tel qu'en 1895 environ 350 automobiles circulaient déjà sur le territoire français, contre 75 en Allemagne et seulement 80 aux Etats-Unis. La Ford T, commercialisée à partir de 1908, constitue le premier jalon de l'histoire de l'automobile de masse. L'après-guerre marque véritablement le début du siècle de l'automobile dont le développement est soutenu pendant les trente glorieuses. Evidemment, le double choc pétrolier de 1973 et 1979 change la donne mais même si les ventes s'écroulent de 30% environ les années suivant ces chocs, le nombre total de véhicules ne cesse d'augmenter. Il faut attendre la crise financière asiatique de 1997 pour constater la première baisse dans la taille du parc automobile mondial. Baisse vite compensée par l'arrivée des premiers consommateurs chinois... Le nouveau choc pétrolier de 2008 précipite la production globale à la baisse mais en 2010 déjà, la tendance décennale est rattrapée avec 78 millions



FIGURE 1.1 – Evolution du parc automobile mondial [Lamiot 2011]

de véhicules écoulés. Après avoir stagné autour de 60 millions de véhicules/an, la production a en effet progressée de 18 millions d'unités depuis 2002. En 2010, la Chine a justement produit 18 millions de véhicules (autant que les Etats-Unis et le Japon réunis).

Les besoins des salariés en terme de mobilité individuelle sont assez variables, en fonction du lieu de résidence notamment. En France, le kilométrage annuel moyen d'une automobile s'établit à 13000 km environ soit une distance quotidienne proche de 37 km [SOeS 2010]. Quant aux seuls trajets pendulaires, en 2004, ils se décomposaient de la façon suivante selon un rapport de l'Insee [Baccaïni 2007] :

- 41% des actifs parcourent moins de 10 km, ils sont à l'origine de 12% des distances parcourues en France ;
- 28% des actifs travaillent entre 10 et 20 km de leur domicile. Ils réalisent 20% des distances parcourues ;
- 21% des actifs se déplacent sur 20 à 50 km réalisant 31% des déplacements en France ;
- enfin, seulement 10% des actifs, qui réalisent plus de 50km pour se rendre sur leur lieu de travail, correspondent à 37% des distances parcourues.

1.1.3 Indirecte

Transport de marchandise longue distance

Le transport longue distance (de continent à continent) est assuré par voie maritime (cargo porte-conteneur, pétrolier, gazier) ou aérienne. Un transport terrestre est exclu du fait des complications administratives et de la non-adéquation des réseaux routiers ou ferroviaires dont les capacités sont limitées contrairement aux mers et aux cieux (même si les terminaux eux sont limitant). Aussi, les combustibles fossiles règnent ici en maître. Le vecteur hydrogène pourrait constituer une alternative mais le rendement énergétique déplorable de la filière est un point rédhibitoire à mon sens (cf. 1.2.1.2). Aussi, ce domaine ne nous intéressera pas ici.

Transport de marchandise moyenne distance

On entre ici dans la chasse gardée des camions. Ici, la substitution possible se nomme frêt ferroviaire mais son développement est très lent à l'échelle européenne voire en contraction dans différents pays. En France, le manque de dynamisme au sein du secteur et la saturation progressive du réseau ferré découragent les initiatives dans ce sens. Pour couvrir les distances envisagées, des moyens de transports électriques autonomes ne font guère de sens. Si toutefois cela devait arriver, la filière hydrogène serait sans doute la plus adaptée pour les distances considérées avec toujours le problème du rendement.

Transport de marchandise courte distance

Ce secteur, souvent appelé " le dernier kilomètre " constitue en revanche un sérieux débouché pour les véhicules électrifiés de tailles diverses. Des projets industriels ont déjà vu le jour (Renault Trucks Maxity électrique) et des expérimentations grandeur nature sont en place (TNT Express² à Lyon, Turin et Berlin). Le coût d'exploitation avantageux de ces véhicules combiné à la lutte contre la pollution environnementale et sonore pourrait suffire à provoquer la transition depuis les véhicules thermiques conventionnels vers ces nouveaux modes.

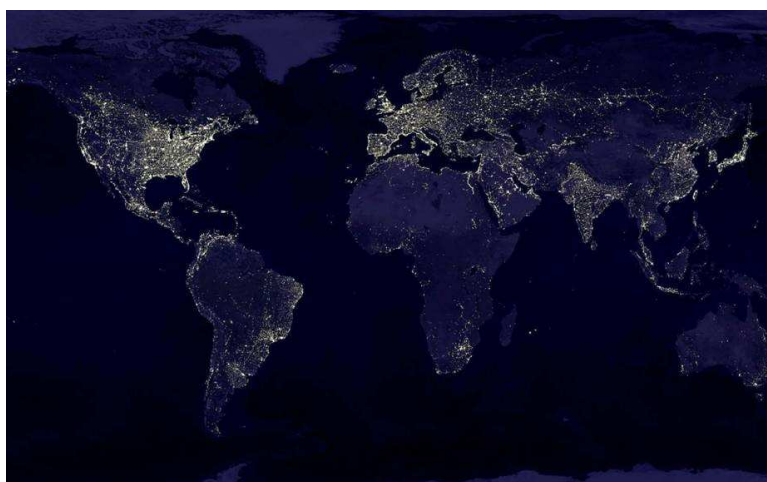
2. société de livraison de colis

1.2 La contrainte énergétique et matérielle

La simple image 1.2 permet d'illustrer l'indéniable appétit énergétique de nos sociétés. Alors qu'en 1970, seules les grandes agglomérations nord-américaines, européennes et japonaises sont visibles depuis l'espace, en 2000, on mesure sans difficulté l'essor de notre civilisation industrielle.



(a) 1970



(b) 2000

FIGURE 1.2 – Vues nocturnes reconstituées de la planète Terre [NASA]

Rappelons qu'entre 1960 et l'an 2000, la population mondiale a doublé comme en témoigne la figure 1.3. Si le terme "révolution industrielle" apparaît parfois abstrait, la simple vue de l'évolution démographique depuis sa survenue devrait permettre de lui rendre une signification bien concrète. Aujourd'hui la planète abrite 7 milliards d'habitants et les prévisions estiment que la population mondiale plafonnera à 9 milliards d'habitants avant de commencer à décroître avant la fin du siècle [ONU 2004]. Il existe un fort degré de disparité selon les régions du globe au niveau des consommations individuelles d'énergie et de pétrole [BP 2011]. En particulier, les deux géants démographiques que sont l'Inde et la Chine devraient respectivement tripler et doubler leurs consommations par tête pour parvenir au même niveau que l'Europe de l'ouest. Evidemment, ce scénario reste hautement hypothétique si les approvisionnements ad hoc sont inatteignables.

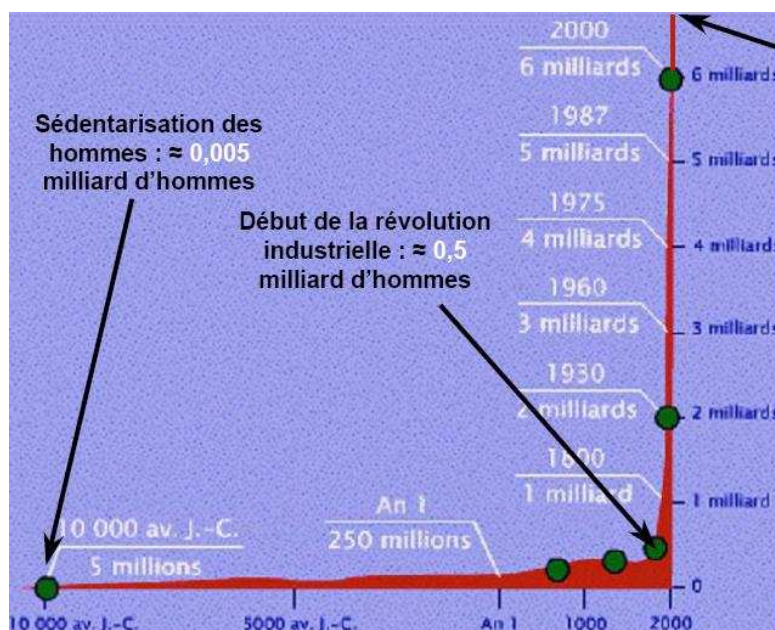


FIGURE 1.3 – Evolution de la démographie mondiale [Jancovici 2008]

1.2.1 L'avenir des énergies fossiles

Il est nécessaire de rappeler les définitions de quelques termes souvent utilisés dans le domaine de l'énergie. Une **ressource** désigne la quantité de produit présente dans un espace donné sans prendre en considération sa possible extraction ou non. Par opposition, une **réserve** fait référence à la portion récupérable de cette ressource dans les conditions économiques et techniques du moment présent. On parle alors de **réserve prouvée**. Toute conversion du statut de ressource à réserve dépend de l'évolution de la technique et des conditions tarifaires associées (le consommateur est-il disposé à payer le baril de pétrole 1000\$?). Rappelons par ailleurs qu'une **source d'énergie** ne peut être considérée comme telle que si l'utilisation du produit extrait génère davantage d'énergie que son extraction et son conditionnement n'en a requis. A défaut, le produit doit être considéré comme un **vecteur** énergétique (cas de l'hydrogène). A l'heure actuelle, le pétrole est bien une source d'énergie mais dans l'avenir il se pourrait qu'il rétrograde au stade de vecteur énergétique dès lors que son extraction deviendrait non rentable énergétiquement. De ce point de vue, on sait que seule une portion limitée des ressources d'hydrocarbures est éligible au titre de réserve ; en moyenne le taux d'extraction d'un puit de pétrole s'établit à 35%. Il était de 25% 35 ans auparavant, mais pourrait cesser de croître en raison de la taille décroissante des nouveaux gisements (les gisements les plus qualitatifs, donc les plus rentables, ont été mis en production les premiers) [Jancovici 2011]. Un autre exemple nous est fourni par les agrocarburants de première génération dont la filière de production consomme parfois près de l'équivalent d'un litre de pétrole par litre d'éthanol produit, rendant ainsi l'opération contre-productive énergétiquement parlant [Cardoso 2012].

1.2.1.1 Pétrole

La questions des réserves et de leurs évaluations

La question des réserves prouvées de pétrole est assurément un sujet sensible à travers le monde, et dans les états autoritaires en particulier. Dans les années 80, les observateurs ont ainsi pu observer un jeu de dupes entre les principaux pays producteurs membres de l'OPEP³ [Inman 2011]. En

3. Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEC en anglais)

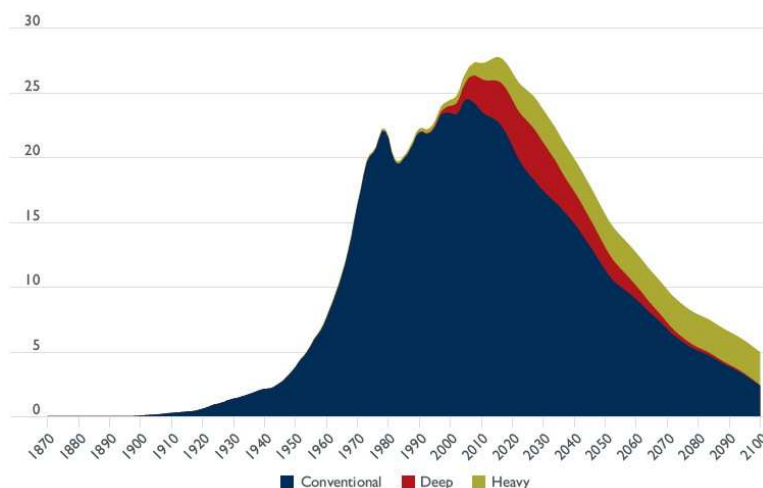


FIGURE 1.4 – Prédiction du pic pétrolier [Gargett 2009]

effet, dans un souci de régulation, l'OPEP a souhaité mettre en place une règle commune aux états membres de l'organisation afin de placer des quotas sur les productions nationales en fonction des réserves prouvées de chaque état. Le Koweït ouvre le bal de la manipulation géostratégique lorsque ses réserves passent de 67 à 93 milliards de barils au 1er janvier 1984. Entre 1985 et 1986, les réserves déclarées par l'Iran passent de 59 à 93 milliards de barils, celles des Emirats Arabes Unis de 33 à 97 milliards. L'Arabie Saoudite attendra l'année 1988 pour procéder à l'ajustement de ses chiffres, passant alors de 170 à 255 milliards de barils extractibles. L'Iraq enfin, voit ses réserves triplées entre 1981 (32 milliards) et 1987 (100 milliards). Depuis, les réserves déclarées par chaque pays sont restées assez stables. Rappelons que chaque pays est responsable de l'évaluation de ses propres réserves, sans aucun contrôle étranger possible. Ce petit jeu aux enjeux démesurés a toutefois repris depuis le retour des américains en territoire iraqi. En octobre 2010, à la suite d'une nouvelle évaluation, l'Iraq déclare une augmentation de ses réserves de l'ordre de 25% (113 à 143). Dans la foulée, l'Iran déclare des réserves en hausse à 150 milliards de barils contre 138 l'année précédente, ce qui lui permet de reprendre la seconde place derrière le géant saoudien.

La situation mondiale des approvisionnements en pétrole fait régulièrement l'objet de publications officielles (BP⁴, Agence Internationale de l'Energie,...) mais il convient de rappeler que les chiffres qui y figurent sont, pour l'essentiel, ceux communiqués par les états producteurs, avec les incertitudes que cela comporte. Le vrai signal de la réduction de la ressource reine est donc à rechercher parmi d'autres indicateurs (le prix, la production annuelle, le niveau des capacités de production inutilisées, le coût d'exploitation des champs mis en production,...).

Pic de production et difficultés d'approvisionnement

En résumé, il reste du pétrole, c'est un fait. Il en reste pour des dizaines d'années à venir mais dans des proportions annuelles en baisse tendancielle (figure 1.4). On identifie comme facteurs aggravant des chocs pétroliers à venir les points suivants :

- Augmentation de la population mondiale
- Augmentation de l'accès des populations à un véhicule motorisé individuel
- Raréfaction de l'offre pétrolière à l'exportation

En effet, l'offre pétrolière disponible à l'export chutera beaucoup plus vite que le volume global de production. Les pays dépourvus de ressources pétrolières souffrent déjà ou souffriront rapide-

4. British Petroleum

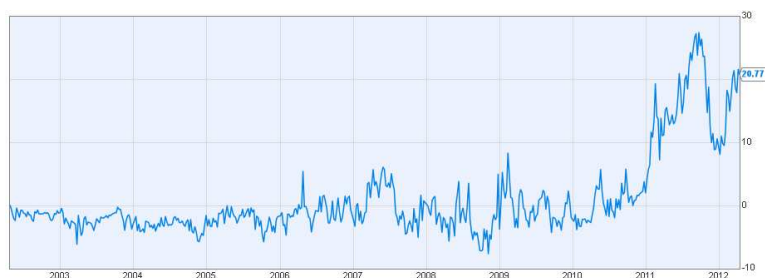


FIGURE 1.5 – Evolution du spread Brent-WTI [Ycharts 2012]

ment des effets de la diminution de l'offre. L'Europe, bien que première zone économique mondiale est victime depuis 2010 de ce phénomène. En effet, les français qui ont récemment découvert la notion de "spread" en référence à l'écart entre les taux d'intérêts d'emprunt d'Etat entre la France et l'Allemagne, vont rapidement pouvoir se familiariser avec la notion de "Brent-WTI Spread" qui désigne l'écart de prix entre le baril de référence européen (le Brent) et le baril américain (West Texas Intermediate). La courbe 1.5 illustre sans équivoque l'apparition récente d'un écart entre les deux cotations alors que celles-ci restaient infiniment proches depuis des décennies.

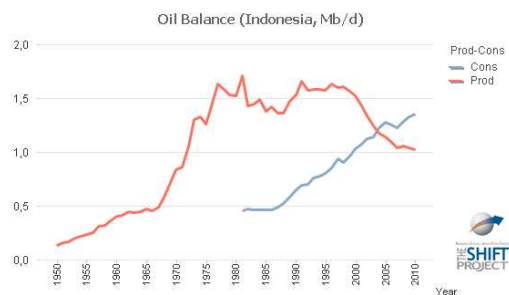
Les graphiques de la figure 1.6 illustrent quant à eux la raréfaction de l'offre de pétrole à l'exportation en raison de la chute de la production du pays, ou de sa ponction croissante pour sa consommation intérieure, ou les deux. Le cas des pays ayant perdu leur statut de pays producteur au profit de pays importateur au cours de la décennie passée sont représentés sur les figures 1.6a, 1.6b et 1.6c. Le Mexique semble suivre la même trajectoire d'après la figure 1.6d. On trouve en 1.6e et 1.6f deux pays parmi les plus importants du marché mondial de pétrole dont la production continue de croître mais dont les capacités d'export stagnent car leurs consommations propres explosent. Les grands pays émergents sont représentés en 1.6g, 1.6h et 1.6i. Ils présentent des profils d'exposition relativement différents. Si l'Inde et la Chine dépendent de fortes importations, le Brésil semble auto-suffisant mais au détriment d'une culture vivrière tournée vers la production d'éthanol comme substitut partiel au pétrole, avec les conséquences sociales inhérentes. Enfin, la situation américaine est dépeinte figure 1.6j. On y constate une consommation de produits pétroliers en forte croissance entre 1980 et 2008. Dans le même temps, la production nationale, assise sur des gisements conventionnels décline régulièrement. La situation récente se caractérise par une diminution de la demande qui a accompagné la crise économique post 2008 et par une reprise marquée de la production domestique suite à la mise en oeuvre de gisements non-conventionnels hétérogènes ("shale gas").

D'après plusieurs observateurs [Rubin 2008, Jancovici 2010a], la véritable origine de la crise économique que nous traversons depuis 2008 réside dans l'envolée du prix du pétrole qui a précédé. En réalité, ils imputent l'ensemble des récessions mondiales aux soubresauts du baril de pétrole comme en témoigne la figure 1.7a. La seule exception à cette règle concerne la crise financière asiatique de la fin des années 90. L'importance de la dernière crise peut être comparée aux précédentes à l'aide de la figure 1.7b. Dans le contexte national, on peut remarquer qu'en 1973 nous subissons un choc pétrolier majeur et que depuis 1974, aucun budget à l'équilibre n'a été voté par l'Assemblée Nationale.

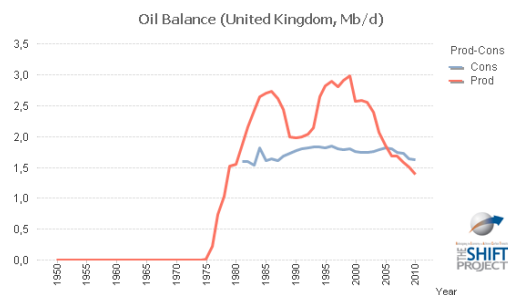
1.2.1.2 Autres carburants

Gaz et charbon

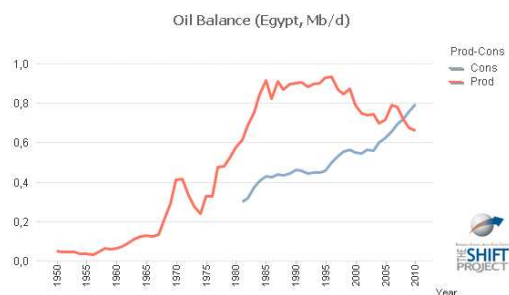
On ne peut évidemment pas faire l'économie d'aborder les deux autres principales sources d'énergie à l'échelle mondiale, fossiles et fortement carbonnées elles aussi. Le gaz et le charbon n'ont pas les mêmes usages (chauffage et production électrique) que le pétrole (transport) et sont donc difficilement substituables en cas de pénurie de pétrole. Il faut observer que la densité moindre et le



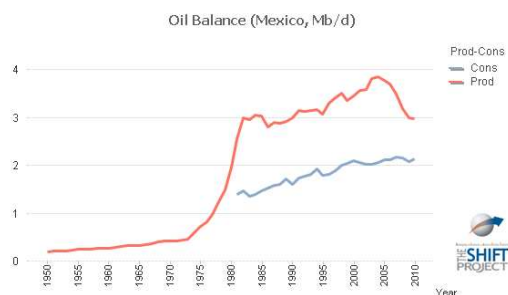
(a) Indonésie



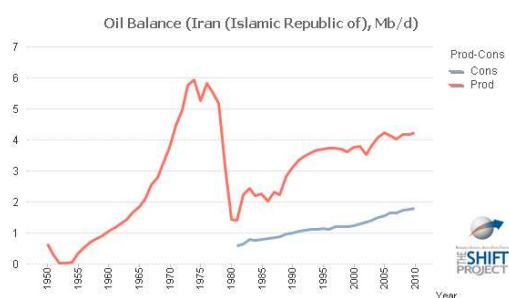
(b) Royaume-Uni



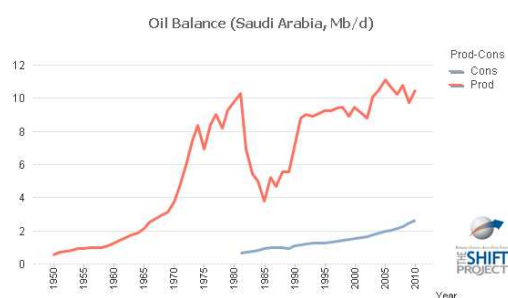
(c) Egypte



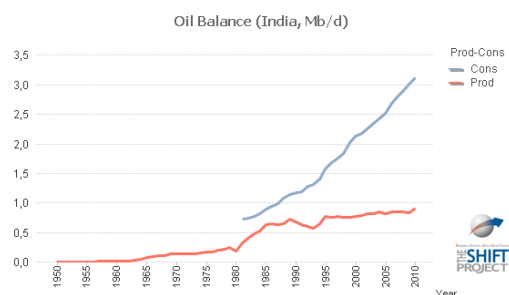
(d) Mexique



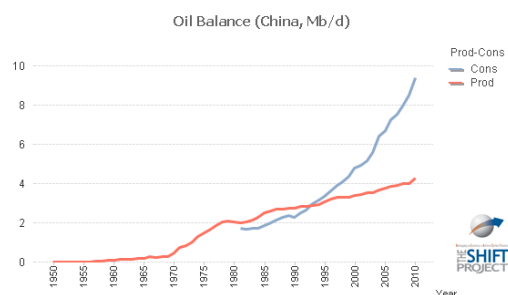
(e) Iran



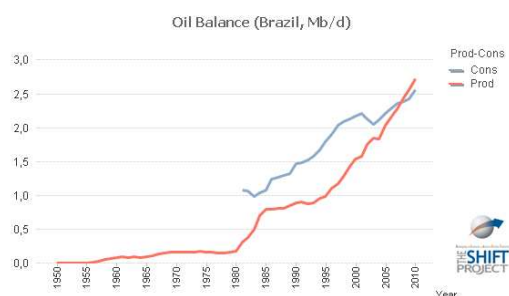
(f) Arabie



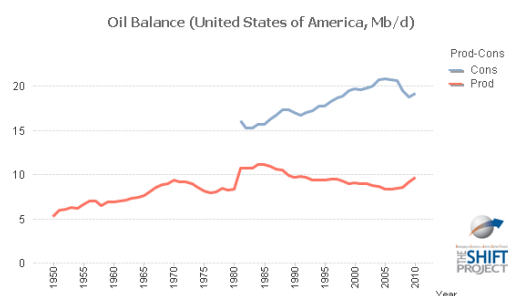
(g) Inde



(h) Chine



(i) Brésil



(j) USA

FIGURE 1.6 – Productions et consommations nationales de quelques pays phares [TSP 2012]

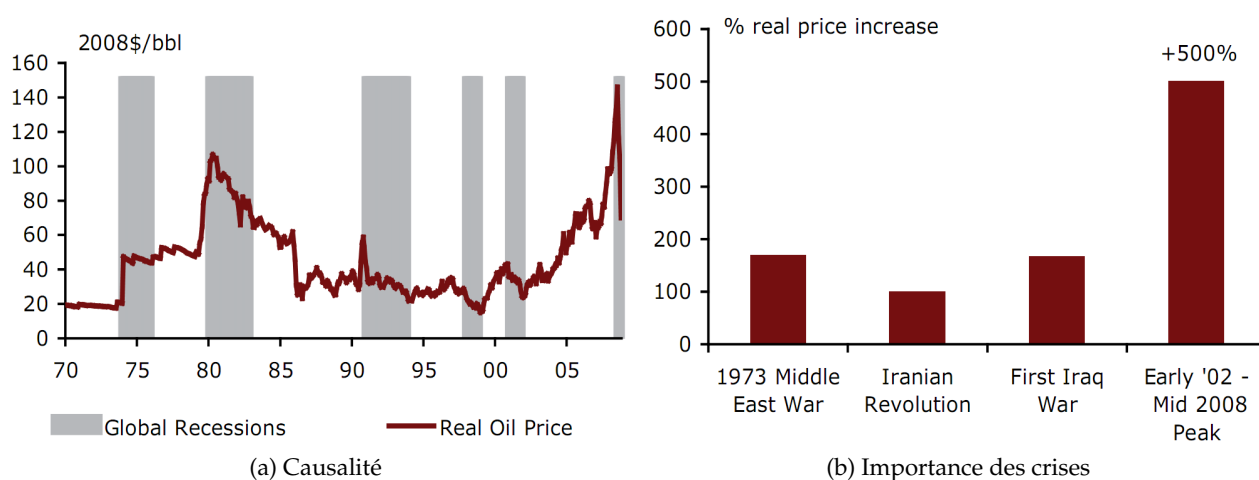


FIGURE 1.7 – Corrélation entre chocs pétroliers et économie [Rubin 2008]

transport moins aisé de ces carburants fossiles comparativement au pétrole empêche de fait d'envisager la création d'un marché mondial comparable à celui du pétrole. Tout juste peut-on imaginer des marchés régionaux desquels l'Europe serait exclue également, faute de ressources. La figure 1.8 présente les estimations des réserves des sources d'énergie fossiles. Identiquement au pétrole, les réserves apparaissent comme fortement restreintes au niveau mondial.

Carburants de synthèse

Le gaz, le charbon, la biomasse, comme toutes les autres chaînes organiques, sont susceptibles d'être transformés en un carburant liquide voisin de l'essence issue du pétrole, ou d'un autre produit raffiné (diesel). Pour cela, il faut employer le procédé de synthèse Fisher-Tropsch. Même si le procédé de Fisher-Tropsch permettrait en théorie de convertir ces derniers en essence utilisable dans les transports, il présente l'énorme inconvénient de n'offrir qu'un rendement optimisé proche de 50%. Dans un monde aux flux énergétiques tendus, une telle conversion représente un gaspillage rédhibitoire. La chaîne globale du puit à la roue offrirait un rendement plafonnant à 10% (50% lors de la synthèse, 15 à 20% lors de l'utilisation dans un véhicule essence ou diesel respectivement). En comparaison, une centrale à gaz à cycle combiné offre un rendement de conversion gaz vers électricité de près de 60%. En utilisant cette électricité pour le transport au moyen d'un système de stockage de l'énergie électrique installé dans un véhicule, offrant lui un rendement de l'ordre de 80% de la prise à la roue (traction électrique comprise donc), nous obtenons un rendement du puit à la roue voisin de 50%. Les deux voies technologiques diffèrent donc d'un facteur 5 en termes d'efficacité énergétique.

La filière hydrogène

Les mêmes causes amenant aux mêmes effets, ma conclusion sur la filière hydrogène revient à dire que la chaîne totale offre un rendement trop peu satisfaisant pour offrir une quelconque perspective raisonnable. En effet, la production de l'hydrogène sous forme de gaz (stocké comprimé) offre un rendement optimisé de 60% (80% lors de l'électrolyse, 80% de la compression pour le stockage) et son emploi dans une pile à combustible de bonne facture plafonne à nouveau à 60% [Jancovici 2010b, Mazza 2005]. Au final, avant même d'être utilisée pour faire tourner le moteur électrique d'un véhicule, l'électricité ainsi produite a été aux 2/3 dissipées sous forme de chaleur. A cela il faut rajouter le rendement de la centrale électrique amont (qui consomme une source d'énergie afin de générer l'électricité qui à son tour permet de produire du dihydrogène à partir de l'eau), ainsi que le rendement du reste de la chaîne de traction électrique. Au final, la filière hydrogène pour le

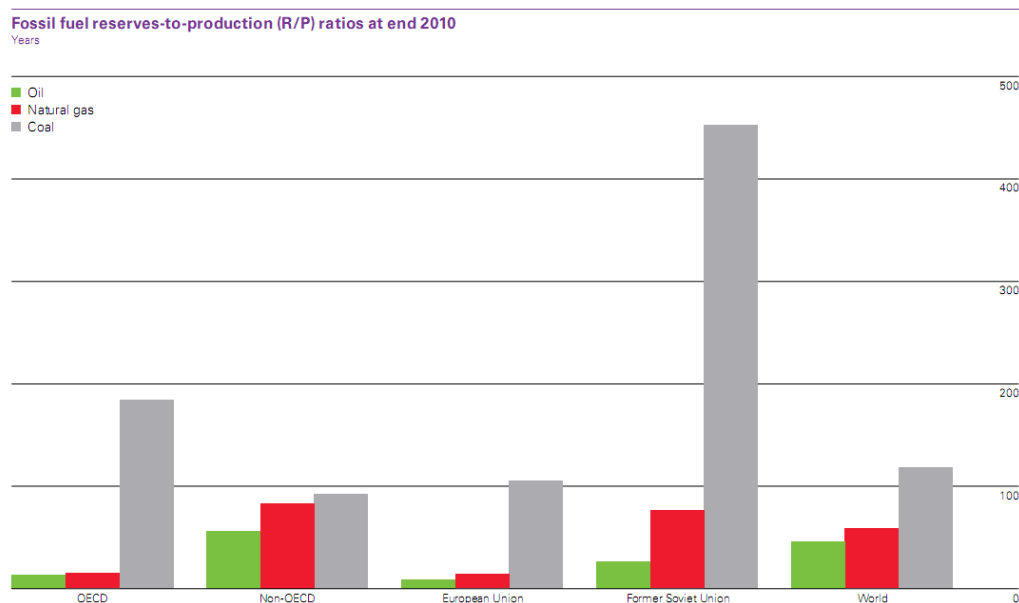


FIGURE 1.8 – Réserves fossiles [BP 2011]

transport offre un rendement du puit à la roue plafonné à $0.60 \times 0.60 \times 0.60 \times 0.90 = 20\%$. Rappelons enfin que le transport d'hydrogène gazeux sur de longues distances via un réseau de gazoduc souffre d'un coût (énergétique et financier) trois fois supérieur à celui du gaz naturel (H_2 : $3\text{kWh}/m^3$ Vs CH_4 : $10\text{kWh}/m^3$) [Jancovici 2006].

1.2.2 Production électrique

La consommation électrique française a cru rapidement après le choc pétrolier de 1973 sous l'impulsion d'une politique nationale de développement d'un parc nucléaire et de la transition vers le chauffage électrique. La consommation annuelle est relativement stable ($\approx 480\text{TWh}$) depuis une décennie, ce qui rend les développements de nouvelles centrales peu attractifs dans la mesure où le besoin est déjà couvert. L'usage massif de véhicules électriques comme substituts aux véhicules conventionnels accroîtrait la consommation électrique du pays. Toutefois les différents scénarii du tableau 1.2 illustrent le faible impact sur les moyens de production. Au cours d'une journée type, que ce soit en hiver ou en été, le différentiel de consommation moyenne entre le jour et la nuit avoisine 10GW comme en témoigne la figure 1.9. Ainsi, un parc de 10 millions de véhicules électriques parcourant 37km par jour et rechargeés quotidiennement en heures creuses pourrait être absorbé sans modification au niveau des capacités de production (approx. 9GW requis).

Taille du parc	Parcours journalier moyen (km)	Consommation électrique associée (GWh)	Surproduction requise sur 8h (GW)	Surproduction requise sur 24h (GW)	Consommation annuelle (TWh)
1 million	37	7	1	0.3	3
5 millions	37	37	5	1.5	14
10 millions	37	74	9	3.1	27
37 millions	37	274	34	11.4	99

Hypothèse 200Wh/km à la prise

TABLE 1.2 – Scénarii de parc automobile électrifié

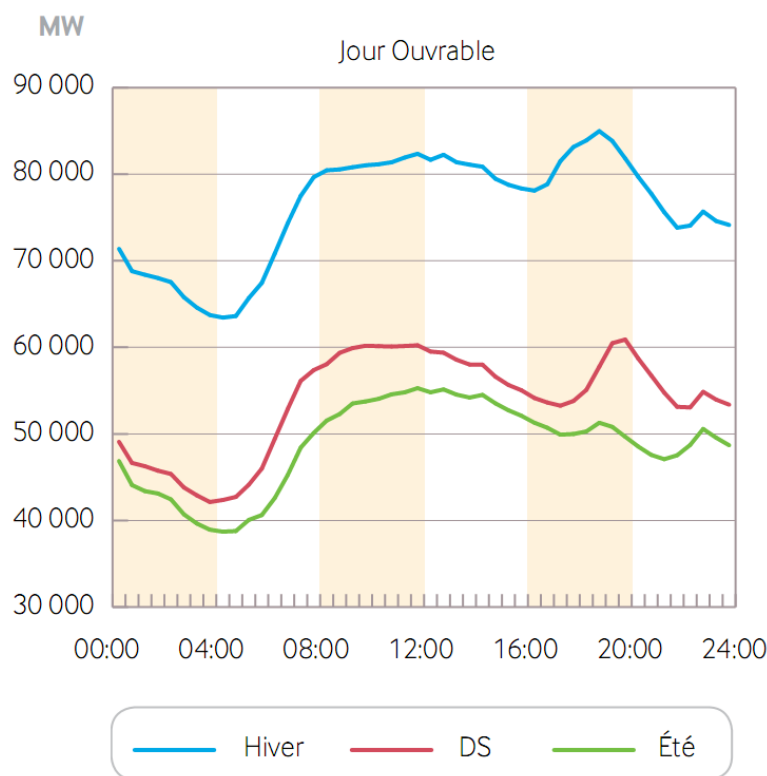


FIGURE 1.9 – Charges électriques typiques d’une journée en été, hiver et demi-saison (DS). [RTE 2011]

1.2.3 Minerais

Les minerais sont, tout comme les hydrocarbures, présents dans la croûte terrestre en quantité finie et les capacités d’extractions associées peuvent épisodiquement être inférieures à la demande mondiale. En effet, on estime qu’un délai de 10 ans est nécessaire entre la découverte d’un gisement et sa phase de mise en production au stade industriel. En conséquence, toute évolution rapide et imprévue des besoins d’un minerai en particulier peut provoquer une tension sur le marché de l’approvisionnement. Toutefois, à la différence des hydrocarbures qui finissent brûlés dans des réacteurs thermiques (moteur, centrale électrique ou chauffage), les minerais sont, en grande partie, réutilisables (et réutilisés). Des procédés de recyclage ont été établis pour la quasi totalité des produits et les filières se développent sous la pression législative européenne. Sur ce plan, l’Europe, dont les réserves minières sont tout aussi pauvres que les réserves d’hydrocarbures a depuis longtemps saisi l’importance du recyclage pour limiter les importations étrangères.

Dans un véhicule électrique ou hybride, de nouveaux besoins apparaissent en comparaison des véhicules conventionnels. Ainsi certains métaux et lanthanides (terres rares) sont requis dans la réalisation des dispositifs électriques et électroniques qui constituent la chaîne de traction électrique. En particulier, le cuivre et l’aluminium interviennent pour la fabrication des machines électriques (carter, bobinage,...), des conducteurs et des collecteurs de courant dans les SSE. Les terres rares telles que le Néodymium sont nécessaires à la réalisation des aimants permanents de certaines machines électriques ou encore aux électrodes de la précédente génération de batteries (NiMH, Lanthanium).

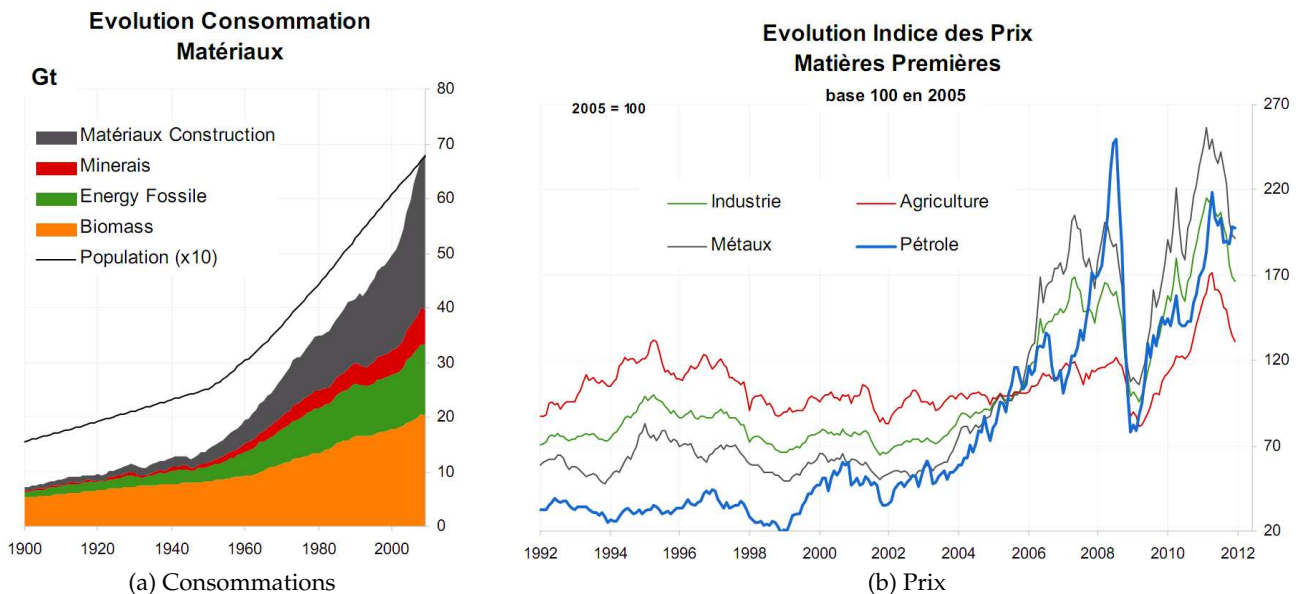


FIGURE 1.10 – Evolutions de la consommation et des prix des matières premières au regard de l'accroissement de population [Appert 2012]

1.2.3.1 Les Métaux du Génie Electrique

Le Nickel est un minerai métallique qui intervient dans la fabrication des batteries NiMH, de matériaux magnétiques (alliage FeNi) et comme matériau de cathode dans certaines batteries Li-ion. Au rythme actuel de production, on entrevoit seulement 44 années de réserves. Toutefois, l'usage principal du Nickel correspond à la fabrication d'acier inox et seulement 3% de la production est consommée par l'industrie des batteries [Sanier 2010].

L'Aluminium est obtenu à partir de bauxite. Il existe d'autres filières mais leurs viabilités techniques et économiques ne peuvent pas rivaliser. Toutefois, les réserves mondiales de bauxite n'appellent pas d'inquiétude notable [USGS 2012]. On retrouve ce métal dans la fabrication de nombreuses pièces mécaniques des véhicules modernes, y compris les carters de machines électriques. Son usage se développe aussi comme conducteur électrique et comme collecteur de courant pour la cathode des batteries Li-ion.

Le Cuivre est le métal de prédilection comme conducteur électrique. Il est massivement utilisé pour réaliser les bobinages des machines électriques. Il sert aussi comme collecteur de courant pour l'anode des batteries Li-ion. Toutefois sa disponibilité est semblable à celle du Nickel (40 ans) [USGS 2012]. Il a vocation à être substitué au profit de l'Aluminium partout où cela est possible (ce qui n'est pas le cas au niveau des anodes). Son recyclage intégral est également une priorité.

1.2.3.2 Les Terres rares

L'Union Européenne, le Japon et les Etats-Unis se sont récemment émus de la situation mondiale de production de Terres Rares. Sur la base de considérations économiques et environnementales, les pays développés ont en effet délégué la production de ces minerais particuliers à la Chine depuis une décennie. En effet, la faible concentration de ces minerais et la radioactivité qui les accompagne ont incité les compagnies minières à recourir à la main d'œuvre chinoise dans le but de garder des coûts de production profitables et de s'affranchir des contraignantes législations environnementales occi-

Objet technologique	Terre(s) rare(s) nécessaire(s)	Qté par unité produite (kg)	Niveau de tension approvisionnement
Moteur électrique VEH	Neodyme(Nd)	1-2	++
Batterie NiMH (VEH)	Lanthanum(La)	10-15	-
Pot catalytique Diesel	Platine(Pt)	>50% prod	++
Pot catalytique Essence	Palladium(Pd)	>50% prod	++
Eolienne (1MW)	Neodyme(Nd)	100-150	++
Batterie Li-ion	Néant	/	/

TABLE 1.3 – Usage de terres rares dans les applications modernes [Kara 2010]

dentales. Aujourd’hui, la Chine concentre 97% de la production mondiale et limite ses exportations vers l’étranger afin de contenter son marché intérieur et de favoriser la production de certains objets technologiques sur son territoire. Il faut en effet savoir que les terres rares (ou lanthanides) sont nécessaires à la fabrication de nombreux dispositifs technologiquement avancés, particulièrement dans le domaine de l’énergie comme en témoigne le tableau 1.3. Toyota mène des recherches visant, d’une part à industrialiser les filières de recyclage des terres rares présentes dans les moteurs électriques de ses véhicules, et d’autre part à développer de nouveaux moteurs ne nécessitant pas l’emploi de Néodyme [Toyota 2011].

1.2.3.3 Les Autres matériaux requis

On estime à 100g par kWh la quantité de Lithium intervenant dans la réalisation d’une batterie Li-ion. Ce qui correspond à un besoin de 2 à 3 kg pour une voiture purement électrique et à moins d’un kilogramme pour un véhicule hybride rechargeable. Notons que pour une batterie de scooter (2kWh) il ne faut plus que 200g et pour un VAE (300Wh), le besoin ne dépasse pas 30g. La demande mondiale s’élève à 30kt environ dont 30% sont affectées à l’industrie des batteries. A ce rythme de production, on estime pouvoir subvenir à 160 ans de consommation avec les réserves existantes [Sanier 2010]. Une production mondiale annuelle de 10 millions de VE génèrerait un besoin additionnel de l’ordre de 25kt de Lithium, soit un doublement de la production. Dans ce contexte, le recyclage du Lithium, techniquement réalisable mais rarement mis en pratique compte tenu du faible intérêt économique actuel, apparaît comme une nécessité face à un parc important de véhicules électrifiés. D’après une étude d’Argonne [Gaines 2009], la réalisation d’une batterie de 30kWh nécessite une quantité variable de Lithium en fonction de l’électrochimie employée : 7.4kg pour la génération précédente (NCA⁵/graphite) contre 3.4 et 4.7kg respectivement pour la génération actuelle (LMS⁶ et LFP⁷). La récente technologie LTO⁸ présente comme inconvénient de porter à 12.7kg la consommation de Lithium pour réaliser cette même batterie, en raison de sa densité d’énergie plus faible et de la présence de Lithium dans la composition du matériau actif d’anode. On peut noter que les industriels se sont rapidement tournés vers des électrochimies dont les constituants de base sont disponibles en abondance (Fer, Phosphate, Manganèse, Graphite), ce qui n’était pas le cas de la première génération (Cobalt, Nickel).

5. Nickel-Cobalt-Aluminium

6. Lithium Manganèse Spinelite

7. Lithium Fer Phosphate

8. Titanate de Lithium

1.3 Conclusion et motivation du travail de thèse

Les données présentées dans cette introduction générale laissent présager d'un avenir proche où nos sociétés seront contraintes de modérer leurs appétits énergétiques et matériels malgré un contexte d'augmentation de la population. Dès lors, il apparaît nécessaire d'accroître l'efficacité énergétique et la sobriété matérielle relatives à nos modes de vie.

Le travail qui va suivre tente donc de mettre en place des outils nécessaires à la juste prédiction de l'usage des batteries Lithium-Ion dans les transports comme substitut aux motorisations conventionnelles (cas des véhicules électriques) ou comme aide à la réduction de consommation de carburant (cas des véhicules hybrides). Au-delà des évidentes considérations économiques, il apparaît nécessaire de dimensionner au mieux les systèmes de batteries afin d'en optimiser la durée de vie et ainsi de réduire les consommations énergétiques et matérielles liées à la production de tels véhicules électrifiés.

Fondements

Sommaire

2.1	Systèmes de stockage de l'énergie électrique	17
2.1.1	Batteries	17
2.1.2	Supercondensateurs	27
2.1.3	Autres dispositifs	28
2.2	Architectures véhicules	30
2.2.1	Hybrides (VEH)	31
2.2.2	Electriques (VE)	32
2.3	Vieillessement et fiabilité	34
2.3.1	Champs d'application	34
2.3.2	Cas des batteries	36
2.4	Modélisation de l'usage	51
2.4.1	Besoins	51
2.4.2	Cycles normalisés	51
2.4.3	Approches existantes	56
2.5	Conclusion	61

Dans ce chapitre, je vais exposer les fondements théoriques nécessaires aux travaux présentés par la suite. Nous allons passer en revue le fonctionnement électrochimique des SSE, puis leur intégration dans un usage véhicule. Ensuite nous étudierons la question de la dégradation des performances des SSE avant de conclure sur les outils à notre disposition pour modéliser finement l'usage des SSE dans les différents usages du transport.

2.1 Systèmes de stockage de l'énergie électrique

2.1.1 Batteries

Note : le lecteur recherchant la compréhension la plus large du fonctionnement des batteries et de leur technologie est invité à se tourner vers les ouvrages de références que sont [Linden 2001, Huggins 2008, Yoshio 2009, Reddy 2010]. En particulier [Reddy 2010, Chapitre 26] apporte un éclairage à jour et très complet. Les mécanismes de dégradations sont documentés par [Brown 2008, Section 1.6] et [Groot 2012, Chapitre 2] et modélisés par [Deshpande 2011].

Une batterie est un dispositif de conversion d'énergie. Ce dispositif stocke de l'énergie sous forme chimique entre deux électrodes : l'électrode positive est appelée la cathode, l'électrode négative est l'anode, en convention générateur¹.

La cathode présente le potentiel le plus haut et durant la décharge les électrons affluent dans sa direction via le circuit externe de telle sorte que le courant circule de la cathode vers l'anode par le

1. Ces définitions ne sont pas valables au sens électrochimique de ces deux termes mais sont couramment employées dans la littérature technique et scientifique, par abus de langage. Nous utiliserons cette terminologie simplificatrice tout au long de ce manuscrit.

circuit externe, comme en témoigne la figure 2.1. L'énergie chimique peut être convertie en électricité simplement en refermant le circuit électrique externe.

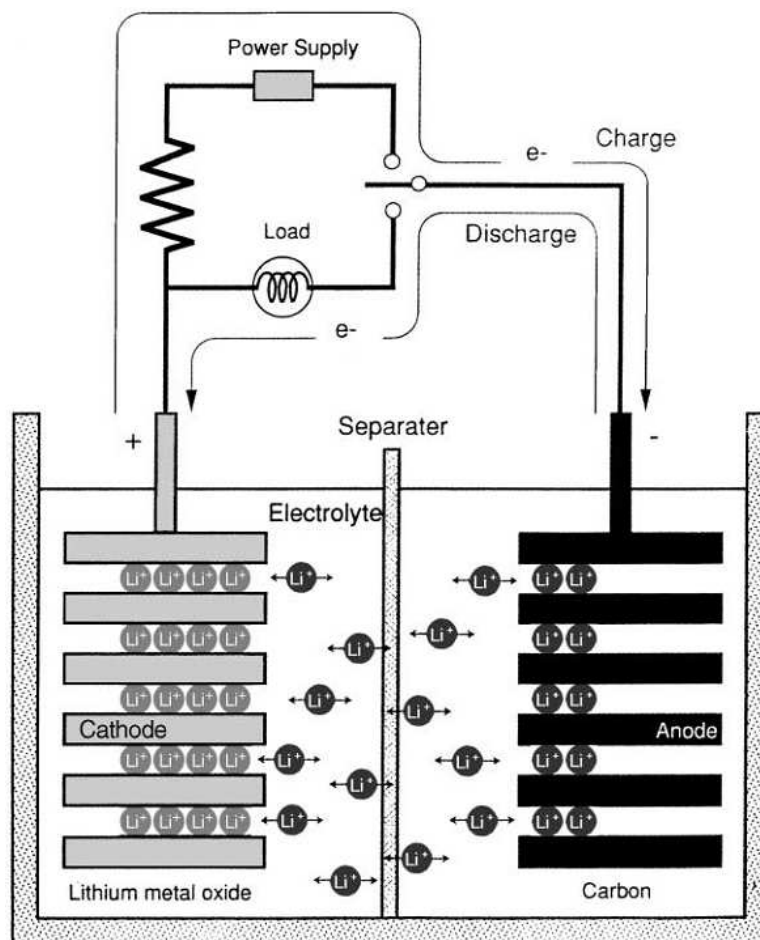


FIGURE 2.1 – Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion [Wakihara 2001]

Si la batterie ne fonctionne que dans ce sens, elle est dite primaire. Si un apport extérieur d'énergie électrique permet de réaliser la réaction de décharge à l'envers, alors le dispositif est réversible et la batterie est dite secondaire. Il arrive fréquemment qu'une batterie puisse être déchargée mais pas ou mal rechargée lorsque la réaction spontanée en charge n'est pas l'inverse de celle en décharge. Dans les batteries comme dans les piles à combustible, le processus de conversion électrochimique consiste en une paire de réactions redox aux deux électrodes : l'une s'oxyde alors que l'autre est réduite et les électrons circulent par le circuit externe.

Les batteries Lithium-ion ont pour particularité de faire appel à un sous-type de cette réaction électrochimique. En effet, le fonctionnement des batteries Lithium repose sur une réaction de chimie du solide dite d'insertion ou d'intercalation. Les cations Li^+ , de relativement faible diamètre, prennent place dans une structure cristalline hôte moyennant l'apport d'une petite quantité d'énergie.

2.1.1.1 Fonctionnement

Comme on peut le voir sur la figure 2.2, une cellule Li-ion est faite d'une succession de couches. On trouve à droite la cathode à base d'oxyde métallique lithié ($LiMeO_2$), avec $Me=Co, Mn, Ni$, etc. Celle-ci est au contact de l'électrolyte (fait de sels de Lithium dissous dans un solvant organique la

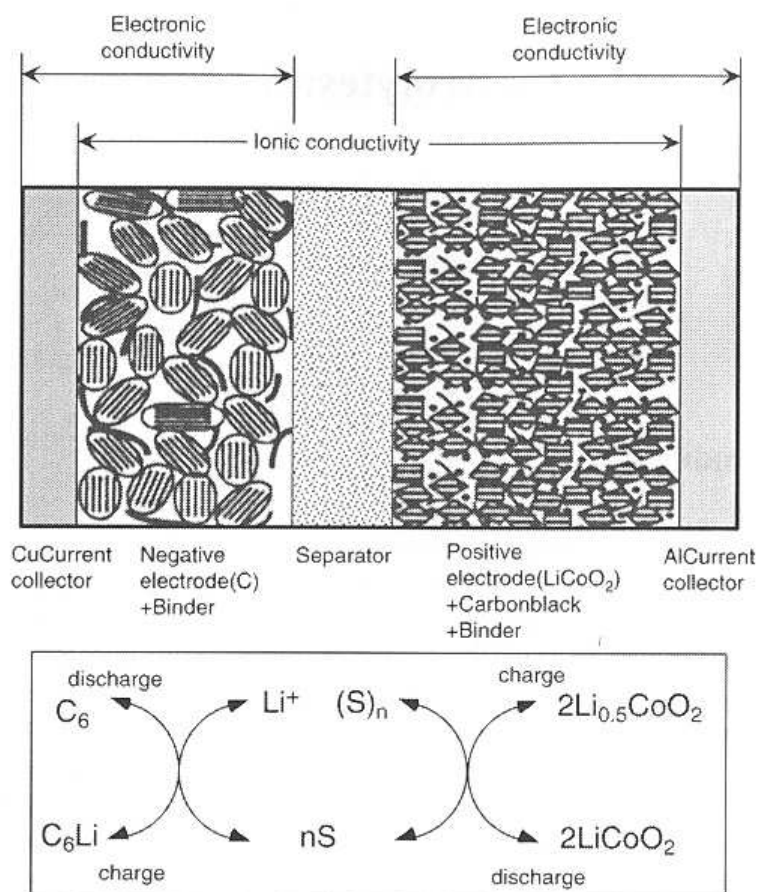


FIGURE 2.2 – Modes de conduction (électronique ou ionique) en haut et réactions associées en bas [Yoshio 2009]

plupart du temps). On trouve à sa gauche un séparateur, sorte de membrane solide souple, dont le rôle est de permettre le passage des ions conducteurs (cations Li^+) d'une électrode à l'autre sans pour autant permettre de conduction électronique (prévention de contact). Ainsi comme nous le verrons plus tard, la charge électrique ne peut être transmise à l'intérieur de la cellule que par les cations Li^+ alors que les électrons doivent eux emprunter le circuit externe. On trouve à gauche l'anode à base de carbone, souvent sous forme graphite (Li_xC_6). Celle-ci n'est pas au contact immédiat de l'électrolyte mais se trouve séparée de lui par une couche de passivation, une sorte de film qui se forme lors de la première utilisation de la cellule lorsque l'anode réagit partiellement avec l'électrolyte. Ce film est communément appelé SEI ou Solid Electrolyte Interface. Il est nécessaire à la stabilité de l'anode dans la cellule. Enfin pour faire circuler le courant électrique vers et depuis la cellule, on colle des collecteurs de courant au contact des électrodes. L'anode reçoit un collecteur Cuivre alors que la cathode reçoit un collecteur Aluminium, ceci pour des raisons de stabilité électrochimique.

Le fonctionnement d'une batterie Lithium repose donc sur l'échange de cations Li^+ entre la cathode et l'anode à travers le séparateur, l'électrolyte et la SEI (cf. figure 2.4a). Ainsi, à la décharge, chaque atome de Lithium quitte l'anode (Li_xC_6) et libère un électron préalablement capturé. L'électron circule par le circuit externe via le collecteur de courant tandis que le cation Li^+ migre vers la cathode en traversant d'abord la SEI puis l'électrolyte et son séparateur membranaire avant d'atteindre la cathode. Une fois à proximité immédiate de la surface de la cathode, le cation Li^+ pénètre puis diffuse dans le matériau de cathode jusqu'à trouver un site libre et se recombine avec un électron. L'apport en électrons est assuré par le circuit externe via le collecteur de courant. Lors de la charge,

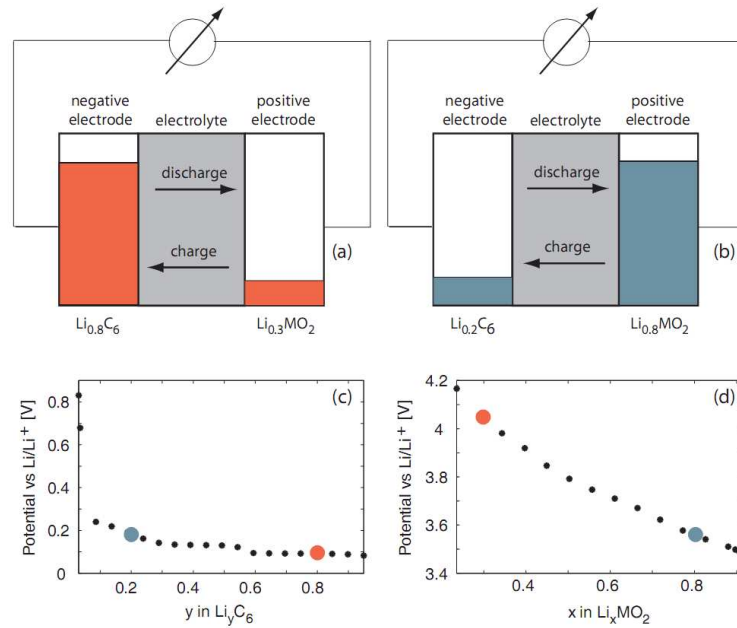
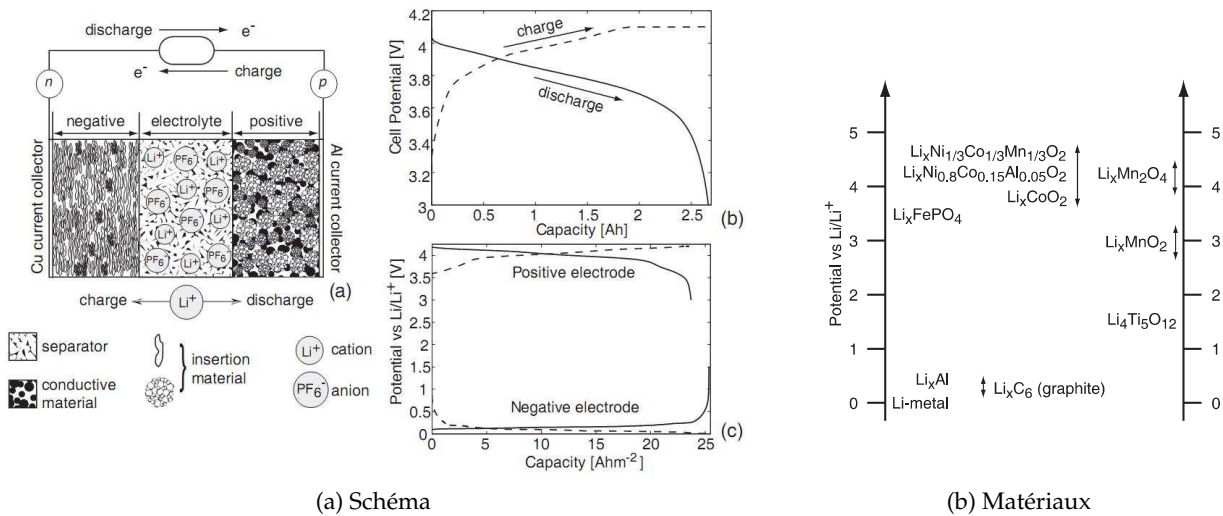


FIGURE 2.3 – Evolutions des concentrations en Lithium au sein des deux électrodes en charge et en décharge [Brown 2008]



(a) Schéma

(b) Matériaux

FIGURE 2.4 – (a) Schéma de principe d'une batterie Li-ion avec évolution de la tension aux bornes de la cellule et des potentiels d'anode et de cathode en fonction de l'état de charge, (b) Matériaux d'anode et de cathode couramment utilisés et classés selon leur potentiel d'insertion Vs. Li/Li^+ [Brown 2008]

il convient simplement d'inverser les sens de déplacement des cations Li^+ et des électrons. On voit donc que les mécanismes de transfert de charges électriques sont de deux natures. A l'intérieur de la cellule, les cations Li^+ assurent une conduction ionique rendue possible par la conductivité ionique de la SEI, de l'électrolyte et du séparateur. A l'extérieur de la cellule et à l'intérieur des électrodes, ce sont des électrons qui assurent une conduction électronique favorisée par la présence de collecteurs de courant et de liant dans les électrodes.

Idéalement l'insertion/désinsertion se déroule instantanément et sans déformer nullement l'électrode d'accueil. En pratique, les cations Li^+ doivent diffuser dans le matériau pour trouver un site

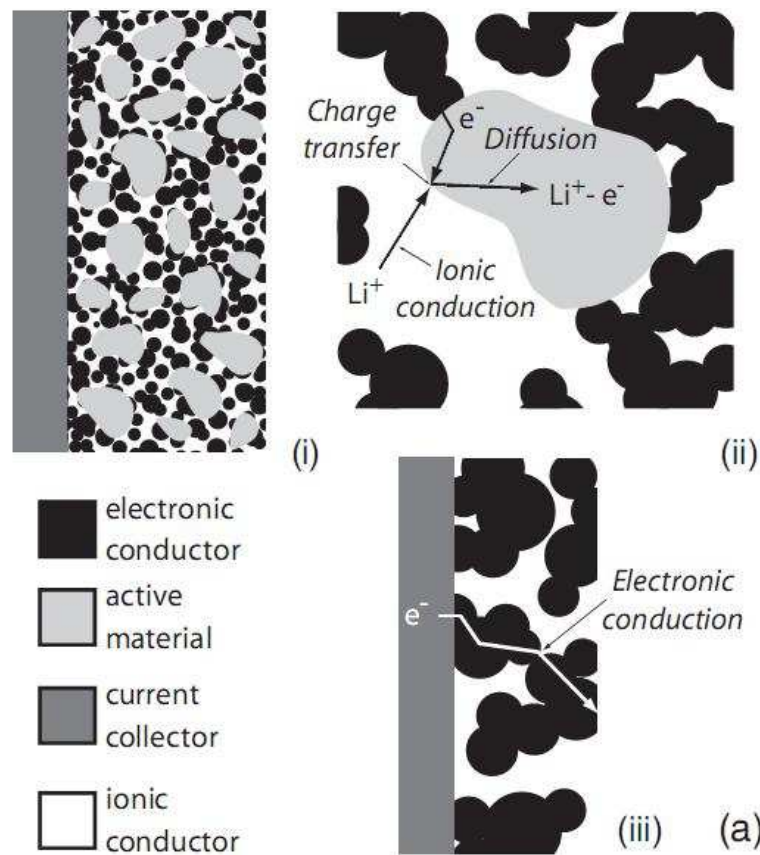


FIGURE 2.5 – Représentation des chemins empruntés par les charges ioniques (Li^+) et électroniques lors de l'insertion [Brown 2008]

vacant et ceci est régi par les lois de la chimie du solide. D'autre part, les cations Li^+ ont beau être parmi les plus petits, ils provoquent néanmoins une légère variation du volume des électrodes à l'insertion, ce qui a tendance à induire un stress mécanique qui se manifeste parfois par des phénomènes de dislocations locales. Ce processus d'intercalation se déroule en trois étapes, illustrées par la figure 2.5 :

- Diffusion ou migration des cations Li^+ solvatés dans l'électrolyte
- Désolvatation des cations Li^+ et pénétration dans la structure à vacances, recombinaison avec un électron libre (provenance externe)
- Diffusion des espèces Lithium dans la structure d'accueil

La cathode n'est généralement pas l'électrode limitante pour des raisons de viabilité de la cellule. En effet, cette dernière est conçue de façon à ce que la concentration en espèce Lithium ne varie pas de plus de 50% (parfois plus en fonction du matériau de cathode utilisé, mais <100% dans tous les cas). Pour une cathode de formulation $LiCoO_2$ dans son état déchargée (c.à.d. pleine de Lithium), on aura en fin de charge $Li_{0.5}CoO_2$ [Yoshio 2009]. L'intérêt est de préserver la structure de la cathode à intercalation de Lithium en limitant la variation de volume entre les états chargés et déchargés [Abruna2008]. L'inconvénient de cette pratique est l'accroissement du poids de la cellule pour une même quantité d'énergie stockable. Une différence notable existe entre les cellules typées puissance et celles typées énergie au niveau du ratio entre l'épaisseur des collecteurs de courant et celle de la matière active déposée dessus. A masse égale, une cellule puissance offre une plus grande surface d'électrodes en regard et donc une impédance plus faible. A contrario, une cellule énergie offre une plus grande capacité de stockage mais présente une impédance plus élevée. Du coup, elle souffre

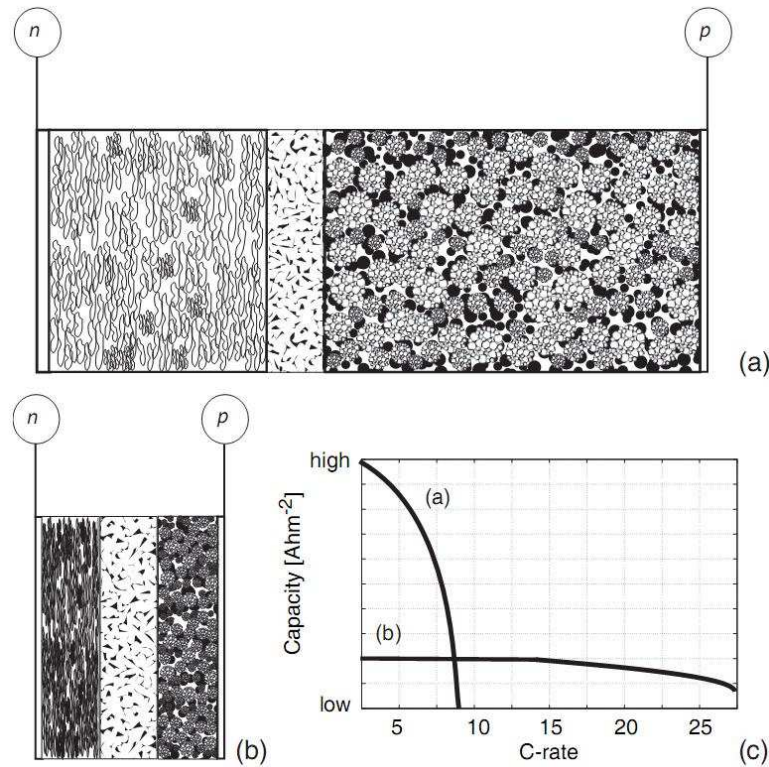


FIGURE 2.6 – (a) Cellule typée énergie, (b) Cellule typée puissance, (c) Comparaison des performances en fonction du régime de décharge. [Brown 2008]

de limitations cinétiques qui se manifestent sous des régimes de courant plus faible que les cellules puissance. Tous ces points sont résumés par la figure 2.6.

Au final, la plupart des cellules fonctionnent à une tension nominale comprise entre 3.6V et 3.7V et une tension de fin de charge de 4.2V. Les cellules à cathodes $LiFePO_4$ (Lithium-Fer-Phosphate ou LFP), fonctionnent à un potentiel sensiblement inférieur et par conséquent la tension nominale de la batterie se situera dans ce cas entre 3.2V et 3.3V. La figure 2.4b situent les matériaux actifs usuels selon leur potentiel Vs. Li/Li^+ . Il existe des matériaux de cathode fonctionnant à plus haut potentiel, autour de 5V, comme le $LiMnMeO_4$. Malheureusement, à haut potentiel, les électrolytes actuels se montrent trop instables (réagissent trop) et la cellule complète n'est pas viable (vieillesse rapide et problème de sécurité). La recherche se concentre sur les techniques et additifs qui rendront possible l'emploi de cathode haute tension.

2.1.1.2 Matériaux d'anode

Par définition, l'anode est le siège de la réaction d'oxydation, c'est-à-dire qui libère un ou des électrons ($red \rightarrow ox + n^*e^-$). De ce point de vue, l'anode désigne l'électrode négative lors de la décharge tandis qu'elle désigne l'électrode positive lors de la charge. Toutefois, dans le cas des batteries secondaires, l'anode désigne par convention l'électrode négative dans tous les cas de figure. Dans les systèmes Lithium, la première anode consistait en du Lithium métallique. Dans un souci d'accroître la cyclabilité, la sécurité et la capacité volumique spécifique, les anodes à base de carbone(coke, amorphe, MCMB, graphite) se sont imposées. Les alternatives au graphite sont les matériaux à base d'étain (Sn), de silicium (Si), de titanate (LTO : $Li_4Ti_5O_{12}$) et de nanotubes de carbone.

2.1.1.3 Matériaux de cathode

Par définition, la cathode est le siège de la réaction de réduction, c'est-à-dire qui capte un ou des électrons ($ox + n^*e^- \rightarrow red$). Dans le domaine des batteries secondaires, la cathode désigne par convention l'électrode positive dans tous les cas de figure. Les conditions à remplir pour qu'un composé d'intercalation soit considéré comme un bon matériau de cathode sont rappelées par [Linden 2001, Ehrlich, Chapitre 35] :

- Haute énergie libre de réaction avec le Lithium (potentiel élevé typ. 4-5V)
- Capacité à incorporer de larges quantités de Lithium (capacité spécifique élevée $>200\text{mAh/g}$)
- Intercalation réversible sans altération de structure
- Bonne diffusion des cations Li^+
- Bonne conductivité électronique
- Insolubilité dans l'électrolyte
- Préparé à l'aide de réactifs peu onéreux
- Synthèse à faible coût

Le matériau de cathode historique est le dioxyde de Cobalt ($LiCoO_2$) employé lors de la première industrialisation par Sony en 1991. Actuellement, les matériaux de cathode dominants sont le NCA (Nickel-Cobalt-Aluminium), le NCM (Nickel-Cobalt-Manganese), le LMS ($LiMn_2O_4$) et le LFP ($LiFePO_4$). Ces matériaux d'intercalation présentent des capacités spécifiques, des potentiels d'insertion, des coûts de production et des aspects sécuritaires différents les uns des autres.

2.1.1.4 Electrolytes, séparateur et additifs

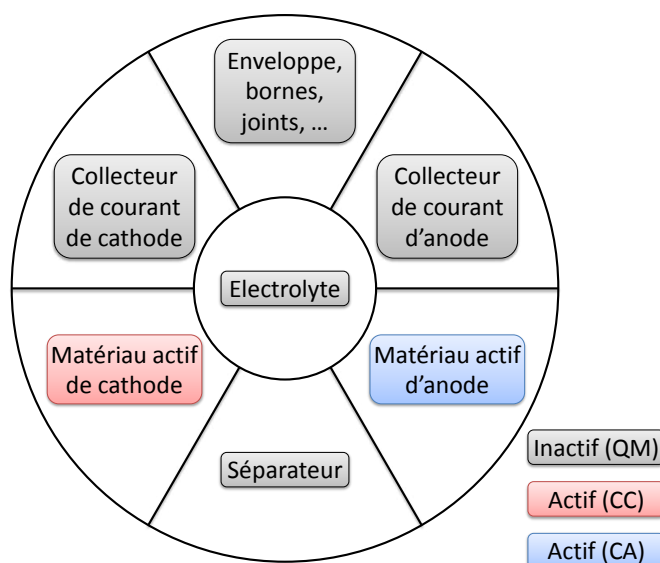


FIGURE 2.7 – Constituants d'une batterie Lithium-ion [Linden 2001]

Assembler une cathode et une anode ne suffit pas à réaliser une cellule fonctionnelle et encore moins performante. La composition de l'électrolyte (solvants + sel conducteur), la structure du séparateur et la composition et les proportions des additifs (liant, dopants de conduction) jouent un rôle prépondérant sur la performance pure et la durabilité d'une cellule Lithium-ion. Malheureusement, chacun de ces constituants inactifs (dans le sens où ils ne participent pas au stockage électrochimique proprement dit), contribue à alourdir la cellule et à accroître son coût de revient. On peut définir la quantité Q_M comme la capacité équivalente de l'ensemble des composants inactifs. C_A et C_C dési-

gnent respectivement la capacité spécifique du matériau actif d'anode et celle du matériau actif de cathode. L'objectif est de maximiser cette quantité Q_M afin de limiter l'influence de ces matériaux inactifs sur le bilan de capacité spécifique tel qu'il est défini par l'équation (2.1) [Yoshio 2009, Dimov, section 11.1].

$$C_{total}(mAh/g) = \frac{1}{(1/C_A) + (1/C_C) + (1/Q_M)} = \frac{C_A * C_C * Q_M}{(C_A * Q_M) + (C_C * Q_M) + (C_C * C_A)} \quad (2.1)$$

Une valeur infinie représente l'objectif inatteignable, tandis qu'une valeur proche de C_C et C_A indique que les constituants inactifs sont responsables d'environ 1/3 du poids de la cellule.

2.1.1.5 Opportunité économique

Le coût actuel et futur des batteries Lithium-ion est au centre de beaucoup d'attentions. L'objectif avoué est de concurrencer le véhicule conventionnel (motorisation thermique) sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule, voire même de proposer une alternative légèrement moins onéreuse pour compenser le désagrément causé par la plus faible autonomie.

Le choix de l'électrochimie retenue lors de la fabrication industrielle de batteries Lithium joue un rôle non-négligeable. En effet, le coût des matières premières des différents matériaux de cathode est fortement variable. Pour les principales options actuelles, il faut compter [Nelson 2011, page 64] :

- 10\$/kg pour $LiMn_2O_4$,
- 20\$/kg pour $LiFePO_4$,
- 37\$/kg pour $LiNi_{.80}Co_{.15}Al_{.05}O_2$,
- 39\$/kg pour $LiNi_{.33}Co_{.33}Mn_{.33}O_2$,
- 60\$/kg pour $LiCoO_2$,
- 19\$/kg pour du Graphite,
- 12\$/kg pour $Li_4T_5O_{12}$.

La contribution des matières premières à la formation du coût de revient des batteries Lithium-ion est un bon indicateur de la maturité de la maîtrise industrielle. Pour la production à destination de l'électronique grand public (formats standardisés, larges volumes), les matériaux contribuent à hauteur de 70% ou plus [Takeshita 2007]. En revanche, pour les batteries de traction la contribution des matières premières reste minoritaire devant la contribution du processus de fabrication et des coûts de développement [Anderman 2012]. Il est souvent avancé que l'augmentation des volumes de production peut permettre une forte réduction des prix. Une autre source de réduction des coûts tient à l'augmentation des densités énergétiques gravimétriques et volumétriques qui permettront le stockage d'un kWh à partir d'une masse matérielle et d'une surface totale d'électrodes en baisse. Dans le domaine de l'électronique grand public, la standardisation des procédés de fabrication (format cylindrique standard 18650), l'augmentation des volumes de production et l'accroissement de la densité énergétique au moyen de nouveaux matériaux de cathode ont permis une très forte réduction des coûts (200-300€/kWh en 2012). A titre d'exemple, une batterie de 25kWh à 250€/kWh permettant de couvrir 150000km au cours de sa vie offrirait le même coût de revient kilométrique qu'une consommation de 6l/100km avec un litre de carburant à 1€. Cela constituerait une performance très compétitive, d'autant plus que l'éventuelle ré-utilisation de la batterie après sa vie automobile générerait un revenu appréciable.

Pour les véhicules hybrides, la métrique utile s'exprime en €/kW. En effet, la puissance utile prime sur l'énergie. La batterie de la Toyota Prius II s'échange entre 1500 et 2500\$ ce qui se traduit par un coût de 80€/kW ou 1600€/kWh [Takeshita 2007].

Plusieurs simulations simplifiées sont proposées dans les figures 2.8 à 2.12. Pour toutes ces simulations, une hypothèse de consommation de 200Wh/km à la prise est retenue. Une recharge en

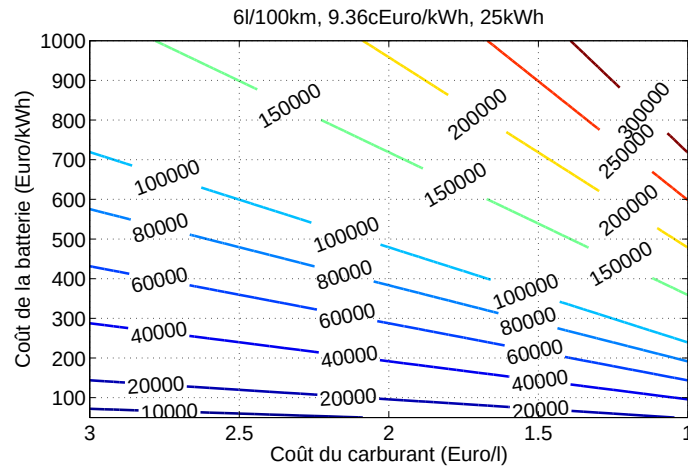


FIGURE 2.8 – Cible kilométrique pour véhicule électrique compétitif en 2012

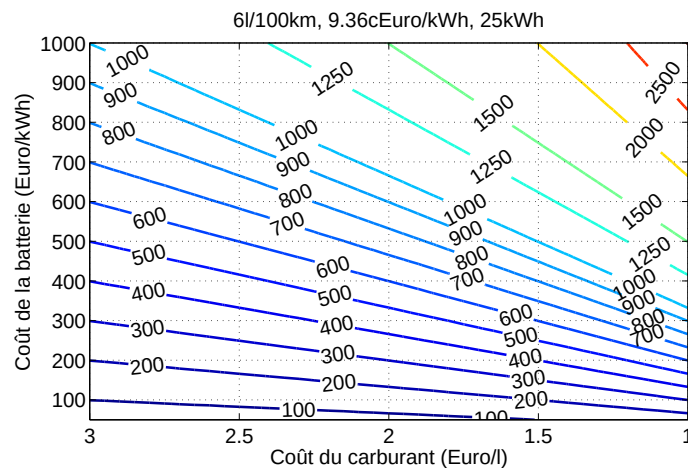


FIGURE 2.9 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique compétitif en 2012

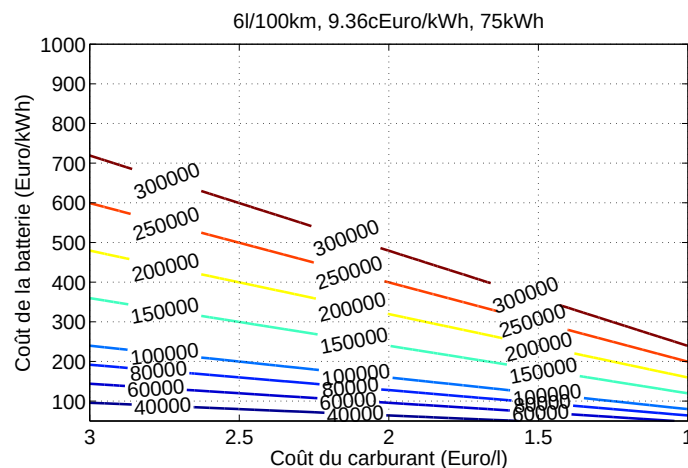


FIGURE 2.10 – Cible kilométrique pour véhicule électrique 300km compétitif en 2012

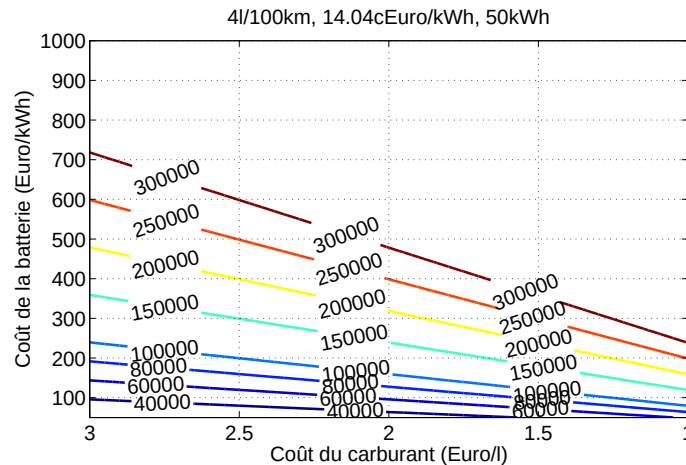


FIGURE 2.11 – Cible kilométrique pour véhicule électrique compétitif en 2020

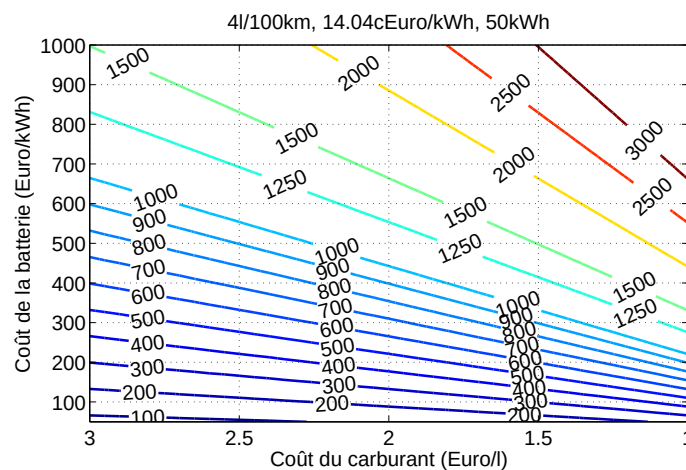


FIGURE 2.12 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique compétitif en 2020

heures creuses est privilégiée (9.36€/kWh en 2012 et 14.04€/kWh en 2020) . Le coût des recharges basé sur ces hypothèses est pris en compte dans ces simulations. Le taux d'actualisation des sommes engagées n'est pas pris en compte. L'ensemble des simulations et de leurs détails sont disponibles dans l'annexe A.

Intéressons-nous ici à deux problématiques distinctes :

- à partir de quel kilométrage le véhicule électrique rattrape-t-il le coût d'exploitation du véhicule thermique ?
- quelle durabilité doivent présenter les batteries pour atteindre cet objectif kilométrique ?

Pour un véhicule offrant une autonomie réelle de 100km (25kWh), nous observons d'après la figure 2.8 que le seuil de rentabilité est atteint à partir de 160000km environ lorsqu'on fait les hypothèses suivantes : 600€/kWh Vs. 6l/100km à 1.6€ le litre. Cela se traduit par un impératif de durée de vie voisin de 1200 cycles complets (figure 2.9), ce qui constitue un niveau de performance relativement élevé mais potentiellement atteignable. En revanche, la rentabilité économique d'un véhicule offrant une autonomie plus large (300km) ne devient possible autour de 200000km que si le coût de la batterie chute à moins de 250€/kWh, comme le montre la figure 2.10.

Si l'on cherche à anticiper la situation en 2020, on peut alors faire l'hypothèse que le véhicule thermique ne consommera plus que 4l/100km. Le véhicule électrique autoriserait lui 200km d'auto-

nomie (50kWh) et le tarif de l'électricité croîtrait de 50% pour s'établir à 14.04c€/kWh (Rapport du Sénat, "Coût réel de l'électricité", publié le 18/07/2012). La figure 2.11 indique que pour un litre de carburant à 1.6€, la rentabilité est difficile à atteindre. En effet, la traction électrique ne s'avèrerait rentable qu'à partir de 300000km pour une batterie à 350€/kWh. Il faudrait alors être en mesure de cycliser 1000 fois la batterie (cf. figure 2.12). A 2.5€ le litre de carburant, la même batterie à 350€/kWh devient profitable dès 175000km, soit 600 cycles.

Evidemment, de nombreux autres paramètres rentrent en compte pour évaluer le seuil de rentabilité précis. On peut par exemple citer l'écart de prix entre les seules motorisations, la variation du coût de maintenance, les usages smart-grid monétarisés, la taxation de l'électricité pour le transport, la taxe carbone, le bonus/malus, la revente de la batterie si sa durée de vie excède celle du reste du véhicule, la contribution au recyclage, la location de véhicule pour les trajets trop longs.

2.1.2 Supercondensateurs

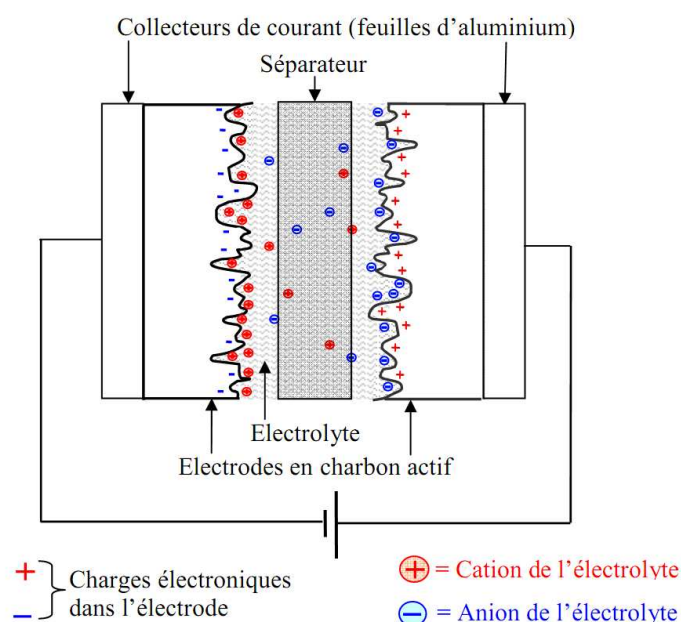


FIGURE 2.13 – Schéma de principe d'un supercondensateur [Venet 2007]

Les supercondensateurs sont des composants de stockage électrochimique à mi-chemin entre les batteries secondaires et les condensateurs électrolytiques [Venet 2007]. Ils présentent une densité de puissance supérieure à la plupart des batteries Lithium-ion (quelques kW/kg Vs quelques 100W/kg), même si l'écart tend à se réduire avec le développement de batteries typée puissance (employant du LTO par exemple). En contrepartie, les supercondensateurs affichent une énergie spécifique largement déficitaire vis-à-vis des batteries Li-ion (quelques Wh/kg Vs quelques 100Wh/kg). Aussi, ces composants s'adressent essentiellement à des applications nécessitant un fort niveau de puissance pendant une durée très courte (typiquement inférieure à 10s). Les supercondensateurs ne se posent donc comme concurrents des batteries Li-ion que dans le cas des véhicules faiblement hybridés (micro-hybrid, start-stop) et se retrouvent en pareil cas souvent associés à une batterie Plomb SLI² classique.

Ils sont très proches par construction des batteries et la différence tient essentiellement à la nature du matériau actif déposé sur les électrodes. Comme pour les condensateurs électrolytiques, les

supercondensateurs comportent deux électrodes et un électrolyte. Plusieurs technologies co-habitent mais celle à base d'électrodes au charbon actif et d'électrolyte à l'acétonitrile représente l'essentiel de la production actuelle. En effet, les électrodes en charbon actif sont les plus développées industriellement compte tenu de leur grande surface spécifique, du faible coût de la matière première et du procédé industriel de fabrication. Le stockage d'énergie pour les supercondensateurs à électrodes en charbon actif n'est pas réalisé grâce à un transfert de charges mais grâce aux interactions électrostatiques entre les ions de l'électrolyte liquide et les charges électroniques à la surface des électrodes. C'est le fait que ces charges électriques se stockent uniquement en surface qui confère aux supercondensateurs à la fois leur forte densité de puissance et leur faible densité énergétique.

Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée entre les deux électrodes, les ions de l'électrolyte, sous l'influence du champ électrique, se dirigent vers l'électrode comportant des charges de signe opposé. Les charges (électroniques du côté de l'électrode et ioniques du côté de l'électrolyte) vont donc s'accumuler de part et d'autre des interfaces entre chaque électrode et l'électrolyte. Comme nous pouvons le constater sur la figure 2.13, il se forme donc aux interfaces une zone de charge d'espace appelée double couche électrique. C'est l'épaisseur de la double couche électrique, de quelques nanomètres (liée aux diamètres des molécules du solvant de l'électrolyte de l'ordre du nanomètre), qui définit la capacité du composant. Cette très faible épaisseur, associée à une très grande surface d'électrodes (jusqu'à 2000 à 3000 m²/g) grâce à l'utilisation de matériaux poreux tels que le charbon actif, permet d'obtenir des capacités très élevées (de plusieurs milliers de farads pour les plus gros composants).

2.1.3 Autres dispositifs

Les batteries Lithium-ion et les supercondensateurs sont aujourd'hui au coeur de l'offre technologique en matière de SSE pour le transport. Toutefois d'autres technologies se posent en concurrentes, à court terme comme à long terme. Débutons cette revue d'effectif par les technologies de SSE dont la réversibilité n'est obtenue qu'au moyen d'une installation externe : pile à combustible avec hydrolyse en station, et stockage par air comprimé (ou un autre gaz) avec station de compression stationnaire. Un certain nombre de démonstrateurs existent pour ces deux technologies mais le besoin en infrastructure externe (entre autres inconvénients) est un frein conséquent à leur diffusion plus large. De nombreuses électrochimies alternatives au Lithium-ion sont également en phase de développement dans le domaine des batteries secondaires : Na-S, Na-NiCl₂, Li-S, Li-Si, Metal-Air. Pour la plupart, l'intérêt vis-à-vis de la technologie de référence Li-ion réside soit dans une densité énergétique accrue soit dans un coût de production inférieur. Toutefois, leur maturité technologique et industrielle ne devrait pas intervenir avant une voire deux décennies. D'autres dispositifs de stockage plus exotiques pourraient passer au stade industriel dans les années à venir : on compte parmi eux le stockage inductif par supraconducteur et le volant d'inertie.

Un panorama non exhaustif est proposé en figure 2.14 où sont présentés les forces et faiblesses de chaque voie technologique. L'étalon carburant pétrolier est aussi inclus pour comparaison.



FIGURE 2.14 – Panorama des systèmes de stockage de l'énergie

2.2 Architectures véhicules

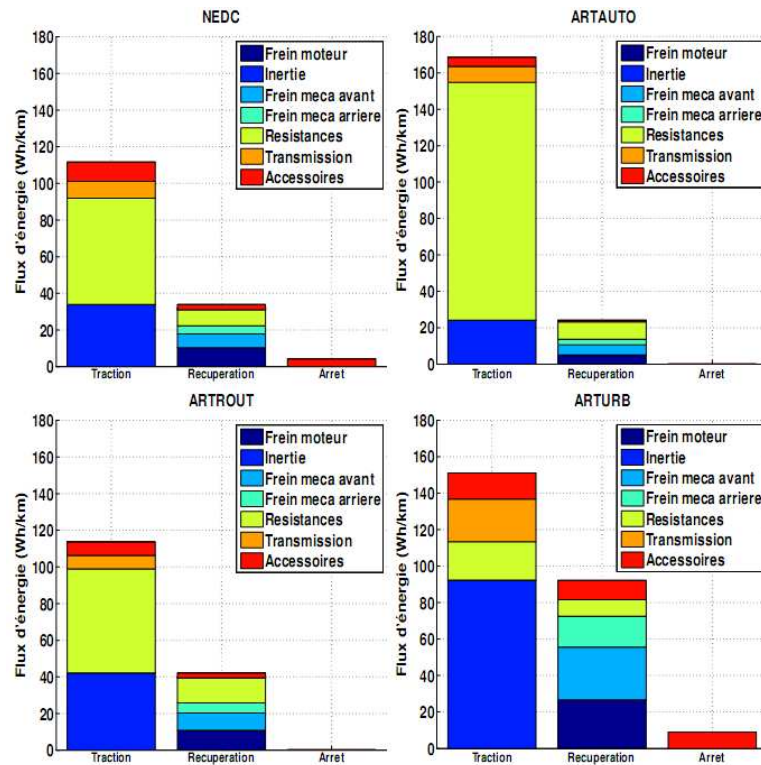


FIGURE 2.15 – Flux énergétiques sur cycles normalisés [Montaru 2009, Annexe B.2]

Un véhicule motorisé conventionnel est mû par un moteur thermique au travers d'une chaîne cinématique relativement complexe entre l'arbre moteur et la ou les roues motrices. Longtemps, les moteurs essence ont dominé l'offre commerciale, grâce à leur maturité technique précoce. Les motorisations diesel et GPL ont ensuite progressivement intégré les catalogues des différents motoristes, chacune apportant son lot d'avantages et d'inconvénients. Toutefois ces motorisations thermiques sont macroscopiquement assez proches dans la mesure où il s'agit de brûler un carburant liquide, stocké dans un réservoir, afin de générer une explosion contrôlée qui en repoussant un piston dans un cylindre crée un mouvement mécanique. Via un ensemble de dispositifs mécaniques ayant pour mission d'adapter la vitesse et le couple, on finit par obtenir une mise en mouvement rotatif des roues de nature à faire avancer le véhicule. Malheureusement, le rendement d'un moteur thermique et de sa chaîne cinématique associée sont relativement faibles. Pour ralentir le véhicule, il est nécessaire de recourir à un second système dans la mesure où un moteur thermique n'est pas strictement réversible. On utilise alors un dispositif de freinage dont la mission est d'opposer une force de friction au mouvement de rotation des roues du véhicule. Aujourd'hui, le duo disque/étrier à piston hydraulique représente la solution technique la plus commune. L'inconvénient de ce système tient au fait que l'énergie cinétique acquise par le véhicule est dissipée sous forme de chaleur lors des phases de freinage, c'est-à-dire perdue. Par ailleurs, les freins mécaniques sont des pièces à l'usure relativement rapide et nécessitent donc une maintenance régulière tout au long de la vie du véhicule. Il a été établi que l'énergie dissipée lors des phases de freinage d'un véhicule pouvait représenter une part significative de la consommation énergétique totale du véhicule comme en témoigne la figure 2.15 issue de [Montaru 2009, Annexe B.2, p215-217]. Plusieurs architectures alternatives ont alors été imaginées. Quelques-unes d'entre elles figurent sur la figure 2.16.

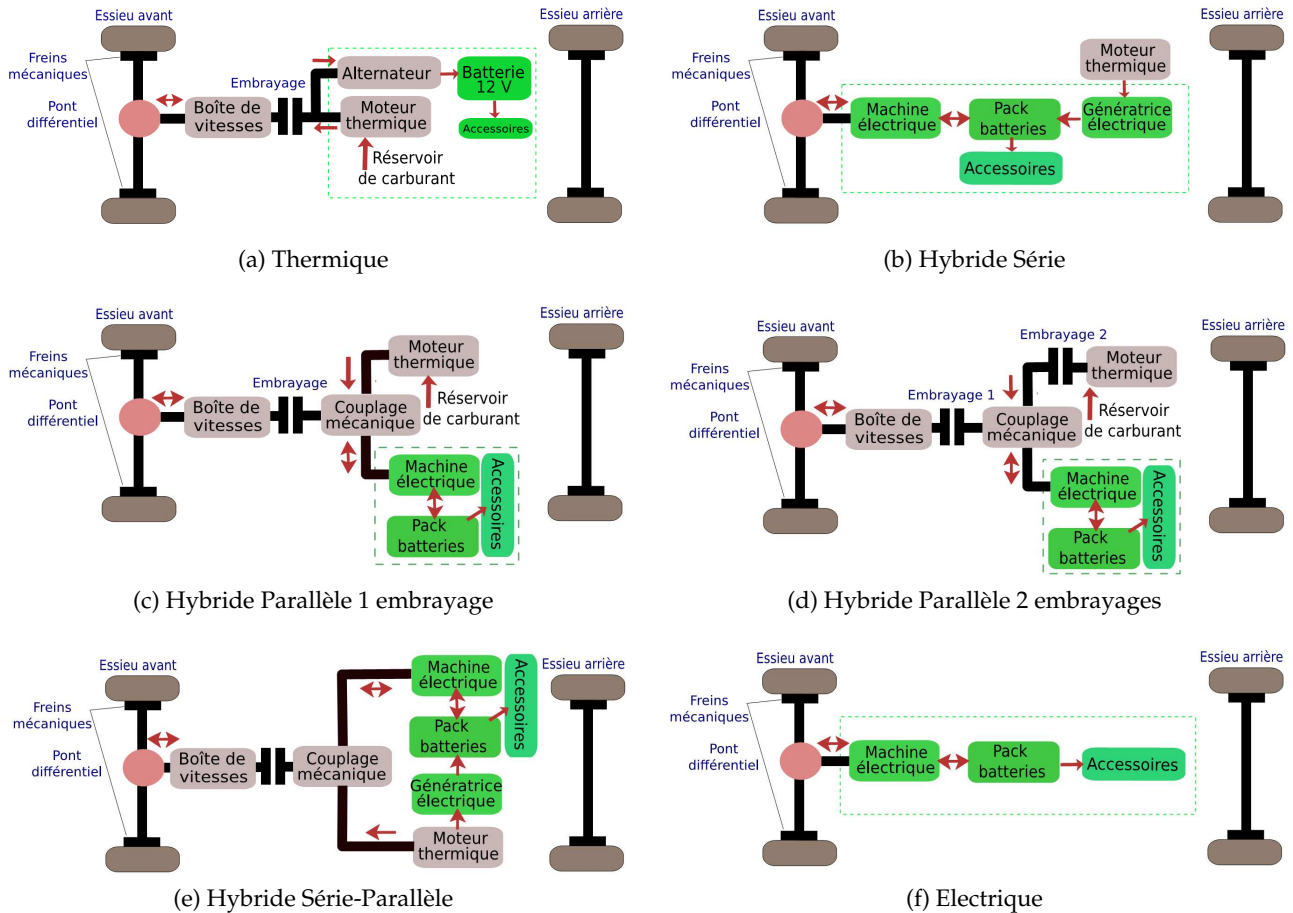
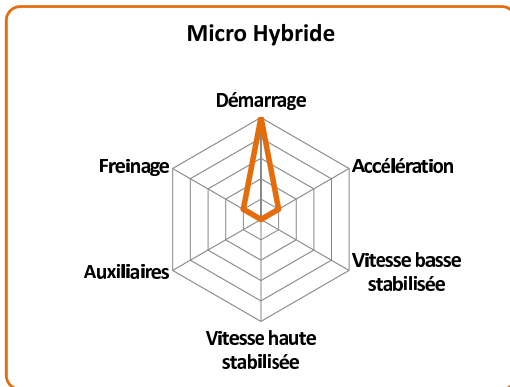


FIGURE 2.16 – Architectures possibles de la chaîne de traction [Montaru 2009, Annexe B.1]

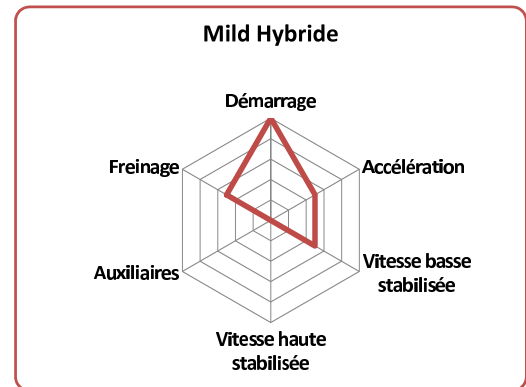
2.2.1 Hybrides (VEH)

Parmi ces nouvelles solutions, une architecture innovante a été conçue et mise sur le marché : le véhicule hybride. Un véhicule hybride, tel que la Toyota Prius, pionnière de la catégorie, est en mesure de récupérer tout ou partie de l'énergie cinétique acquise par le véhicule lors des phases de freinage, puis de la restituer lors des phases d'accélération. L'interaction mécanique avec la chaîne de traction conventionnelle est réalisée au moyen d'une ou plusieurs machines électriques de puissance relativement faible en regard de celle de la motorisation thermique principale. Toutefois, il est nécessaire de stocker l'énergie acquise lors du freinage afin de la restituer de façon contrôlée et au moment adéquat, c'est-à-dire lors d'une accélération. Un certain nombre de systèmes de stockage d'énergie (SSE) sont en mesure de remplir cet office, chacun présentant des avantages et des inconvénients bien identifiés. Une description de quelques-uns de ces SSE a été fournie au paragraphe 2.1. On parle d'hybridation car le véhicule dispose alors de plusieurs réservoirs d'énergie (au moins deux). Avec le temps, différents niveaux d'hybridation ont été proposés. Avec le niveau croissant d'hybridation, les fonctionnalités demandées au SSE croissent comme en témoignent les figures 2.17a à 2.17c. Typiquement, les transitoires de puissance mesurés sur une Prius atteignent des valeurs maximales correspondant à une décharge complète en moins de 3 minutes (23C) et une recharge en 4 minutes (15C).³

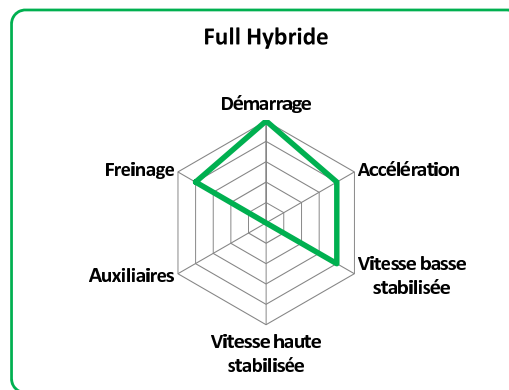
3. 1C : valeur du régime de courant (exprimé en A) qui permet de charger ou de décharger une cellule en une heure



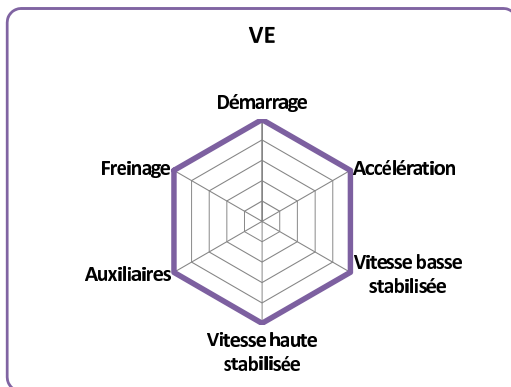
(a) Micro Hybride



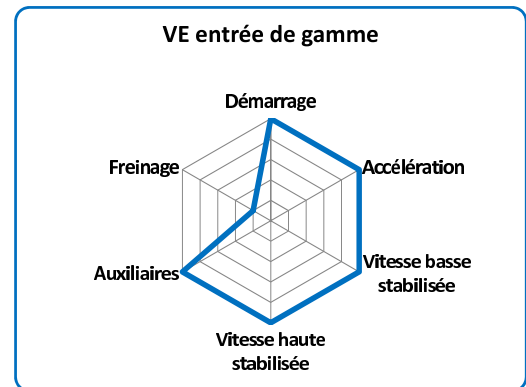
(b) Hybride Partiel (Mild)



(c) Hybride Intégral (Full)



(d) Véhicule Électrique



(e) Véhicule Électrique Limité

FIGURE 2.17 – Fonctions assumées par la batterie de traction en fonction de l'architecture

2.2.2 Electriques (VE)

Le véhicule électrique est une autre architecture de traction qui se développe progressivement. Ici, le véhicule est mû uniquement par des machines tournantes électriques et puise son énergie motrice dans le seul SSE. Celui-ci voit donc son rôle accru comme en témoignent les figures 2.17d et 2.17e. En effet, comme le SSE devient alors la seule réserve d'énergie à bord du véhicule, il se doit d'assurer l'ensemble des phases de fonctionnement (alimentation des auxiliaires, accélération, décélération et maintien de la vitesse). Il est alors nécessaire d'embarquer une capacité de stockage très supérieure à celle du VEH, typiquement un ordre de grandeur de différence, comme le montre la figure 2.18. Compte-tenu des performances actuelles des SSE, le dispositif permettant d'assurer une centaine de

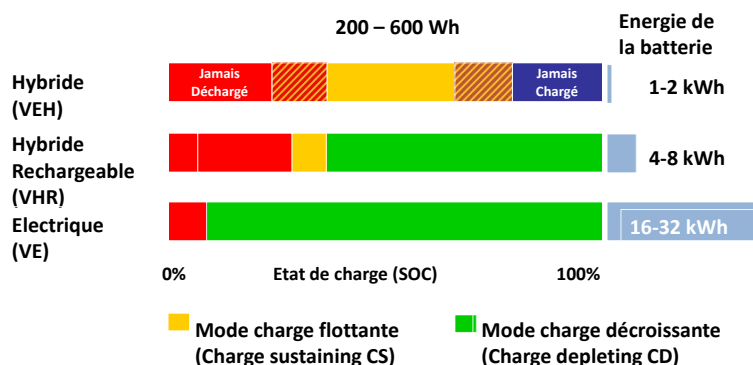


FIGURE 2.18 – Dimensionnement en fonction de l'architecture

kilomètres d'autonomie affiche alors une masse de 200kg environ (cas d'une batterie Lithium-ion de 20kWh dans un véhicule léger). On mesure ici l'importante différence de densité d'énergie gravimétrique qui sépare les motorisations thermiques et électriques (deux ordres de grandeur). Toutefois, cette plus faible autonomie n'est pas rédhibitoire pour tous les usages des véhicules légers et utilitaires, particulièrement dans les contextes urbains et péri-urbains qui représentent l'essentiel des trajets. Si l'on se réfère à la production commerciale récente, la motorisation d'un véhicule électrique léger ou utilitaire intègre une machine de 50 à 100kW et une batterie de 15 à 30kWh. Ces dimensionnements laissent présager d'un taux de décharge moyen de l'ordre de C/1 à C/2 (soit 1 à 2 heures d'autonomie) et de transitoires s'établissant entre 2C et 6C (cas de la Chevrolet Volt). Rappelons qu'il existe une extension au véhicule électrique, le véhicule à prolongateur d'autonomie (EREV). La Chevrolet Volt en fait partie, tout comme la Fisker Karma. Cette variante autorise une autonomie de déplacement plus grande voire illimitée en recourant à une génératrice thermique reliée à un petit réservoir d'essence. Ceci permet de produire de l'énergie électrique lorsque le SSE est vide et de continuer à alimenter les auxiliaires et la chaîne de traction.

2.3 Vieillessement et fiabilité

2.3.1 Champs d'application

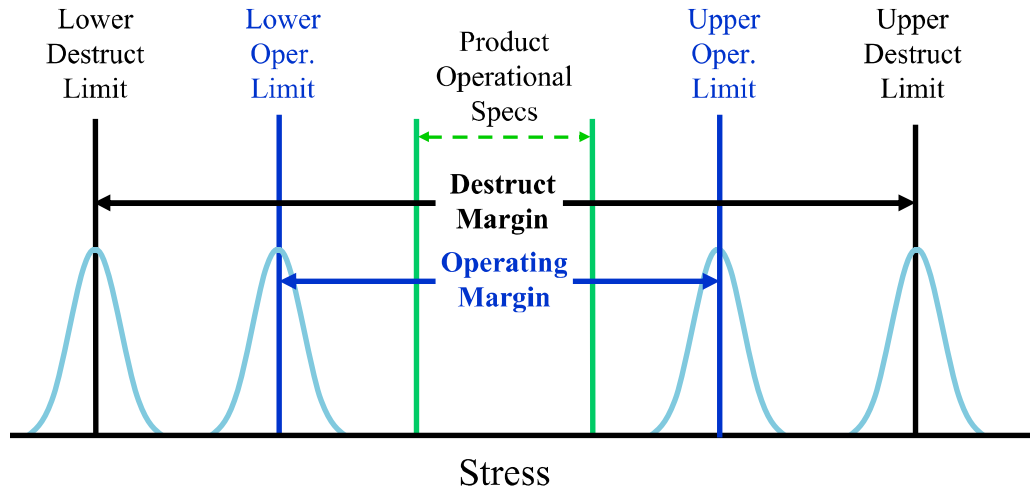


FIGURE 2.19 – Méthode HALT [Silverman 2005]

La dégradation physico-chimique des composants et systèmes concerne tous les produits manufacturés par l'Homme. Dans certains cas, ce phénomène est caractérisé par des constantes de temps largement supérieures à la durée d'utilisation usuelle du produit considéré. Dans d'autres cas, le faible coût du produit incite à ne pas chercher à prolonger la durée de vie de celui-ci mais plutôt à lui chercher un remplaçant. Dans d'autres cas encore, la dégradation usuelle ne perturbe pas l'aspect fonctionnel du produit. Pour tous ces cas de figure, la juste prédiction et l'optimisation de la durée de vie du produit ne constitue pas un enjeu économique majeur. À l'inverse, certaines réalisations technologiques, de par leur coût initial important ou de par l'obligation de service qui les caractérise, se doivent de présenter des caractéristiques de durée de vie tout à la fois suffisantes et prédictibles. À titre d'exemple, citons les pièces d'usure des véhicules qui revêtent un aspect vital (freins, pneus), les sous-systèmes vitaux des avions, des satellites, des centrales nucléaires, les réalisations de travaux publics (pont, immeuble, tunnel), etc...

Plusieurs approches sont envisageables lorsqu'il s'agit de caractériser la durée de vie d'un composant. La plus évidente consiste à étudier la durée de vie effectivement constatée en marche normale, sur un échantillon de taille variable. Cela peut toutefois prendre plusieurs années et ne permet pas d'améliorer le produit avant de le mettre sur le marché. De plus, les paramètres environnementaux sont difficilement quantifiables. Une seconde approche consiste à simuler le vieillissement d'un lot de composants soumis à différentes conditions expérimentales, au moyen de chambres climatiques généralement, afin de disposer d'une base de données relative aux performances de durée de vie en fonction de l'environnement considéré. Évidemment la définition des conditions expérimentales est alors très importante et conditionne la validité des résultats. L'utilisation d'un échantillon de référence (ou étalon) permet de quantifier l'influence respective des différents paramètres environnementaux. Lorsque ces tests sont réalisés en imposant des contraintes légèrement supérieures à celles rencontrées dans le cadre d'une utilisation du produit dans le monde réel, on parle alors d'essais de vieillissement accélérés ou ALT (Accelerated Life Testing).

Lorsqu'on accroit progressivement les contraintes, généralement par paliers et sans limites pré-établies, jusqu'à provoquer la défaillance du composant testé, on parle de HALT (Highly Accelerated

Tab. 2.9.3 - Performance grid relative to the factor A

Cod e	Sub-factor	Factors levels	Score
A1	Traction resistance	$R_{tr} < 100 \text{ KPa}$	0,90
		$100 \leq R_{tr} \leq 120 \text{ KPa}$	1,00
		$121 \leq R_{tr} \leq 150 \text{ KPa}$	1,10
		$R_{tr} > 150 \text{ KPa}$	1,20
A2	Compression resistance	$R_{tr} < 120 \text{ KPa}$	0,90
		$120 \leq R_{tr} \leq 150 \text{ KPa}$	1,00
		$151 \leq R_{tr} \leq 175 \text{ KPa}$	1,10
		$R_{tr} > 175 \text{ KPa}$	1,20
A3	Density	$\delta < 34 \text{ Kg/m}^3$	0,90
		$34 \leq \delta \leq 37 \text{ Kg/m}^3$	1,00
		$\delta > 37 \text{ Kg/m}^3$	1,10
A4	Water permeability	$\geq 300 \text{ Pa}$	0,90
		$\geq 600 \text{ Pa}$	1,00
		$\geq 1200 \text{ Pa}$	1,10
A5	Colour changing	$\Delta E_{ab}^* > 8$	0,80
		$5 \leq \Delta E_{ab}^* \leq 8$	0,90
		$\Delta E_{ab}^* < 5$	1,00
A6	Quality	FPC (ISO 9000)	0,80
		ETA	0,90
		CE marking of products	1,00

(a) Facteur A et sous-facteurs

Tab. 2.9.4 - Performance grid relative to the others factors

Code	Factor	Factors levels	Score
B	Quality of project	Any certificate	0,90
		According to best practice indications	1,00
C1	Quality of construction	Any certificate	0,90
		According to best practice indications	1,00
C2	Quality of construction: laying team	Not specialized	0,90
		Specialized	1,00
D	Indoor environment	Very aggressive	0,70
		Aggressive	0,80
		Middly aggressive	0,90
		Low aggressive	1,00
		Not aggressive	1,10
E	Outdoor environment	Industrial and marine	0,70
		Industrial	0,80
		Marine	0,90
		Urban	1,00
		Rural	1,10
F	Conditions of use	Environment with bumps against hard body	0,80
		Environment with bumps against soft body	0,90
		Environment with no frequent bumps	1,00
		Environment with rare bumps	1,10
G	Level of maintenance	High (< 10 years)	0,90
		Medium ($10 \leq t \leq 20$ years)	1,00
		Low (> 20 years)	1,10

(b) Facteurs B à G

Tab. 2.9.5 - Assessment of ESL

Component RSL	Sandwich panel on discontinuous roofing 10 years	
Factor	Level	Score
A	According to technical characteristics	1,18
B	According to best practice indications	1,00
C	Construction in according to best practice indications and by specialized laying team	1,00
D	Not aggressive indoor environment	1,10
E	Urban environment	1,00
F	Environment with rare bumps	1,10
G	High level of maintenance	0,90
ESL	RSL x A x B x C x D x E x F x G	12,83 years

(c) Résultat de la prédiction de durée de vie

FIGURE 2.20 – Approche factorielle appliquée aux matériaux de construction [Daniotti 2010]

Life Testing). Il s'agit d'un processus itératif au cours duquel l'objectif des essais menés est de déceler les modes et mécanismes de défaillances à moyen et long termes dans des produits en cours de développement afin de corriger le produit au stade de sa conception. Aussi la représentativité des contraintes appliquées ou le facteur d'accélération qui en découle passent-ils au second plan. Le second intérêt de la méthode HALT consiste à déterminer les limites de fonctionnement sain du produit ainsi que les marges offertes par la conception (c'est-à-dire l'écart entre les limites de fonctionnement observées et les conditions réelles d'utilisation, cf. figure 2.19). Si la méthode HALT ne permet pas de caractériser la durée de vie d'un produit, elle permet néanmoins de la faire croître en repoussant la survenue et l'intensité de différents modes de défaillances vers des niveaux de sollicitation plus éloignés des conditions typiques d'utilisation.

La méthode HASS (Highly Accelerated Stress Screening) est mise en place à la suite de la méthode HALT et consiste à réutiliser les résultats obtenus en HALT afin de tester individuellement les composants produits sur une ligne. En réalisant une série de tests courts mais intenses en bout de ligne, il est possible de mettre en évidence les défauts de jeunesse de certains composants. Si la proportion de rebut augmente brusquement, cela traduit une modification significative lors du processus de fabrica-

tion et appelle donc une action corrective. Cette combinaison HALT/HASS est massivement utilisée dans l'industrie du semi-conducteur, entre autres.

L'approche factorielle s'intéresse davantage à quantifier le lien entre vieillissement constaté et facteur aggravant dans le but de renseigner un modèle de durée de vie en opération. Dans un premier temps, il faut définir une performance de référence (réalisée dans un environnement de référence) notée RSL (reference service life). Ensuite, une matrice d'essais dans lesquels on fait varier l'un des paramètres environnementaux permet de quantifier l'influence quantitative relative à ce changement. Enfin, la combinaison linéaire des différents facteurs permet d'établir la performance estimée sous les conditions environnementales considérées. On note cette performance ESL (estimated service life). Dans le domaine des matériaux de construction, une approche factorielle a été proposée par [Daniotti 2010]. Un cas appliqué est présenté dans la figure 2.20.

2.3.2 Cas des batteries

Cause	Effect	Leads to	Reduced by	Enhanced by
Electrolyte decomposition (→SEI) (Continuous side reaction at low rate)	Loss of lithium Impedance rise	Capacity fade Power fade	Stable SEI (additives) Rate decreases with time	High temperatures High SOC (low potential)
Solvent co-intercalation, gas evolution and subsequent cracking formation in particles	Loss of active material (graphite exfoliation) Loss of lithium	Capacity fade	Stable SEI (additives) Carbon pre-treatment	Overcharge
Decrease of accessible surface area due to continuous SEI growth	Impedance rise	Power fade	Stable SEI (additives)	High temperatures High SOC (low potential)
Changes in porosity due to volume changes, SEI formation and growth	Impedance rise Overpotentials	Power fade	External pressure Stable SEI (additives)	High cycling rate High SOC (low potential)
Contact loss of active material particles due to volume changes during cycling	Loss of active material	Capacity fade	External pressure	High cycling rate High DOD
Decomposition of binder	Loss of lithium Loss of mechanical stability	Capacity fade	Proper binder choice	High SOC (low potential) High temperatures
Current collector corrosion	Overpotentials Impedance rise Inhomogeneous distribution of current and potential	Power fade Enhances other ageing mechanisms	Current collector pre-treatment (?)	Overdischarge Low SOC (high potential)
Metallic lithium plating and subsequent electrolyte decomposition by metallic Li	Loss of lithium (Loss of electrolyte)	Capacity fade (power fade)	Narrow potential window	Low temperature High cycling rates Poor cell balance Geometric misfits

FIGURE 2.21 – Analyse qualitative des mécanismes et modes de dégradation d'une anode graphite et de leurs influences [Vetter 2005]

Les batteries secondaires modernes se présentent comme un système électrochimique complexe résultant de l'assemblage industriel de quelques dizaines de constituants. Par ailleurs, une batterie peut être considérée comme un système non maintenable dans la mesure où la plupart des technologies actuelles se présentent sous la forme d'objets scellés, sur lesquels toute forme de maintenance interne est exclue. Aussi la défaillance, même partielle, d'une batterie s'avère-t-elle définitive. On peut néanmoins mentionner les travaux de [Wang 2011a], où une quantité significative de Lithium cyclable a pu être restaurée en déchargeant la cathode interne face à une anode externe chargée en Lithium. L'opération est répétable et a permis de restaurer une partie importante de la capacité perdue en cyclage. Cela ne concerne toutefois que la perte de capacité par diminution de Lithium cyclable. On peut également s'interroger sur la viabilité économique du procédé ; les auteurs proposent

d'équiper les cellules produites d'une 3^{ème} électrode agissant comme une anode réserve pour restituer des petites quantités de Lithium cyclable, lorsqu'on les utilise à l'aide d'un circuit externe. Le surpoids ainsi engendré serait rendu acceptable par l'utilisation d'un matériau d'anode haute capacité (Li-métal, Silicium) qui ne serait soumis qu'à très peu de cycles.

Une approche factorielle a été utilisée dans le cadre du programme de recherche français SIM-STOCK (vieillessement pour application véhicule hybride), dont les premiers résultats commencent à paraître [Liu 2011], ainsi que dans le programme SIMCAL (vieillessement calendaire) [Kassem 2012]. Dans le cas des batteries Lithium-ion, une campagne HALT/HASS reviendrait à tester les limites de fonctionnement sûr du système batterie. Par exemple, l'étude de la tolérance à la surcharge (dépassement de la tension maximale préconisée), à la surdécharge (dépassement de la tension minimale préconisée), aux températures extrêmes (chaudes pour tester le risque de survenue d'un emballement thermique, froides pour tester l'apparition d'un mode dégradé, comme le plaquage de Lithium métallique à l'anode par exemple), au courant maximum admissible en charge et en décharge ou encore la résistance mécanique des cellules.

A l'opposé, une campagne ALT consisterait à faire vieillir un ensemble de cellules, en vieillissement calendaire et/ou en cyclage, sous des conditions expérimentales assez contraignantes (haute température, typiquement supérieure à 50°C, forts courants, ...) mais qui resteraient dans les plages de fonctionnement limites préconisées par le fabricant. Ce type d'essais est extrêmement répandu mais n'offre pas toujours la possibilité de prédire la durée de vie en opération réelle, notamment dans le cadre d'un fonctionnement soumis à des contraintes environnementales très variables. De plus, pour aboutir à une prédiction, il est nécessaire de comparer les résultats obtenus à un échantillon de référence vieilli dans des conditions beaucoup plus relâchées, ce qui requiert une certaine durée d'expérimentation (en mois ou en années).

Soulignons également que les batteries font partie de ces rares systèmes complexes qui emmagasinent une quantité d'énergie non-négligeable. Leur défaillance peut donc entraîner des effets extérieurs nuisibles voire destructeurs. Enfin, il n'est généralement pas possible de monitorer l'état interne d'une batterie car aucun dispositif n'est prévu à cet effet dans le cadre d'une production industrielle. Il faut donc se contenter d'outils d'analyse et d'observation indirectes, avec le lot d'incertitude que cela comporte.

La littérature des deux dernières décennies propose de nombreux essais de vieillissement et interprétations électrochimiques. Les paramètres les plus souvent cités comme influents sont : profondeur de décharge (DOD), température, courant efficace, état de charge (SOC), courant maximum, protocole de charge, composition et structuration des électrodes, composition de l'électrolyte. L'objectif de cette partie est d'établir la relation entre la variation de ces différents paramètres et le résultat en termes de vieillissement et de dégradation des performances des batteries. Les situations de vieillissement calendaire et en cyclage seront distinguées. Les travaux de [Vetter 2005, Broussely 2001, Broussely 2005] sont souvent cités et repris lorsqu'il s'agit de résumer les causes et facteurs aggravant du vieillissement des batteries Lithium-ion. En particulier la figure 2.21 décrit les mécanismes propres à l'anode graphite des ces batteries.

En revanche, il existe peu de travaux sur une synthèse quantitative des influences de ces mécanismes. C'est ce que je me propose de faire dans les paragraphes suivants. Pour réaliser les graphiques qui vont suivre, la méthodologie a consisté, pour chaque étude traitant de l'effet du paramètre considéré, à identifier la valeur minimale du paramètre environnemental étudié (température, DOD, etc...) parmi les essais réalisés. La performance de vieillissement associée à ce paramètre minimal sert de référence et son résultat quantitatif (dont la métrique varie en fonction des études) devient le score de référence ("1") pour l'étude considérée. Les autres résultats décrits par l'étude considérée et obtenus en faisant varier la valeur du paramètre considéré sont alors comparés à ce résultat de référence. Ils obtiennent alors un score relatif (supérieur ou égal à 1). Tous ces résultats, provenant de différentes études mais traitant de l'influence quantitative d'un paramètre donné (la température par

exemple), sont projetés sur un même graphique pour centraliser les informations. Afin de maximiser la lisibilité, l'échelle des scores de dégradation (axe des ordonnées) est parfois représentée en échelle log base 2. Le détail de la compilation bibliographique et des scores calculés pour chaque étude est fourni en annexe [B](#).

2.3.2.1 Influence de la température ambiante

D'après les travaux de [Jungst 2000, Amine 2001, Takei 2001, Shim 2002, Wright 2002, Asakura 2003, Bloom 2003, Ramadass 2003, Thomas 2003, Wright 2003, Sarre 2004, Belt 2005, Broussely 2005, Ichimura 2005, Itou 2005, Ramasamy 2005, Christophersen 2006, Guena 2006, Abraham 2007, Kobayashi 2007, Brown 2008, Thomas 2008, Haifeng 2009, Matsushima 2009, Mori 2009, Pasquier 2009, Dupré 2010, Liu 2010, Liu 2011, Safari 2011, Castro 2012, Groot 2012, Kassem 2012, Thomas 2012], la température a un effet significatif sur la dégradation des performances d'une cellule dans le temps.

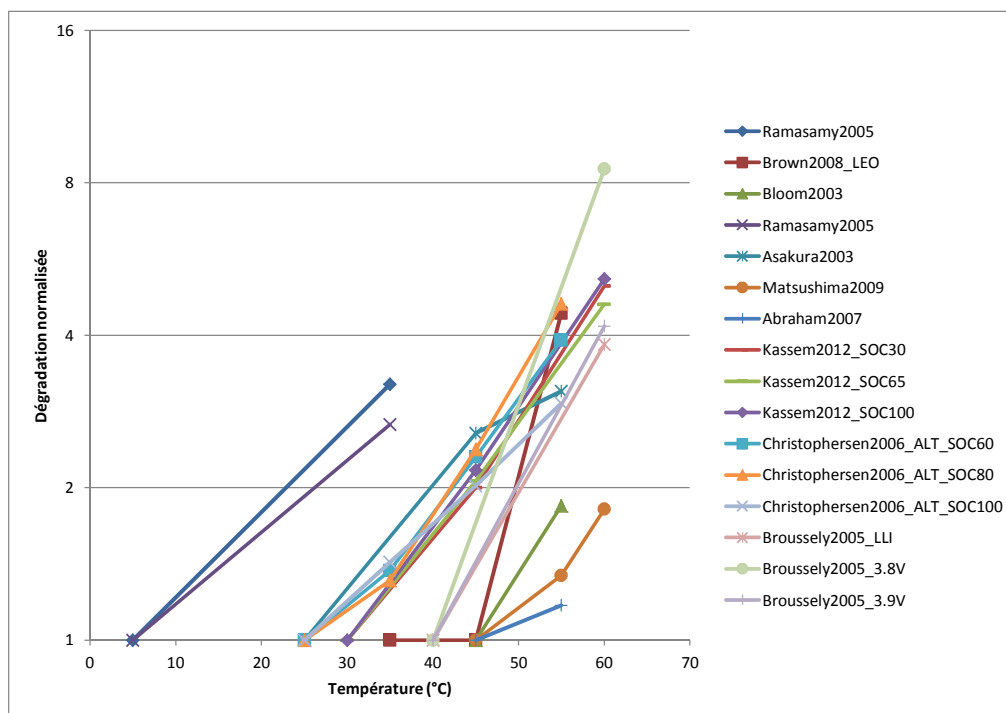


FIGURE 2.22 – Influence normalisée de la température sur la diminution de la capacité lors de vieillissement calendaire (cf. tableau B.1)

Diminution de la capacité Les figures 2.22 à 2.23 résument les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'influence de la température sur le rythme de dégradation en capacité des batteries Lithium-ion. En particulier, la figure 2.22 traite spécifiquement du vieillissement calendaire ou en floating. La figure 2.23 s'intéresse au vieillissement en cyclage des cellules NCA (Nickel-Cobalt-Aluminium) alors que la figure 2.24 concerne toutes les autres électrochimies usuelles (LCO, LMS, LFP).

Augmentation de l'impédance Les figures 2.25 et 2.26 résument les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'influence de la température sur le rythme de dégradation en puissance des batteries Lithium-ion. En particulier, la figure 2.25 traite spécifiquement du vieillissement calendaire alors que la figure 2.26 s'intéresse au vieillissement en cyclage ou en floating.

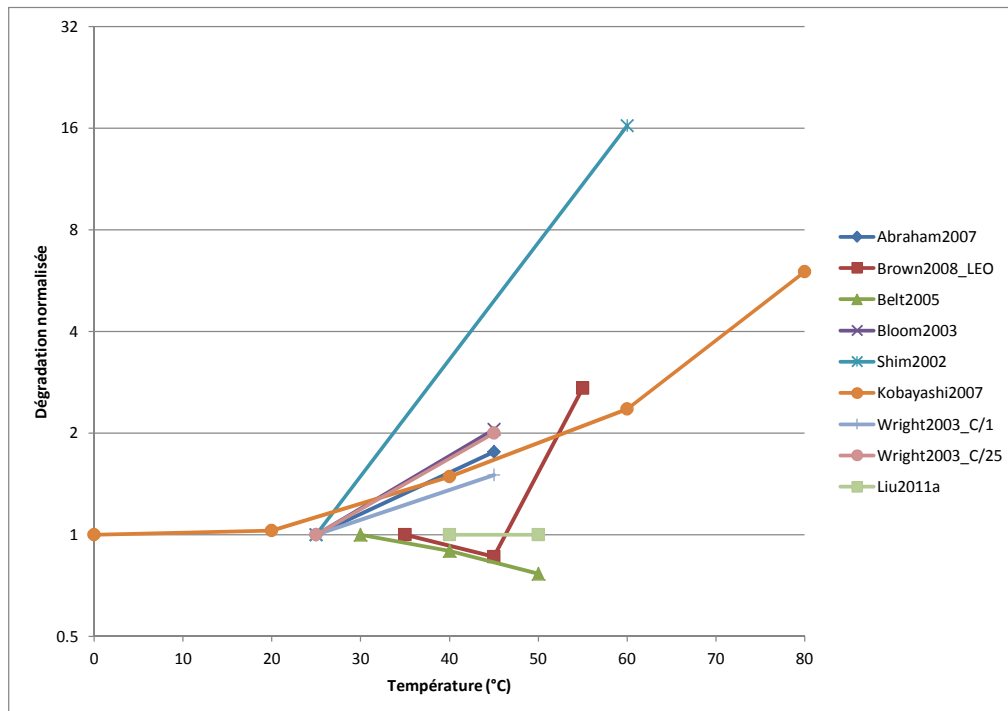


FIGURE 2.23 – Influence normalisée de la température sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage - NCA (cf. tableau B.2)

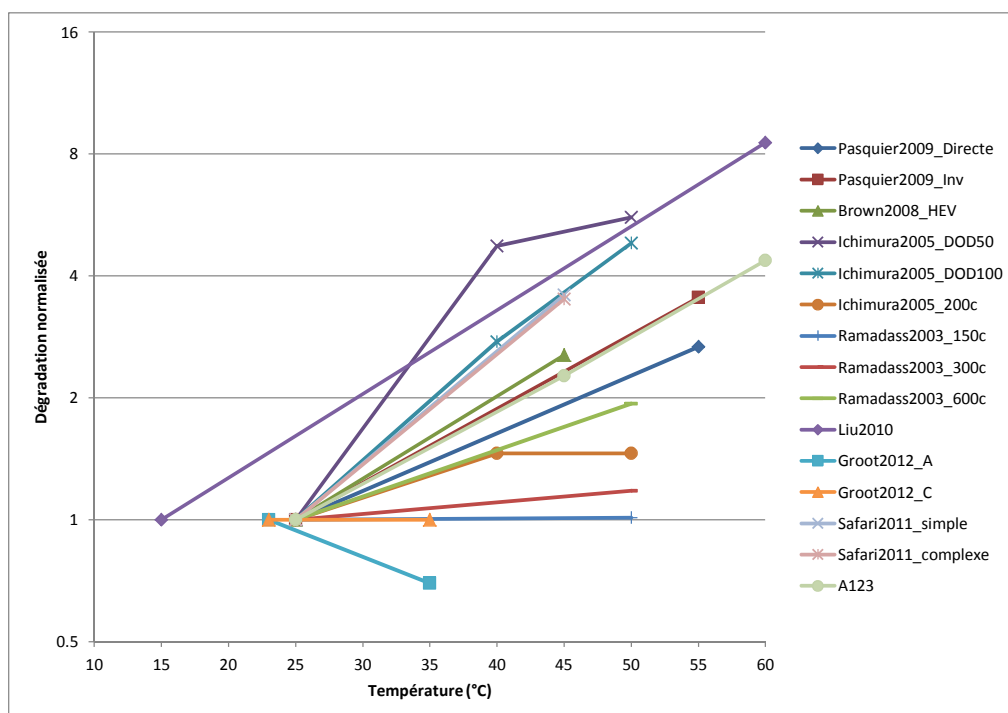


FIGURE 2.24 – Influence normalisée de la température sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.3)

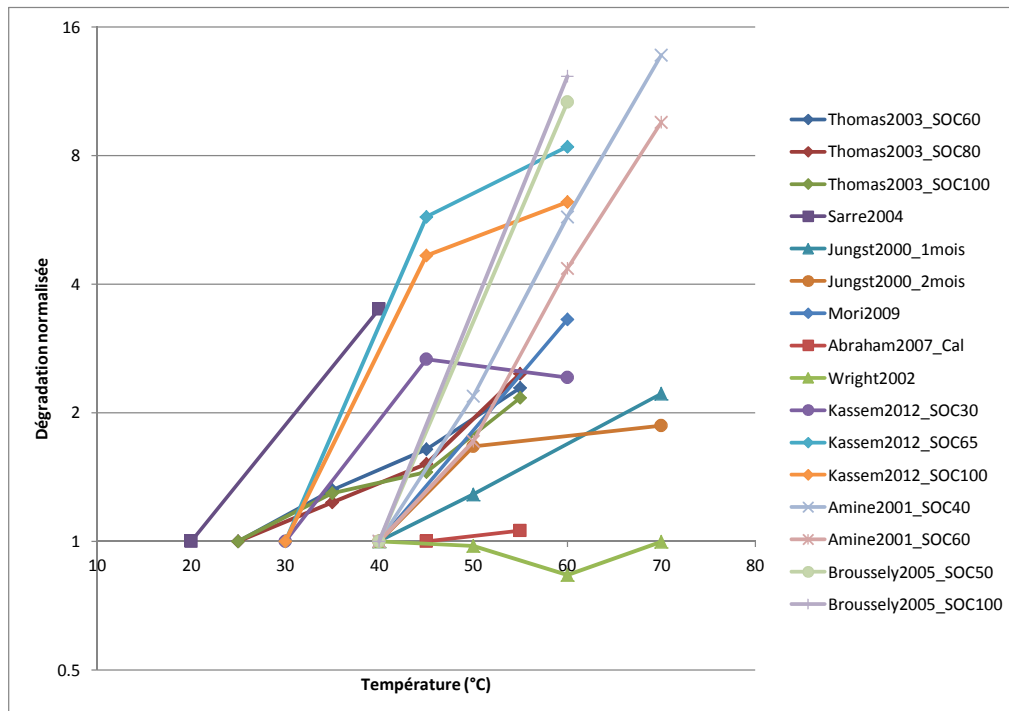


FIGURE 2.25 – Influence normalisée de la température sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement calendaire (cf. tableau B.4)

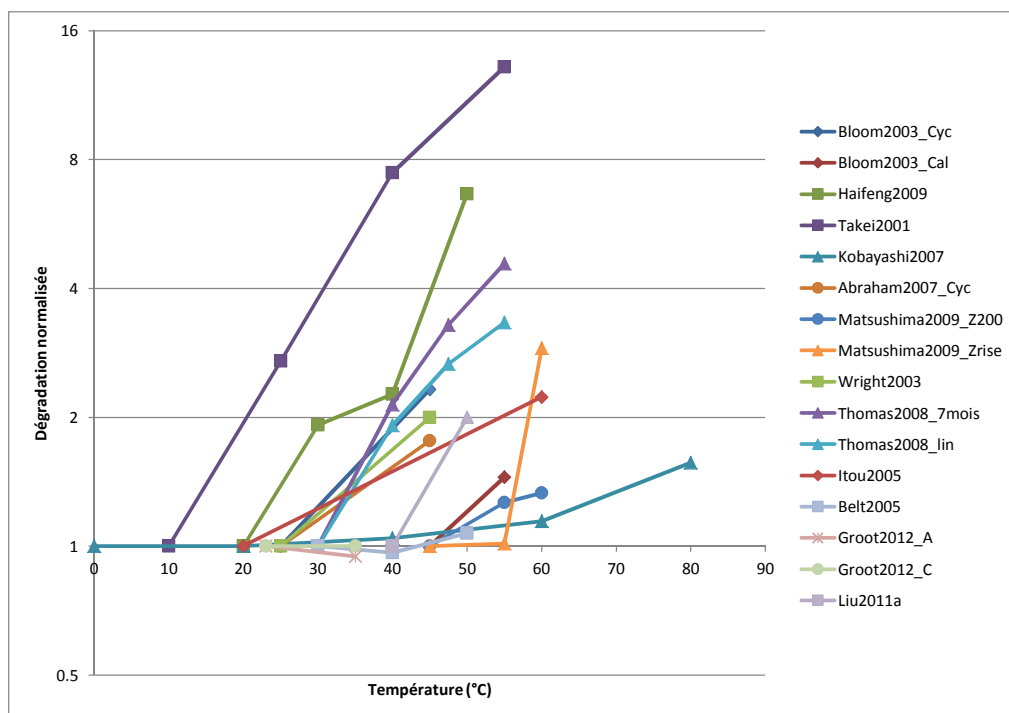


FIGURE 2.26 – Influence normalisée de la température sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.5)

2.3.2.2 Influence de la profondeur de décharge (DOD)

Historiquement, réduire la DOD⁴ à laquelle était soumis un SSE permettait de prolonger la durée de vie du SSE de façon assez sensible. Ce principe est encore largement utilisé sur les technologies Plomb (SLA, Deep Cycle, Marine) sans quoi la capacité s'effondre à un rythme extrêmement rapide. Les batteries Nickel bénéficiaient aussi de ce phénomène. Avec l'avènement de la technologie Lithium-ion, il est nécessaire de vérifier si ce phénomène est toujours sensible et si oui, dans quelle mesure.

Un cas concret de limitation de la DOD pour prolonger la durée de vie du SSE est illustré par le véhicule Chevrolet Volt de type PHEV. La conception originale prévoyait l'utilisation de 64% de la capacité nominale pour l'usage véhicule électrique (10.3kWh sur 16kWh embarqués). Le retour d'expérience a permis aux ingénieurs Chevrolet de relâcher quelque peu la contrainte sur ce paramètre (65%, 10.8kWh sur 16.5kWh embarqués), ce qui autorise une autonomie en mode tout électrique légèrement accrue [Volt 2012].

[Takei 2001, Fellner 2003, Shim 2003, Ning 2004, Ichimura 2005, Takeno 2005, Guena 2006, Brown 2008, Haifeng 2009, Herb 2009, Peterson 2010, Liu 2011, Groot 2012] ont étudié l'influence de la DOD sur le rythme de dégradation des batteries Lithium-ion (cf. figures 2.27 et 2.28). [Takeno 2005] et [Peterson 2010] sont les seuls à observer un effet bénéfique de la DOD sur la quantité d'énergie totale extractible durant la vie de la batterie. Pour [Takeno 2005], l'explication tient probablement à l'accroissement du SOC moyen qui accompagne la diminution de la DOD. Enfin, [Ichimura 2005] n'observe pas de différence avant 180 cycles.

4. par DOD, il faut entendre ici $DOD = \Delta SOC$

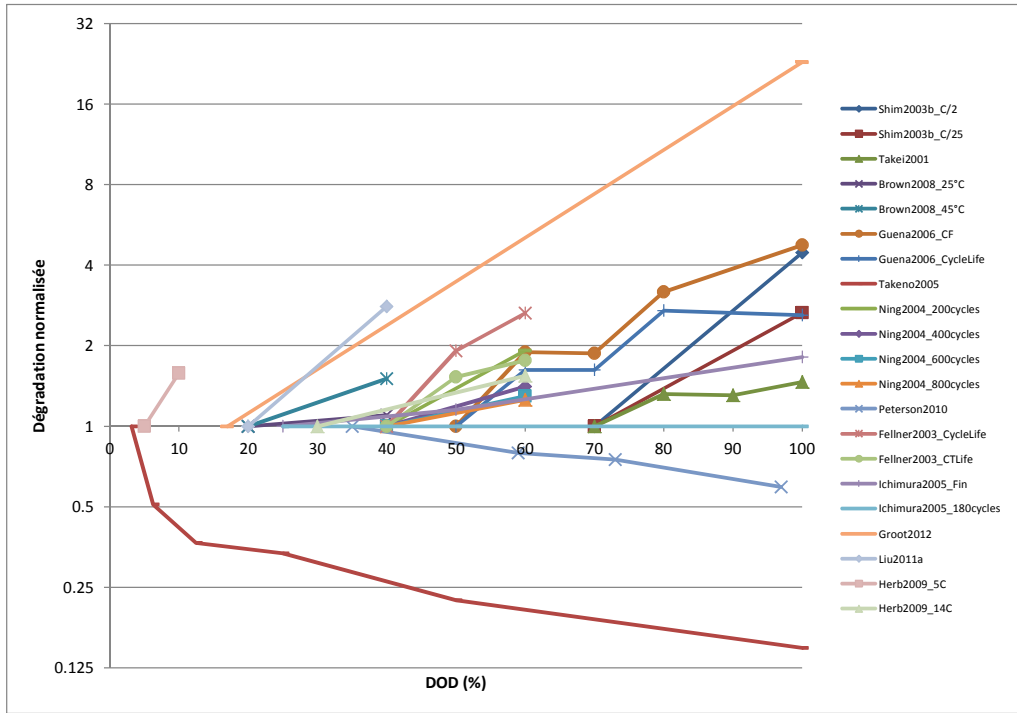


FIGURE 2.27 – Influence normalisée de la DOD sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.6)

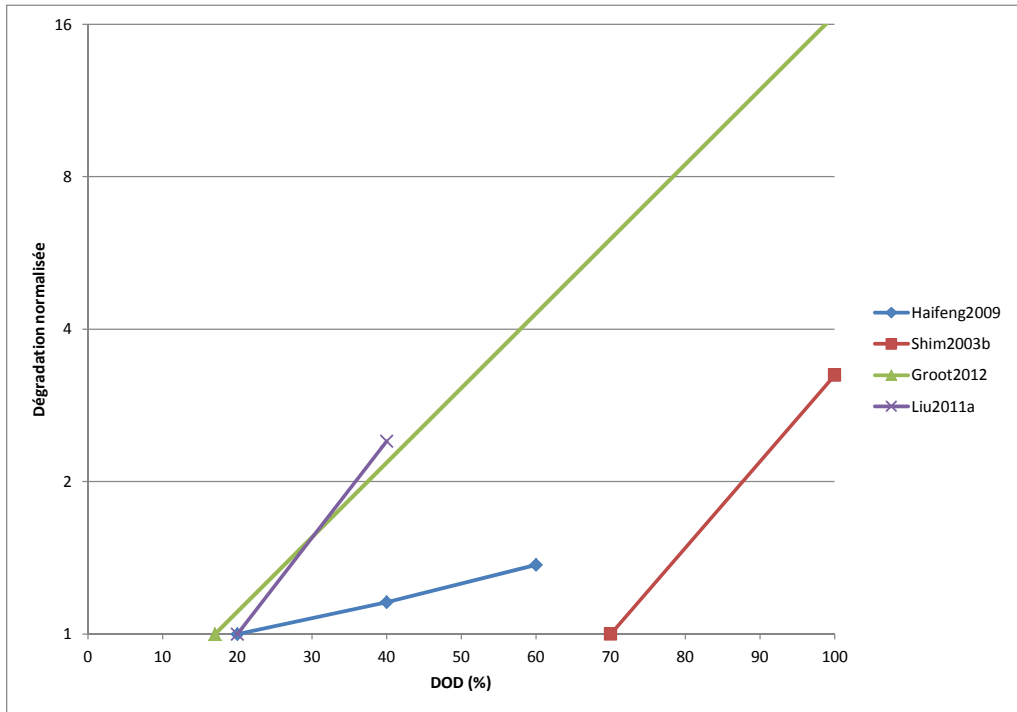


FIGURE 2.28 – Influence normalisée de la DOD sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.7)

2.3.2.3 Influence de l'état de charge (SOC)

L'état de charge ou SOC traduit l'état interne de la batterie et en particulier le stade d'évolution des électrodes (anode et cathode) en matière de quantité d'ions Lithium stockés. Un SOC de 100% signifie que la batterie est pleinement chargée ce qui revient à dire que la cathode est à son niveau minimum de concentration en ions Lithium et que l'anode est à son niveau maximum de concentration en ions Lithium. La situation s'inverse à 0% de SOC. Ainsi, les compositions internes des électrodes seront différentes d'un état de charge à un autre et seront donc susceptibles de se comporter différemment aussi bien en termes de performances électrochimiques qu'en termes de mécanismes et rythmes de dégradation. L'électrolyte et les réactions parasites qui s'y déroulent sont également sensibles à ces variations de SOC. En particulier, un SOC élevé se traduit par une fenêtre de potentiels maximale entre l'anode et la cathode. L'électrolyte sera donc soumis à une instabilité électrochimique plus prononcée à ses deux interfaces avec l'anode d'une part (potentiel minimum) et la cathode d'autre part (potentiel maximum).

Son influence sur la diminution de capacité a fait l'objet de recherches par [Takei 2001, Ichimura 2005, Takeno 2005, Christophersen 2006, Brown 2008, Thomas 2008, Safari 2011, Kassem 2012]. Par ailleurs, son influence sur l'augmentation d'impédance a fait l'objet de recherches par [Amine 2001, Thomas 2003, Liaw 2003, Broussely 2005, Christophersen 2006, Kassem 2012]. Beaucoup concluent à une dégradation accélérée avec l'augmentation de SOC. Toutefois le SOC semble être un facteur moins influent que la température ou la DOD. Par ailleurs, [Brown 2008, Safari 2011, Kassem 2012] ne mesurent pas une dépendance significative envers le SOC. Dans le détail, en cyclage, [Brown 2008] conclut d'une quasi-absence d'influence du SOC (entre 40 et 80%) sur le rythme de dégradation de cellule bouton à base de NCA (issu du programme de recherche américain ATD). Idem pour [Thomas 2008] entre 33 et 53% de SOC moyen. [Takei 2001] divise en 4 la fenêtre de tension d'une cellule LCO et observe l'absence d'influence entre 0 et 37.5% de SOC moyen (c'est-à-dire en incluant une légère surdécharge), puis une rapide accélération à partir de 50% de SOC jusqu'à 100%. En calendrier, [Amine 2001, Thomas 2003, Liaw 2003] observent une influence significative avec le SOC croissant. A l'opposé, sur des cellules LFP (A123 2.3Ah) une très faible dépendance a été observée par [Safari 2011, Kassem 2012], ce qui peut éventuellement être expliqué par l'allure plate de la courbe de potentiel du $LiFePO_4$ en fonction du SOC.

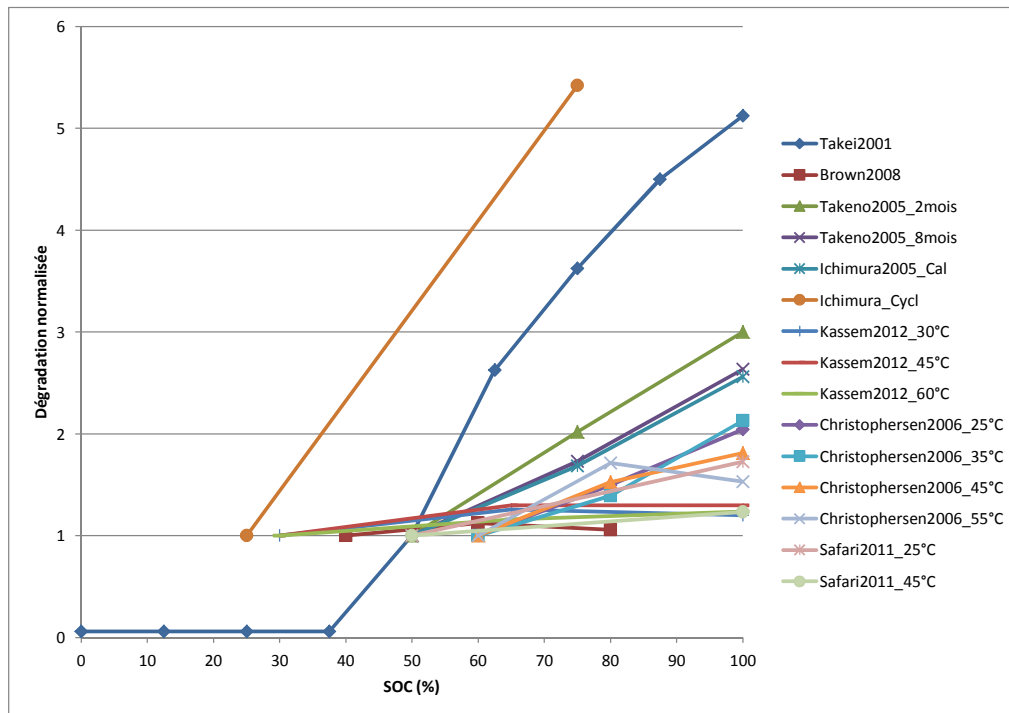


FIGURE 2.29 – Influence normalisée du SOC sur la diminution de la capacité lors de vieillissement calendaire ou en cyclage (cf. tableau B.8)

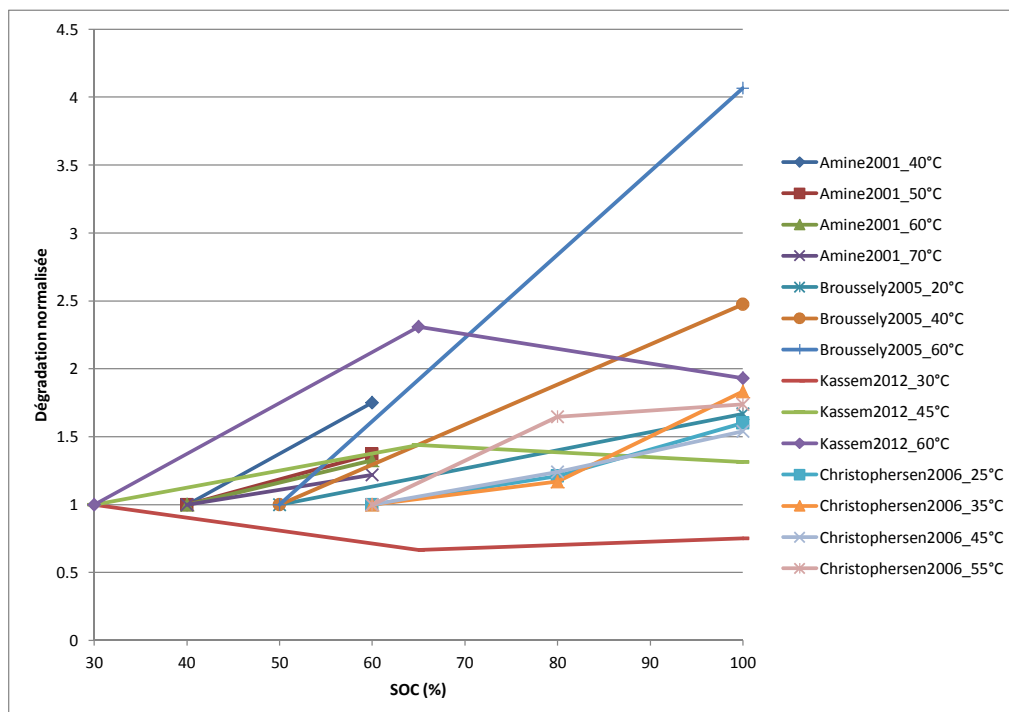


FIGURE 2.30 – Influence normalisée du SOC sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement calendaire ou en cyclage (cf. tableau B.9)

2.3.2.4 Influence du protocole de charge

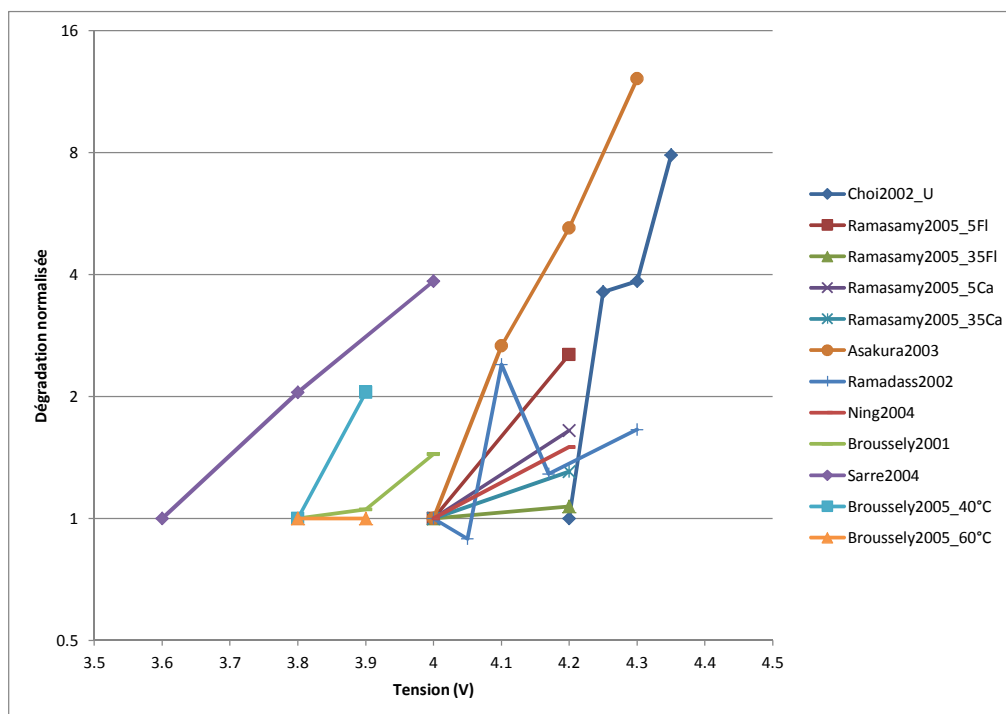


FIGURE 2.31 – Influence normalisée de la tension de fin de charge sur la diminution de la capacité lors de vieillissement calendaire ou en cyclage (cf. tableau B.10)

Dans le cadre d'une application transport, il est difficile de maîtriser le profil du courant lors des phases en mouvement. En revanche, pour un véhicule avec recharge sur le réseau, jouer sur le protocole de charge (intensité du courant, durée, relaxations, tension maximale, floating, ...) est une possibilité qu'il ne faut pas écarter. Intéressons-nous en particulier à l'influence de la tension maximale atteinte en fin de charge ainsi qu'à l'influence de la durée de la phase à tension constante (en charge CC-CV⁵). Selon [Broussely 2001, Choi 2002, Ramadass 2002, Asakura 2003, Ning 2004, Sarre 2004, Ramasamy 2005] l'augmentation de la tension de fin de charge accélère le vieillissement des batteries (cf. figure 2.31). Les effets les plus marqués ont été observés par [Choi 2002, Asakura 2003] sur des cellules LCO. Toujours d'après [Choi 2002], la suppression de la phase CV a permis de diviser par 6 environ le rythme de dégradation des cellules testées par rapport à des phases CV de durée variable (28 à 100 min). Lorsque cela est possible, réduire la tension de fin de charge et supprimer la phase CV (au détriment de la capacité stockée) permet probablement de prolonger la durée de vie de la batterie.

5. Constant Current - Constant Voltage : maintient d'un courant constant jusqu'à une tension donnée puis maintient de cette tension constante

2.3.2.5 Influence du niveau de courant

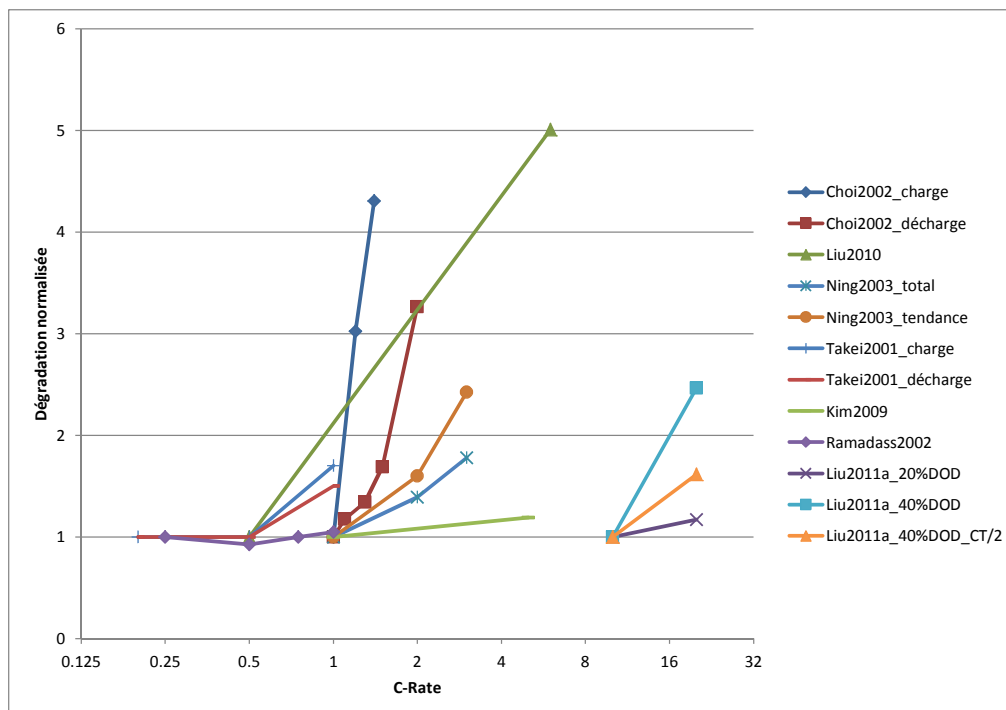


FIGURE 2.32 – Influence normalisée du courant (C-rate) sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.11)

De par le stress mécanique (lors de l'insertion, de la diffusion et de l'extraction des ions Lithium [Deshpande 2011, Huang 2012] qu'il génère au sein des matériaux actifs des deux électrodes et de par l'échauffement qu'il induit par effet Joule, il est assez aisé d'imaginer que l'accroissement du courant est susceptible de provoquer un vieillissement accéléré. Parmi la revue bibliographique que j'ai menée, quelques travaux témoignent d'une certaine innocuité de l'augmentation du courant, lorsqu'il est inférieur à 0.5C pour [Takei 2001], à 1C pour [Ramadass 2002] et même entre 1 et 5C pour [Kim 2009]. D'autres travaux [Choi 2002, Ning 2003, Haifeng 2009, Liu 2010] ont mis en évidence un accroissement assez marqué du rythme de dégradation avec l'augmentation du courant imposé. [Takei 2001] fait la même observation au-dessus de 0.5C. La sensibilité semble forte pour le LCO [Choi 2002, Ning 2003], alors que le LMS semble immune [Kim 2009, Ramadass 2002]. Le cas du LFP [Liu 2010] est plus incertain car l'augmentation du courant n'était pas la seule différence entre les deux essais. Au final, il est intéressant de constater la large dispersion des résultats (cf. figure 2.32), mais aussi la petite taille de l'échantillon bibliographique. Ce sujet a en effet été assez peu documenté, comparativement aux autres facteurs. Enfin, toutes ces études ont été réalisées à courant constant, et aucun travail s'appuyant sur une variation du courant efficace sur un profil plus dynamique n'a été identifié. [Liu 2011] est la seule exception à ce constat. Ce travail décrit une partie des résultats expérimentaux de SIMSTOCK, sur des cellules NCA Saft, avec une application HEV en ligne de mire. Les profils sont donc constitués d'impulsions carrées de courte durée dont on fait varier la valeur du courant (10 ou 20C). On remarque sur les figures 2.32 et 2.33 que le résultat quantitatif est sensible aux autres conditions de test rencontrées, ce qui témoigne donc d'une influence croisée. On observe même une influence inverse à toutes les autres dans le cadre de l'essai à faible DOD (20%) sur la variation d'impédance.

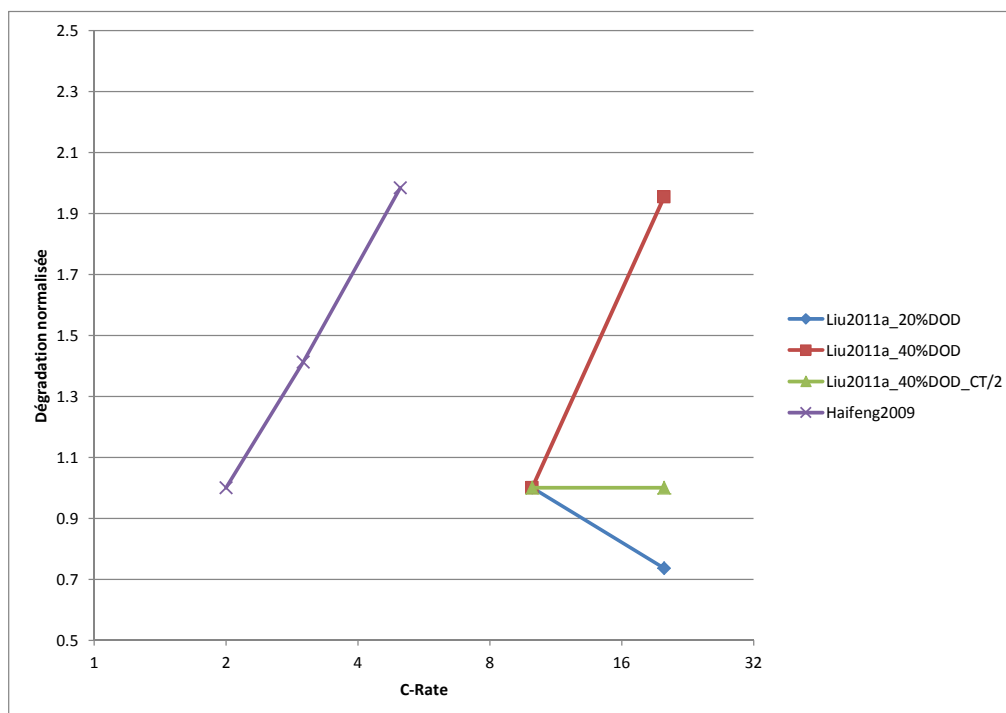


FIGURE 2.33 – Influence normalisée du courant (C-rate) sur l'augmentation d'impédance lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.12)

2.3.2.6 Composition des matériaux actifs

Un des obstacles à la compréhension plus profonde et dans un délai plus court des mécanismes de dégradation des batteries Lithium-ion tient au fait que plusieurs matériaux actifs sont employés. Si les anodes industrielles sont quasiment toutes faites en graphite, le choix du matériau actif de cathode se fait parmi une demi-douzaine de matériaux (LCO, LNO, NCA, NCM, LMS, LFP). Il faut rajouter à cela la possibilité de combiner certains matériaux (cas du LMR-NCM, des oxides "layered-layered"). Enfin, pour la cathode comme pour l'anode, la structuration, parfois à l'échelle nanométrique, ainsi que l'emploi d'additifs conducteurs, aboutit à une ramification quasi-infinie des combinaisons de matériaux actifs. Par ailleurs, la maîtrise industrielle du fabricant joue un rôle prépondérant dans la qualité et l'homogénéité de la production. Une opinion répandue consiste à considérer le LMS comme le matériau le moins cyclable en raison de la dissolution du Mn_2O_4 en Mn^{2+} . Le LFP semble lui présenter de bonnes prédisposition au cyclage mais son potentiel inférieur le dessert sur le plan de la densité d'énergie. Les matériaux incorporant du Nickel ont également très bonne réputation. Un phénomène de création d'une réserve de Lithium cyclable dans l'anode, pendant la formation et lorsqu'une cathode à base de Nickel est utilisée, a été mis en évidence par [Broussely 2001, Sarre 2004]. La réversibilité incomplète du matériau de cathode à base de Nickel en serait la cause. En pratique, cela se traduit par une capacité spécifique inférieure aux cellules à base de Cobalt mais aussi par une cyclabilité prolongée.

2.3.2.7 Composition de l'électrolyte

L'électrolyte apparaît souvent comme un facteur limitant de la performance des batteries Lithium-ion, aussi bien à court terme (tension atteignable, énergie spécifique, conductivité ionique à basse température) qu'à long terme (vieillessement). Il faut dire que l'électrolyte joue un rôle cen-

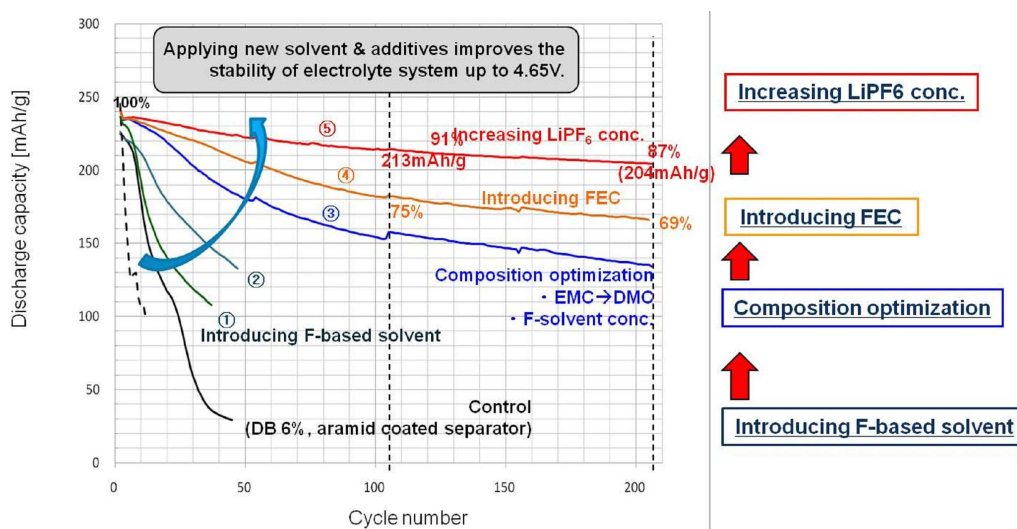


FIGURE 2.34 – Effet de l'amélioration par étape de l'électrolyte [Karditsas 2012]

tral dans une batterie. Etant situé entre les deux électrodes, il est exposé à la fois à des potentiels bas (anode) et à des potentiels élevés (cathode). Un électrolyte performant se doit de présenter une fenêtre de stabilité électrochimique couvrant l'intégralité de la fenêtre de potentiels qu'il va rencontrer. Malheureusement, il persiste toujours une petite instabilité qui se manifeste particulièrement à SOC élevé ($\rightarrow 100\%$), là où la fenêtre de potentiels est maximale, comme en attestent les résultats présentés dans le paragraphe 2.3.2.3. Aussi un travail préalable de stabilisation de l'électrolyte via un choix optimal des solvants et du sel, puis par l'adjonction d'additifs dont la mission consiste soit à ralentir certaines réactions de décomposition parasites, soit à orienter la nature des produits de ces réactions parasites au profit des produits les plus inertes possibles. Un exemple est présenté sur la figure 2.34. Bien que l'électrolyte soit un paramètre fixé pour toute la vie de la batterie, il semblerait qu'il soit possible d'optimiser, en contrôlant les conditions de température, de courant et de tension, ses premières réactions avec les deux électrodes lors de la phase de formation de la cellule (création et épaissement des films passivant). Aujourd'hui l'électrolyte représente le frein majeur à l'emploi des cathodes haute tension ($>5V$) qui permettrait d'accroître les densités énergétiques des batteries Lithium-ion (et donc aussi à réduire les coûts).

2.3.2.8 Influences croisées

Le dernier aspect à considérer, et certainement le plus complexe à traiter, a trait à la possible influence mutuelle de plusieurs facteurs et à leur combinaison non-linéaire. Dans un souci de simplicité, la plupart des études de vieillissement aborde la thématique du vieillissement des batteries comme une combinaison linéaire des différents facteurs environnements et opérationnels présentés ci-dessus. Or, cette hypothèse réductrice a peu de chance d'être respectée et certaines études laissent présager d'interactions fortement non-linéaires et, qui plus est, temps variantes, c'est-à-dire que l'état interne de la batterie va influencer sensiblement sur sa réponse aux sollicitations auxquelles elle s'expose, et donc que l'impact quantitatif de tel ou tel facteur va évoluer avec le temps (c'est-à-dire avec l'âge de la batterie).

2.3.2.9 Conclusions

Les résultats compilés ici présentent une certaine homogénéité au niveau qualitatif mais brillent par leur forte dispersion quantitative. Aussi semble-t-il impossible de proposer un modèle unifié de la durée de vie des batteries Lithium-ion. Ce constat est aggravé par l'absence quasi-systématique de prise en compte de la variabilité des sollicitations avec le temps qui se manifesterait dans les applications véhicules électriques et hybrides comme dans les applications réseaux électriques. L'obtention d'un modèle propre à une référence de batterie sera difficilement généralisable à d'autres cellules tant la sensibilité des batteries aux sollicitations est forte. Une variation de facteur de forme (poche, cylindrique, prismatique) peut résulter en un différentiel d'échauffement interne suffisamment important pour provoquer une variation sensible du rythme de dégradation. Une variation d'épaisseur des électrodes, de leur composition ou de celle de l'électrolyte modifiera la réponse de la cellule aux sollicitations extérieures. De nombreux autres exemples pourraient être soulevés. De plus, la plupart des travaux ont mis en évidence plusieurs phases de vieillissement avec des accélérations ou des décélérations au cours du temps, ce qui complique encore la tâche.

Pour ne garder que quelques cas extrêmes en tête, rappelons que [Amine 2001] a mesuré un facteur 14 sur l'augmentation d'impédance entre 40 et 70°C, [Shim 2002] un facteur 16 sur la perte de capacité entre 25 et 60°C et [Takei 2001] un facteur 13 entre 10 et 55°C, accompagné d'une dispersion statistique de 50%. Concernant la DOD, [Groot 2012] a enregistré un écart d'un facteur 23 pour la capacité et 16 pour l'impédance entre 17 et 100%DOD. [Takei 2001, Ichimura 2005, Broussely 2005] ont mesuré des facteurs supérieurs à 4 entre le vieillissement à faible SOC et celui à 100%SOC. [Liu 2010] a vu le vieillissement accéléré par un facteur 5 entre C/2 et 6C tandis que [Choi 2002] a reporté un facteur 3 pour une infime variation de 1 à 1.2C en charge.

En conclusion, en raison de cette forte sensibilité du rythme de dégradation aux paramètres environnementaux et à la variabilité d'une référence de batterie à une autre, une étude approfondie des conditions d'usages des batteries en fonction de l'application visée apparaît comme un prérequis à la juste prédiction des durées de vie de ces composants en usage réel. À la suite de cette étude, une campagne de cyclages représentatifs devra être conduite pour obtenir des indications fiables de la durée de vie potentiellement atteignable, en fonction des batteries utilisées, de leur dimensionnement et de la nature de l'application envisagée.

2.4 Modélisation de l'usage

2.4.1 Besoins

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, de nombreux paramètres environnementaux peuvent avoir un effet significatif sur la dégradation des performances d'une batteries Lithium-ion dans le temps. Aussi apparait-il nécessaire de documenter l'usage effectif de telles batteries dans les applications visées. La difficulté réside ici dans le fait que l'utilisation de batteries dans les applications transport se déroule en environnement non contrôlé et que le système batterie sera donc exposé à une large variété de contraintes environnementales. Par ailleurs la relation parfois non linéaire qui lie la dégradation d'une batterie avec le ou les facteurs identifiés comme pénalisant est susceptible de donner lieu à des écarts significatifs entre la performance de durée de vie d'un même système dans deux contextes différents (par exemple, un bus électrique au Canada ou à Dubai ne sera pas confronté aux mêmes plages de températures).

On a observé également à plusieurs reprises une dépendance au temps écoulé et/ou à l'enchaînement des contraintes au niveau du rythme de dégradation (path-dependent aging) [Dubarry 2009a, Dubarry 2011a, Dubarry 2011b, Gering 2011]. Dans pareil cas, la simple utilisation d'histogramme ne suffira pas à modéliser l'usage en raison de ces inter-dépendances. Ce phénomène invalide également les approches factorielles.

2.4.2 Cycles normalisés

La notion de cycles normalisés ou standardisés est très répandue dans l'univers automobile. En effet, il a été assez rapidement nécessaire de proposer une méthode pour comparer différents véhicules dans un référentiel commun afin d'en déterminer la performance relative (notamment en terme de consommation de carburant). [Joumard 1999] oppose les cycles réglementaires aux cycles représentatifs en arguant du fait que les cycles réglementaires ont été axés sur la simplicité et la répétabilité de la procédure de test. Nous allons effectuer une comparaison succincte de ces différents cycles au regard de l'utilisation qui pourrait en être faite dans l'optique de la prédiction des profils de mission des batteries dans les applications transport.

2.4.2.1 Cycles réglementaires

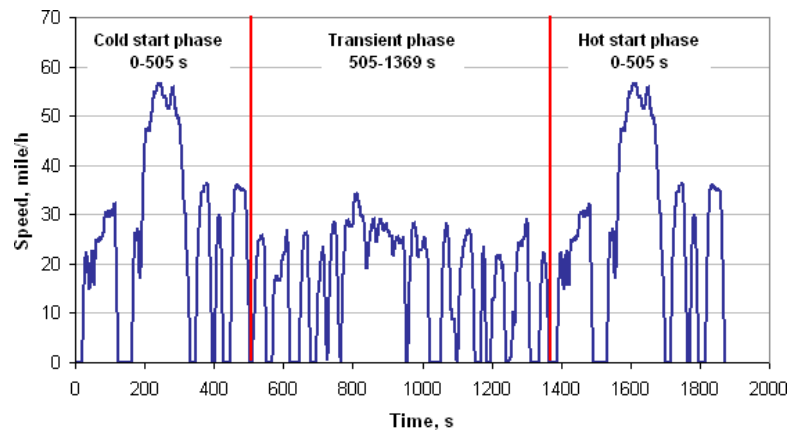
Les principaux cycles réglementaires usuels sont décrits dans l'annexe C. Nous allons nous contenter ici de présenter les 3 principaux cycles normalisés en application dans le monde :

- le cycle FTP-75 (Federal Test Procedure) sur le continent américain (cf. figure 2.35a),
- le cycle 10-15 mode au Japon (cf. figure 2.35b),
- le cycle NEDC (New European Driving Cycle) en Europe (cf. figure 2.35c).

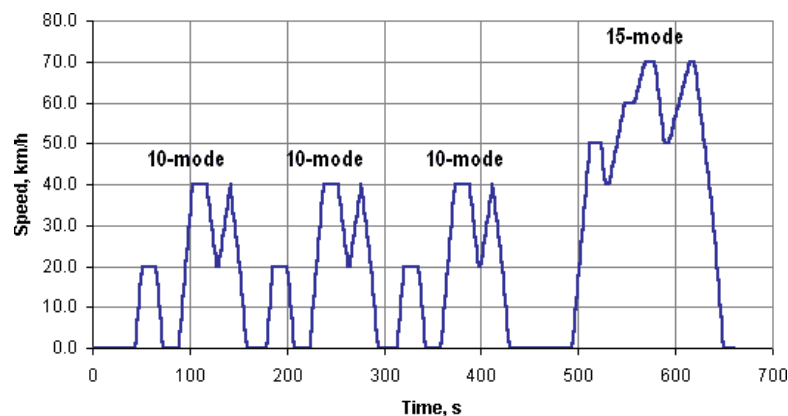
Le cycle FTP-75 est une variante du cycle FTP-72. La phase n°1 est répétée à l'issue du cycle FTP-72, avec un démarrage à chaud cette fois-ci. L'ajout dure 505 secondes ce qui porte la durée totale du cycle à 1874 secondes, la distance parcourue à 17.77km et la vitesse moyenne à 34.1 km/h. Ce cycle admet à son tour deux variantes : US06 dans lequel la conduite est plus agressive et à vitesse plus élevée, et SC03 qui inclut l'emploi de la climatisation.

Le cycle 10-15 mode est le cycle réglementaire japonais. Il combine trois répétitions du mode 10 suivies d'une itération du mode 15. C'est le plus lent des cycles réglementaires décrits ici avec une vitesse moyenne de 22.7km/h sur un trajet de 4.16km. La vitesse maximale atteinte n'est que de 70km/h.

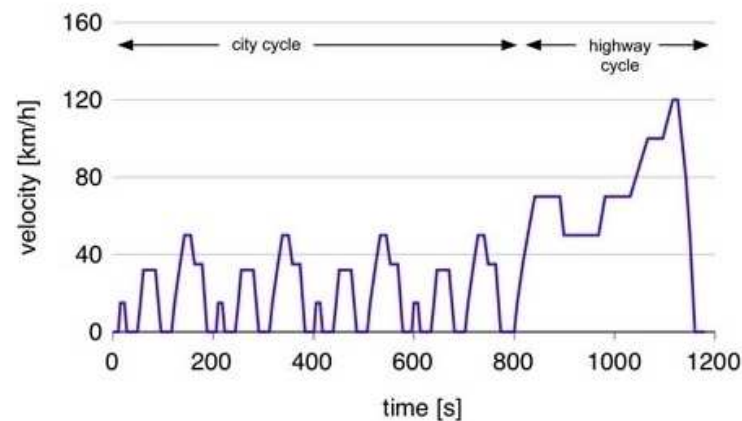
Le cycle NEDC, aussi appelé parfois Motor Vehicle Emissions Group (MVEG), est le cycle réglementaire européen. Il se compose de deux phases. La première phase consiste en la répétition à 4 reprises d'un cycle élémentaire ECE-15, de caractère plutôt urbain avec une vitesse moyenne de



(a) Cycle Federal Test Procedure 75



(b) Cycle 10-15 mode japonais



(c) New European Driving Cycle (NEDC)

FIGURE 2.35 – Les trois principaux cycles réglementaires [Diesel 2012]

18.7km/h sur un trajet de 1km environ sur lequel la vitesse ne dépasse pas 50km/h. La seconde phase est un cycle à vocation extra-urbaine (EUDC) de 7km de long environ parcouru à une vitesse moyenne de 62.6km/h et atteignant 120km/h en pointe. La combinaison des deux phases résulte en un cycle de 11km environ parcouru à 33.6km/h de moyenne.

La vocation première de ces cycles réglementaires consiste en l'évaluation des émissions polluantes à la sortie d'échappement des véhicules légers. Malheureusement, les cycles normalisés sous-estiment les émissions à chaud de près de 50% pour les véhicules essence et de près de 30%

pour les diesel [Joumard 1999] par rapport aux observations réalisées dans un environnement moins artificiel. La question de leur représentativité est donc posée.

2.4.2.2 Cycles représentatifs de l'usage

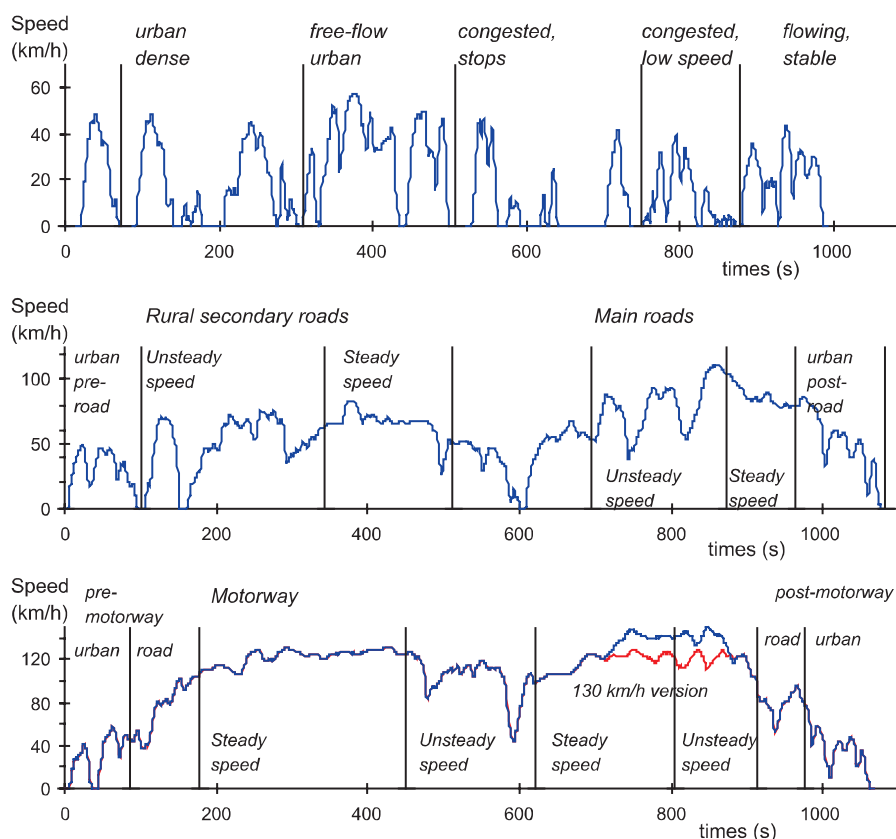


FIGURE 2.36 – Cycles représentatifs ARTEMIS : urbain, routier et autoroutier de haut en bas [André 2004]

En Europe, des travaux ont été menés pour davantage documenter l'usage représentatif des véhicules légers. Un certain nombre de cycles représentatifs ont ainsi été élaborés, à l'aide de base de données relativement larges et en recourant à des outils de modélisation plus sophistiqués que ceux employés pour générer les cycles réglementaires. Un premier ensemble de cycles représentatifs a été proposé par [André 1987, Crauser 1989, Maurin 1990]. On compte 10 cycles "Inrets" qui se proposent de modéliser 4 types de circulation :

- Urbain lent (2 cycles de 4 et 7 km/h, en tout 1% du kilométrage),
- Urbain fluide (3 cycles de 10 à 24 km/h, 16% du kilométrage),
- Route (3 cycles de 32 à 57 km/h, 42% du kilométrage)
- Autoroute (2 cycles de 74 et 95 km/h, 41% des distances).

Une seconde tentative a été opérée par [André 1995] qui s'appuyait sur des données recueillies sur 58 voitures privées instrumentées en France, Grande-Bretagne et Allemagne. Au total, 8200 trajets et 73 000 km ont été enregistrés. 14 cycles "modem" couvrent les mêmes situations que les cycles "Inrets".

Une mise à jour des travaux "modem" a conduit à la proposition de nouveaux cycles qui avaient pour objectif de corriger certaines limitations des travaux précédents. Ces cycles "modem Hyzem"

sont décrits dans [André 1998]. Ils utilisent 12 classes pour partitionner l'ensemble des conditions de circulation rencontrés par la flotte de véhicules (77 véhicules privés, 10400 trajets et 90000km).

Plus récemment, le projet "ARTEMIS" a proposé 3 nouveaux cycles représentatifs des usages urbain, routier et autoroutier [André 2004]. Ils sont reproduits en figure 2.36.

2.4.2.3 Cas des véhicules électrifiés

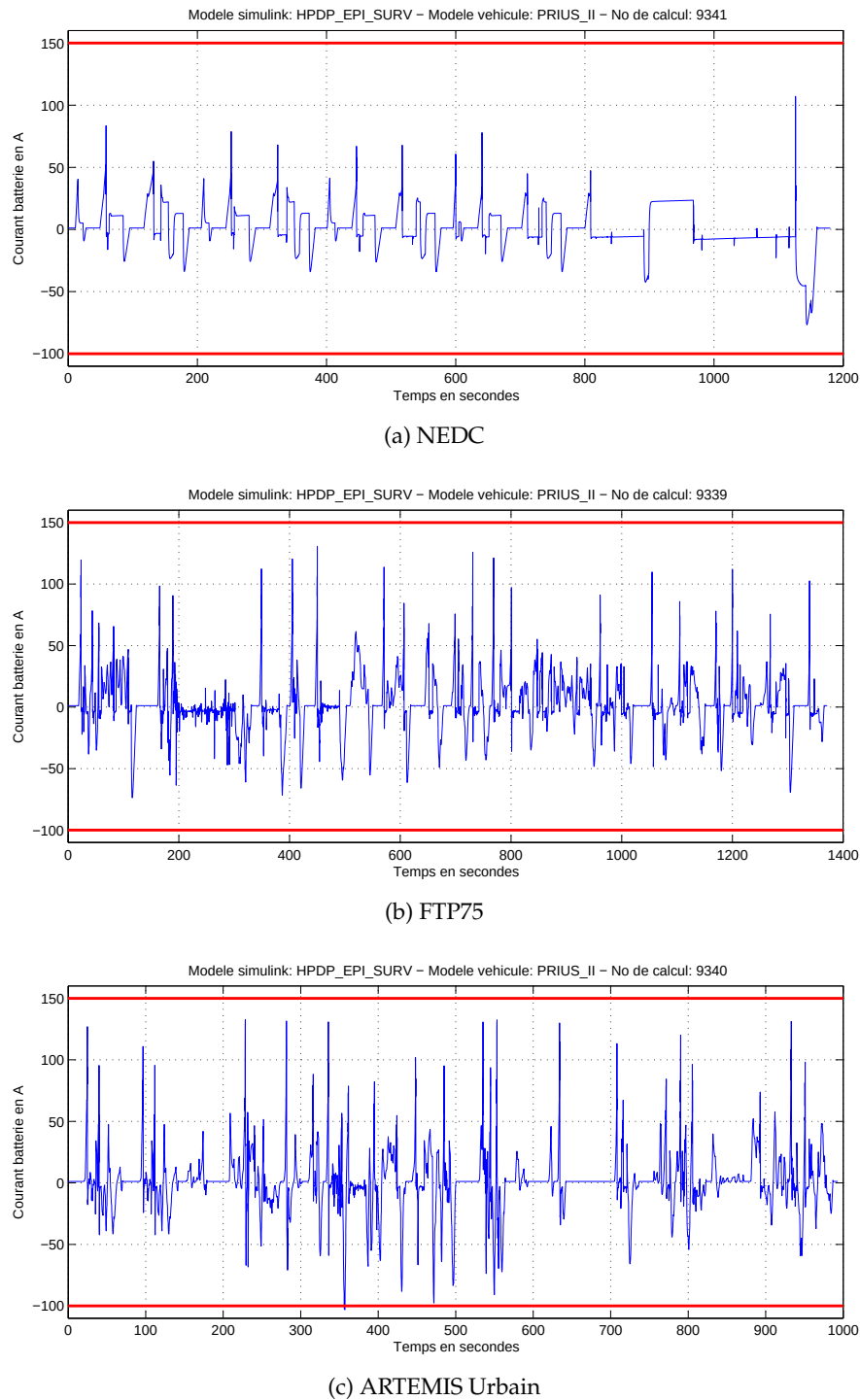


FIGURE 2.37 – Résultats de simulation de la Toyota Prius II sur différents cycles (en rouge sont représentées les bornes typiques mesurées du courant batterie lors d'essais dans le monde réel)

Deux problématiques distinctes se posent lorsqu'il s'agit d'évaluer un véhicule électrique ou hybride à l'aide d'un cycle normalisé (réglementaire ou représentatif). La première a déjà été largement traitée par un ensemble d'organismes internationaux. En effet, avec l'apparition des premières déclinaisons de véhicules électrifiés, il a été nécessaire de fixer les règles d'évaluation de ces véhicules car la procédure existante avait été établie sur la base de l'architecture conventionnelle (motorisation thermique seule). Aussi, en complément des précautions déjà en vigueur, la question du conditionnement initial de la batterie ainsi que le possible emploi d'un mode tout-électrique a été au centre des considérations des organismes normatifs. La procédure européenne a été complétée par la norme ECE-R101 qui spécifie la procédure à suivre lorsqu'on évalue un véhicule électrifié. Il s'agit là de s'assurer d'une certaine équité de traitement entre les différentes architectures de véhicules.

La seconde problématique concerne davantage les travaux présentés ici. En effet, la question revient à savoir si l'utilisation de la seule simulation informatique, qui combinerait un modèle macroscopique du véhicule avec les profils de déplacement décrits par les cycles normalisés, pourrait suffire à prévoir, avec une fidélité acceptable, les sollicitations auxquelles se trouvera exposée une batterie dans le cadre d'une application véhicule donnée. Cette démarche est en effet très intéressante en raison de sa rapidité de mise en oeuvre largement supérieure à une expérimentation terrain ainsi qu'au faible coût qui y est associé. Elle a notamment l'avantage de s'affranchir des considérations temporelles (temps de travail légal, durée du jour, délai de recharge de la batterie, fatigue du conducteur, inertie thermique des organes du véhicule, ...) propres à l'expérimentation réelle. Elle permet également de faire varier l'architecture véhicule sans délai pour étudier l'impact de tel ou tel dimensionnement. En conclusion, la prédiction des sollicitations typiques d'un usage représentatif via l'emploi de la simulation informatique présente donc de nombreux avantages.

Néanmoins cette approche se heurte à plusieurs écueils. Le premier écueil tient évidemment à la validité du modèle informatique employé. En effet, le développement d'un tel modèle requiert un degré d'expertise avancé et nécessite la réalisation d'essais matériels en deux occasions au moins. La première fois pour renseigner un certain nombre de paramètres du modèle et la seconde fois pour confronter ce modèle à la réalité physique du système modélisé. Or, lors de cette étape de confrontation, il peut s'avérer que le modèle parvienne à représenter fidèlement certains aspects fonctionnels du système étudié tout en échouant sur d'autres (ex : bonne prédiction de consommation globale de carburant mais mauvaise prédiction des phases hybrides). En somme, des mesures expérimentales s'avèrent nécessaires dans tous les cas de figure. Le second écueil tient cette fois à la nature des données entrantes dans le modèle, les cycles normalisés. On a vu que la plupart des cycles réglementaires n'étaient pas caractérisés par une représentativité acceptable et seraient donc de piètre utilité dans ce cas. Les cycles représentatifs sont eux évidemment beaucoup plus intéressants. Ils sont la compression d'un très grand échantillon de situations de conduite. C'est d'ailleurs une de leurs faiblesses dans le cas présent. En effet, le fait de réduire un large échantillon à une portion congrue, certes facilement manipulable et plus intelligible, provoque automatiquement la diminution de la richesse et de la diversité des conditions de fonctionnement. Or, si les cycles représentatifs peuvent dans certains cas fournir des prédictions globales d'émissions polluantes ou de consommation de carburant tout à fait fidèles à la réalité, il est probable qu'ils s'avèrent trop réducteurs au niveau de la prédiction des sollicitations typiques des batteries dans les applications transport. Il est alors fort probable que le résultat des simulations souffrirait d'une sous-pondération des modes de fonctionnement extrêmes, qui sont pourtant à l'origine d'une accélération parfois dramatique du rythme de dégradation d'une batterie (cf. 2.3.2). Une analogie simple consisterait à dire que la moyenne des notes des élèves d'une classe se chiffre à 12/20 ; cela ne me permettrait pas pour autant de savoir si des élèves sont menacés de redoublement ou si d'autres peuvent prétendre entrer à Polytechnique. La moyenne (12/20) est une donnée facilement manipulable mais s'avère somme toute très pauvre en information.

On pourrait alors s'intéresser à deux variantes de cette approche simulatoire. La première consisterait à ré-utiliser une plus large portion de l'échantillon qui a servi de base de données lors de la

génération des cycles représentatifs (et non pas seulement la poignée de cycles résultants du traitement). La seconde est une approche assez répandue dans le domaine de la simulation, il s'agit de la méthode de Monte Carlo où les paramètres de simulation ne sont pas traités comme des valeurs fixées une fois pour toute mais comme des variables aléatoires, susceptibles de varier dans un espace défini. Dans ce cas précis, nous pourrions simuler un très grand nombre de conditions de fonctionnement qui seraient toutes dérivées d'un ou plusieurs cycles représentatifs initiaux. Enfin, le dernier écueil tient à la prise en compte de l'environnement sur l'usage réel des batteries. Comme nous l'avons vu dans la section 2.3.2, les paramètres environnementaux que sont la température ambiante et la fréquence des recharges (DOD), sont autant de facteurs influant sur le rythme de dégradation des batteries. Or l'approche basée sur la simulation ne permet pas de recueillir d'informations relatives à ces questions, notamment car il s'agit d'une problématique totalement inédite par rapport aux motorisations conventionnelles.

A titre d'exemple, les résultats de simulation du véhicule Toyota Prius II sur quelques cycles normalisés sont représentés en figure 2.37. Les lignes rouges horizontales désignent les bornes usuelles du courant en décharge (positif) et en charge (négatif). L'inadéquation du cycle NEDC apparait de façon manifeste.

2.4.3 Approches existantes

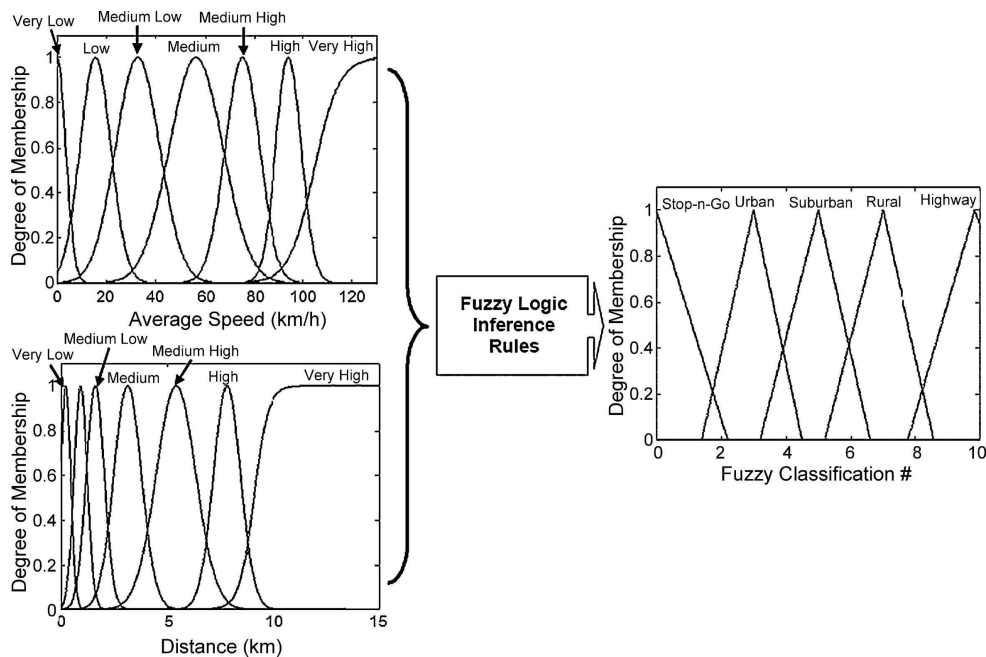


FIGURE 2.38 – Mise en place des règles d'inférence floue sur 2 variables pour la classification de portions de trajet [Liaw 2007]

L'utilisation de techniques de fouilles de données multivariées (ou analyse exploratoire) a été proposée pour l'étude de certains aspects de la production industrielle de batteries [Perone 1992, de Azevedo 1994, Hagan 2003] ou encore pour l'étude des moyens de transport et de leurs profils de mission [Stathopoulos 2003, Vlahogianni 2005, Vlahogianni 2006, Karlaftis 2009, Karlaftis 2011]. En effet, il s'agit d'une approche intéressante dans les cas de figures où la complexité apparente du système à étudier et la relative absence de connaissances préalables, le tout combiné à l'existence

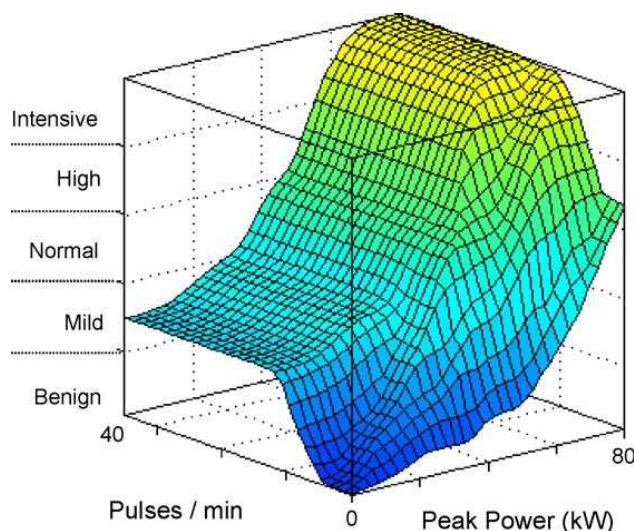


FIGURE 2.39 – Carte de sévérité résultante pour l'étude des impulsions de puissance [Liaw 2007]

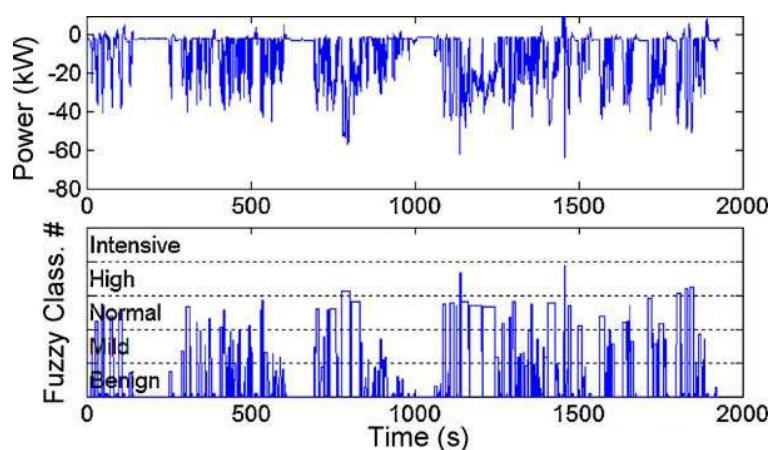


FIGURE 2.40 – Résultat de la classification des impulsions de puissance par logique floue [Liaw 2007]

d'une grande quantité de données expérimentales, incite à adopter une démarche exploratrice à la recherche de motifs reconnaissables ou de corrélations entre plusieurs variables.

D'autres outils statistiques, tels que la logique floue, la décomposition en ondelettes ou encore les réseaux de neurones artificiels, ont été appliqués au cas des véhicules électriques ou hybrides [Karner 2007, Thomas 2008, Erdinc 2009b, Erdinc 2009a, Marano 2009, You 2009, Schwarzer 2010, Serrao 2010, He 2011, Kim 2011, Souffran 2011, Wang 2011b, Zhang 2011].

A l'opposé, plusieurs approches dites "expertes" ont également été proposées [Ramadass 2004, Serrao 2005, Ning 2006, Rong 2006, Santhanagopalan 2006, Ramasamy 2007, Safari 2009, Safari 2010a, Safari 2010b, Delacourt 2012]. Ces approches requièrent une certaine expertise quantitative à propos des liens de causes à effets que l'on cherche à modéliser. C'est un inconvénient majeur car souvent cette expertise fait défaut et la généralisation à d'autres cellules (électrochimie et/ou format et/ou producteur différents) est problématique.

La comparaison de différentes approches a été menée par [Wenzl 2005, Sauer 2008], en appliquant la démarche aux batteries Plomb.

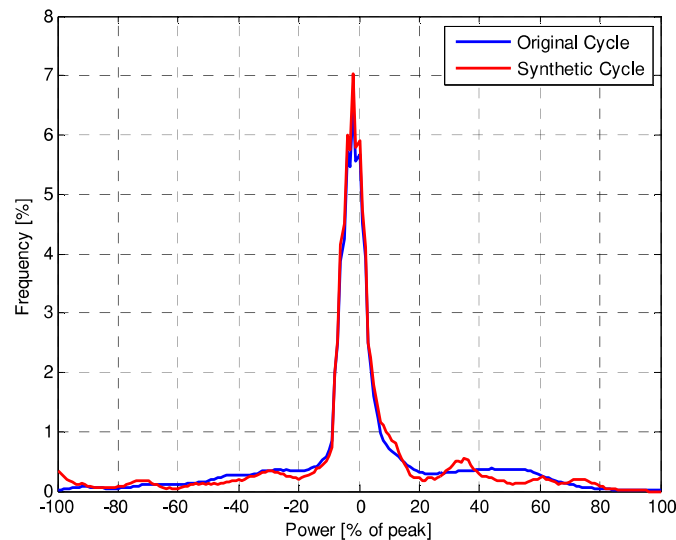


FIGURE 2.41 – Comparaison des distributions de puissance entre le profil de mission enregistré et à sa compression statistique à 5% par chaîne de Markov [Groot 2009]

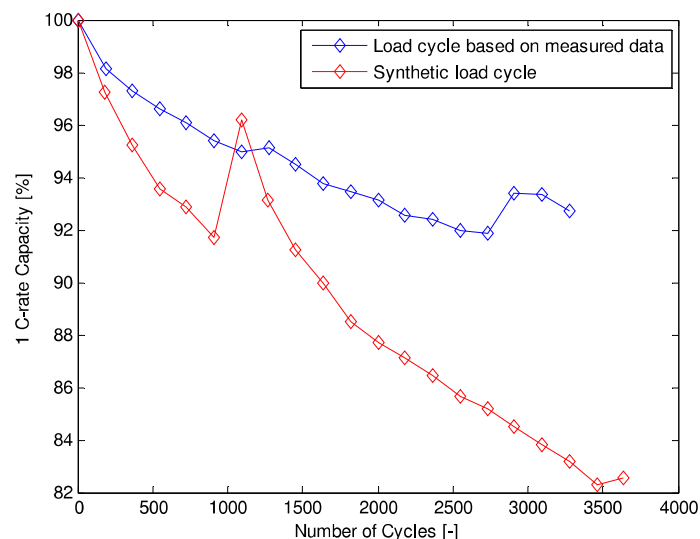


FIGURE 2.42 – Comparaison expérimentale entre le vieillissement dû à un profil de mission enregistré par rapport à sa compression statistique par chaîne de Markov [Groot 2010]

La reconstruction de cycles de conduite représentatifs a été abordée par [Adornato 2009, Lee 2010]. Leurs travaux portent sur l'analyse des déplacements du véhicule, de type PHEV. Il s'agit ici de documenter les déplacements de ce type véhicule dans une optique de dimensionnement optimal de la taille de la batterie pour l'autonomie voulue. La question de la durabilité des batteries et de leur profil de mission n'est pas traitée.

Au niveau international, les travaux les plus proches de ceux que nous avons mené sont le fruit, d'une part, du laboratoire Electrochemical Power Systems, du Hawaiï National Energy Institute (HNEI), sous la direction du Prof. Bor Yann Liaw et du Dr. Matthieu Dubarry [Staackmann 1997, Liaw 2002, Liaw 2003, Liaw 2004, Dubarry 2005, Liaw 2005, Dubarry 2007a, Dubarry 2007c, Dubarry 2007b, Dubarry 2007d, Dubarry 2007e, Liaw 2007, Dubarry 2009a, Dubarry 2009b,

Dubarry 2010, Dubarry 2011a, Dubarry 2011b, Gering 2011, Dubarry 2012], et d'autre part, de Jens Groot, ingénieur-docteur chez Volvo Trucks, Suède [Groot 2003, Groot 2009, Groot 2010, Groot 2012].

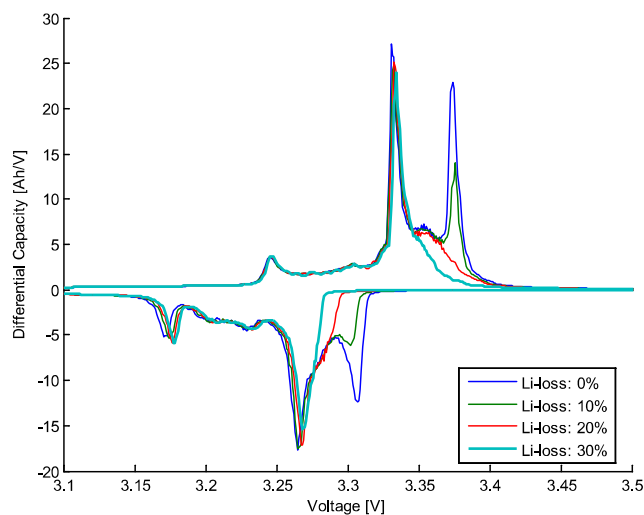
Ils se sont tous les deux intéressés d'une part à l'analyse et à la modélisation, par compression, des cycles de conduites ou des cycles de courant. Liaw et son équipe ont d'abord étudié l'analyse statistique des profils de mission enregistrés dans le cas d'une flotte (modeste) de véhicules électrifiés [Staackmann 1997, Liaw 2002]. Ils ont ensuite utilisé une approche par inférence basée sur la logique floue pour classer les cycles de conduite mais aussi les impulsions de courant en classes (cf. figures 2.38, 2.39 et 2.40 [Liaw 2004, Dubarry 2005, Dubarry 2007e, Dubarry 2007d]). L'inconvénient de la méthode employée est qu'elle se base sur des règles expertes pour procéder au classement des impulsions. Cela se traduit par la nécessaire anticipation de les effets unitaires et combinés de facteurs comme le SOC, la température de la batterie, le courant maximum et le courant efficace afin d'attribuer un score à chaque impulsion relevée.

Plus récemment Dubarry et al. ont cherché à mettre en évidence et à documenter le phénomène de path-dependence de la dégradation des batteries Lithium-ion au travers de quelques essais expérimentaux [Dubarry 2009a, Dubarry 2011a, Dubarry 2011b, Gering 2011].

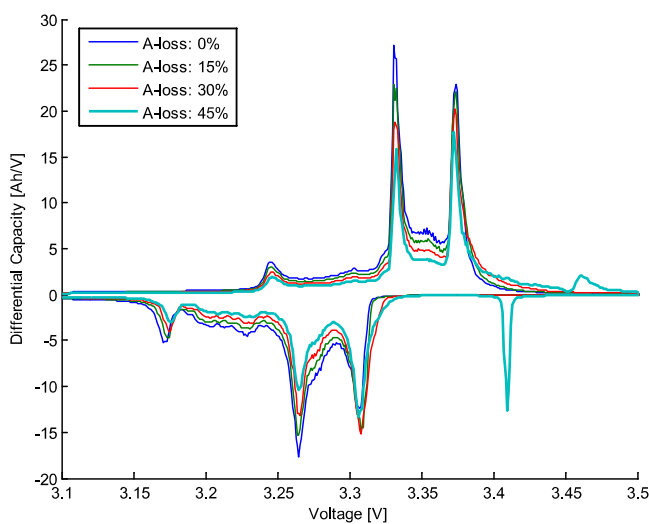
Jens Groot, s'est lui intéressé aux profils de courant mesurés dans une application véhicule lourd hybride. Son objectif consistait à modéliser la séquence de points de fonctionnement observés ($I(t)$) au moyen d'une chaîne de Markov du premier ordre. Au final, il a tenté de réduire le profil $I(t)$ de départ à un échantillon qui ne représente plus que 5% de la longueur du cycle initial. Sur un plan statistique, ce cycle court devait toutefois présenter les mêmes caractéristiques en termes de puissance et d'énergie que le cycle de référence mesuré dans le monde réel [Groot 2009]. Par la suite, il a mené la comparaison expérimentale entre le vieillissement dû à un profil de mission enregistré par rapport à sa compression statistique par chaîne de Markov [Groot 2010]. Le résultat témoigne d'un vieillissement accéléré par un facteur 3 dans le cas du profil compressé alors que les paramètres expérimentaux sont extrêmement proches (cf. figures 2.41 et 2.42). En effet, les deux profils de cyclage présentent de nombreux points communs :

- puissance moyenne et maximale
- plage et distribution de courant,
- plage de température,
- plage de SOC.

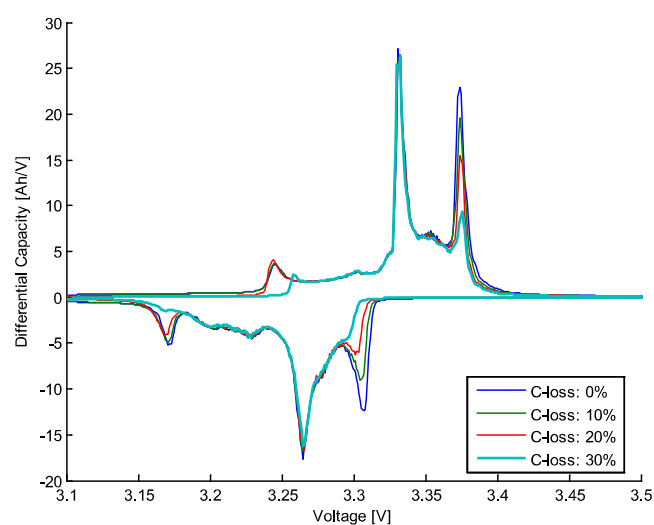
Enfin, dans la thèse défendue récemment par Jens Groot [Groot 2012] ainsi que les travaux de Dubarry et Liaw et al. [Liaw 2005, Dubarry 2007c, Dubarry 2007b, Dubarry 2009a, Dubarry 2011a, Dubarry 2011b, Gering 2011, Dubarry 2012] ou encore [Safari 2011, Kassem 2012], il a été mis en évidence que la technique expérimentale d'analyse ex-situ dite ICA (Incremental Capacity Analysis) ou DCA (Differential Capacity Analysis), que nous traduirons par Analyse par Capacité Incrémentale (ACI), s'avère un être outil performant dans le suivi, pendant le cyclage, de l'évolution des états individuels de trois principaux modes de diminution de la capacité (pertes aux niveaux de la cathode, de l'anode ou du Lithium cyclable) comme en témoigne la figure 2.43.



(a) Perte de Lithium cyclable



(b) Perte de matière active à l'anode



(c) Perte de matière active à la cathode

FIGURE 2.43 – Les différentes signatures des modes de diminution de la capacité d'une batterie Lithium-ion en utilisant la technique ICA [Groot 2012]

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les batteries Lithium-ion et les architectures des véhicules susceptibles d'y recourir. Nous avons également mis en évidence la dépendance significative du rythme de dégradation envers certains paramètres environnementaux tels que la température, le SOC, la DOD, la tension et le courant. Enfin, nous avons réalisé un tour d'horizon du nombre limité de méthodes utilisables pour suivre et prédire la dégradation des batteries Lithium-ion en fonction de l'application visée.

Au chapitre suivant, nous présenterons notre approche pour analyser les profils de mission des batteries Lithium-ion dans les applications de transport et prédire la durée de vie de ces batteries en usage réel.

Sommaire

3.1	Recueil de données	65
3.1.1	Instrumentation	67
3.2	Préparation des données	70
3.3	Classification	73
3.3.1	Choix de la distance	74
3.3.2	Choix du nombre de classes	74
3.3.3	Résultat de la classification	75
3.4	Reconstruction de cycle	79
3.4.1	Modélisation par chaîne de Markov	79
3.4.2	Application aux profils de courant	81
3.5	Conclusion	85

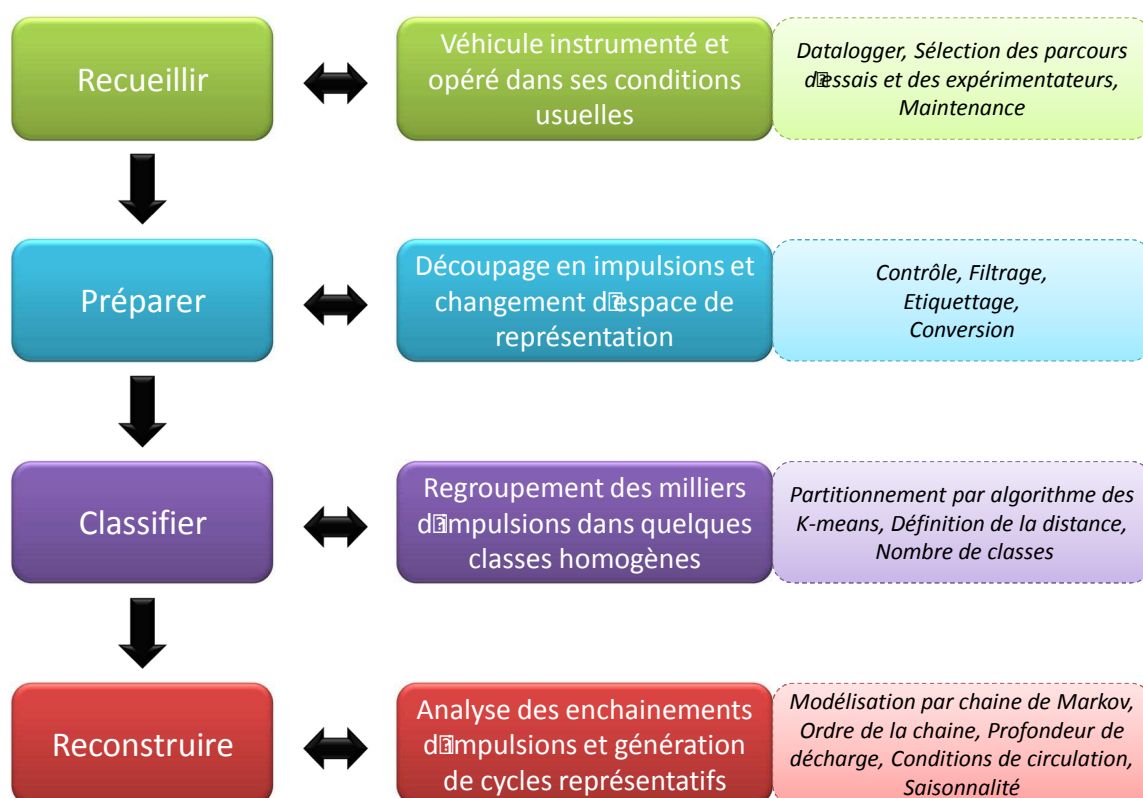


FIGURE 3.1 – Démarche retenue

Avant de présenter la méthode retenue dans les travaux présents, notons qu'il existe de nombreuses approches possibles pour analyser les signaux temporels complexes. Les plus répandues

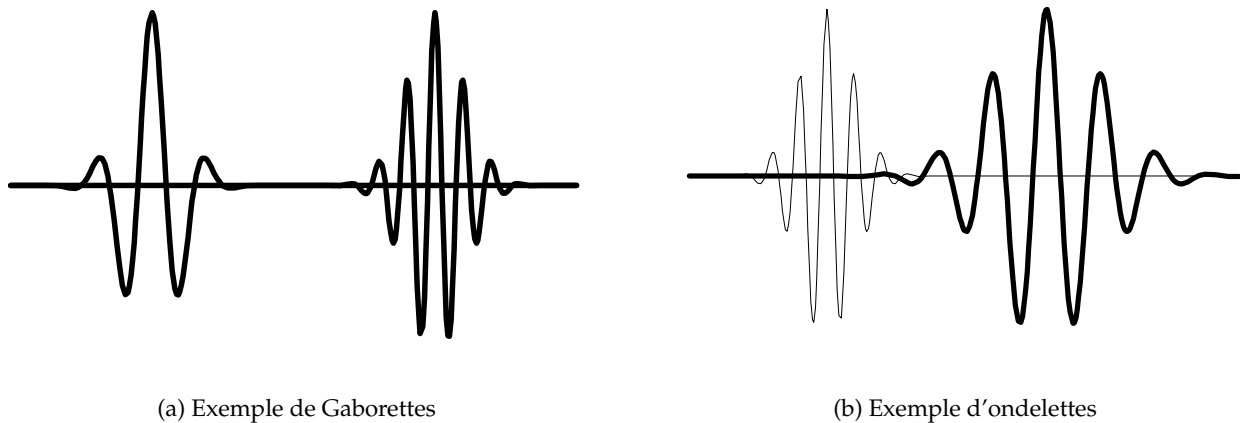


FIGURE 3.2 – Quelques techniques de représentation compressée d'un signal numérique [Truchetet 1998]

sont certainement l'ensemble des techniques de traitement du signal utilisées notamment dans le domaine de la compression numérique (son, image, vidéo) [Truchetet 1998] ou encore dans le domaine de la reconnaissance de forme. On y trouve la décomposition en séries de Fourier qui consiste à représenter un signal donné par une combinaison linéaire de nombreuses sinusoïdes de fréquences et d'amplitudes variables. L'inconvénient de la transformée de Fourier du signal tient au fait qu'elle ne permet pas de localiser les portions du signal dans lesquelles les variations sont rapides, ni celles où elles sont lentes. Cela engendre une perte d'information sur les caractéristiques spatiales du signal étudié. Comme les signaux de courant rencontrés ici ne sont pas du tout périodique, cette approche devient problématique.

On y trouve aussi la transformée en "Gaborettes" et celle en "ondelettes". Ces approches corrigent certains inconvénients de la décomposition en séries de Fourier en recourant à un maillage du signal par fenêtre spatiale (on ne tente pas de modéliser le signal en entier d'un seul coup mais plutôt en procédant par portions en jouant sur la notion de translation par rapport à l'origine). Ici, il est à nouveau question de représenter le signal comme une combinaison de motifs élémentaires. Dans le cas des Gaborettes, ces motifs sont des clones les uns des autres mais différent par leur localisation spatiale (translation) et par leur fréquence (cf. figure 3.2a). En revanche ils font tous la même largeur (durée). De même que la transformée de Fourier, la transformée de Gabor d'un signal contient toutes les informations portées par le signal. Par conséquent, le signal peut être reconstruit à partir de sa transformée de Gabor. Cette reconstruction est remarquablement simple : le signal peut être synthétisé comme somme de Gaborettes. A chacune de ces Gaborettes sont attachés une fréquence et un temps bien déterminés. Le poids d'une Gaborette dans un signal est déduit de la valeur de sa transformée de Gabor pour la fréquence et le temps correspondants. Les ondelettes diffèrent des Gaborettes par le fait que l'on fait ici varier conjointement la taille et la fréquence (cf. figure 3.2b). Les ondelettes sont des clones obtenus par dilatation d'une ondelette de base. Dans les deux cas, il est nécessaire de choisir la forme du motif élémentaire au départ. Pour l'application visée ici, ces approches présentes l'inconvénient majeur de ne pas offrir une décomposition présentant un sens physique tangible. Chaque ondelette ne pourra en effet pas être considérée par elle-même mais devra toujours être rattachée au reste de la décomposition.

Le lecteur recherchant un éclairage plus pointu vers les techniques de reconnaissance de formes est invité à se tourner vers [Come 2009].

La stratégie retenue dans le cadre cette thèse pour documenter l'usage réel des batteries dans les

applications transport s'inscrit dans la thématique dite de fouille de données (ou statistique exploratoire ou data mining). En effet, on tente ici d'aborder la question sous l'angle d'un profane dans la mesure où peu d'éléments quantitatifs certains (cf. § 2.3.2) peuvent venir appuyer une analyse dite experte. On cherche donc à identifier des sollicitations typiques en courant (éventuellement associées à des conditions environnementales telles que le SOC ou la température) en analysant de grandes quantités de données expérimentales. Les principales étapes sont représentées par la figure 3.1.

Les travaux présentés ici ont été initiés par Maxime Montaru, dont la thèse a été soutenue à l'Inrets en 2009 [Montaru 2009]. Une partie de ses travaux portaient sur la classification des impulsions de courant du véhicule hybride Prius II. A cette occasion, Maxime a procédé à la comparaison des différents algorithmes de classification usuels au regard de l'application visée et a retenu l'algorithme des K-means qui se prête bien au problème abordé. Ma contribution personnelle consiste en quelques corrections mineures sur les étapes de préparation et de classification des données (filtrage et seuillage alternatif), ainsi qu'au recueil de nouvelles données sur d'autres types de véhicules électrifiés et enfin au développement de la méthode de génération des cycles synthétiques qui n'avait pas été abordé précédemment. Nous allons donc reprendre ici certains éléments déjà exposé par ailleurs [Montaru 2009, Chapitre10, Annexe D] mais qui sont nécessaires à la compréhension globale de l'approche proposée.

3.1 Recueil de données

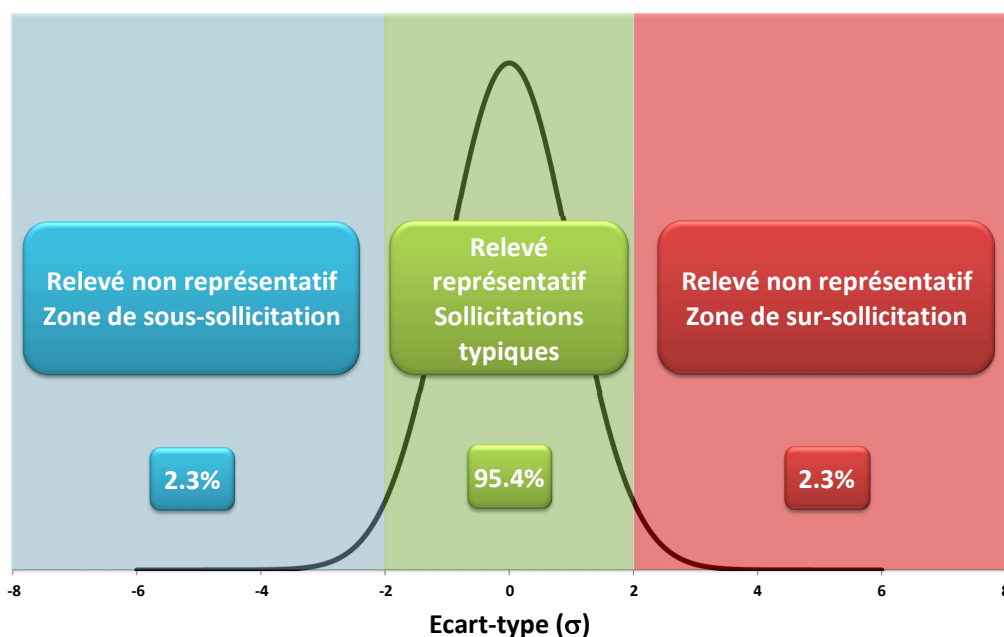


FIGURE 3.3 – Modélisation du processus de recueil de données par une loi normale et une performance à 2σ

Compte-tenu de notre volonté de documenter l'usage réel des batteries dans les applications transport, la phase de recueil de données revêt une importance particulière. Un des principaux obstacles tient ici au fait que nous nous plaçons dans le cas où nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est ou n'est pas l'usage représentatif. Aussi est-il impossible de discriminer les données valides des autres lors du recueil. Il conviendra donc de conditionner les résultats obtenus aux hypothèses faites sur la qualité du recueil de données.

Si l'on considère que la phase de recueil de données peut souffrir d'un biais de mesure dont la provenance pourrait être interne ou externe à l'expérimentation (style de conduite atypique, trafic exceptionnel, météo exceptionnelle, mode dégradé du véhicule, ...), il convient alors de se prémunir contre ce risque. Si l'on fait l'hypothèse que ce risque est de nature aléatoire et régi par la loi normale (gaussienne), on peut alors estimer la taille de l'échantillon de mesure nécessaire à la réalisation d'une analyse offrant un niveau de confiance souhaité. Adoptons le kilomètre parcouru comme unité de comptage de l'échantillon à recueillir.

D'après la loi normale, un processus aléatoire produit 68.2% de résultats compris entre $\pm 1\sigma$ ¹, 95.4% de résultats compris entre $\pm 2\sigma$ et 99.6% de résultats compris entre $\pm 3\sigma$. La plupart des processus industriels n'ayant pas fait l'objet d'une optimisation présentent une performance comprise en 2 et 3 σ . Un procédé très mal maîtrisé admettrait lui 1 seul σ tandis qu'un processus optimisé peut atteindre 6 σ ou plus. Considérons que le fait d'effectuer un roulage en vue de recueillir des données s'apparente à un processus performant à 2 σ (cf. figure 3.3), ce qui correspond à une hypothèse plutôt conservatrice. En pareil cas, cela signifie qu'environ 5 km/100 sont de nature atypique, en moyenne. D'après cette hypothèse, on prévoit ainsi que chaque kilomètre parcouru a 95.4% de chance d'être représentatif de l'usage. Choisir de modéliser le recueil de données par un processus performant à 1 seul σ soulèverait deux interrogations. Les expérimentateurs ont-ils une tendance lourde à opérer le véhicule dans des situations inhabituelles (ex : conduite sur chemin forestier, essai à 3h du matin, arrêts intempestifs sans raison valable, ...)? Il me semble que les conditions expérimentales pour chacun des cas étudiés plus loin excluent de fait pareille hypothèse. La seconde interrogation est plus complexe à traiter. En effet, si l'on fait l'hypothèse que seulement 68.2% des données recueillies sont représentatives de l'usage et ce sur de grandes quantités de données, alors il me semble opportun de remettre en cause la vision associée à la représentativité de telle ou telle donnée. Il me semblerait nécessaire de réinclure une partie des 31.8% de données initialement considérées comme non représentatives dans le giron des données représentatives. En effet la loi des grands nombres indique qu'à mesure que la taille de l'échantillon étudié grandit, les propriétés de l'échantillon convergent vers les propriétés de l'ensemble de la population (la population étant ici par définition l'usage représentatif). En clair, si un phénomène est fréquemment observé, alors il est représentatif.

Soit :

- p : la probabilité que le relevé soit représentatif de l'usage,
- q : la probabilité que le relevé ne soit pas représentatif de l'usage ($q=1-p$),
- n : le nombre de kilomètres dans l'échantillon,
- r : le niveau de représentativité que l'on souhaite atteindre sur l'échantillon considéré,
- D : le degré de confiance obtenu par rapport à l'objectif r pour p, q et n fixés.

On utilise la formule suivante pour calculer la valeur de D :

$$D = \sum_{k \geq r \cdot n}^n C_n^k \cdot P(k) \text{ avec } k \text{ entier et } P(k) = p^k \cdot q^{n-k} \quad (3.1)$$

1. σ : écart-type du résultat du processus

Admettons que l'on vise une performance $r \geq 90\%$. Voici le degré de confiance acquis en fonction de la taille de l'échantillon.

Nombre de kilomètres	10	20	50	100	150
Degré de confiance(%)	92.55	93.82	97.34	99.36	99.84

TABLE 3.1 – Degré de confiance portant sur $r \geq 90\%$

On remarque aisément que plus la taille de l'échantillon sera importante plus il sera aisé de garantir un certain niveau de représentativité des données servant à l'analyse. Toutefois, il existe une limite à cela. En effet, il sera rigoureusement impossible de garantir la validité des données recueillies au-dessus du niveau de performance maximum qui est égale à la probabilité que le relevé soit représentatif de l'usage, c'est-à-dire la quantité p .

Nombre de kilomètres	40	80	120	160
Degré de confiance(%)	44.53	28.21	19.28	13.65

TABLE 3.2 – Degré de confiance portant sur $r \geq 97.5\%$

3.1.1 Instrumentation

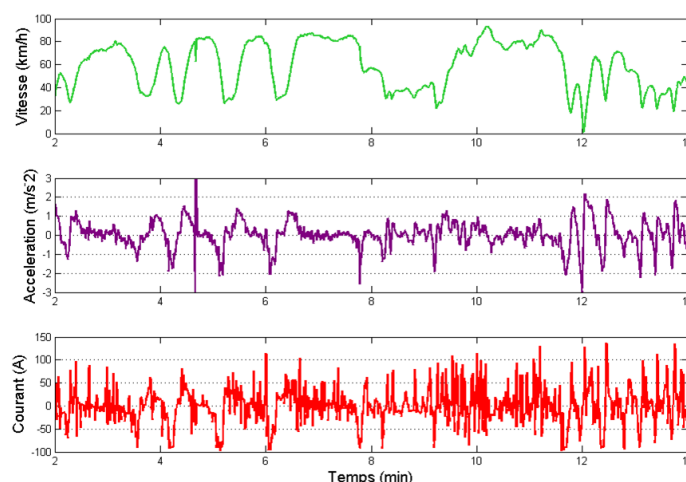


FIGURE 3.4 – Lien entre accélération et courant mesuré

Les différents véhicules que nous avons étudié embarquaient tous une centrale d'acquisition de données. Cette centrale se trouvait reliée à un vaste ensemble de capteurs afin de recueillir les enregistrements des grandeurs physiques à étudier (tension, courant, température, vitesse, ...). Dans pareil cas, et tout particulièrement dans le cas d'un système aussi complexe qu'une automobile se déplaçant en environnement non contrôlé, il est inévitable de voir les relevés perturbés par des signaux extérieurs que l'on qualifie de bruit de mesure. Il est par conséquent souvent nécessaire de procéder à une phase de filtrage avant le traitement des données. Lorsque cela s'avérait nécessaire un filtrage en 2 étapes a été appliqué au signal bruité. La première étape fait appel à l'emploi d'une méthode statistique pour la détection des valeurs aberrantes (outliers). En effet, via une analyse statistique relativement simple, il est possible de discriminer certaines valeurs qui se trouveraient en dehors du spectre observé des valeurs admissibles. A cette fin, la fonction *boxplot()* de Matlab a été employée. Dans un deuxième temps, pour rejeter le bruit HF qui peut se greffer au signal physique,

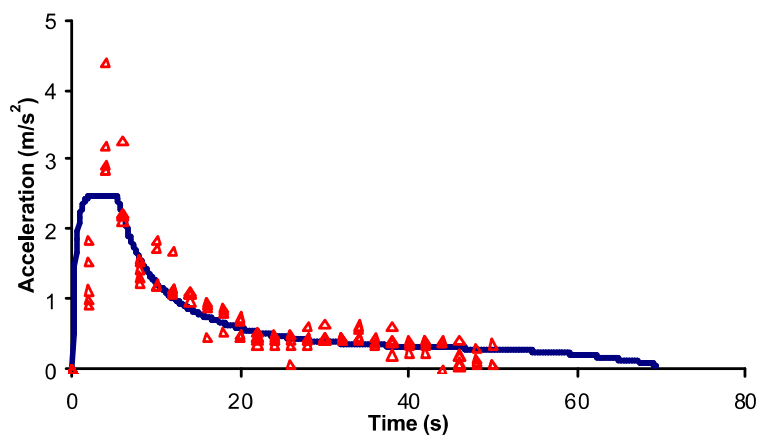
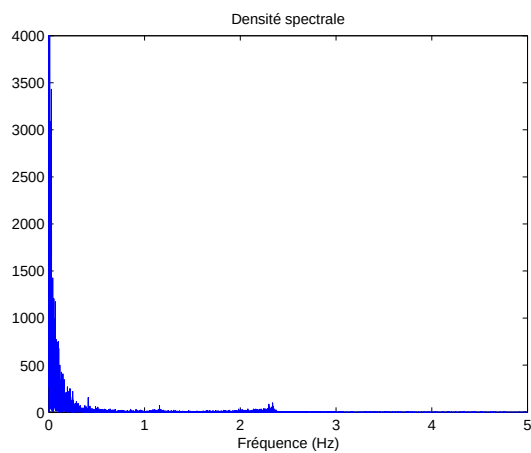
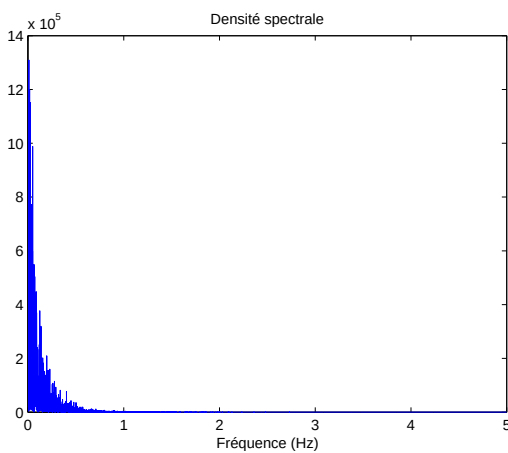


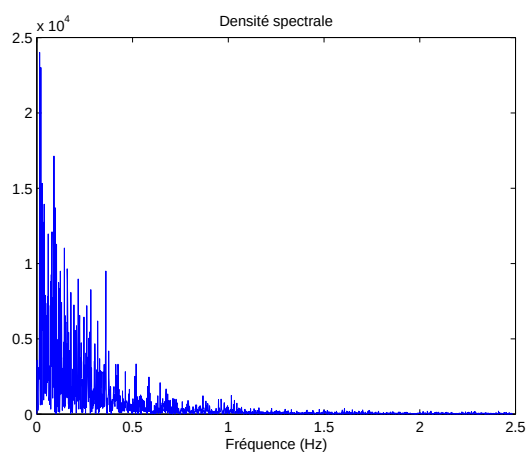
FIGURE 3.5 – Phase d'accélération maximale d'une berline américaine [Snare 2002]. Les points rouges symbolisent la mesure, la courbe bleue est une modélisation de l'accélération.



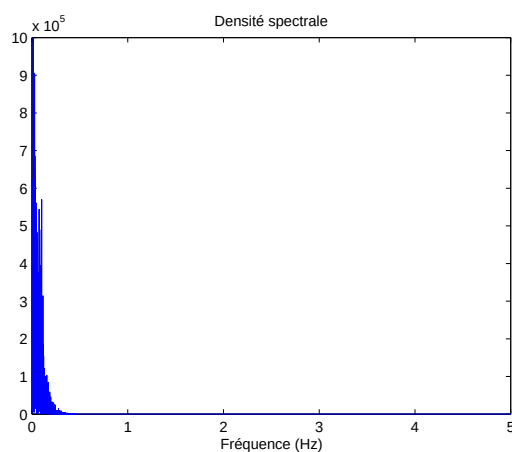
(a) Vélo



(b) Quadricycle



(c) Hybride



(d) Trolleybus

FIGURE 3.6 – Densité spectrale des courants mesurés

une technique de filtrage par spline cubique, mise au point par l'équipe de recherche en acoustique physique du LTE à l'IFSTTAR, a été utilisée. A l'aide de cette méthode, il est possible de rejeter du

bruit HF sans pour autant recourir à un lissage (moyenne glissante, filtre basse fréquence) des données d'origine, qui serait problématique vis-à-vis de la suite de notre méthode d'analyse. Les détails relatifs à l'utilisation de ces traitements sur les différents signaux physiques recueillis, véhicule par véhicule, sont fournis dans l'annexe D.

Une autre problématique relative à la mise en place d'une instrumentation tient au choix de la fréquence d'échantillonnage. En effet, pour capturer un signal physique de façon intégrée au moyen d'un appareillage d'acquisition numérique, il est nécessaire de maîtriser le choix de la fréquence d'échantillonnage. Bien souvent, les centrales d'acquisition dont nous disposons permettent d'acquérir jusqu'à une fréquence maximale de 10Hz. En se basant sur le théorème de Nyquist-Shannon relatif à l'échantillonnage, il nous est possible d'affirmer que les signaux présentant une fréquence de moins de 5Hz seront correctement retranscrits. Il est alors intéressant de se questionner sur l'ordre de grandeur des constantes de temps propres au déplacement du véhicule, aux variations de couple moteur (et donc de courant dans la machine électrique), ainsi qu'à l'évolution en température des principaux organes (principalement batterie dans notre cas). Il faut savoir que dans un véhicule grand public, en circulation normale, l'accélération observée varie sur une plage de $\pm 2\text{m/s}^2$ en excédant rarement le seuil des $\pm 1\text{m/s}^2$ comme en témoigne la figure 3.4.

Toutefois, comme en témoigne la figure 3.4, le profil temporel du courant mesuré au niveau de la batterie se rapproche davantage de celui de l'accélération que de celui de la vitesse. Il semble même présenter une plus grande richesse fréquentielle. Les travaux de [Snare 2002] se proposent d'étudier et de quantifier les phases d'accélération maximales de nombreux véhicules américains. Retenons l'exemple d'une voiture au rapport puissance/poids élevé, la Dodge Intrepid (1.5t - 200ch), dont l'accélération maximale est représentée en figure 3.5. La constante de temps de la phase initiale où l'accélération croît très rapidement est proche de 0.3 seconde. A l'opposé, la diminution de l'accélération à mesure que la vitesse de déplacement augmente est elle caractérisée par une constante de temps beaucoup plus longue qui ne présentera pas de difficulté d'échantillonnage. Si l'on peut faire l'hypothèse raisonnable qu'un véhicule est très rarement utilisé à son potentiel d'accélération maximum, il ne faut oublier que les tractions électriques sont caractérisées par une disponibilité immédiate du couple au démarrage. Aussi, une légère perte d'information pourra-t-elle se manifester lors des fronts montants d'accélération (et donc de courant). De plus, lorsque la circulation l'exige, les décélérations par freinage peuvent parfois présenter des dynamiques supérieures aux accélérations. Et puisque les véhicules électrifiés sont en mesure de faire participer la machine électrique et sa batterie associée aux phases de freinage, il est possible que là aussi, certains fronts montants soient en-dehors des limites d'acquisition du système. Pour confirmer ces observations, une analyse de la densité spectrale des courants mesurés sur les batteries des différents véhicules qui ont fait l'objet d'une étude dans les présents travaux a été faite. Les résultats présentés sur la figure 3.6 indiquent que les variations de courants s'opèrent pour la plupart en dessous de 1Hz, ce qui laisse une marge confortable.

Les détails des instrumentations embarquées sont fournis, véhicule par véhicule, au chapitre suivant.

3.2 Préparation des données

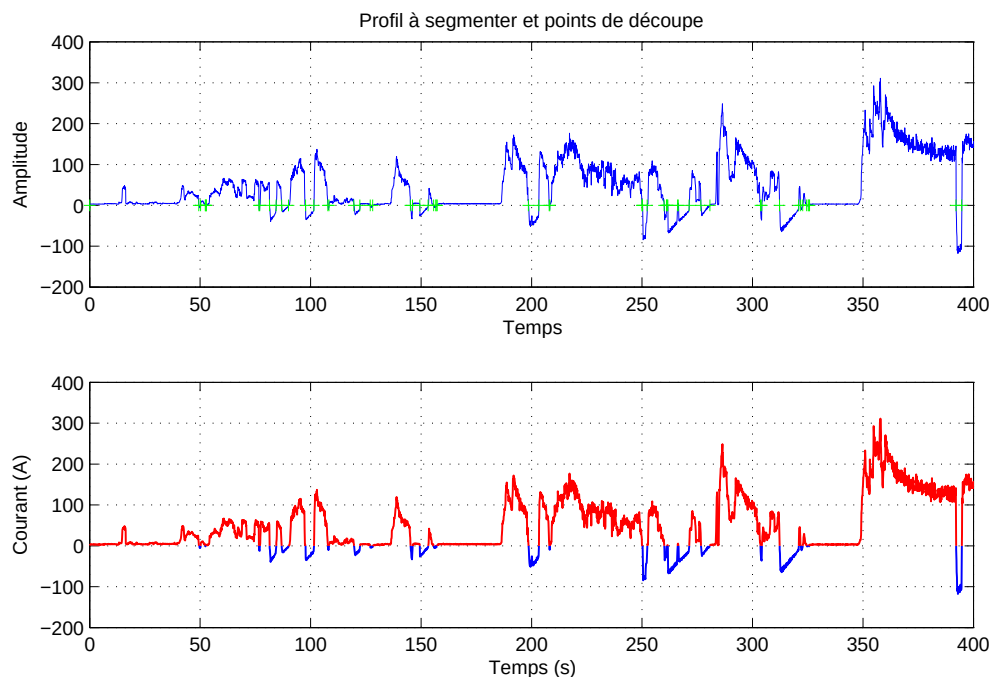


FIGURE 3.7 – Découpage en impulsions pour un fonctionnement réversible

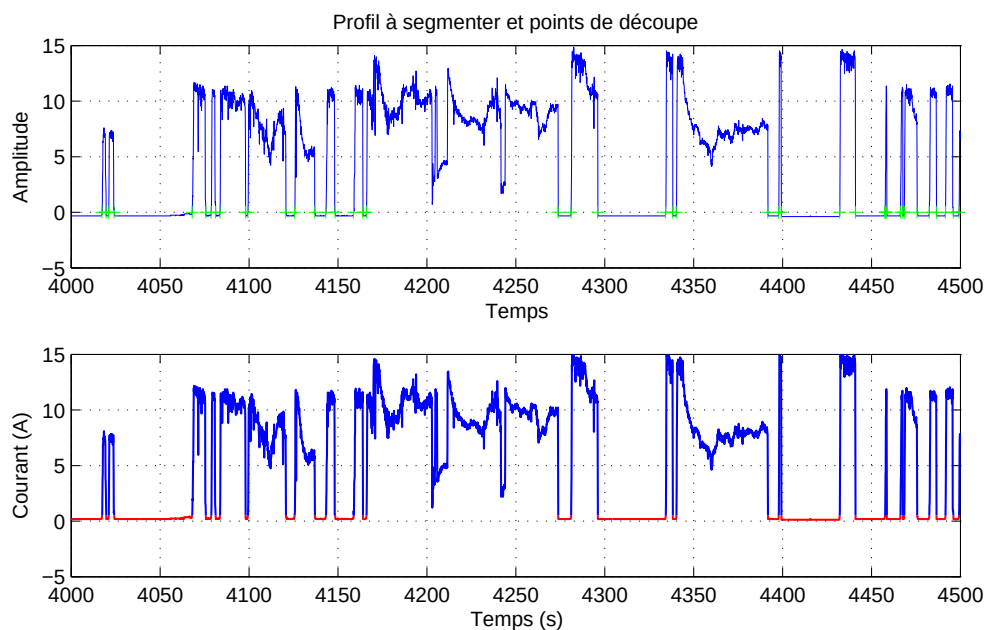


FIGURE 3.8 – Découpage en impulsions pour un fonctionnement 1 quadrant

Une fois que les données sont recueillies, il est nécessaire de les préparer avant de pouvoir les classer dans de bonnes conditions. La première étape consiste à découper chaque profil temporel

de courant batterie en motifs individuels que nous appellerons “impulsions”. Deux cas de figures se présentent ici. Ou bien le courant batterie prend des valeurs positives et négatives ou bien il n’admet qu’un seul signe. Le premier cas correspond à un véhicule dont la chaîne de traction électrique est utilisée de façon réversible (moteur et frein). Par convention, les valeurs positives de courant correspondent aux décharges de la batterie alors que les valeurs négatives sont liées aux recharges. Le second cas découle lui d’un véhicule dont la machine électrique n’est utilisée que comme moteur, le freinage étant alors entièrement mécanique. Si le courant alterne entre les deux signes, comme sur la figure 3.7, alors le découpage en impulsions s’effectue à l’occasion de chaque passage par zéro. En pratique, avec un signal échantillonné, il s’agit de rechercher toutes les inversions de signes entre deux valeurs consécutives. Nous obtenons ainsi des impulsions en décharge et en charge. Si le courant ne change pas de signe, il faut alors définir une valeur de base du courant qui correspond à la consommation à vide du véhicule (contribution des auxiliaires). Comme l’illustre la figure 3.8, les impulsions seront alors définies en recherchant tous les passages à travers cet axe de la consommation à vide. On n’obtiendra plus ici que des impulsions en décharge.

A l’issue de l’étape de découpe en impulsions, nous disposons de centaines ou de milliers d’impulsions individuelles décrites dans le domaine temporel ($I(t)$). Avec cette représentation temporelle, deux impulsions possédant le même spectre de courant peuvent différer dans leur forme et donc ne pas présenter de similitude apparente permettant de les regrouper par la suite. En cela, l’application visée diffère sensiblement des autres domaines usuels où l’on pratique la reconnaissance de forme ou la détection d’évènement. Ici, pour permettre la comparaison directe entre plusieurs impulsions et mesurer leur degré de similitude, il est nécessaire de procéder à un changement de repère. Ce changement de repère prend la forme de la conversion de la représentation d’une impulsion donnée vers le domaine de charge (mAh échangés) en lieu et place du domaine temporel. Cette conversion reste assez simple dans la mesure où il s’agit de procéder au décompte des quantités de charges échangées à chaque niveau de courant par intégration du courant $I(t)$. Il s’agit en effet d’obtenir l’histogramme des courants de chacune des impulsions que nous cherchons à classer. Ce sont ces histogrammes qui serviront de base de comparaison entre les impulsions.

Commençons par définir les plages de courant à considérer dans la mesure où nous travaillons toujours dans le domaine discret. Plaçons nous dans le cas général d’un profil de courant adoptant des valeurs positives comme négatives comprises entre les deux bornes I_{min} et I_{max} . Il faut ensuite choisir un pas de courant qui peut être constant ou variable, ou encore fin ou grossier. Prenons ici un

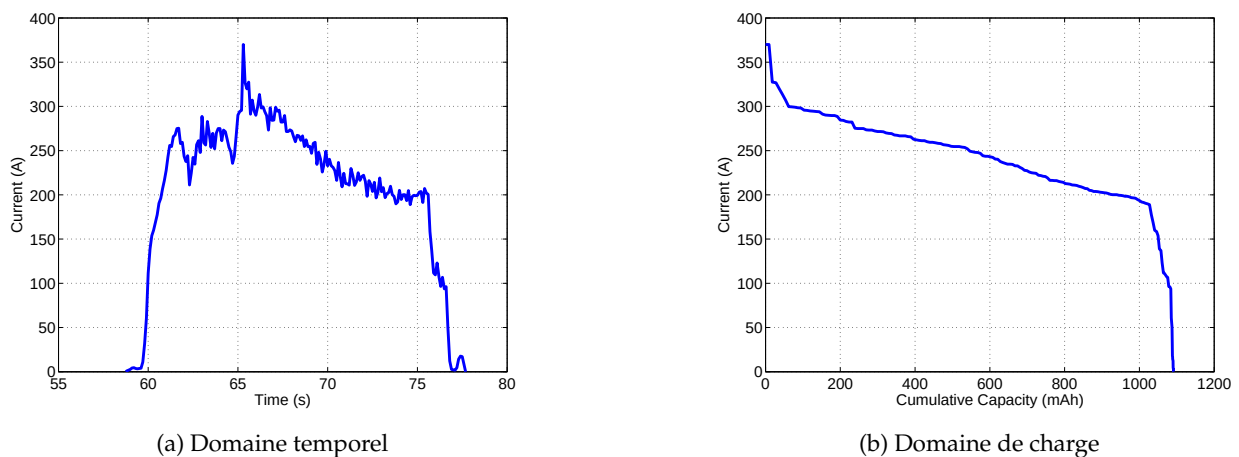


FIGURE 3.9 – Illustration de la conversion sur une impulsion

pas de courant constant de valeur dI commune à la charge et à la décharge. Il s'agit ensuite, impulsion par impulsion, pour chaque plage de courant de hauteur dI , d'intégrer localement le signal $I(t)$ à chaque instant où $I(t)$ appartient à la plage de courant considérée. Une même impulsion peut donc présenter une contribution morcelée dans le temps pour un niveau de courant donné.

Une fois que l'ensemble des plages de courant comprises entre I_{min} et I_{max} ont été parcourues et que leurs contenus ont été calculés, nous disposons d'une représentation complète de l'impulsion dans le domaine de charge (son histogramme). Le tableau 3.3 donne une illustration de la représentation numérique d'une impulsion dans le domaine temporel tandis que le tableau 3.4 s'intéresse lui au domaine de charge. Le calcul de chaque quantité q_{ik} d'une impulsion "i" pour la plage de courant "k" s'effectue selon la formule (3.2) qui prend la forme d'une série d'intégrales par morceaux. L'ensemble T_k désigne alors tous les instants "t" où le courant mesuré appartient à la plage de courant "k". t_1 et t_2 sont les bornes successives de chaque segment contigu de temps contenu dans T_k . L'illustration visuelle de cette conversion est proposée en figure 3.9.

$$q_{ik} = \sum_{t \in T_k} \int_{t_1}^{t_2} I(t) \cdot dt \text{ avec } T_k \text{ tel que } I(t \in T_k) \in [I_k; I_{k+1}[\quad (3.2)$$

Temps (s)	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
Courant (A)	i_0	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9

TABLE 3.3 – Représentation numérique d'une impulsion dans le domaine temporel

Plage courant (A)	$I_{min}..I_{min}+dI$	$I_{min}+dI..I_{min}+2dI$	...	$0 \pm dI/2$	...	$I_{max}-dI..I_{max}$
Charge échangée (mAh)	q_{i1}	q_{i2}	...	q_{ix}	...	q_{ip}

TABLE 3.4 – Représentation numérique d'une impulsion "i" dans le domaine de charge à "p" dimensions

L'étape finale consiste à peupler la matrice individus-variables où chaque ligne représente un individu (ici une impulsion) et chaque colonne décrit une plage de courant. Cette matrice est utilisée comme base de données lors de la classification des individus selon leurs variables. L'exemple d'une matrice comprenant "n" impulsions (individus) représentées dans un espace à "p" dimensions (multivarié, une variable = une plage de courant) est donné en (3.3).

$$\begin{matrix} \text{Impulsion 1} \\ \text{Impulsion 2} \\ \vdots \\ \text{Impulsion i} \\ \vdots \\ \text{Impulsion n} \end{matrix} \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1p} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{i1} & q_{i2} & \dots & q_{ip} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & q_{np} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Il faut toutefois noter qu'un certain nombre d'impulsions extraites des profils $I(t)$ mesurés à bord des véhicules ne sont pas incluses dans la classification en raison de leur caractère trop bref ou trop peu énergétique. Selon le véhicule considéré, les critères de sélection des impulsions valides diffèrent mais la forme générale du test effectué ne change pas :

$$\Delta Q \geq 10mAh \ \& \ I_{max} \geq 20A \ \& \ \text{Durée} \geq 1s \quad (3.4)$$

3.3 Classification

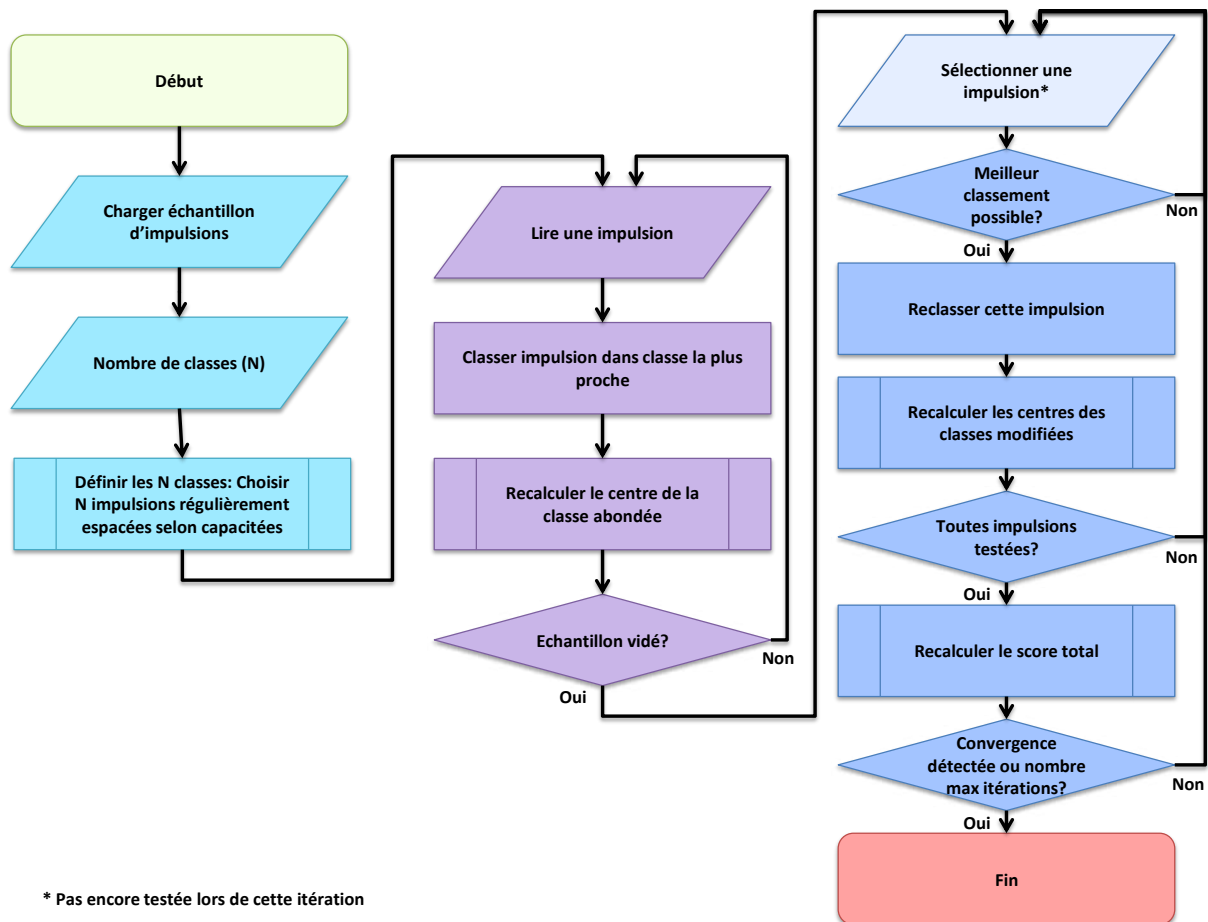


FIGURE 3.10 – Organigramme logique représentant l’algorithme des K-means

Pour procéder au regroupement de toutes les impulsions au sein d’un nombre réduit de classes homogènes, il a été choisi de recourir à l’algorithme des K-means. L’algorithme des K-means est une méthode de classification non-supervisée (les règles de tri ne sont pas établies à l’avance, elles évoluent de façon autonome) largement répandue. Il est particulièrement utile dans un cas tel que le nôtre où les données sont multivariées (c’est-à-dire décrites par plus d’une observation/variable, ici tous les q_i de chaque impulsion).

Cet algorithme se déroule en deux phases, la première est linéaire et la seconde est itérative. L’ensemble de l’algorithme est représenté sous forme d’organigramme logique en figure 3.10. A l’initialisation, il faut choisir le nombre de classes (N) que l’on souhaite obtenir au final, ainsi que la définition de la distance et le nombre maximum d’itérations autorisées pour prévenir le risque de boucle infinie. Ensuite, il faut initialiser les N classes en y affectant une impulsion par classe. Cette affectation peut être aléatoire ou non. Ici, les classes sont initialisées en utilisant des impulsions régulièrement espacées selon l’axe des capacités (mAh). Ceci permet d’accélérer le regroupement des impulsions similaires en séparant au maximum les classes dès le départ. Lors de la première phase, chaque impulsion de l’échantillon à partitionner est affectée à l’une des N classes sur la base de la comparaison de la distance de l’impulsion considérée aux N classes. A chaque nouvelle affectation, le centre de la classe abondée est recalculé afin de suivre l’évolution de son contenu. Cette première phase linéaire s’achève lorsque l’échantillon a été vidé, c’est-à-dire lorsque chaque impulsion a été classée. Débute alors la seconde phase, dite en-ligne ou itérative qui consiste à tester tous les mouvements d’impul-

sions d'une classe à l'autre afin de déterminer si un meilleur partitionnement est possible. Cette phase se termine lorsque plus aucun mouvement d'impulsion ne fait évoluer le score du partitionnement dans le bon sens (convergence) ou lorsque le nombre limite d'itérations est atteint. L'algorithme des K-means ne garantit pas la convergence vers la solution optimale et peut se retrouver bloqué autour d'un minimum local, c'est pourquoi on procède généralement à un grand nombre de tirages pour tenter d'aboutir à un optimum global. Ce résultat n'est pas nécessairement atteint mais dans les travaux présents, il ne constitue pas un prérequis. L'obtention d'un partitionnement proche de la solution optimale est amplement suffisant et limite la perte d'information.

3.3.1 Choix de la distance

Le choix de la distance utilisée lors de la classification influe, parfois significativement, sur les regroupements qui vont être faits. L'objectif est double, il faut à la fois permettre le regroupement des impulsions qui présentent des spectres de courant similaires et maximiser la séparation des classes pour obtenir des classes suffisamment homogène qui s'intéressent alors à un type d'impulsion relativement ciblé. Il est envisageable d'utiliser n'importe quelle norme, usuelle ou définie sur mesure. Parmi les normes usuelles, la distance Euclidienne s'est avérée la plus performante dans l'optique de regrouper les impulsions selon leurs similitudes dans le plan courant-capacité cumulée issu de la conversion décrite précédemment. De plus, l'élévation au carré lors du calcul de la distance globale permet intrinsèquement de mettre l'accent sur les similitudes à fort courant plutôt qu'à faible courant, ce qui est ici bénéfique à l'objectif poursuivi. Une certaine corrélation entre le vieillissement de cellules Lithium-ion et le terme cumulé I^2t a été observée par [Savoye 2012, Annexe VIII, p217]. Ce résultat conforte le choix de la distance euclidienne en vue de regrouper les impulsions de courant en classes homogènes du point de vue de la dégradation engendrée sur les cellules Lithium-ion. Sa définition est donné par (3.5) où C_{jk} représentent les coordonnées du centre de la classe considérée (C_j).

$$D_i(C_j) = \sum_{k=1}^p (q_{ik} - C_{jk})^2 \quad (3.5)$$

3.3.2 Choix du nombre de classes

Le choix du nombre de classes lors d'une classification constitue une étape importante. Ici, ce choix répond à un double objectif. En effet, il faut à la fois préserver un certain niveau de détails (qui chute à mesure que le nombre de classes se réduit) et permettre une manipulation aisée du résultat (trop d'impulsions typiques sont difficilement interprétables et réutilisables en vieillissement et compliquent la modélisation par chaîne de Markov). Ce compromis à trouver peut faire l'objet d'une recherche d'optimalité mais les critères semblent bien difficiles à déterminer. L'approche la plus raisonnable consistera à sélectionner le nombre de classes le plus large possible en fonction de l'objectif poursuivi. Typiquement, des essais ultérieurs de vieillissement en cyclage pourront difficilement s'accommoder de plus d'une dizaine de classes en charge et décharge. Pour aider au choix, une étude de sensibilité du score de partitionnement au nombre de classes demandé a été réalisée et les résultats sont fournis par la figure 3.11. On remarque que le score de partitionnement évolue de façons similaires pour les impulsions en charge (CH) et en décharge (DE). Le score de partitionnement est amélioré par un facteur 3 entre 2 et 40 classes (soit 80 en additionnement charge et décharge). Ce score converge vers 0 à mesure que le nombre de classes rejoint le nombre total d'impulsions. Choisir 10 classes plutôt que 2 permet déjà de doubler l'homogénéité des classes lors du partitionnement. Dans les travaux présentés ci-après, un partitionnement en 5 ou 6 classes en charge comme en décharge sera utilisé pour présenter les résultats de façon lisible.

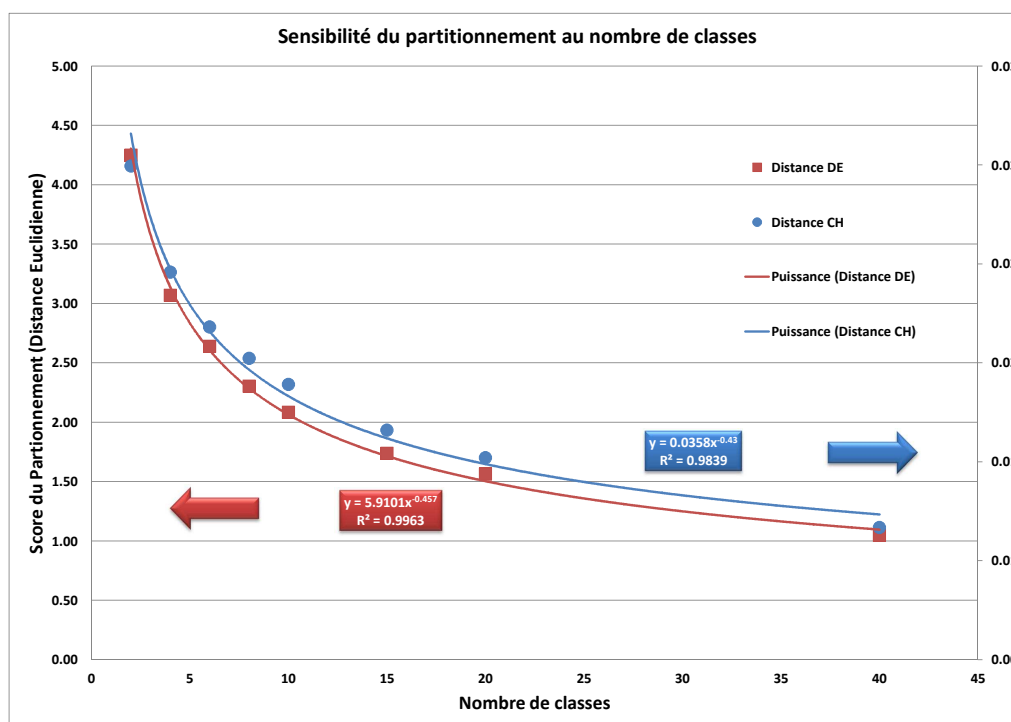


FIGURE 3.11 – Sensibilité de la performance de classification au nombre de classes

3.3.3 Résultat de la classification

Afin de conférer au lecteur les outils nécessaires à la compréhension des résultats présentés véhicule par véhicule au chapitre suivant, nous allons ici brièvement décrire la forme sous laquelle se présentent les résultats de la classification. La figure 3.12 représente l'ensemble des impulsions typiques obtenues suite à la classification, en charge comme en décharge, pour un véhicule électrique, lors d'une analyse en 5 classes. On appelle "impulsion typique", l'impulsion synthétique résultante du calcul de la valeur moyenne des impulsions qui constituent une classe donnée. C'est-à-dire que pour tous les individus appartenant à une même classe, on procède au calcul de la valeur moyenne de chacune des variables de représentation des impulsions mesurées (une variable correspond à une colonne de la matrice individus-variables (3.3)). Mises bout à bout, ces variables fournissent la définition de l'histogramme de courant de l'impulsion typique, qu'il suffit alors de reconstituer, d'abord dans le domaine de charge, puis dans le domaine temporel.

En particulier les figures 3.12a et 3.12b présentent les 5 impulsions typiques de décharge et de charge dans le domaine temporel. Alternativement, les figures 3.12c et 3.12d présentent ces mêmes 5 impulsions typiques de décharge et de charge dans le domaine de charge. Cette représentation est la plus lisible car elle masque l'effet de distortion temporel à faible courant. Enfin les figures 3.12e et 3.12f informent sur les poids respectifs (capacité échangée) de ces 5 impulsions de décharge et de charge.

La figure 3.13 détaille le résultat de la classification en affichant chaque impulsion de chaque classe. On retrouve en trait gras l'impulsion typique résultante pour chaque classe. Ce sont bien évidemment les mêmes qu'en figures 3.12c et 3.12d. On observe une bonne homogénéité des classes 2 à 5 tandis que les classes 1, qui regroupent les impulsions les plus courtes et les moins énergétiques, sont davantage hétérogènes. Ce résultat n'est pas rédhibitoire car comme nous l'avons vu en 2.3.2, conserver un bon niveau de détail à fort courant est préférable au regard des causes de dégradation des batteries.

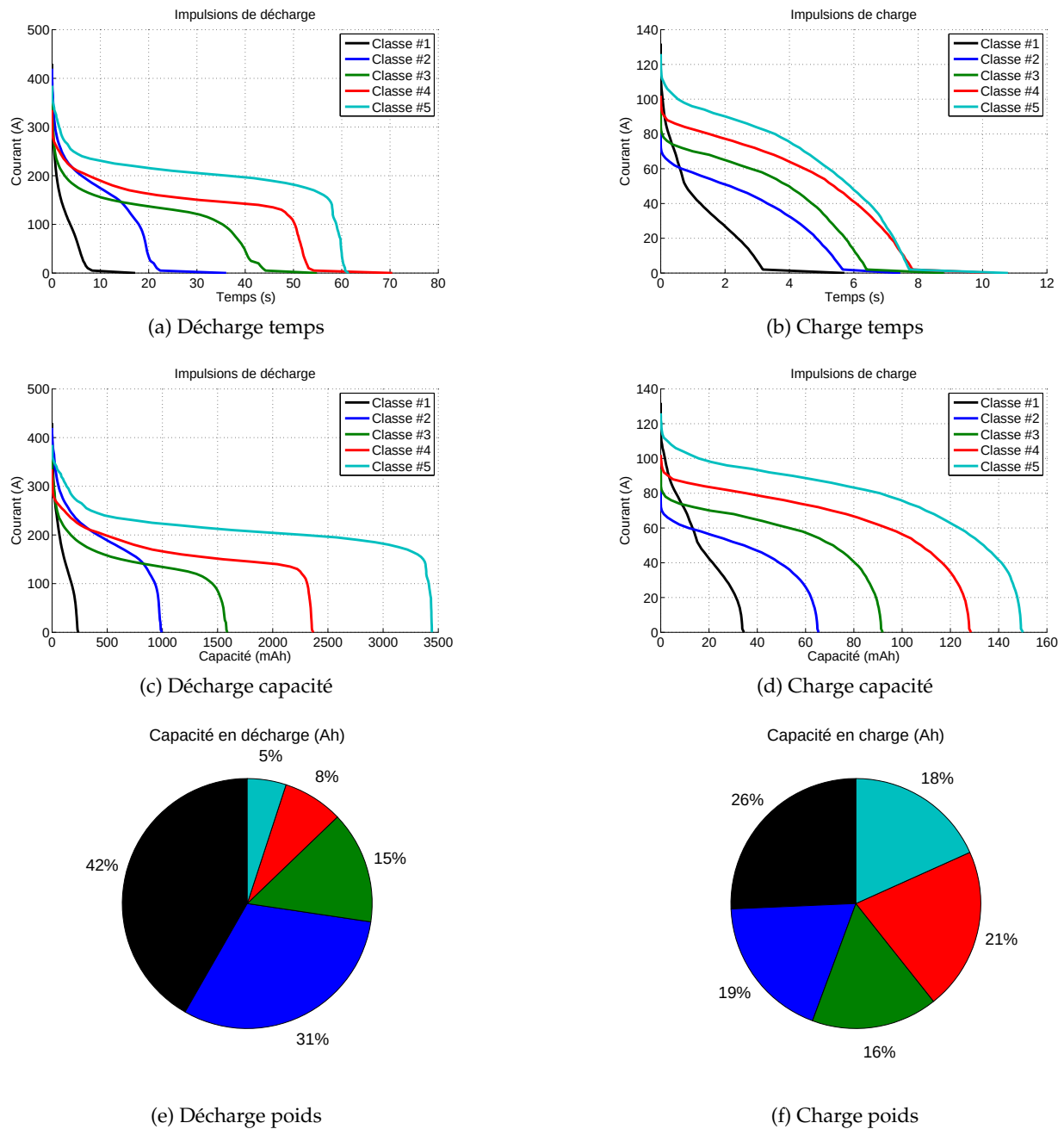


FIGURE 3.12 – Impulsions typiques en charge et décharge à l'issue de la classification

Enfin, à titre de comparaison, toutes les impulsions classées sont projetées dans des plans plus usuels de représentation de grandeurs électriques en figure 3.14. On remarque alors une certaine logique dans la classification selon l'algorithme des K-means vis-à-vis des métriques usuelles que sont les courants moyens, efficaces ou maxima. Néanmoins, une classification selon une ou plusieurs de ces métriques n'auraient pas offert le même résultat comme en témoigne les entrelacements entre classes ainsi que les chevauchements selon les ordonnées qui représentent la valeur du courant considéré (maximum, moyen, efficace).

Suite à l'éviction d'une certaine partie des impulsions issues de la découpe des profils temporels de courant en raison de leur faible importance énergétique individuelle, il est important de vérifier l'impact que cela a pu avoir en termes de perte d'information. Pour cela, à l'aide de la figure

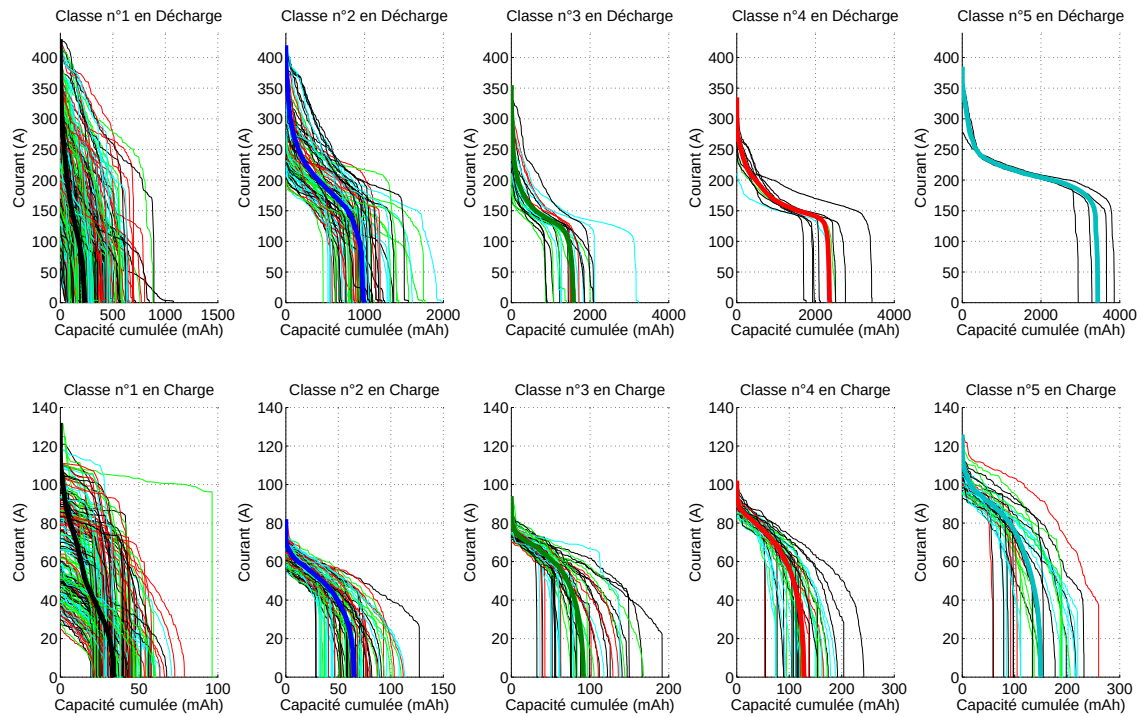


FIGURE 3.13 – Représentation de toutes les impulsions en classes avec l'impulsion typique résultante

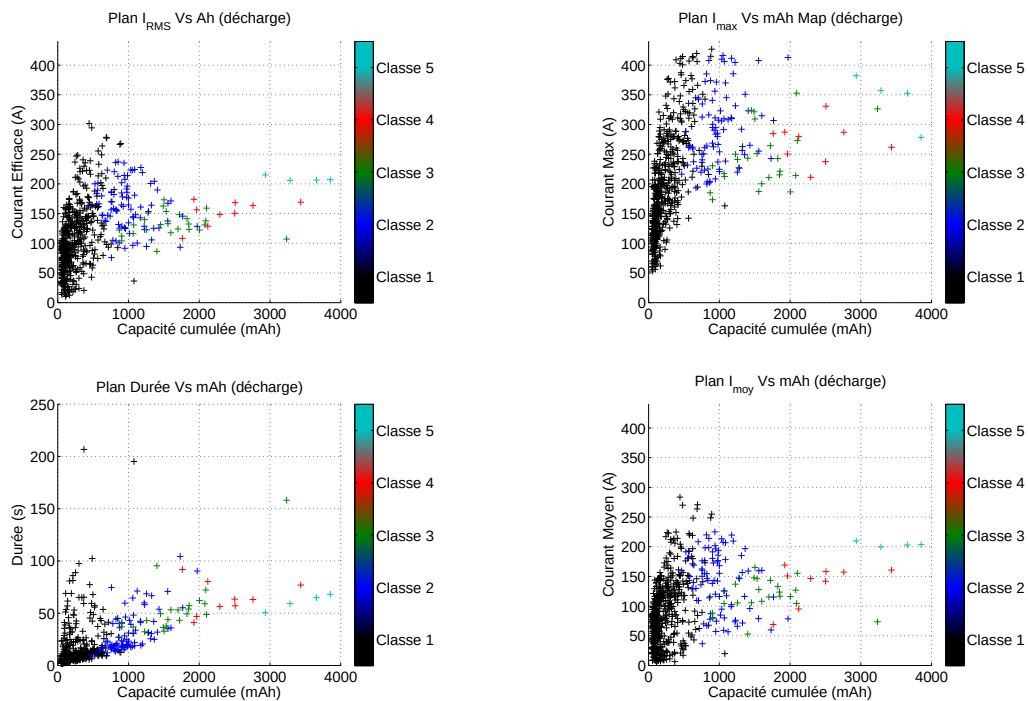


FIGURE 3.14 – Visualisation du résultat de classification dans différents repères usuels

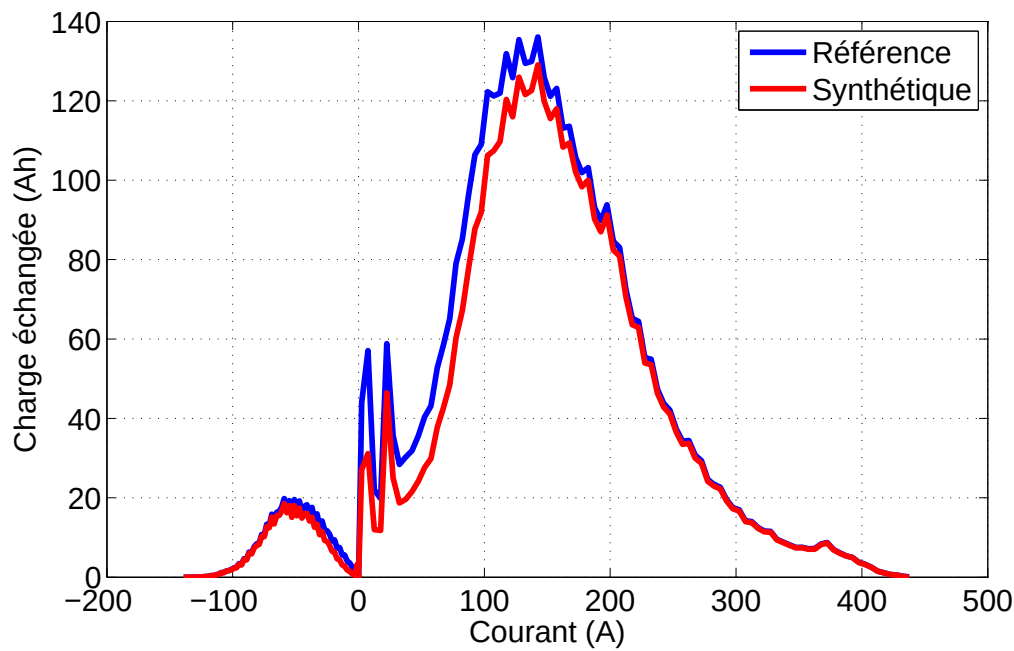


FIGURE 3.15 – Comparaison des distributions de courant entre l'échantillon de référence et le résultat synthétique

3.15, on peut comparer les histogrammes de courant pour les deux ensembles que sont l'échantillon initial de tous les profils mesurés ("référence") et le résultat de la classification qui correspond à la contribution pondérée de chaque classe d'impulsions ("synthétique"). On constate alors que la perte d'information est mineure dès que le courant dépasse 25% de sa valeur maximale en charge comme en décharge. La perte d'information est un peu plus significative sur les faibles courants de charge et devient sensible sur les faibles courants de décharge. Toutefois comme on a pu le voir en 2.3.2, il est beaucoup plus intéressant de préserver la fidélité sous les forts courants que sous les faibles courants. De plus, des actions correctives peuvent être mise en place pour compenser ce léger écart en introduisant un courant de base dans les phases de repos ou en surpondérant légèrement les classes d'impulsions qui couvrent essentiellement cette plage de courant. Au final, la fidélité obtenue ici peut être favorablement comparée aux résultats obtenus par Jens Groot avec sa tentative de compression directe du profil de courant par chaîne de Markov (cf. figure 2.41 page 58) [Groot 2009, Groot 2010]. En effet, sans filtrage adapté, la large contribution des courants faibles et modérés aura tendance à masquer celle des courants plus forts lors d'une compression statistique.

3.4 Reconstruction de cycle

3.4.1 Modélisation par chaîne de Markov

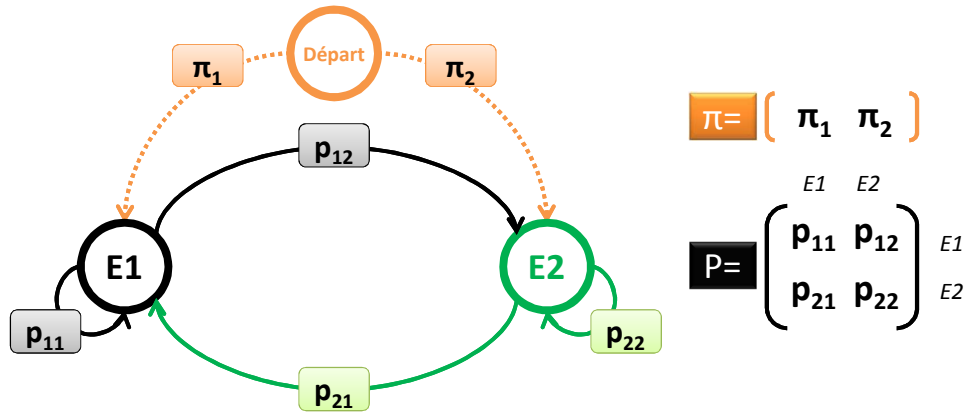


FIGURE 3.16 – Chaîne de Markov à deux états (E1,E2), régie par la matrice de transition P et la loi initiale Π

A l'issue de l'étape de classification nous nous retrouvons avec des familles d'impulsions (ou classes) qui permettent d'avoir une vision simplifiée de l'ensemble des sollicitations rencontrées. A ce stade il est déjà possible d'analyser le profil de mission des batteries dans l'application visée. Mais il peut s'avérer intéressant de procéder à une reconstruction de ce profil de mission sous une forme plus usuelle, un profil temporel représentatif du courant ($I(t)$). Pour parvenir à ce résultat, il nous faut reconstruire un signal complexe en partant des motifs élémentaires identifiés (impulsions typiques issues de la classification) et dont les caractéristiques seront la synthèse de celles mesurées sur l'ensemble des relevés effectués. Pour remplir cet objectif, il a été choisi de modéliser l'enchaînement des impulsions sous la forme d'un processus aléatoire, une chaîne de Markov dans le cas présent. La littérature fournit de nombreux exemples d'application des chaînes markoviennes, dont certains parfois anciens [Lestienne 1979]. On peut distinguer deux types d'utilisation des chaînes de Markov, pour la prédiction d'une part, et pour la génération de séquences de test d'autre part. Dans les deux cas, on commence par modéliser la séquence aléatoire observée à l'aide d'une chaîne de Markov. Ensuite, cette chaîne de Markov peut être utilisée pour la prédiction des états futurs en se basant sur l'observation courante [Lazri 2007, Samba 2005, Li 2009]. A l'opposé, lorsque la prédiction ne constitue pas un objectif, cette chaîne se trouve utilisée pour générer une ou plusieurs séquences synthétiques qui serviront de données d'entrée à la conception, au test ou à la validation d'un système tiers [Lestienne 1979, Liu 2002, Kolmanovsky 2002, Shamshad 2005, Li 2007, Groot 2009, Souffran 2011]. Dans le domaine du véhicule électrifié les applications sont nombreuses et concernent l'aide au dimensionnement optimal, l'élaboration des lois de gestion d'énergie et leurs optimisations sur un vaste panel de profils de mission mais aussi le test de composants individuels. Nous nous plaçons ici clairement dans ce contexte.

Un processus aléatoire est un processus dont les états pris par la sortie appartiennent à un ensemble prédéfini mais qu'il est impossible de prévoir de façon déterministe. Dans certains cas, on adopte cette représentation aléatoire pour des processus potentiellement déterministes mais dont les lois échappent à notre compréhension (certains phénomènes météorologiques par exemple). Un processus aléatoire peut être de nature discrète (états discrets) ou de nature continue (plage de valeur en sortie). De même, on peut s'intéresser à sa représentation en temps discret ou en temps continu. Une chaîne (ou processus) de Markov est une forme particulière de processus stochastique (aléatoire) qui

satisfait aux trois propriétés de Markov ((3.6), (3.7), (3.8)).

Commençons par définir l'espace $E(m)$, à m valeurs, de tous les états discrets que peut prendre une chaîne de Markov, $E=(e_1, e_2, e_3, \dots, e_{m-1}, e_m)$. Appelons X_n l'état du processus à l'instant n . X_{n-1} représente alors l'état précédant l'état X_n . Soit p_{ij} la probabilité relative à la réalisation de la transition ($X_{n-1}=e_i$) vers ($X_n=e_j$).

La première propriété de Markov dit :

$$P(X_n = e_j | X_{n-1} = e_i, X_{n-2} = e_k, \dots, X_0 = e_0) = P(X_n = e_j | X_{n-1} = e_i) = p_{ij} \quad (3.6)$$

La seconde propriété de Markov indique :

$$p_{ij}(t + dt) = p_{ij}(t), dt \neq 0 \quad (3.7)$$

Enfin, la troisième propriété de Markov dicte :

$$P(X_0 = e_i) = \Pi_i \text{ (loi initiale)} \quad (3.8)$$

L'équation (3.6) traduit la propriété fondamentale des chaînes de Markov, à savoir que la connaissance de l'état passé du processus n'apporte aucune information supplémentaire par rapport à la connaissance du seul état présent pour la prédiction de l'état futur. L'équation (3.7) témoigne du fait que les chaînes de Markov sont temps-invariantes, ce qui signifie que les probabilités de transition p_{ij} ne varient pas au cours du temps et de l'évolution du processus. On dit aussi qu'elle est homogène. La matrice de transition P qui regroupe tous les p_{ij} est donc définie une fois pour toute dès le départ. Enfin l'équation (3.8) conditionne l'initialisation d'une chaîne de Markov. L'état initial de la chaîne est en effet régi par un tirage aléatoire basé sur le vecteur de probabilité Π à m valeurs dans $[0; 1]$ et dont la somme des valeurs est unitaire. Si pour un processus donné, il est établi que l'état initial est toujours connu, alors le vecteur Π admet une valeur unitaire et $(m-1)$ valeurs nulles et l'état associé à la valeur unitaire est toujours choisi comme état initial. Par ailleurs, si au moins une des probabilités de transition p_{ii} (d'un état vers lui-même) admet une valeur unitaire, alors la chaîne de Markov admet au moins un état absorbant. Un état absorbant est un état dont la chaîne ne pourra plus s'extraire quel que soit le nombre de tirages effectués par la suite. Enfin, une chaîne de Markov à états discrets et à temps discret ne présente pas nécessairement une période de transition fixe (temps écoulé entre X_{n-1} et X_n). Au final, une chaîne de Markov est représentée simplement par sa matrice de transition P et sa loi initiale Π . La figure 3.16 représente le graphe de la chaîne de Markov la plus simple qui soit.

Sous sa forme basique, une chaîne de Markov est dite d'ordre 1. Cela signifie que l'état présent X_{n-1} n'est caractérisé que par une seule observation de l'état du processus (la plus récente). Il est possible de recourir à une chaîne de Markov d'ordre supérieur à 1. Ainsi l'état présent peut être caractérisé à l'aide de plusieurs observations de l'état du processus (les trois plus récentes par exemple pour une chaîne d'ordre 3). Cette démarche peut sembler antinomique vis-à-vis de la première propriété de Markov (3.6), qui indique l'absence de mémoire, mais elle est parfaitement légale. En réalité, il ne s'agit ici que d'une généralisation de la définition des chaînes de Markov qui consiste à dire que l'état présent reste la seule information nécessaire à la juste prédiction mais que cet état présent se base sur les k -dernières observations pour une chaîne de Markov d'ordre " k ". Cette généralisation s'avère parfois nécessaire pour représenter des systèmes à mémoire à profondeur limitée (ordre 1 = système sans mémoire). Certains phénomènes météorologiques sont modélisés sur la base de chaînes de Markov d'ordre supérieur à 1. Cet ordre est conservé pour tout le déroulement de la chaîne afin de satisfaire à la seconde propriété (3.7).

3.4.2 Application aux profils de courant

Pour modéliser les profils de courant mesurés sur les véhicules étudiés, il faut donc définir les quantités P (matrice de transition), Π (loi initiale) et k (ordre de la chaîne). L'ensemble des classes d'impulsions (en charge comme en décharge) forme l'espace discret des états admissibles par la chaîne de Markov, espace auquel il faut ajouter au moins un état supplémentaire dit "de repos" qui servira à représenter toutes les impulsions écartées à l'étape précédente (impulsions non classées, cf. §3.2, page 72). Il faut noter que compte-tenu du découpage en impulsions qui a été opéré avant la classification, il est rigoureusement impossible, par définition, de réaliser une transition entre deux états de même nature (charge vers charge ou décharge vers décharge). En revanche une transition entre deux états de repos est possible, soit parce qu'elle correspond au passage de la fin d'un trajet vers le début d'un autre, soit parce que deux impulsions successives ont été jugées trop faibles pour être classées.

3.4.2.1 Analyse statistique des transitions

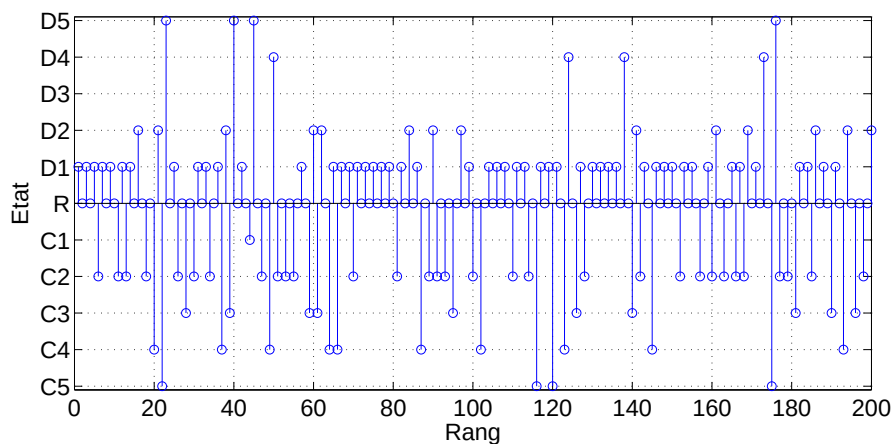


FIGURE 3.17 – Séquence d'états observés sur un échantillon

Pour renseigner la matrice P , il convient, pour un ordre k donné, de réaliser un apprentissage sur la base de l'ensemble des transitions observées dans les profils mesurés. Cela est rendu possible par le fait que chaque impulsion de courant se retrouve désormais associée à un état donné suite à la classification. Une représentation de l'enchaînement des classes d'impulsions et donc des états est proposée en figure 3.17 qui représente un extrait de profil où chaque impulsion est remplacée par l'indication de la classe à laquelle elle appartient ("D" les états en décharge, "R" l'état de repos, "C" les états en charge). La démarche consiste simplement à lire séquentiellement cette suite d'états et à comptabiliser une à une les transitions observées. A l'ordre $k=1$, on se place sur le premier état puis on regarde quel est l'état suivant avant d'incrémenter la case correspondante dans un tableau qui décompte toutes les transitions. On se décale ensuite d'une position dans la séquence et on répète l'opération jusqu'à parvenir à la dernière transition. A un ordre $k>1$, le procédé est relativement similaire à la différence qu'il faut maintenant considérer les états par groupe de largeur " k " pour déterminer l'origine de la transition. Concernant la destination de la transition, on continue en revanche à considérer le seul état suivant immédiatement. De même, on continue à se décaler d'un rang à la fois pour lire intégralement la séquence. Une difficulté émerge lorsqu'on accroît l'ordre k dans la mesure où davantage de combinaisons origine-destination sont possibles et que, par conséquent, le tableau de décompte des transitions voit son nombre de lignes augmenter parfois considérablement.

Une fois le tableau de décompte des transitions renseigné, il faut le convertir sous sa forme de matrice de transition P . Pour cela, il suffit, pour chaque ligne, de diviser les quantités de chaque case par la somme des cases de la ligne. Chaque case de cette matrice P comporte maintenant une valeur comprise entre 0 et 1 et toutes les lignes admettent une somme unitaire. Enfin, dans l'optique de la génération ultérieure, la matrice P est convertie vers la matrice P_s dont chaque ligne n'est autre que la somme cumulée de la ligne correspondante dans P . Un exemple de ces trois matrices est fourni par les tableaux 3.5 à 3.7.

De/Vers	D1	D2	R	C1	C2
D1	0	0	0	20	20
D2	0	0	40	10	20
R	20	40	10	10	30
C1	10	10	20	0	0
C2	10	20	40	0	0

TABLE 3.5 – Décompte des transitions

De/Vers	D1	D2	R	C1	C2
D1	0	0	0	0.50	0.50
D2	0	0	0.57	0.29	0.14
R	0.18	0.37	0.09	0.09	0.27
C1	0.25	0.25	0.50	0	0
C2	0.14	0.29	0.57	0	0

TABLE 3.6 – Matrice de transition P

De/Vers	D1	D2	R	C1	C2
D1	0	0	0	0.50	1.00
D2	0	0	0.57	0.86	1.00
R	0.18	0.55	0.64	0.73	1.00
C1	0.25	0.50	1.00	1.00	1.00
C2	0.14	0.43	1.00	1.00	1.00

TABLE 3.7 – Matrice des probabilités cumulées P_s

3.4.2.2 Chaîne de Markov

La figure 3.18 décrit une modélisation par chaîne de Markov du profil de courant suite à sa classification en 5 états, 2 de décharge (D1, D2), 2 de charge (C1, C2) et 1 de repos (R). On y remarque l'absence de transition possible entre deux états de même nature. L'initialisation de la chaîne se fera soit par un état de décharge soit par l'état de repos selon la loi initial II.

Le choix final de l'ordre optimal pour la chaîne de Markov à utiliser est l'objet d'une étape de sélection de modèles. A cette fin, les techniques AIC (Akaike Information Criterion) et BIC (Bayesian Information Criterion) ont été utilisées. Un exemple de leur application aux chaînes de Markov est fourni par [Cazacioc 2005, Roblès 2012]. Ces critères mettent en balance la performance obtenue sur la vraisemblance du modèle et le nombre de paramètres requis pour décrire ce modèle. Le principe consiste donc à générer des chaînes de Markov pour l'ensemble des ordres que l'on souhaite tester puis à mesurer leurs vraisemblances et dénombrer le nombre de paramètres utilisés par chaque chaîne de Markov aux différents ordres.

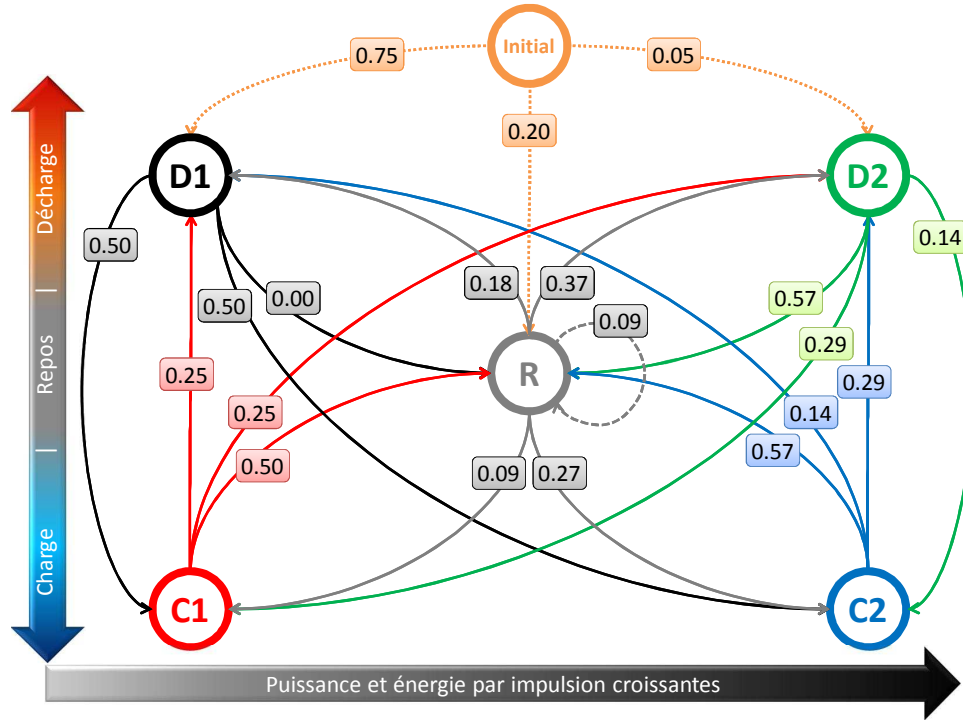


FIGURE 3.18 – Chaîne de Markov à 5 états (2 en décharge, 2 en charge, 1 état repos), à l'ordre 1, représentée sous forme de graphe

Soit :

- k : le nombre de paramètres (libres) du modèle considéré,
- n : la longueur de la séquence observée,
- L : la vraisemblance du modèle considéré par rapport à la séquence observée.

Le nombre de paramètres libres " k " du modèle considéré est obtenu en analysant le contenu de la matrice de transition P . Pour chacune des lignes de cette matrice P , il s'agit de déterminer le nombre de paramètres requis pour décrire toutes les transitions possibles à partir de cette ligne. Par hypothèse, nous avons exclu les transitions entre deux états du même type (charge->charge, décharge->décharge). Les cases correspondantes dans la matrice P ne sont donc pas comptabilisées comme paramètres libres. De plus, il est impératif que chaque ligne totalise une somme unitaire. Cela implique qu'une des valeurs présentes sur cette ligne n'est pas libre. Sa valeur contrainte n'est autre que le complément à 1 de la somme des autres cases. En conclusion, en fonction du dernier état de la séquence reliée à la ligne considérée nous avons, dans le cadre d'une analyse en N classes (N "décharge" + N "charge" + 1 "repos") :

- $N+1-1 = N$ paramètres libres par ligne traduisant une séquence avec un état final de "décharge",
- $N+1-1 = N$ paramètres libres par ligne traduisant une séquence avec un état final de "charge",
- $2*N+1-1 = 2*N$ paramètres libres par ligne traduisant une séquence avec un état final de "repos".

Admettons que C désigne le nombre total d'impulsions de "charge", D le nombre total d'impulsions de "décharge" et R le nombre total d'impulsions de "repos", nous obtenons le nombre de paramètres libres du modèle par le calcul suivant :

$$k = (C + D + 2R) \cdot N \quad (3.9)$$

La mesure de la vraisemblance du modèle s'obtient en "rejouant" intégralement la séquence ob-

servée à travers la matrice de transition P du modèle considéré. Soit e_i l'état au rang "i" de la séquence observée, nous obtenons la vraisemblance en appliquant :

$$L = \prod_{i=\text{ordre}}^{n-1} Pr(e_i \rightarrow e_{i+1}) \quad (3.10)$$

La définition du critère AIC est donnée par (3.11) et celle du BIC est donnée par (3.12). Le modèle retenu est celui qui présente le score le plus bas à ces deux tests.

$$AIC = 2 \cdot k - 2 \cdot \ln(L) \quad (3.11)$$

$$BIC = k \cdot \ln(n) - 2 \cdot \ln(L) \quad (3.12)$$

Il faut noter que nous ne cherchons pas ici à trouver un modèle exact ou quasi-exact de la séquence d'états observée. En effet, ce résultat serait dommageable à l'étape de génération de cycles car on ne ferait alors que répéter la séquence observée (en intégralité ou en partie). La chaîne de Markov que nous cherchons à obtenir doit comporter de nombreux degrés de libertés pour permettre la génération d'un ensemble de cycles synthétiques. A titre d'exemple, à condition de fixer le point de départ, une vraisemblance de "1" signifie que le modèle est exact et qu'il ne peut générer qu'une seule séquence. Une vraisemblance de "0.25" signifie que le modèle ne peut générer que quatre séquences synthétiques (une chance sur 4 d'obtenir la séquence observée).

Lorsque la vraisemblance d'un modèle est extrêmement basse (inférieure à 10^{-323}), les limitations numériques de Matlab interfèrent avec le calcul de la valeur des critères AIC et BIC.

Les limitations numériques rencontrées sous Matlab ont également conduit à limiter l'ordre maximal testable des chaînes de Markov à 15 environ. En effet, avec une dizaine de classes, l'encodage d'une séquence de longueur 16 (origine : 15 états, destination : 1 état), génère une valeur numérique (code) de l'ordre de 10^{16} . Or, Matlab ne distingue plus les unités à partir de ces valeurs, si bien que la méthode d'encodage de la séquence est sensible à la corruption de données.

Au final, l'ordre retenu est pris égal à la valeur sélectionnée par le calcul du critère BIC, à condition que celui-ci soit calculable (par Matlab) pour l'échantillon considéré. A défaut, la valeur maximale compatible avec Matlab est retenue. Celui-ci se situera donc entre 1 et 15 et sera donné pour chacun des échantillons de données traités au chapitre 4.

3.4.2.3 Génération de séquences

L'étape finale consiste à générer une ou plusieurs séquences de longueurs déterminées (durée limite, nombre d'états se succédant, profondeur de décharge associée à la séquence). Cet objectif de reconstruction dépend des besoins de l'utilisateur et ne peut pas être généralisé à ce stade. Une fois l'initialisation de la chaîne de Markov réalisée (application de la loi initiale), on utilise la matrice des probabilités cumulées P_s conjointement avec un générateur de nombres aléatoires à valeur dans $[0; 1]$ (fonction `rand()` sous Matlab). En fonction du nombre réalisé, connaissant l'état courant, on détermine par tirage l'état suivant dans la séquence synthétique. L'état retenu sera celui dont la valeur de probabilité cumulée est immédiatement supérieur à la valeur aléatoire tirée. A titre d'exemple, dans la matrice 3.7, admettons que nous nous trouvions dans l'état courant "R" et que nous tirions de façon aléatoire la valeur 0.355, alors l'état de destination sera "D2" (car $P_s(D1) < 0.355 \leq P_s(D2)$). Ce processus est répété jusqu'à l'obtention d'une séquence d'états suffisamment longue pour satisfaire à l'objectif fixé.

Nous suivrons une stratégie cherchant à remplir deux niveaux d'objectifs. Le premier objectif, au niveau macroscopique, consistera à générer une ou plusieurs séquence(s) qui satisfasse(nt) une cer-

taine valeur de DOD, kilométrage ou durée. Le second objectif, au niveau microscopique, consistera à s'assurer que l'ensemble des séquences générées présente une répartition des classes d'impulsions très proches de celle mesurée, servant de référence.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de l'algorithme des K-means et des chaînes de Markov. L'algorithme des K-means a été adapté à l'étude et au partitionnement des impulsions de courant observées sur les profils de courant batterie mesurés. Le choix du nombre de classes et de la distance retenus pour procéder au partitionnement a été discuté. Une modélisation par chaîne de Markov a été appliquée aux enchainements d'impulsions au sein des profils de courant batterie. L'adaptation des chaînes de Markov à notre problématique ainsi que l'obtention de l'ordre optimal des chaînes de Markov utilisées ont été décrites.

Au chapitre suivant, nous présenterons les résultats obtenus sur différents types de véhicules électrifiés, en usage réel, suite à l'application de l'approche décrite dans ce chapitre.

Résultats

Sommaire

4.1 Vélos à assistance électrique	88
4.1.1 Assistance fixe - moteur roue	88
4.1.2 Assistance proportionnelle - système Panasonic	98
4.1.3 Conclusions	107
4.2 Véhicules électriques	109
4.2.1 Quadricycle urbain - Aixam Megacity	109
4.3 Véhicules hybrides	123
4.3.1 Toyota Prius	123
4.4 Véhicules lourds	137
4.4.1 Trolleybus Irisbus	137
4.5 Conclusion	146

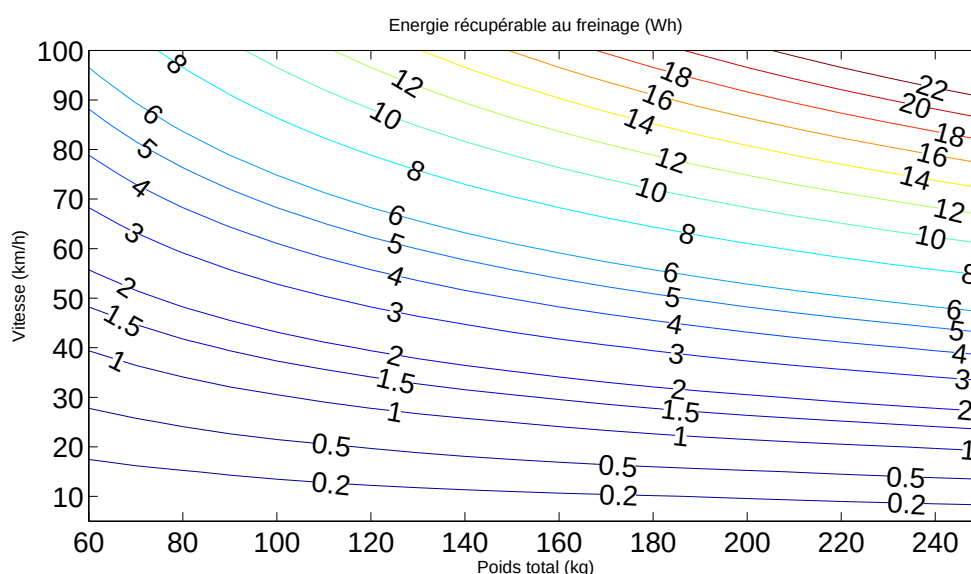


FIGURE 4.1 – Potentialités de récupération d'énergie au freinage

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différents résultats obtenus sur l'ensemble des véhicules électrifiés étudiés au cours de mes travaux. Pour chaque véhicule, une description technique du véhicule ainsi qu'une description de la phase expérimentale de recueil des données seront fournies. Ensuite, toujours pour chaque véhicule, nous nous intéresserons aux sollicitations typiques identifiées, éventuellement en distinguant plusieurs environnements de conduite. Enfin, un ou plusieurs profils typiques seront proposés en se basant sur les sollicitations typiques précédemment identifiées et en recourant à une modélisation par chaîne de Markov. Partout où cela sera possible,

nous analyserons les conditions environnementales à même d'influer sur la dégradation de la batterie du véhicule (SOC, DOD, température, protocole de charge).

Les paramètres utilisés lors de l'analyse des données des cinq véhicules sont détaillés dans l'annexe D.

4.1 Vélos à assistance électrique

Les deux premiers véhicules considérés sont des vélos à assistance électrique (VAE), l'un d'origine hollandaise (marque Sparta) et l'autre allemande (marque Kalkhoff). Un VAE est un vélo sur lequel on installe un moteur électrique et une batterie compacte et légère. Cette traction électrique ne s'active que si le cycliste imprime un pédalage suffisant, autrement elle se coupe automatiquement, en conformité avec la législation européenne. De plus la vitesse est bridée à 25km/h et le VAE est considéré comme un cycle au même titre que n'importe quel vélo. La sélection de ces modèles s'est faite sur la base de leur représentativité du marché européen. En effet, il semble plus intéressant de cibler les modèles ayant des volumes de vente élevés sur les deux principaux marchés européens à ce jour pour les VAE (Pays-Bas et Allemagne). Ces deux vélos se situent dans la même gamme (moyenne, 1500-2000€), adoptent la même géométrie (cadre bas, posture droite et haute), la même transmission (chaîne droite, dérailleur interne au moyeu Shimano Nexus 8 vitesses), et enfin, affichent environ les mêmes poids (26 contre 23kg) et les mêmes quantités d'énergies embarquées (10Ah contre 12Ah sous 26V). Ces vélos diffèrent en revanche sensiblement par leur mode d'assistance électrique comme nous le verrons par la suite. Enfin, notons que ces vélos, comme la quasi-totalité de l'offre commerciale, ne dispose pas d'une fonction de récupération d'énergie à la décélération, le freinage est entièrement mécanique. Ce choix s'explique par la très faible énergie cinétique acquise par un VAE (env. 0.5Wh, masse 100kg et vitesse 25km/h, cf. figure 4.1) au regard de sa consommation kilométrique (un ordre de grandeur au-dessus). Les deux roues électriques (scooter, moto), plus lourds et plus rapides, proposent parfois cette fonctionnalité.

4.1.1 Assistance fixe - moteur roue

Le premier VAE étudié est un produit hollandais, conçu par Sparta, et se nomme e-Motion C2. Intéressons-nous à ses caractéristiques techniques.

4.1.1.1 Description du véhicule

Les caractéristiques techniques de ce véhicule sont rappelées par le tableau 4.1. Ce VAE est équipé d'un moteur brushless de 250W, fabriqué par Sanyo, et qui vient se loger au niveau du moyeu de la roue avant. Aussi, lorsque le moteur est mis en rotation, il entraîne la roue avant et offre une traction au vélo. La roue arrière est mue par le cycliste à l'aide du pédalier et d'un dérailleur arrière à 8 vitesses. Ce VAE présente donc deux caractéristiques mécaniques importantes : d'une part, il possède deux roues motrices, ce qui est plutôt rare, et d'autre part, le moteur électrique est en prise directe avec la roue avant. Le moteur ne peut donc pas bénéficier de la boîte de vitesse et son point de fonctionnement varie donc énormément avec le relief et la vitesse d'évolution du vélo. L'assistance électrique de ce VAE se base sur un principe d'assistance fixe. Pour un niveau d'assistance donné (sur 5 niveaux possibles), la puissance imprimée par le moteur est maintenue constante par le système électronique embarqué. La valeur de la puissance moteur est contrôlée par la limitation du courant de sortie de la batterie (niveau maximum : $\approx 15A$). Lorsque la vitesse maximale réglementaire de 25 km/h est atteinte (26.2km/h en pratique), l'assistance module le couple moteur pour stabiliser l'allure. Si cette vitesse est dépassée, que les freins sont activés ou que le cycliste cesse de pédaler, l'assistance se coupe automatiquement. Le cycliste, par sa contribution au couple moteur qui



FIGURE 4.2 – Vélo à assistance électrique Sparta e-Motion C2

est fonction de son pédalage, peut donc influencer sur la puissance fournie par le moteur. Il y a deux configurations extrêmes : soit le cycliste pédale dans le vide (rapport de transmission court) et le moteur fournit sa puissance $P_{max}(niveau)$, soit le cycliste fournit un effort important et entretient de lui-même une vitesse supérieure à 25 km/h et le moteur se coupe (cas rare). Entre ces deux fonctionnements extrêmes, le vélo est mû par l'effort conjoint du cycliste et du moteur, sans qu'il soit possible de prédire la répartition. Par ailleurs, le vélo dispose d'une gachette d'accélération qui permet d'accélérer le vélo de 0 à 6 km/h sans pédalage requis mais aussi de passer temporairement sur le niveau maximum d'assistance (5/5) pour les démarrages ou les relances. Le cycliste est libre de choisir le niveau d'assistance qui lui convient et d'utiliser ou non l'accélérateur, ce qui se traduit par des profils d'usage assez différents et donc des sollicitations dépendantes du style de conduite.

4.1.1.2 Description de l'expérimentation

Ce véhicule a été confié à des employés de l'IFSTTAR et du laboratoire Ampère afin d'être utilisé en priorité sur leurs trajets domicile-travail. Les autres types de trajets étaient également autorisés. La période de prêt variait entre 1 et 3 semaines en fonction du souhait émis par l'utilisateur. Ce vélo est resté en circulation toute une année à l'exception du mois de novembre 2011 où il a été assez peu utilisé en raison d'une intervention sur le frein arrière. L'ensemble des détails de l'expérimentation est synthétisé par le tableau 4.2. L'écart entre les kilomètres validés et le total enregistré relève du contrôle de la qualité des données. Lorsqu'un relevé sature la mémoire de l'enregistreur de bord, l'étiquetage de ce relevé est partiellement dégradé car le kilométrage associé est alors imprécis (correspondance avec le compteur vélo incertaine). Afin de retranscrire fidèlement les statistiques kilométriques, j'ai choisi d'écarter ces données mal étiquetées. Ces relevés écartés sont distribués assez régulièrement dans l'année et parmi les utilisateurs, ce qui permet de ne pas engendrer de biais.

Fabricant	Sparta
Modèle (millésime)	e-Motion C2 (2011)
Poids	26.0 kg
Mode d'assistance	Fixe par paliers (5 niveaux : 2-4-8-12-15 A)
Transmission	Dérailleur interne au moyeu Shimano Nexus 8 vitesses, rapport variant sur 307%
Machine électrique	Moteur roue avant en prise directe, Sanyo, Brushless, 250W, 29Nm
Batterie	260Wh, 26V _{nom} , 10Ah, arrangement 7S6P, Phylion (Chine), ref : XH259-10J, chimie LMS ($LiMn_2O_4$), poids=3.3 kg, 79Wh/kg au niveau pack
Vitesse maximale	26km/h
Autonomie constructeur	55km (4.7Wh/km)

TABLE 4.1 – Fiche technique du VAE Sparta

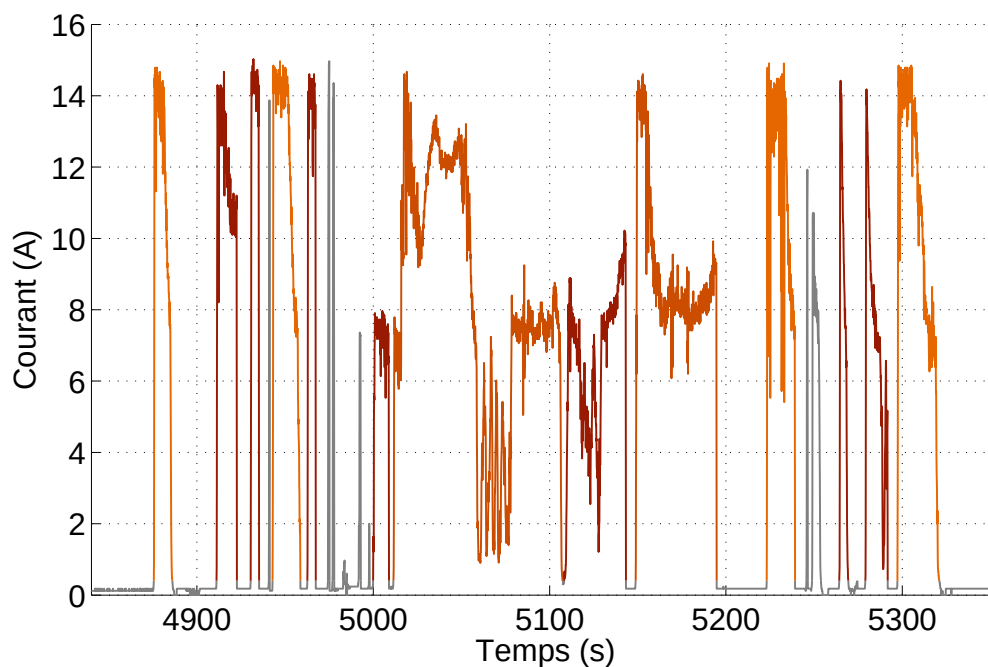


FIGURE 4.3 – Allure du profil de courant

Responsable	Arnaud Devie
Période	Avril 2011 - Avril 2012
Lieu(x)	Agglomération Lyonnaise (intra-urbain)
Personnes impliquées	14 employés d'Ampère ou de l'IFSTTAR
Type de trajets	Domicile-travail matin et soir, autres trajets libres
Nombre de trajets	299
Kilomètres enregistrés	2348km
Kilomètres validés	1526km
Enregistreur de données	EagleTree Systems V4, consommation $\approx 200mA$
Fréquence d'échantillonnage	10Hz
Données enregistrées	Tension batterie Courant batterie Température cosse batterie Vitesse roue

TABLE 4.2 – Conditions expérimentales pour VAE Sparta

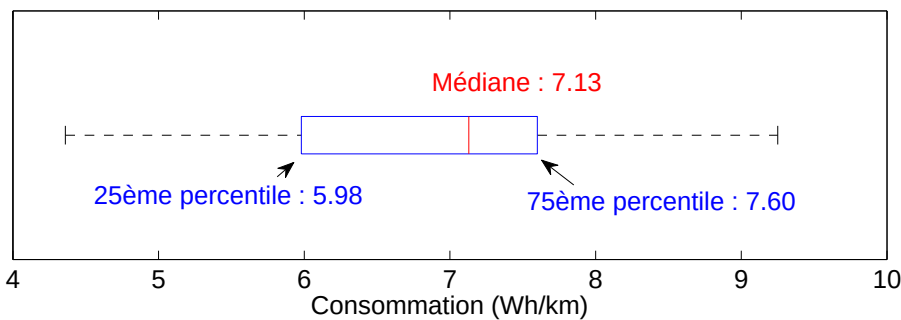


FIGURE 4.4 – Consommations relevées

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
Occurences par 100km	603	105	31	22	2.2	0.3	763
Consommation par 100km (Wh)	285	162	90	95	19	7.1	658

TABLE 4.3 – Données kilométriques globales

4.1.1.3 Sollicitations typiques

La figure 4.3 offre un aperçu de l'allure du courant batterie sur ce véhicule. On y retrouve la limitation du courant imposée par le variateur électronique. La distribution des consommations ki-

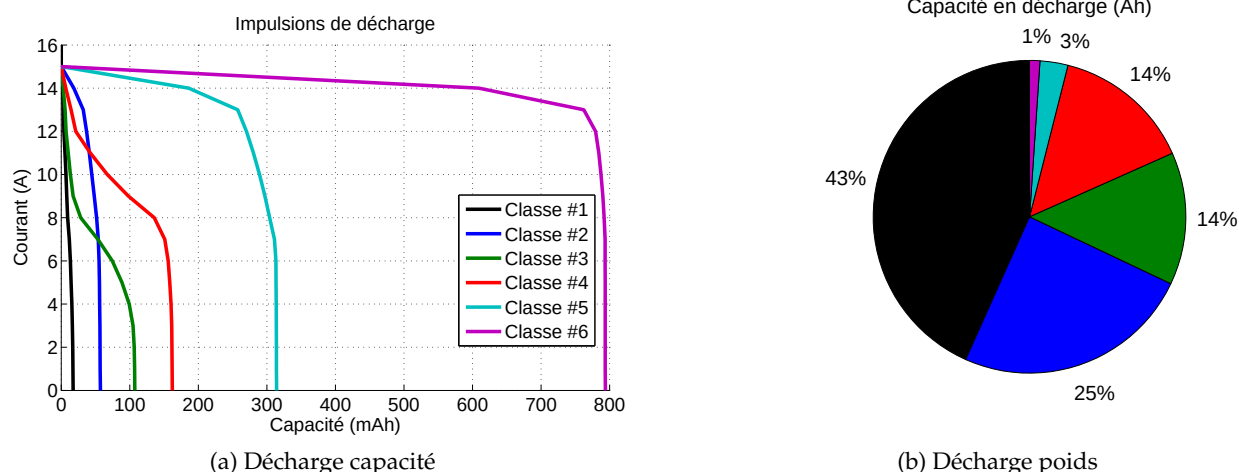


FIGURE 4.5 – Impulsions typiques globales à l'issue de la classification

lomètriques relevées lors des roulages est donnée par la figure 4.4. La valeur médiane s'établit à 7.13Wh/km ce qui se traduit par une autonomie nominale voisine de 35km. Selon le style de conduite, la consommation varie du simple au double entre 4.5 et 9Wh/km pour les extrêmes. Sur la base des mesures effectuées, on peut noter que l'assistance offre jusqu'à 400W (28V-15A) de puissance électrique sur des périodes prolongées. La répartition entre phases de traction et phases de repos (ce qui ne veut pas dire que le vélo est à l'arrêt) est de 58% contre 42%.

Le résultat de la classification des impulsions de courant mesurées sur ce véhicule est présenté en figure 4.5 et sur le tableau 4.3. L'échantillon de départ comportait 10831 impulsions et un partitionnement en 6 classes a été retenu. A l'aide de la figure 4.5b, on observe que les impulsions les plus courtes et les moins énergétiques représentent 43% de la capacité déchargée. Les impulsions typiques issues des classes 1, 3 et 4 présentent des valeurs de courant efficace inférieures à celles des classes 2, 5 et 6. Cette classe n°2 représente un quart de la charge consommée par le véhicule, sous un courant efficace important. Les classes 5 et 6 regroupent les impulsions les plus énergétiques et à fort courant efficace mais sont relativement rares. Ces deux classes représentent 4% de la charge consommée environ. Toutefois, une impulsion de la classe n°6 dure environ 3 minutes sous le courant maximum du système, ce qui est susceptible de provoquer un auto-échauffement sensible de la batterie. Il est donc important de les considérer. Elles traduisent certainement le passage d'une longue montée sous assistance maximale.

Compte-tenu des niveaux de courant observés pour chaque classe, il est raisonnable de penser que la classe n°3 est abondée par un fonctionnement au niveau 3/5 d'assistance, la classe n°4 par un niveau 4/5 et les classes 2, 5 et 6 par un fonctionnement au niveau maximum (5/5).

Le cas des trajets vallonnés a été étudié plus en détails. En effet, une partie de la clientèle des VAE s'intéresse à ce type de véhicule en raison d'un parcours fortement vallonné qui dissuade de l'emploi d'un vélo classique. 357km d'enregistrement ont été labélisés comme comportant des trajets avec une ou plusieurs montée(s) significative(s) (sur la base du repérage du trajet de l'utilisateur sur carte topographique). J'ai donc procédé à l'analyse de ces données plus spécifiquement. La première observation relève de la répartition entre les phases actives et inactives de l'assistance où le ratio passe à 62/38 contre 58/42 globalement. Logiquement, la consommation moyenne augmente sensiblement (+5%) pour s'établir à 6.88Wh/km contre 6.58Wh/km pour l'échantillon global (cf. tableaux 4.3 et 4.4). Les classes 4 et 6 de cet échantillon sont identiques aux classes 5 et 6 de l'échantillon globale mais leur contribution à la consommation énergétique a plus que doublé (cf. figures 4.5 et 4.6). Les autres

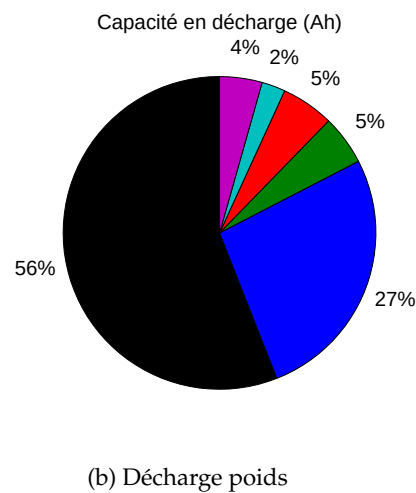
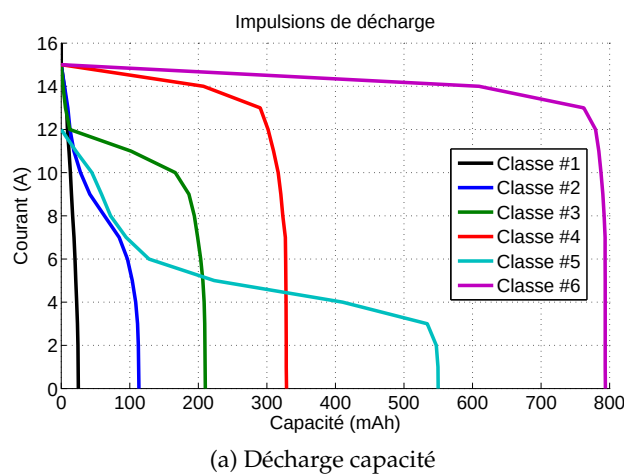


FIGURE 4.6 – Impulsions typiques sur parcours vallonnés

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
Occurences par 100km	568	59	6.2	4.2	1.1	1.4	640
Consommation par 100km (Wh)	385	183	35.3	37.6	16.8	30.3	688

TABLE 4.4 – Données kilométriques sur parcours vallonnés

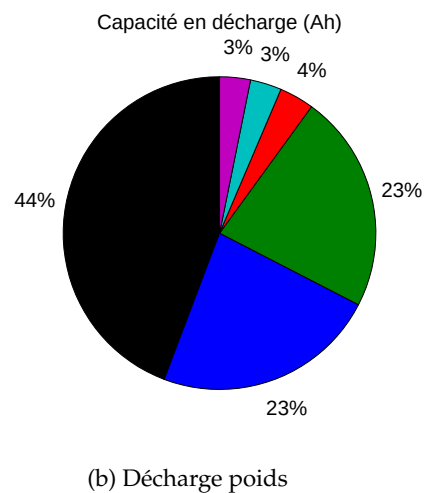
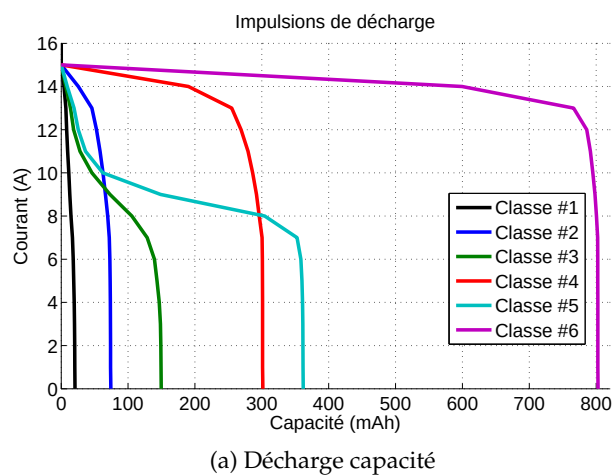


FIGURE 4.7 – Impulsions typiques des cyclistes gros consommateurs

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
Occurences par 100km	642	93	45	3.6	2.7	1.2	788
Consommation par 100km (Wh)	358	188	183	29	26	25	809

TABLE 4.5 – Données kilométriques des cyclistes gros consommateurs

classes présentent des contenus énergétiques par impulsion plus élevés que celles de l'échantillon globale, ce qui traduit un allongement des phases d'assistance. On peut aussi remarquer que les impulsions moyennes (classes 2 et 3) sont moins représentées que dans l'échantillon globale (classes 3 et 4). Tout cela se traduit par un courant efficace en légère hausse de 5% (6.75A contre 6.55A).

Enfin, intéressons-nous au cas des "gros consommateurs". Certains utilisateurs avaient tendance à fournir peu d'effort musculaire et à faire fonctionner l'assistance à sa puissance maximale. Cette répartition inégale des efforts se traduit bien entendu par une forte consommation kilométrique et une autonomie sensiblement inférieure à la moyenne constatée ($\approx 20\text{km}$ contre 35km). Cet échantillon a été constitué à partir de toutes les mesures présentant une consommation globale au-dessus du 3ème quartile (25% des valeurs les plus élevées). Sur cet échantillon de 337km , le courant efficace s'élève à 7.3A . D'après la figure 4.7, on retrouve les mêmes classes d'impulsions 4, 5 et 6 que pour l'échantillon sur parcours vallonné. Toutefois, leur contribution relative à l'énergie consommée est en légère baisse (de 11% à 10). Par rapport à l'échantillon global, les classes 2 et 3 présentent des formes similaires aux classes 2 et 4 de l'échantillon global mais avec un contenu énergétique par impulsion en hausse sensible (80mAh et 180mAh contre 50mAh et 160mAh précédemment). La classe n°1 s'est également épaissie alors que la classe n°3 de l'échantillon global n'apparaît plus. Cette classe présentait le plus faible courant efficace parmi les 6. Au final, l'accroissement de consommation ($151\text{Wh}/100\text{km}$ soit 23%) entre l'échantillon globale et celui-ci résulte pour un tiers de la contribution des classes 4 à 6 alors que les classes 1 à 3, équivalentes aux classes 1 à 4 de l'échantillon globale, contribuent pour deux tiers (cf. tableau 4.5).

On voit donc ici que le niveau de sollicitation des batteries rencontré sur ce véhicule dépend en premier lieu du style de conduite adopté et en second lieu du relief présent sur le parcours. Le fait que le style de conduite impacte autant la consommation est lié au grand degré de liberté offert par ce VAE sur la répartition entre effort musculaire et assistance électrique. La nature des impulsions typiques est peu affectée mais leurs répartitions évoluent nettement d'un contexte à un autre. Dans tous les cas de figures, la distinction entre impulsions longues et courtes est très marquée (cf. classes 1 et 6).

4.1.1.4 Cycles représentatifs

Maintenant que nous disposons de 6 impulsions typiques pour ce véhicule, nous devons vérifier que la perte d'information entre l'échantillon de départ et cette réduction à 6 classes est satisfaisante. La figure 4.8 témoigne d'un respect satisfaisant de la distribution du courant. L'écart est faible entre 12 et 15A , et légèrement plus marqué en dessous de 12A . Cet écart provient de l'éviction d'un certain nombre d'impulsions jugées trop courtes ou trop peu énergétiques lors de la préparation des données. Il est possible de combler cet écart en surpondérant une classe d'impulsion qui couvre la zone incriminée, comme la classe n°3 dans ce cas. Au final, la perte d'information est suffisamment contenue et le résultat jugé acceptable.

Avec le courant, les deux autres paramètres expérimentaux de première importance au regard de la dégradation des batteries sont la température et la DOD. Les histogrammes de ces deux grandeurs physiques sont reportés en figures 4.9 et 4.10. La température est obtenue par mesure directe réalisée au niveau d'une des cosses de la batterie, pour profiter de la conduction thermique du collecteur de courant. La température mesurée varie entre 0 et 45°C . Il faut noter que les valeurs négatives de température ont été seuillées à 0°C par l'enregistreur. Au coeur de l'hiver, la batterie a probablement atteint les -5°C pendant de courts instants. A l'opposé, la batterie n'a passé qu'une demie-heure autour de 45°C et environ deux heures aux environs de 40°C . On peut vérifier que la répartition des températures classe par classe suit la répartition globale, ce qui n'est pas surprenant étant donné la simplicité du véhicule (pas d'auxiliaires, pas de conditionnement batterie) et la constante de temps relativement grande de la variation de température. L'obtention de l'histogramme de DOD est, elle,

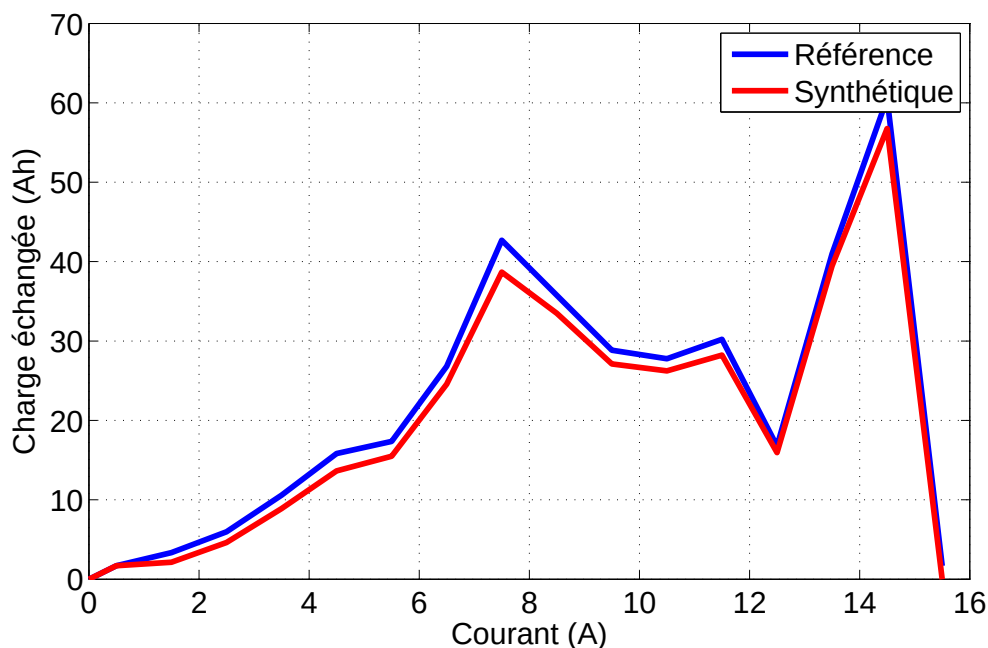


FIGURE 4.8 – Vérification du respect de la distribution du courant

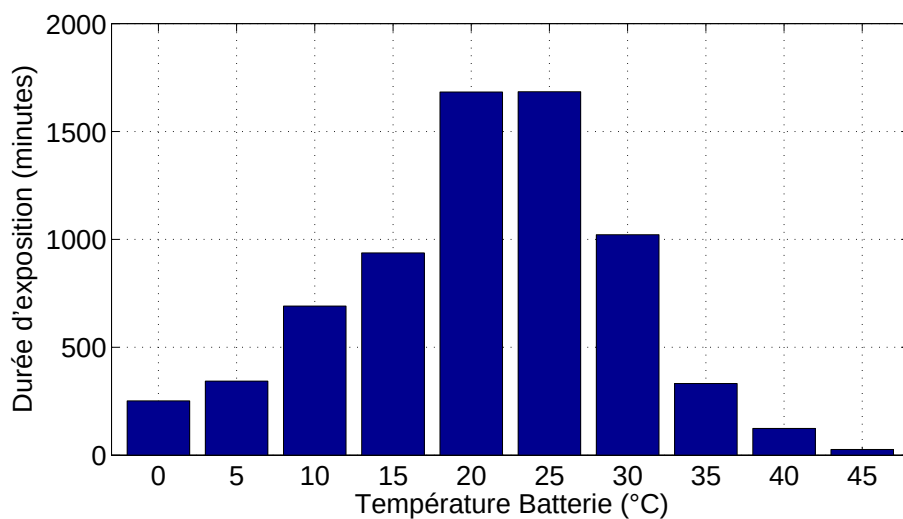


FIGURE 4.9 – Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie

plus aléatoire puisqu'il est basé sur une estimation des phases de recharge à partir de l'allure du profil de tension et de la courbe $SOC=f(OCV^1)$. Les valeurs des quartiles sont reportées sur la figure 4.10. On observe une répartition assez homogène de la DOD entre 0 et 65% suivie par un fort déclin. La DOD constatée varie en fonction de la longueur unitaire des trajets domicile-travail de chaque utilisateur et de ses habitudes de recharge (fréquentes ou espacées). Une DOD de 17% correspond à une distance de 6km en moyenne, 42%DOD à 15km et 60%DOD à 21km. Ce sont effectivement des distances quotidiennes usuelles pour les utilisateurs ayant participé à cette expérimentation.

Pour conclure l'étude de ce véhicule, un cycle représentatif a été généré. Il est proposé sur la

1. Open Circuit Voltage , Tension à vide

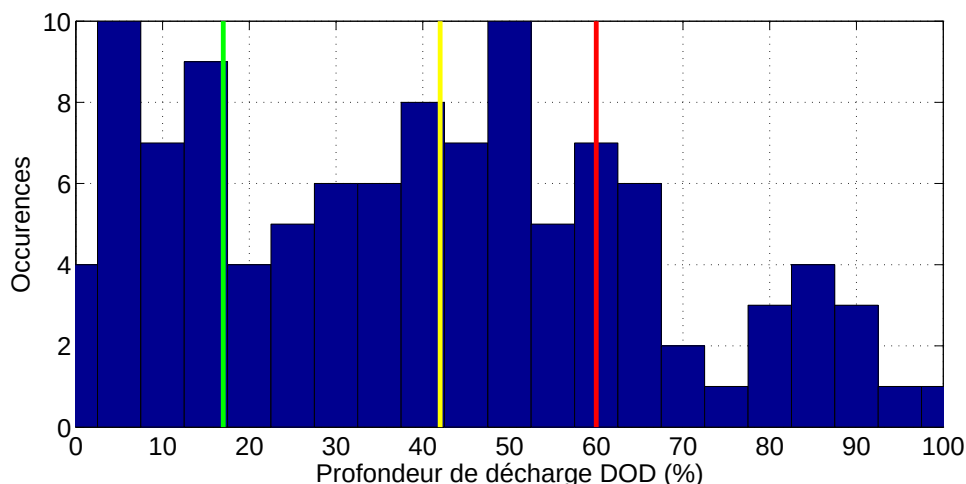
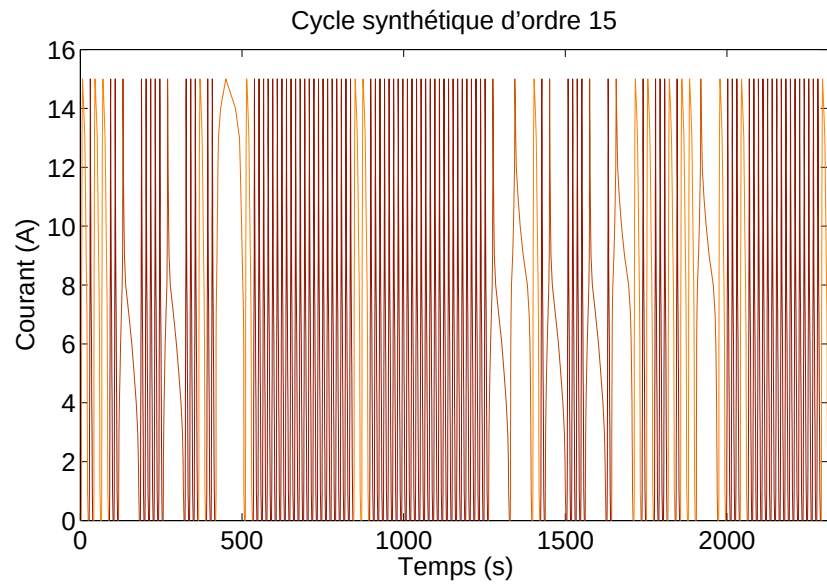
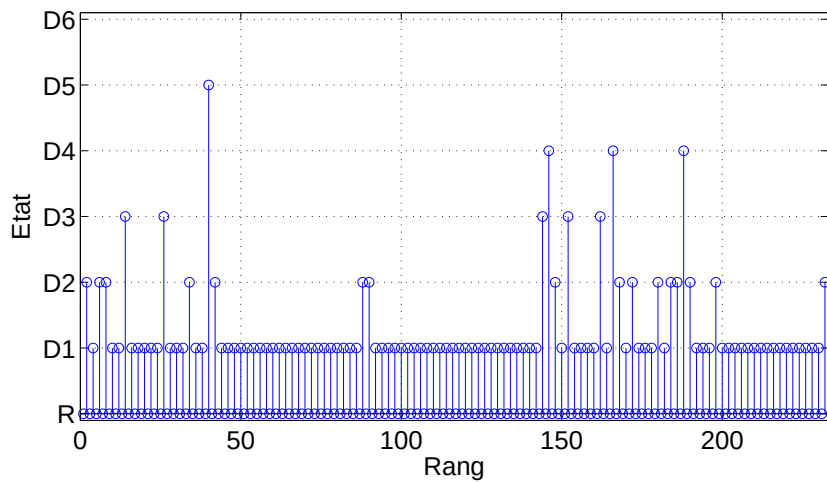


FIGURE 4.10 – Histogramme des profondeurs de décharges constatées (estimation). En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.

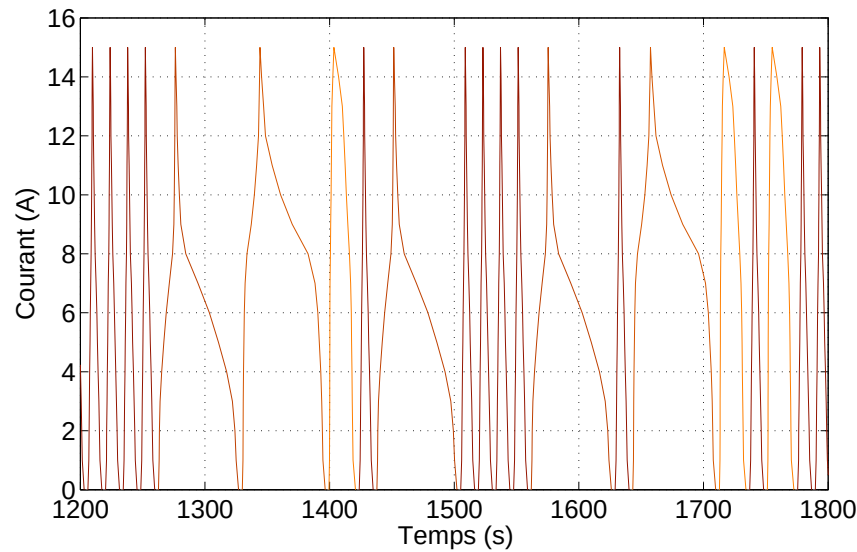
figure 4.11. L'application du critère BIC n'a pas permis de déterminer l'ordre optimal de la chaîne de Markov à retenir. L'ordre maximal testable s'élevant à 15, c'est la chaîne de Markov d'ordre 15 qui a été retenue pour procéder à la génération de cycles représentatifs pour ce véhicule. L'objectif de reconstruction retenu pour cet exemple correspond à la réalisation d'une décharge couvrant 42% de la capacité initiale de la batterie équipant ce véhicule. Cette valeur correspond à la DOD médiane constatée pendant l'expérimentation (cf. figure 4.10). La figure 4.11a donne l'allure générale de ce cycle, la figure 4.11b renseigne sur la séquence d'états générée par la chaîne de Markov à l'ordre 15 pour réaliser l'objectif (42%DOD). Enfin, la figure 4.11c, permet de visualiser l'allure du courant du cycle représentatif sur une portion de 5 minutes. Par souci de lisibilité, les repos entre impulsions classées présentent une durée constante arbitraire de 3 secondes sous un courant de 0A.



(a) Profil synthétique de courant simulant 42%DOD



(b) Séquence synthétique obtenue d'après la chaine de Markov d'ordre 15



(c) Zoom sur 5 minutes de ce cycle

FIGURE 4.11 – Cycle représentatif

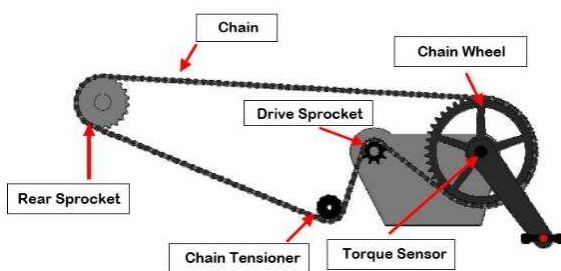
4.1.2 Assistance proportionnelle - système Panasonic

Le second VAE étudié est un produit allemand, conçu par Kalkhoff, et se nomme Agattu C8. Intéressons-nous à ses caractéristiques techniques.

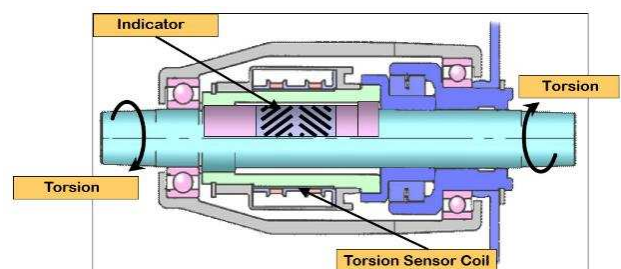


FIGURE 4.12 – Vélo à assistance électrique Kalkhoff Agattu C8

4.1.2.1 Description du véhicule



(a) Schéma de la transmission



(b) Principe du capteur de couple

FIGURE 4.13 – Principe de l'assistance proportionnelle

Les caractéristiques techniques de ce véhicule sont rappelées par le tableau 4.6. Ce VAE est équipé d'un moteur brushless de 250W, fabriqué par Panasonic, et qui vient s'intégrer au bloc pédalier. Il s'agit du Panasonic Drive Unit, système qui équipe une part importante de la production multi-marque mondiale. En 2012, l'entreprise Bosch a commercialisé un système concurrent. Le pignon moteur est localisé tout près du pédalier et entraîne la chaîne en rotation de concert avec la cou-

Fabricant	Kalkhoff
Modèle (millésime)	Agattu C8 (2011)
Poids	23.0 kg
Mode d'assistance	Proportionnelle au couple (3 niveaux [0.5 ; 1 ; 1.3])
Transmission	Dérailleur interne au moyeu Shimano Nexus 8 vitesses, rapport variant sur 307%
Machine électrique	Moteur pédalier, Panasonic, Brushless, 250W
Batterie	312Wh, $26V_{nom}$, 12Ah, arrangement 7S6P, Sanyo 18650 2Ah, ref : NKY304B2, chimie NCM ($LiNi_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}O_2$), poids=2.685 kg, 116Wh/kg au niveau pack
Vitesse maximale	27km/h
Autonomie constructeur	90km (3.5Wh/km)

TABLE 4.6 – Fiche technique du VAE Kalkhoff

ronne du pédalier. Le schéma du système est proposé en figure 4.13a. La roue arrière est donc mûe conjointement par le cycliste et le moteur au travers d'un dérailleur arrière à 8 vitesses. Grâce à cette architecture, le moteur peut bénéficier de la boîte de vitesse et son point de fonctionnement varie donc peu avec le relief et la vitesse d'évolution du vélo (qui est ici fonction du rapport de dérailleur engagé). L'inconvénient de cette architecture tient au fait que la vitesse maximale n'est atteignable que sur le 8ème rapport du dérailleur et la cadence de pédalage pour maintenir cette vitesse est donc imposée par le système plutôt que par l'utilisateur. L'assistance électrique de ce VAE se base sur un principe d'assistance proportionnelle au couple imprimé par le cycliste. Pour un niveau d'assistance donné (sur 3 niveaux possibles), le couple imprimé par le moteur est directement proportionnel à celui du cycliste dont la valeur est mesurée par le système électronique embarqué. Un capteur de couple par mesure de la torsion de l'axe du pédalier est utilisé ; il est dépeint sur la figure 4.13b. La valeur du couple moteur est donc contrôlée directement par le pédalage du cycliste avec trois facteurs d'assistance possibles : 50, 100 et 130%. Le niveau intermédiaire double la puissance de pédalage ($100W_{cycliste} + 100W_{moteur}$) et se trouve être le réglage le plus couramment utilisé. Lorsque la vitesse maximale réglementaire de 25 km/h est atteinte (27.4km/h en pratique), l'assistance module le couple moteur pour stabiliser l'allure. Si cette vitesse est dépassée ou que le cycliste cesse de pédaler, l'assistance se coupe automatiquement. Le cycliste est libre de choisir le niveau d'assistance qui lui convient et de sélectionner le rapport de transmission qui lui convient, ce qui influe sur la vitesse maximale d'évolution et se traduit par des profils d'usage assez différents et donc des sollicitations dépendantes du style de conduite. Ce VAE ne permet par contre pas d'évoluer à vitesse maximale en fournissant un effort minimal, ceci en raison de son principe d'assistance (proportionnelle).

4.1.2.2 Description de l'expérimentation

Ce véhicule a été confié à des employés de l'IFSTTAR ou du laboratoire Ampère afin d'être utilisé en priorité sur leurs trajets domicile-travail. Les autres types de trajets étaient également autorisés.

Responsable	Arnaud Devie
Période	Avril 2011 - Avril 2012
Lieu(x)	Agglomération Lyonnaise (intra-urbain)
Personnes impliquées	14 employés d'Ampère ou de l'IFSTTAR
Type de trajets	Domicile-travail matin et soir, autres trajets libres
Nombre de trajets	300
Kilomètres enregistrés	2204km
Kilomètres validés	1710km
Enregistreur de données	EagleTree Systems V4, consommation $\approx 200mA$
Fréquence d'échantillonnage	10Hz
Données enregistrées	Tension batterie Courant batterie Température cosse batterie Vitesse roue

TABLE 4.7 – Conditions expérimentales pour VAE Kalkhoff

La période de prêt variait entre 1 et 3 semaines en fonction du souhait émis par l'utilisateur. Ce vélo est resté en circulation toute une année à l'exception du mois de novembre 2011 où il a été assez peu utilisé en raison d'une intervention sur la chaîne. L'ensemble des détails de l'expérimentation est synthétisé par le tableau 4.7. L'écart entre les kilomètres validés et le total enregistré relève du contrôle de la qualité des données. Lorsqu'un relevé sature la mémoire de l'enregistreur de bord, l'étiquetage de ce relevé est partiellement dégradé car le kilométrage associé est alors imprécis (correspondance avec le compteur vélo incertaine). Afin de retranscrire fidèlement les statistiques kilométriques, j'ai choisi d'écarter ces données mal étiquetées. Leur contenu est en revanche parfaitement valable. Ces relevés écartés sont distribués assez régulièrement dans l'année et parmi les utilisateurs, ce qui permet de ne pas engendrer de biais.

4.1.2.3 Sollicitations typiques

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
Occurences par 100km	689	82	39	6.3	8.7	5.0	829
Consommation par 100km (Wh)	227	106	71.1	24.3	34.6	22.8	486

TABLE 4.8 – Données kilométriques globales

La figure 4.14 offre un aperçu de l'allure du courant batterie sur ce véhicule. Ce véhicule présente la caractéristique d'imprimer un couple moteur qui varie proportionnellement à celui du cycliste,

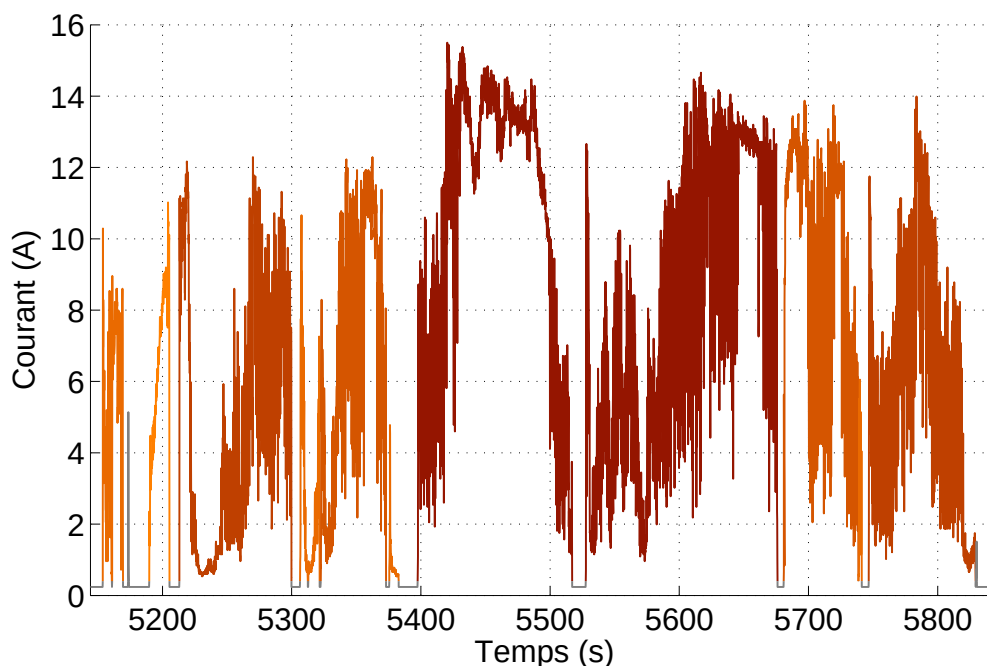


FIGURE 4.14 – Allure du profil de courant

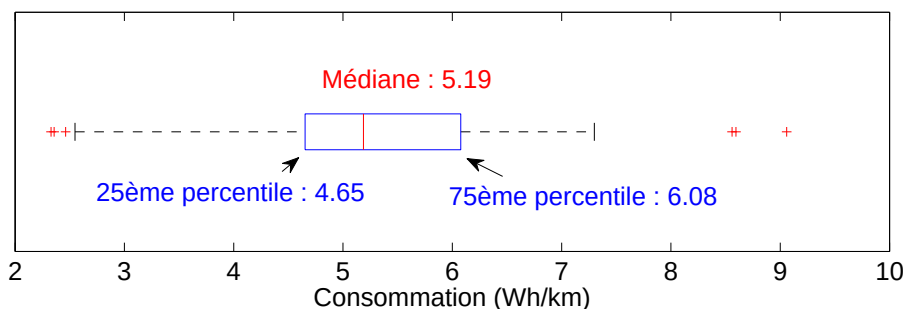


FIGURE 4.15 – Consommations relevées

quasiment en temps réel. Ce qui pourrait passer pour du bruit HF sur ce tracé n'est en fait que la composante alternative du couple moteur. En effet, il faut savoir qu'un cycliste ne développe pas un couple constant sur une révolution de pédalier. Lorsque les manivelles sont à l'horizontale, le couple est maximum, alors que lorsqu'elles sont à la verticale, le couple passe par un minimum. Cette alternance se produit deux fois par tour de pédalier. Comme un cycliste imprime une cadence de pédalage proche de 60 tours par minute à allure tranquille, on vérifie que cette composante alternative est associée à une fréquence fondamentale de 2Hz environ. On retrouve cette composante sur la figure 3.6a. La méthode adoptée ici a l'inconvénient de lisser cette composante. Son influence reste indéterminée à ce jour.

La distribution des consommations kilométriques relevées lors des roulages est donnée par la figure 4.15. La valeur médiane s'établit à 5.19Wh/km ce qui se traduit par une autonomie nominale voisine de 60km. Selon le style de conduite, la consommation varie du simple au triple entre 2.5 et 7.5Wh/km pour les extrêmes. Ce résultat a pour origine la performance de faible consommation réalisée par un des participants. Ce cycliste aguerri avait tendance à fournir un effort musculaire suf-

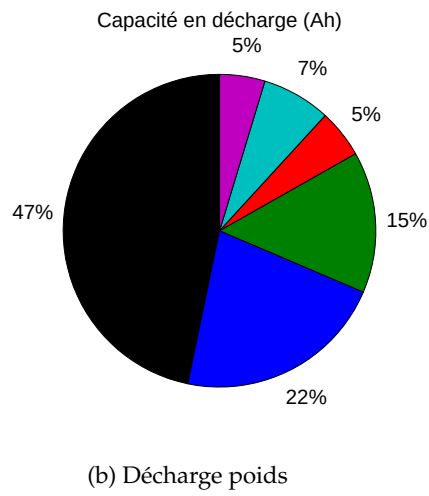
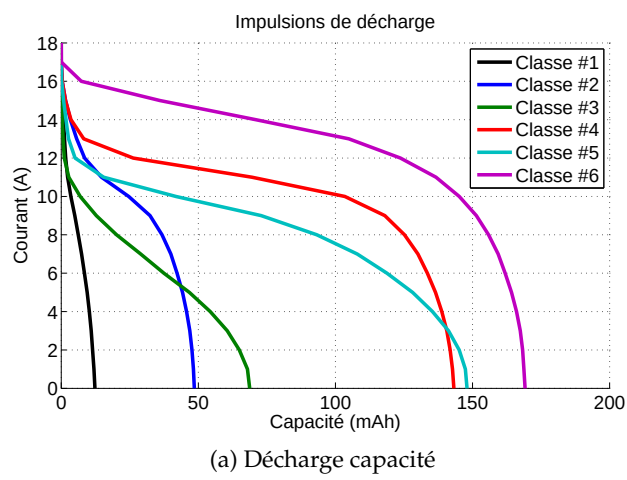


FIGURE 4.16 – Impulsions typiques globales à l’issue de la classification

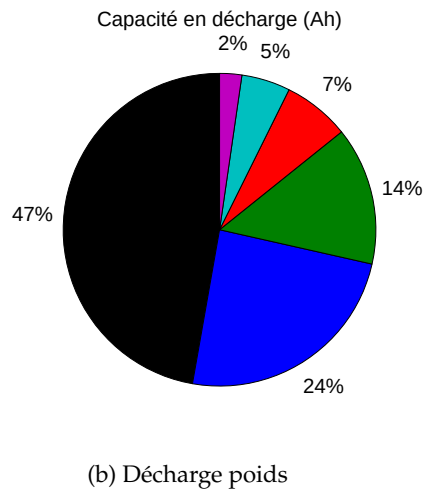
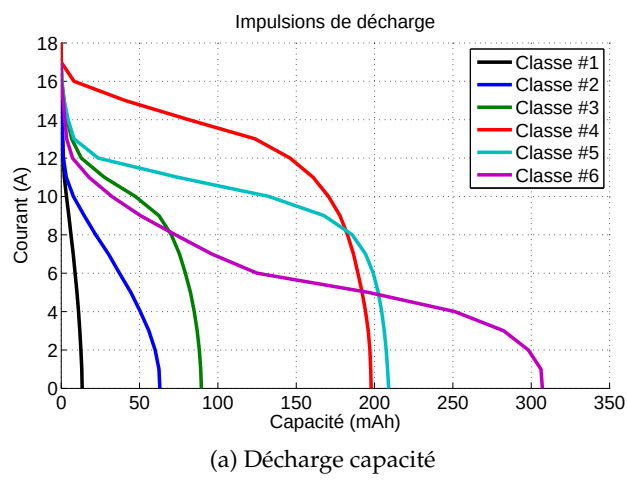


FIGURE 4.17 – Impulsions typiques sur parcours vallonnés

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
Occurences par 100km	786	86	36	7.8	5.4	1.7	922
Consommation par 100km (Wh)	285	146	86.1	41.7	30.4	13.9	603

TABLE 4.9 – Données kilométriques sur parcours vallonnés

fisant pour propulser et maintenir le vélo au-dessus de la vitesse limite d'assistance électrique. Le reste de l'échantillon est en revanche beaucoup plus homogène en raison du principe de fonctionnement de cette assistance électrique. Sur la base des mesures effectuées, on peut noter que l'assistance offre jusqu'à 400W (28V-15A) de puissance électrique sur des périodes prolongées. La répartition entre phases de traction et phases de repos (ce qui ne veut pas dire que le vélo est à l'arrêt) est de 58% contre 42%.

Le résultat de la classification des impulsions de courant mesurées sur ce véhicule est présenté par la figure 4.16 et le tableau 4.8. L'échantillon de départ comportait 20946 impulsions et un partitionnement en 6 classes a été retenu. A l'aide de figure 4.16b, on observe que les impulsions les plus courtes et les moins énergétiques représentent 47% de la capacité déchargée. La classe n°2 représente 22% de la charge consommée par le véhicule. La classe n°3 présente le courant efficace le plus faible pour 15% de la charge consommée. Les classes 4 et 5 regroupent des impulsions plus énergétiques sous un plus grand courant efficace et 12% de la charge a été consommée par ces dernières. Enfin, la classe n°6 ne compte que pour 5% de la charge totale consommée mais présente le plus fort courant efficace. Une impulsion de la classe n°6 dure environ 2 minutes sous le courant maximum du système, ce qui est susceptible de provoquer un auto-échauffement sensible de la batterie. Il est donc important de les considérer. Cette classe provient probablement d'un fonctionnement sous l'assistance maximale (130% de l'effort du cycliste), qui est utilisée assez rarement et principalement dans les conditions difficiles (côte, vent de face).

Le cas des parcours vallonnés a pu être étudié plus en détails. Pour cela un échantillon de 539km a été constitué à partir des trajets labellisés comme comportant une ou plusieurs côte(s) significative(s). Ce vélo a notamment été utilisé sur des trajets à destination des communes de l'ouest lyonnais, qui se trouvent sur les collines surplombant la ville (un peu moins d'une centaine de mètres de dénivelée). Les VAE permettent de gravir ces côtes à une vitesse supérieure à 15km/h sans grande peine alors que l'usage d'un vélo conventionnel est mal aisé pour le quidam. Les impulsions typiques rencontrées sur cet échantillon sont présentées sur la figure 4.17. Les données kilométriques associées sont fournies dans le tableau 4.9. La consommation moyenne augmente fortement (+24%) pour s'établir à 6.03Wh/km. La classe n°1 représente toujours la même proportion relative de la charge consommée mais le contenu énergétique de chaque impulsion est en légère hausse. Les classes 2 et 3 se retrouvent interverties par rapport à l'échantillon global. La classe n°2 présente les mêmes caractéristiques que la classe n°3 précédente mais sa contribution relative passe de 15 à 24% (ou encore, 71 à 146Wh/100km). Cette classe regroupe les impulsions présentant les courants efficaces les plus faibles. L'évolution du VAE dans les descentes où le besoin d'assistance est moindre peut éventuellement expliquer ce renforcement. La classe n°3 présente une allure proche de l'ancienne classe n°2 mais les impulsions qui la composent durent plus longtemps. Sa contribution relative est en baisse (14 contre 22%) mais sa contribution absolue n'est pas si éloignée (86 contre 106Wh/100km). Les classes 4 et 5 de l'échantillon global se retrouvent combinées dans la seule classe n°5 dont les impulsions durent légèrement plus longtemps mais dont la contribution à la consommation est en baisse sensible (5% contre 12, 30Wh/100km contre 59). La classe n°4 reprend les caractéristiques de la classe n°6 de l'échantillon global. Ses impulsions sont plus énergétiques et sa contribution augmente fortement (7% contre 5, 42Wh/100km contre 23). C'est la classe qui présente le courant efficace maximum et il est logique que sa contribution augmente sur des parcours vallonnés. Enfin la classe n°6 est inédite, mais sa contribution reste mineure (2%). Il est surprenant de constater que l'intégralité de l'augmentation de la consommation est attribuable aux classes 1 à 3 plutôt qu'aux classes 4 à 6. Signalons qu'une longue montée est susceptible de faire augmenter la température de la batterie par deux mécanismes : l'augmentation de l'effet joule et la réduction du flux convectif de l'air autour de la batterie en raison de la plus faible vitesse d'évolution. Les hausses rapides de la température mesurée lors des montées sont d'ailleurs facilement visualisables sur les relevés. On constate parfois 3 à 5°C d'échauffement, ce qui peut devenir significatif lorsque la température est déjà haute.

4.1.2.4 Cycles représentatifs

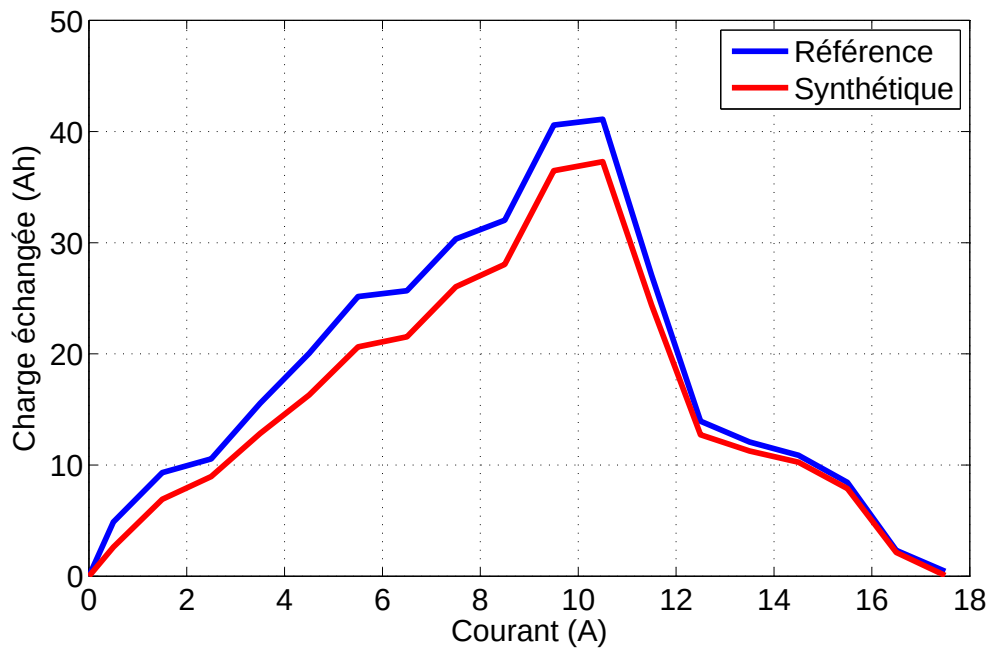


FIGURE 4.18 – Vérification du respect de la distribution du courant

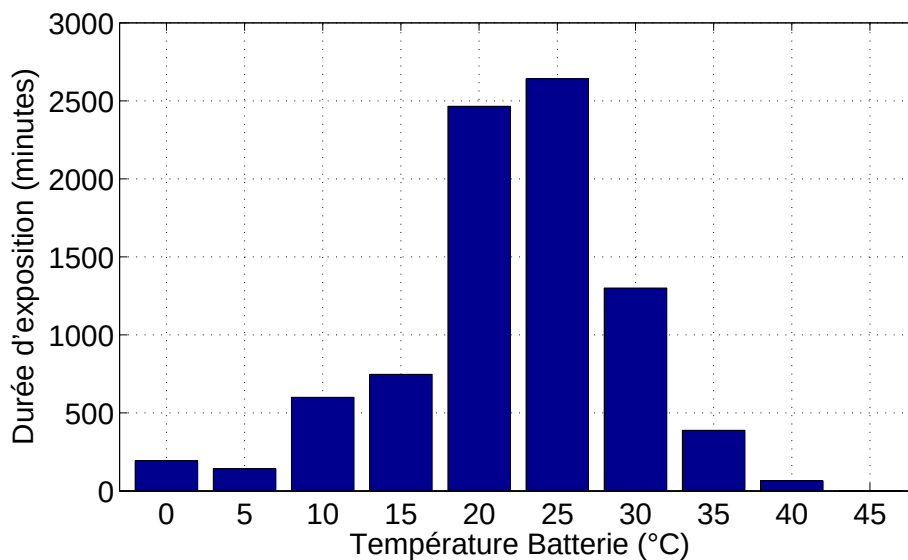


FIGURE 4.19 – Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie

On vérifie à nouveau que la perte d'information entre l'échantillon de départ et cette réduction à 6 classes est satisfaisante. La figure 4.18 témoigne d'un respect satisfaisant de la distribution du courant. L'écart est faible entre 11 et 18A, et légèrement plus marqué en dessous de 11A. Cet écart provient de l'éviction d'un certain nombre d'impulsions jugées trop courtes ou trop peu énergétiques lors de la préparation des données. Il est possible de combler cet écart en surpondérant une classe

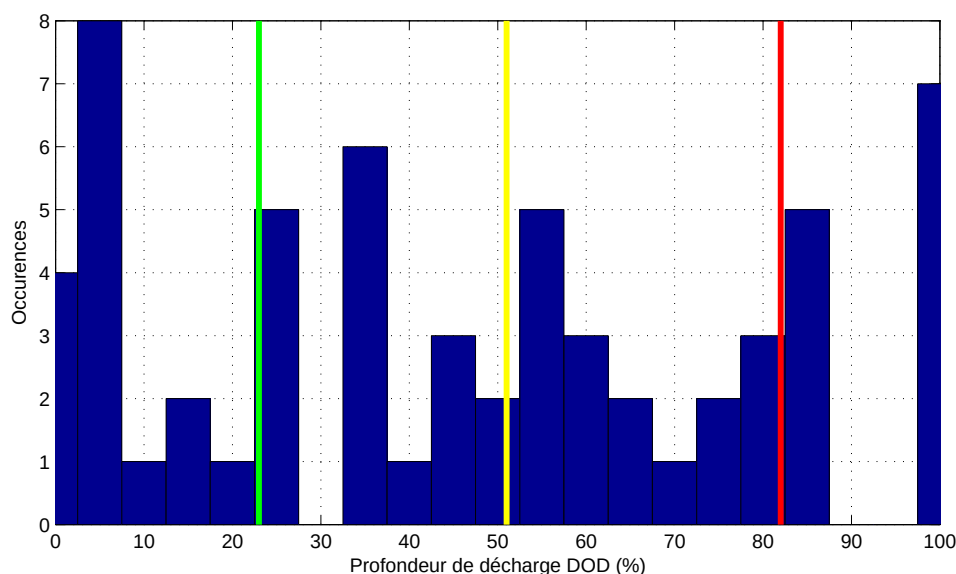


FIGURE 4.20 – Histogramme des profondeurs de décharges constatées (estimation). En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.

d'impulsion qui couvre le zone incriminée, comme la classe n°3 dans ce cas. Au final, la perte d'information est suffisamment contenue et le résultat jugé acceptable.

Avec le courant, les deux autres paramètres expérimentaux de première importance au regard de la dégradation des batteries sont la température et la DOD. Les histogrammes de ces deux grandeurs physiques sont reportés en figures 4.19 et 4.20. La température est obtenue par mesure directe réalisée au niveau d'une des cosses de la batterie, pour profiter de la conduction thermique du collecteur de courant. La température mesurée varie entre 0 et 40°C. Il faut noter que les valeurs négatives de température ont été seuillées à 0°C par l'enregistreur. Au coeur de l'hiver, la batterie a probablement atteint les -5°C pendant de courts instants. A l'opposé, la batterie n'a passé qu'une heure aux environs de 40°C. On peut vérifier que la répartition des températures classe par classe suit la répartition globale, ce qui n'est pas surprenant étant donné la simplicité du véhicule (pas d'auxiliaires, pas de conditionnement batterie) et la constante de temps relativement grande de la variation de température. L'obtention de l'histogramme de DOD est elle plus aléatoire puisqu'il est basé sur une estimation des phases de recharge à partir de l'allure du profil de tension et de la courbe $SOC=f(OCV)$. Les valeurs des quartiles sont reportées sur la figure 4.20. On observe une répartition assez aléatoire de la DOD. La DOD constatée varie en fonction de la longueur unitaire des trajets domicile-travail de chaque utilisateur et de ses habitudes de recharge (fréquentes ou espacées). Une DOD de 23% correspond à une distance de 14km en moyenne, 51%DOD à 31km et 82%DOD à 49km. Ce sont effectivement des distances quotidiennes usuelles pour les utilisateurs ayant participé à cette expérimentation. Ce VAE était confié en priorité aux personnes ayant les plus longues distance domicile-travail à couvrir. De plus, comme son autonomie est assez large, elle n'incite pas à recharger après chaque trajet.

Pour conclure l'étude de ce véhicule, un cycle représentatif a été généré. Il est proposé sur la figure 4.21. L'application du critère BIC n'a pas permis de déterminer l'ordre optimal de la chaîne de Markov à retenir. L'ordre maximal testable s'élevant à 15, c'est la chaîne de Markov d'ordre 15 qui a été retenue pour procéder à la génération de cycles représentatifs pour ce véhicule. L'objectif de reconstruction retenu pour cet exemple correspond à la réalisation d'une décharge couvrant 51% de la capacité initiale de la batterie équipant ce véhicule. Cette valeur correspond à la DOD médiane

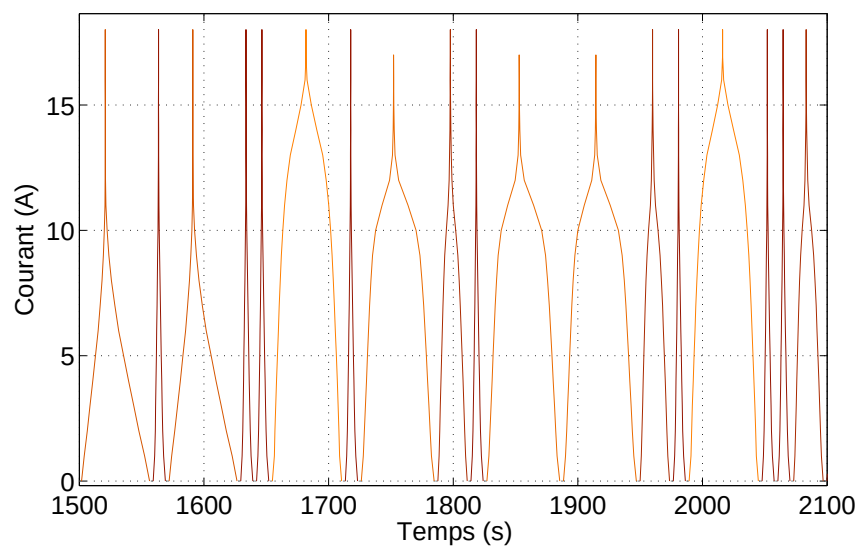
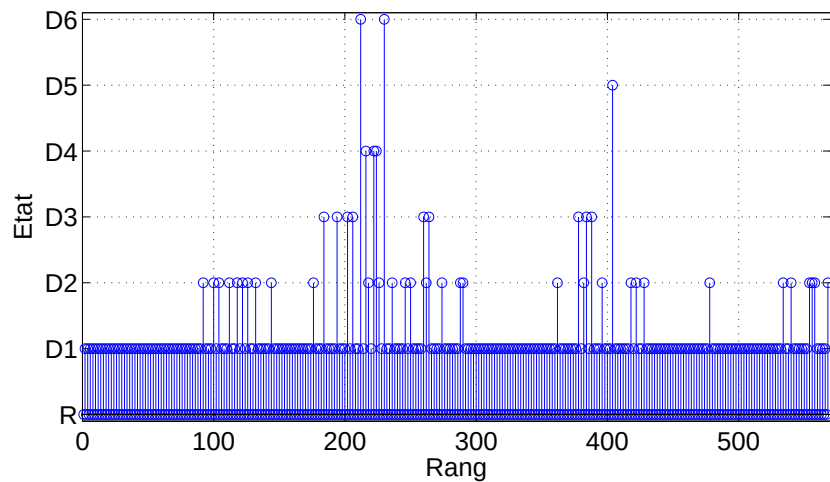
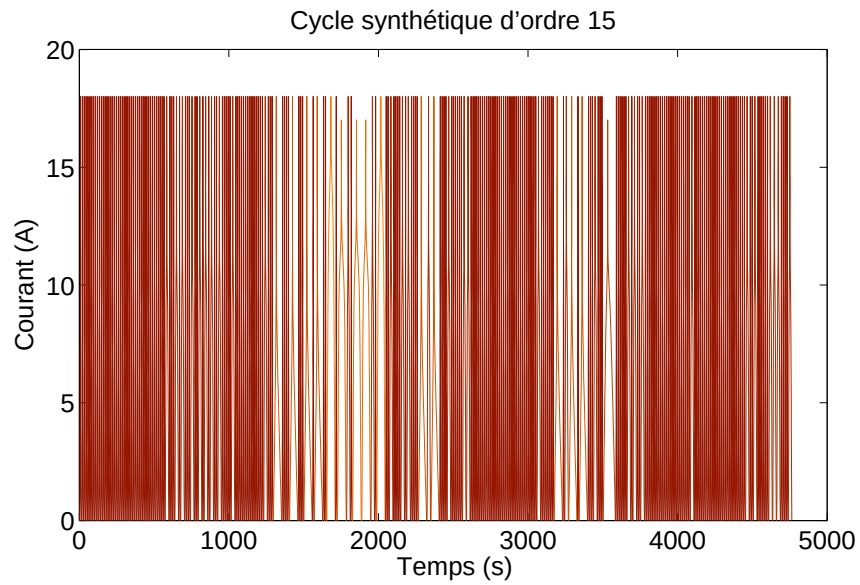


FIGURE 4.21 – Cycle représentatif

constatée pendant l'expérimentation (cf. figure 4.20). La figure 4.21a donne l'allure générale de ce cycle, la figure 4.21b renseigne sur la séquence d'états générée par la chaîne de Markov à l'ordre 15 pour réaliser l'objectif (51%DOD). Enfin, la figure 4.21c, permet de visualiser l'allure du courant du cycle représentatif sur une portion de 5 minutes. Par souci de lisibilité, les repos entre impulsions classées présentent une durée constante arbitraire de 3 secondes sous un courant de 0A.

4.1.3 Conclusions

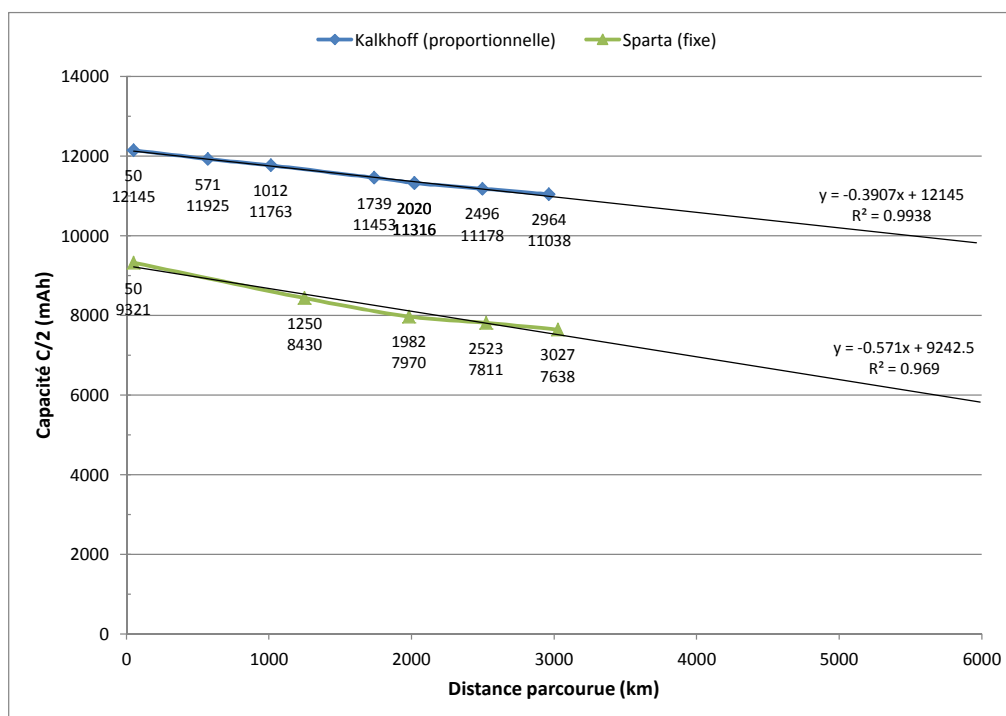


FIGURE 4.22 – Evolutions des capacités des batteries pendant 16 mois

Les deux VAE étudiés présentaient l'intérêt d'être représentatifs du marché européen mais aussi de différer de par leurs architectures électro-mécaniques. Il est donc intéressant de mener une brève comparaison. La première observation que l'on peut faire consiste à souligner que le modèle à assistance proportionnelle affiche une consommation significativement plus faible que le modèle à assistance fixe. Des différences dans les trajets réalisés ou dans les vitesses moyennes ne peuvent pas être mises en cause car les conditions expérimentales sont très proches les unes des autres et que la vitesse d'évolution de ces vélos est régulière (et bridée). La séparation est conséquente puisque, au niveau de la consommation par kilomètre, le premier quartile du VAE à assistance fixe correspond au troisième quartile du VAE à assistance proportionnelle. La différence de consommation est d'environ 1.7 à 2.0Wh/km selon que l'on considère la valeur moyenne ou la valeur médiane. Cet écart de 35% se traduit par une baisse importante de l'autonomie dans le cas du VAE à assistance fixe (35km contre 60). Sur la figure 4.22 nous constatons que cette surconsommation est peut-être à l'origine d'une accélération de la dégradation de la batterie par rapport au modèle le plus performant (la qualité des cellules utilisées joue également un rôle). Le fabricant de cette batterie (Phylion) annonce une durée de vie de 500 cycles jusqu'à 60% de la capacité d'origine. D'après les mesures réalisées, la batterie a déjà perdu 18% de sa capacité initiale après environ 100 cycles (équivalents, 3000km), soit 125% d'erreur par rapport à la donnée constructeur. Si l'on descend au niveau des impulsions les différences sont là aussi marquées puisque le VAE à assistance fixe semble provoquer des sollicitations de plus

longues durées. En effet sur ce vélo, des impulsions fréquentes comme celles des classes 3 et 4 (figure 4.5) dépassent les 100mAh par impulsion alors que la plupart des impulsions fréquentes du VAE à assistance proportionnelle ne dépassent pas les 75mAh par impulsion (figure 4.16). De même, les impulsions les plus longues consomment autour de 800mAh contre 200 à 300mAh seulement pour le VAE à assistance proportionnelle.

4.2 Véhicules électriques

4.2.1 Quadricycle urbain - Aixam Megacity



FIGURE 4.23 – Quadricycle électrique Aixam Megacity

L'étude des sollicitations typiques de ce véhicule a fait l'objet d'une publication dans la revue internationale à comité de lecture "Transportation Research Part C : Emerging Technologies" distribué par Elsevier. L'article en langue anglaise est disponible en ligne [Devie 2012b].

Aixam est un fabricant de quadricycles légers ("voitures sans permis") qui proposent généralement des motorisations diesel bicylindre de 400cm^3 développant 5.4 chevaux en accord avec la réglementation européenne (45km/h maximum). Le modèle Megacity E est une conversion à l'électrique du modèle de base "City". Intéressons-nous à ses caractéristiques techniques.

4.2.1.1 Description du véhicule

Ce véhicule appartient à la catégorie des quadricycles lourds, catégorie L7e, et qui répond aux exigences de la directive cadre 2002/24/EC. Outre-atlantique, on parle de LSV (low speed vehicle) ou NEV (neighbourhood electric vehicle). Cette catégorie désigne les véhicules dont la masse à vide ne dépasse pas les 400kg et dont la puissance moteur est inférieure à 15kW. La catégorie des quadricycles légers exige elle un plafond à 4kW. Ce véhicule appartient donc à la même catégorie que le récent quadricycle Renault Twizy. Les caractéristiques techniques de ce véhicule sont détaillées dans le tableau 4.10. La masse totale de 750kg correspond à la somme du châssis roulant et des batteries, dont la masse est exclue lors de la procédure d'homologation. Ce véhicule est équipé de composant de technologie assez ancienne et éprouvée (moteur à courant continu, batterie plomb). Il est nécessaire de préciser que les résultats obtenus devront être manipulés avec précaution pour l'étude du

Fabricant	Aixam
Modèle (millésime)	Megacity (2008)
Poids	750 kg
Motorisation	Electrique
Transmission	Prise directe
Machine électrique	Moteur courant continu à excitation séparée, 4kW permanent (12kW crête), refroidi par air
Batterie	10kWh, 48V _{nom} , 210Ah, arrangement 4S3P, Exide Champion 12V-70Ah, chimie Plomb AGM, poids=350 kg, 29Wh/kg au niveau pack
Vitesse maximale	65km/h
Autonomie constructeur	80km (125Wh/km)

TABLE 4.10 – Fiche technique du quadricycle Aixam Megacity

vieillessement des batteries Lithium-ion car la masse de ce véhicule est largement supérieure à celle d'une déclinaison à base de batteries plus modernes (Twizy pèse 450kg dont 100kg de batteries). Par ailleurs, il faut rappeler que les batteries Plomb sont très sensibles à l'effet Peukert, ce qui implique que la capacité restituable lors d'une décharge complète en 1 ou 2 heures est significativement inférieure à la capacité nominale de la batterie (mesurée à C/24).

Ce véhicule est dépourvu de boîte de vitesse ou d'embrayage, de façon classique avec une traction électrique. Le freinage récupératif est géré par le calculateur de bord qui applique un couple de freinage préprogrammé lorsque le conducteur relache la pédale d'accélérateur. La pédale de frein n'active elle que le freinage mécanique. Le couple de freinage récupératif suit une loi fonction de la vitesse de rotation du moteur. Il a été mesuré à 17Nm au dessus de 1000tr/min et chute à 5Nm à bas régime. Ce véhicule intègre les auxiliaires usuels d'une voiture et leurs caractéristiques de consommation ont fait l'objet d'une attention particulière. Les feux de croisement consomment 150W, ceux de route 170W, ceux de position 35W et les anti-brouillard 120W. Le système de ventilation forcée consomme entre 50 et 100W suivant le réglage choisi et le ventilateur du moteur consomme 40W. Enfin le chauffage consomme 750W et le désembuage 1750W. L'usage de ces auxiliaires est de nature à faire croître la consommation du véhicule et donc à faire chuter son autonomie.

4.2.1.2 Description de l'expérimentation

Ce véhicule a été confié à des volontaires, salariés de l'IFSTTAR, au cours de l'année 2010. Ces usagers utilisaient le véhicule du lundi au vendredi pour les trajets domicile-travail en priorité. La recharge s'effectuait généralement en cours de journée, sur le parking de l'IFSTTAR. Ce véhicule ne pouvait pas être utilisé pour emprunter les voies rapides de l'agglomération. Une panne a immobilisé le véhicule entre juin et août. Bien que les expérimentations n'aient pas couvert une année complète, une grande variété de conditions environnementales ont été rencontrées, avec des températures élevées début juin et fin août et une météo hivernale (gelées, vent, pluie) dans la seconde moitié

Responsable	Jean-Pierre Roumégoux
Période	Avril 2010 - Novembre 2010
Lieu(x)	Agglomération Lyonnaise (intra-urbain)
Personnes impliquées	19 employés de l'IFSTTAR
Type de trajets	Domicile-travail matin et soir, autres trajets libres
Nombre de trajets	227
Kilomètres enregistrés	1778km
Kilomètres validés	1618km
Enregistreur de données	CardCorder par Cranfield Impact Centre Ltd.
Fréquence d'échantillonnage	10Hz
Données enregistrées	Tension batterie Courant batterie Température cosse batterie Vitesse roue

TABLE 4.11 – Conditions expérimentales pour Aixam Megacity

de novembre. On peut toutefois noter que les saisons estivales et hivernales sont sous-représentées dans l'échantillon. La panne et les délais administratifs rencontrés sont incriminés. Au final, les 19 conducteurs impliqués ont réalisé 227 trajets valides pour un total de 1618km. Les détails de l'expérimentation sont regroupés dans le tableau 4.11.

4.2.1.3 Sollicitations typiques

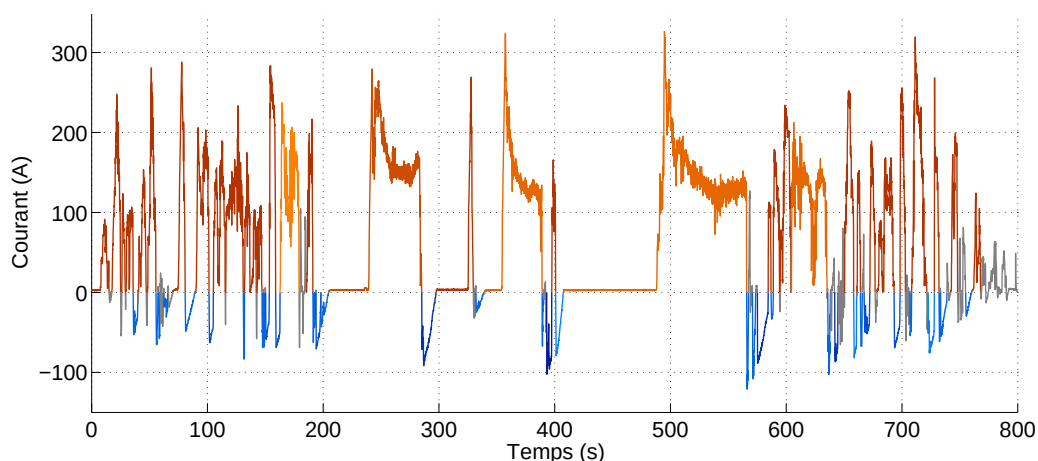


FIGURE 4.24 – Allure du profil de courant

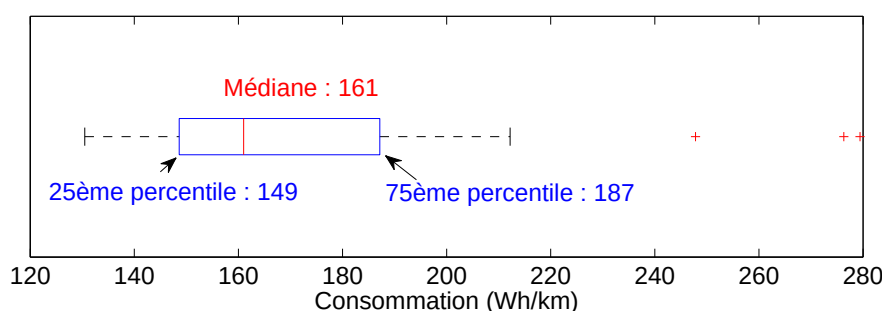


FIGURE 4.25 – Consommations relevées (à la prise)

La figure 4.24 fournit un aperçu de l'allure du courant pour ce véhicule. On y retrouve des impulsions de décharge (courant positif) mais aussi des impulsions de charge (courant négatif) liées au freinage récupératif décrit plus haut. Les consommations relevées à la prise sont représentées par la figure 4.25. Ces valeurs ont été obtenues au niveau d'un compteur individuel sur la borne de recharge du parking. Elles sont plus élevées que la consommation à bord du véhicule car le rendement du chargeur et le rendement électrique des batteries interviennent. Sur la base des mesures effectuées, on estime ce rendement de charge/décharge à 80% en moyenne. Si l'on intègre ce rendement, la consommation médiane s'établit à 129Wh/km, la consommation minimale à 104Wh/km et la consommation maximale à 224Wh/km. Cette amplitude très large dans les valeurs de consommation a pour origine les différences dans les styles de conduite, dans les conditions environnementales, dans l'état du trafic et dans l'usage des auxiliaires. Sur le papier, l'autonomie varie donc entre 44 et 96km mais ces valeurs ne sont que théoriques en raison de la diminution de la capacité restituable par ces batteries au Plomb dans le cadre d'une décharge en 1 à 2 heures (effet Peukert). En pratique nous avons constaté des autonomies s'étalant de 30 à 60km.

La figure 4.26 représente le résultat de la classification des impulsions de charge et de décharge rencontrées à bord de ce véhicule pour l'échantillon complet des 19 conducteurs et des 1618km. Un partitionnement en 5 classes a été retenu. Au total, ce sont 10714 impulsions de charge et 9526 impulsions de décharge qui ont été classifiées. Les critères de sélection des impulsions étaient les

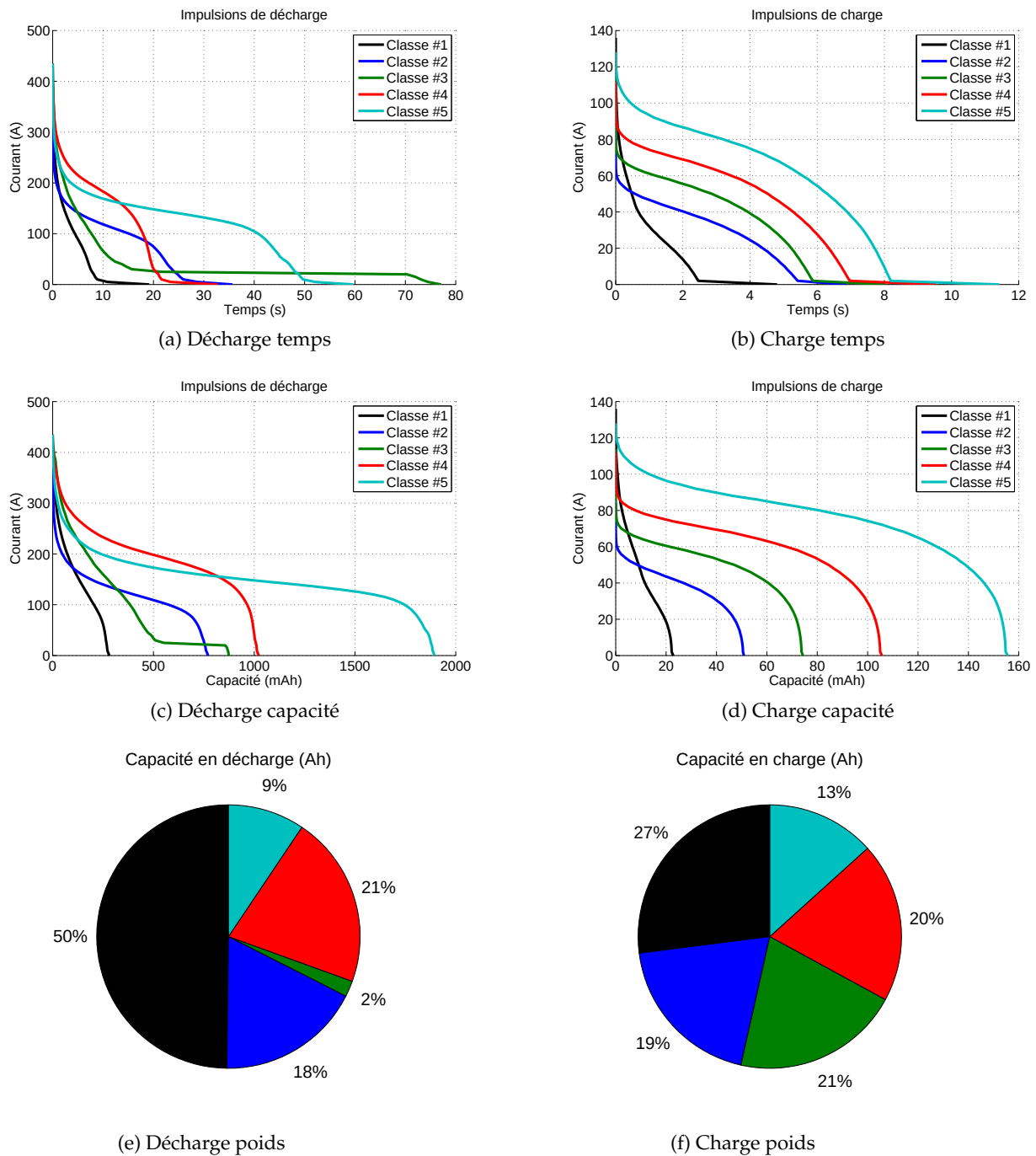


FIGURE 4.26 – Impulsions typiques globales à l'issue de la classification

suivants :

$$\text{Charge} : \Delta Q \geq 10mAh \ \& \ I_{max} \geq 20A \ \& \ \text{Durée} \geq 1s \quad (4.1)$$

$$\text{Décharge} : \Delta Q \geq 100mAh \ \& \ I_{max} \geq 50A \ \& \ \text{Durée} \geq 2s \quad (4.2)$$

En décharge, la classe n°1 représente une part très importante de la consommation (50%). La classe n°2 dont le courant efficace est moindre mais la durée des impulsions plus longue représente 18% de la charge consommée. Comme nous le confirmerons ci-dessous, la classe n°3 regroupe des

impulsions issues d'un fonctionnement hivernal avec la présence d'un plateau à faible courant qui est associé à la consommation des auxiliaires énergivores comme le chauffage et les phares. Enfin, les classes 4 et 5, qui représentent à elles deux 30% de la charge consommée, sont caractérisées par des courants efficaces bien plus importants et des contenus énergétiques par impulsion en forte hausse ($>1000\text{mAh}$ /impulsion en moyenne).

En charge, les classes sont davantage homogènes au niveau de leurs contributions respectives. La régularité des formes des impulsions des classes 2 à 5 découle de la gestion automatique préprogrammée du freinage récupératif. Le conducteur n'exerce pas d'influence directe sur ces phases. Les classes 2 à 5 présentent une distribution croissante du courant efficace et de la capacité par impulsion. Leur occurrence dépend uniquement de la vitesse à laquelle débute la décélération. Les classes 4 et 5, qui présentent les courants efficaces les plus grands, représentent un tiers de la charge récupérée. En termes de courant efficace, la classe n°1 vient s'intercaler entre les classes 2 et 3. Cette classe est notamment abondée par des impulsions de charge courtes qui apparaissent lorsque l'appui sur la pédale d'accélérateur interrompt le freinage récupératif (cf. $t=130\text{s}$ sur la figure 4.24). Globalement, les impulsions de charge durent 5 fois moins longtemps que leurs homologues en décharge et déplacent 10 fois moins d'énergie.

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	Total
En décharge						
Occurrences par 100km	457	59	5.8	53	13	588
Consommation par km (Wh)	64.8	23.0	2.5	27.4	12.2	130.0
En charge						
Occurrences par 100km	370	120	87	58	27	662
Recharge par km (Wh)	4.3	3.1	3.2	3.1	2.1	15.8

TABLE 4.12 – Données kilométriques de l'échantillon global

Le nombre d'occurrence et la consommation de chaque classe d'impulsion par unité de distance sont reportés par le tableau 4.12. Au rendement faradique près, la consommation moyenne (sur la base des seules impulsions retenues) s'élève à 114Wh/km . A chaque kilomètre parcouru, 130Wh sont déchargés de la batterie pour propulser le véhicule alors que 16Wh sont rechargés lors des phases de freinage récupératif.

Afin d'illustrer la sensibilité de la consommation aux conditions extérieures (conduite, climat, ...), 4 sous-échantillons ont été constitués à partir d'observations macroscopiques. En particulier, un style de conduite agressif a été comparé à une conduite économique et un essai par température estivale a été opposée à un essai hivernal caractérisé par l'utilisation des auxiliaires énergivores comme le chauffage et les phares. Nous cherchons ici à identifier des changements au niveau des impulsions de courant qui découleraient de ces modifications environnementales.

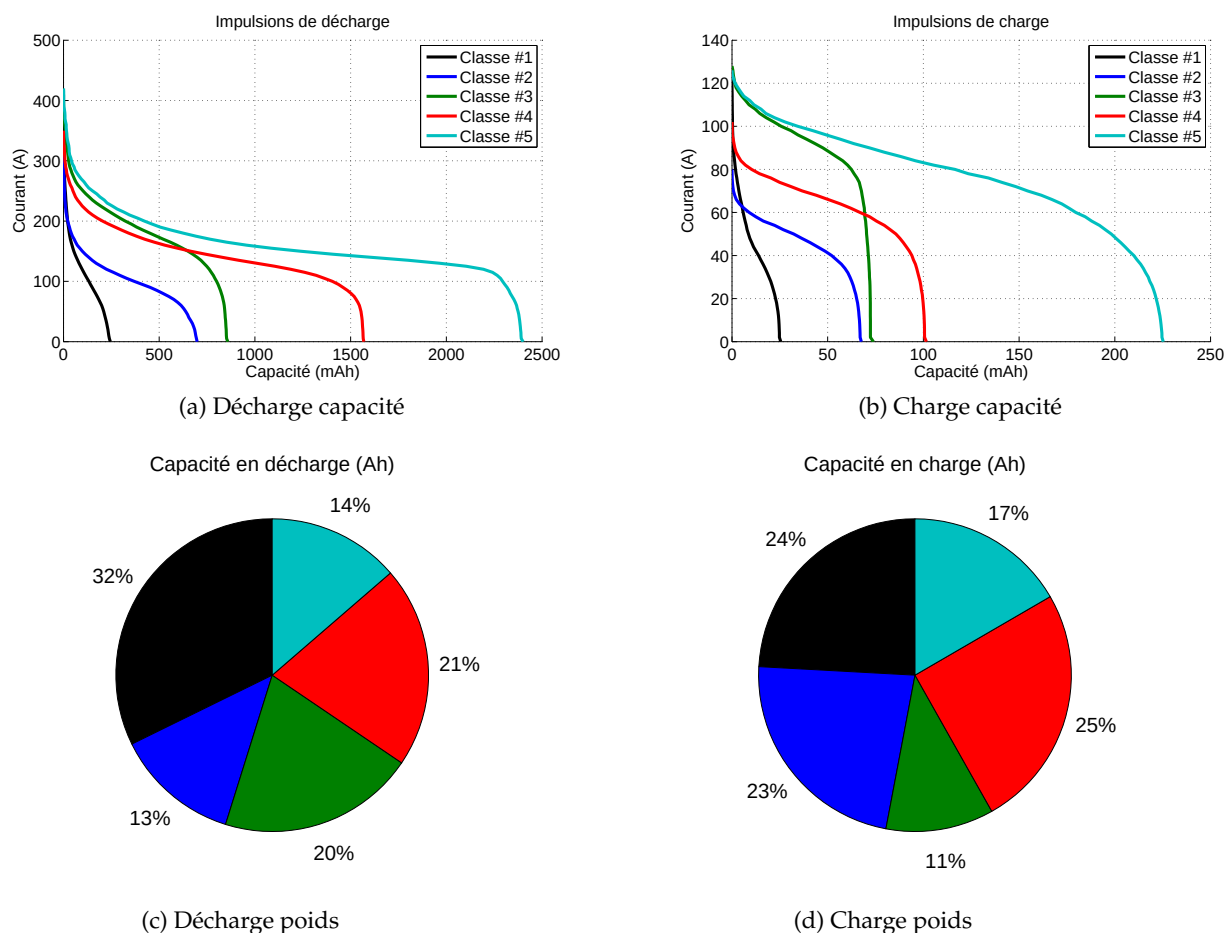


FIGURE 4.27 – Impulsions typiques de l'échantillon éco-conduite

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	Total
En décharge						
Occurences par 100km	271	39	51	28	12	411
Consommation par km (Wh)	34.4	13.7	21.7	22.2	14.5	106
En charge						
Occurences par 100km	285	102	45	75	22	529
Recharge par km (Wh)	3.6	3.4	1.7	3.8	2.5	15.1

TABLE 4.13 – Données kilométriques de l'échantillon éco-conduite

La figure 4.27 et le tableau 4.13 présentent les résultats obtenus avec une éco-conductrice. Une rapide comparaison avec l'échantillon global permet de remarquer que le gain de consommation (24Wh/km) a été obtenu par la diminution des événements de décharge, alors que les phases de recharges sont relativement inchangées. Dans les deux cas, le nombre d'impulsions par km a fortement diminué (-30% en décharge, -20% en charge). Les événements de décharge se caractérisent par un courant efficace en baisse et par une plus forte proportion des impulsions fortement énergétiques. En effet, la classe n°1, celle des impulsions les plus courtes et les plus fréquentes, voit sa proportion chuter de 50 à 32% tandis que le classe n°5 progresse de 9 à 14%. Enfin, la classe n°4 voit sa propor-

tion conservée mais le courant efficace de cette classe est en baisse sensible (il n’y quasiment plus de charge échangée au-dessus de 200A). En charge, les classes les plus énergétiques, 4 et 5, progresse de 33 à 42% de la charge échangée.

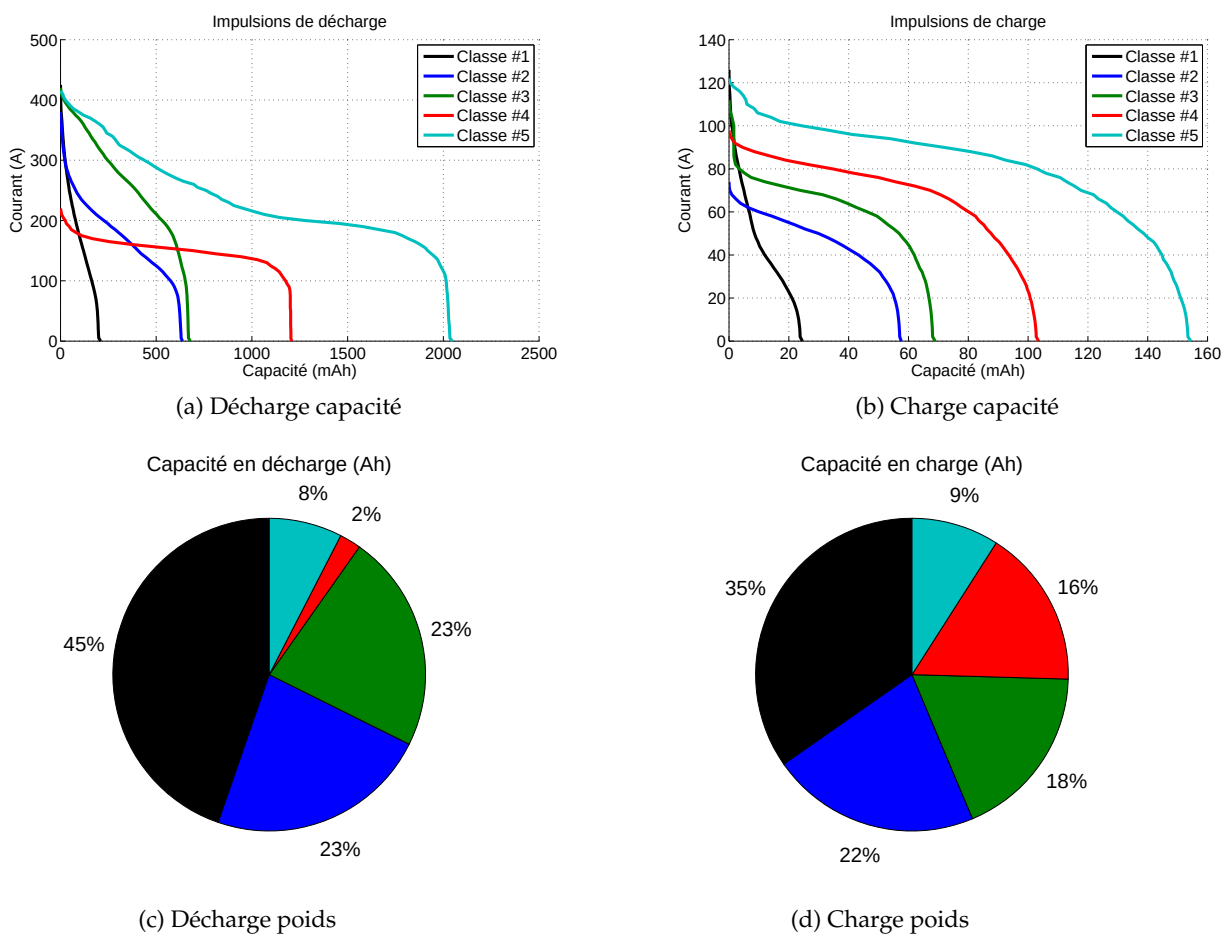


FIGURE 4.28 – Impulsions typiques de l’échantillon conduite aggressive

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	Total
En décharge						
Occurences par 100km	603	102	94	5.2	10	814
Consommation par km (Wh)	64.5	33.1	32.5	3.2	10.9	144
En charge						
Occurences par 100km	629	167	117	70	26	1009
Recharge par km (Wh)	7.9	4.9	4.1	3.7	2.1	22.7

TABLE 4.14 – Données kilométriques de l’échantillon conduite aggressive

La figure 4.28 et le tableau 4.14 décrivent eux la situation d’une conductrice plutôt aggressive. On remarque immédiatement sur la figure 4.28a l’émergence de classes à très fort courant efficace (n°3 et 5), dont une partie importante de la charge est échangée entre 300 et 400A. Ensemble, elles représentent 31% de la consommation totale et témoignent d’une utilisation du véhicule sous le niveau maximum d’accélération disponible.

Si l'on compare maintenant ces deux échantillons, il est intéressant de constater que la conductrice agressive récupère davantage d'énergie par kilomètre que son homologue éco-conductrice (22.7Wh/km contre 15.1). Ce résultat contre-intuitif découle probablement d'un profil de vitesse plus dynamique où de brèves décélérations prennent place à la suite de fortes accélérations (contribution en hausse de la classe n°1 en charge). La différence la plus marquante entre ces deux styles de conduite tient à la fréquence des impulsions par kilomètre parcouru qui double (1823 contre 940 impulsions par 100km). Au final, la consommation moyenne progresse de 33% entre une conduite économique et une conduite agressive. Sur un même trajet, cela se traduira à la fois par une DOD en hausse et des courants efficaces et instantanés en nette augmentation. Ces deux facteurs sont dommageables pour la durée de vie de la batterie.

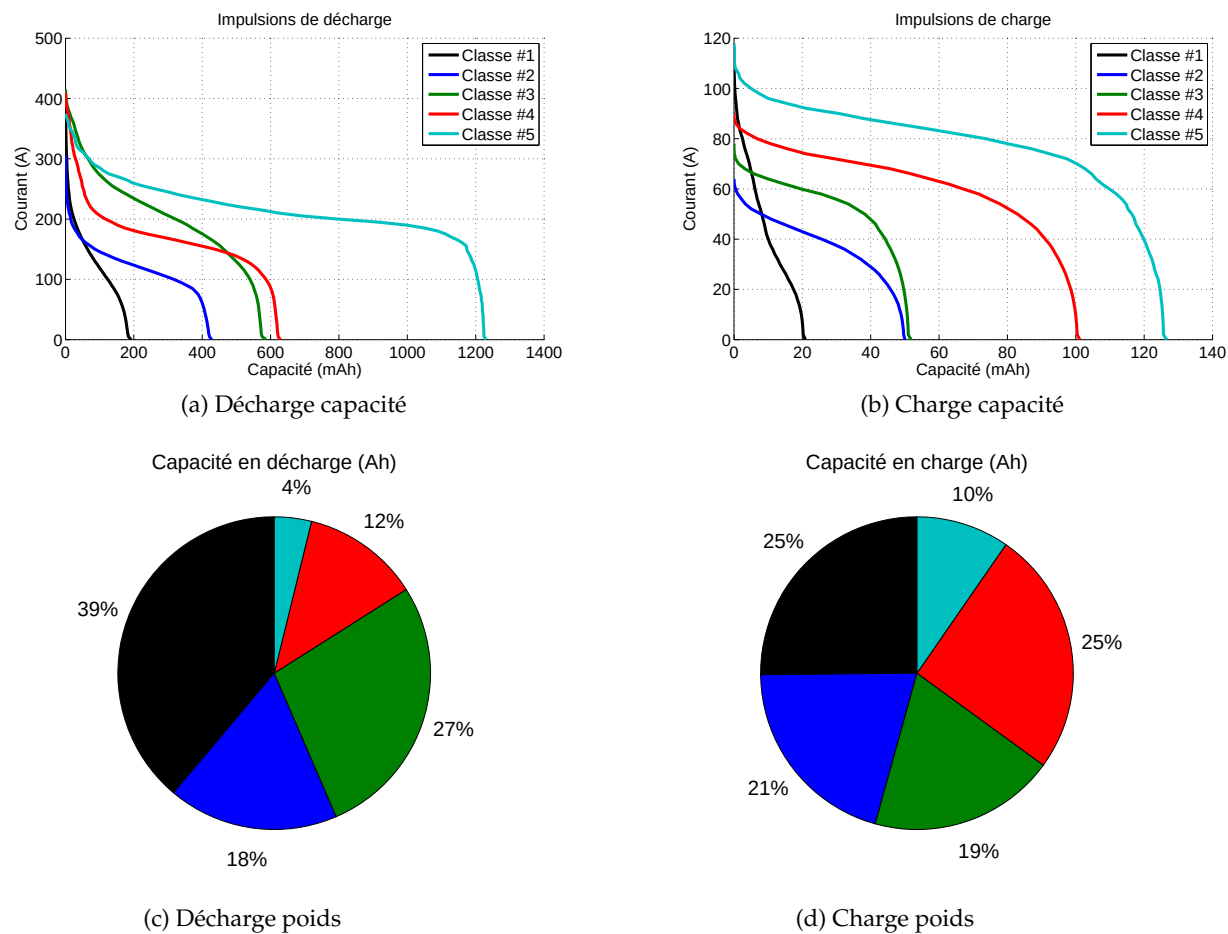


FIGURE 4.29 – Impulsions typiques de l'échantillon estival

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	Total
En décharge						
Occurences par 100km	434	88	101	42	6.7	671
Consommation par km (Wh)	42.2	19.2	29.9	13.2	4.2	109
En charge						
Occurences par 100km	425	145	131	88	27	816
Recharge par km (Wh)	4.5	3.7	3.4	4.5	1.7	17.9

TABLE 4.15 – Données kilométriques de l'échantillon estival

La figure 4.29 et le tableau 4.15 présentent les résultats obtenus par météo estivale. A l’opposé, la figure 4.30 et le tableau 4.16 décrivent les résultats obtenus avec un climat hivernal. En hiver, en raison de la température basse et des jours qui se réduisent, le conducteur est contraint d’utiliser le système de chauffage et les feux qui équippent le véhicule. L’effet sur la consommation est immédiat avec une hausse de 118% de la consommation par unité de distance. L’état de la chaussée, la pluie et la baisse de la luminosité sont autant de facteurs qui ont tendance à congestionner le trafic en hiver. Combinée à l’usage accru des auxiliaires, cette congestion pénalise grandement la consommation de ce véhicule électrique. Si l’on descend au niveau des impulsions typiques obtenues, on note que

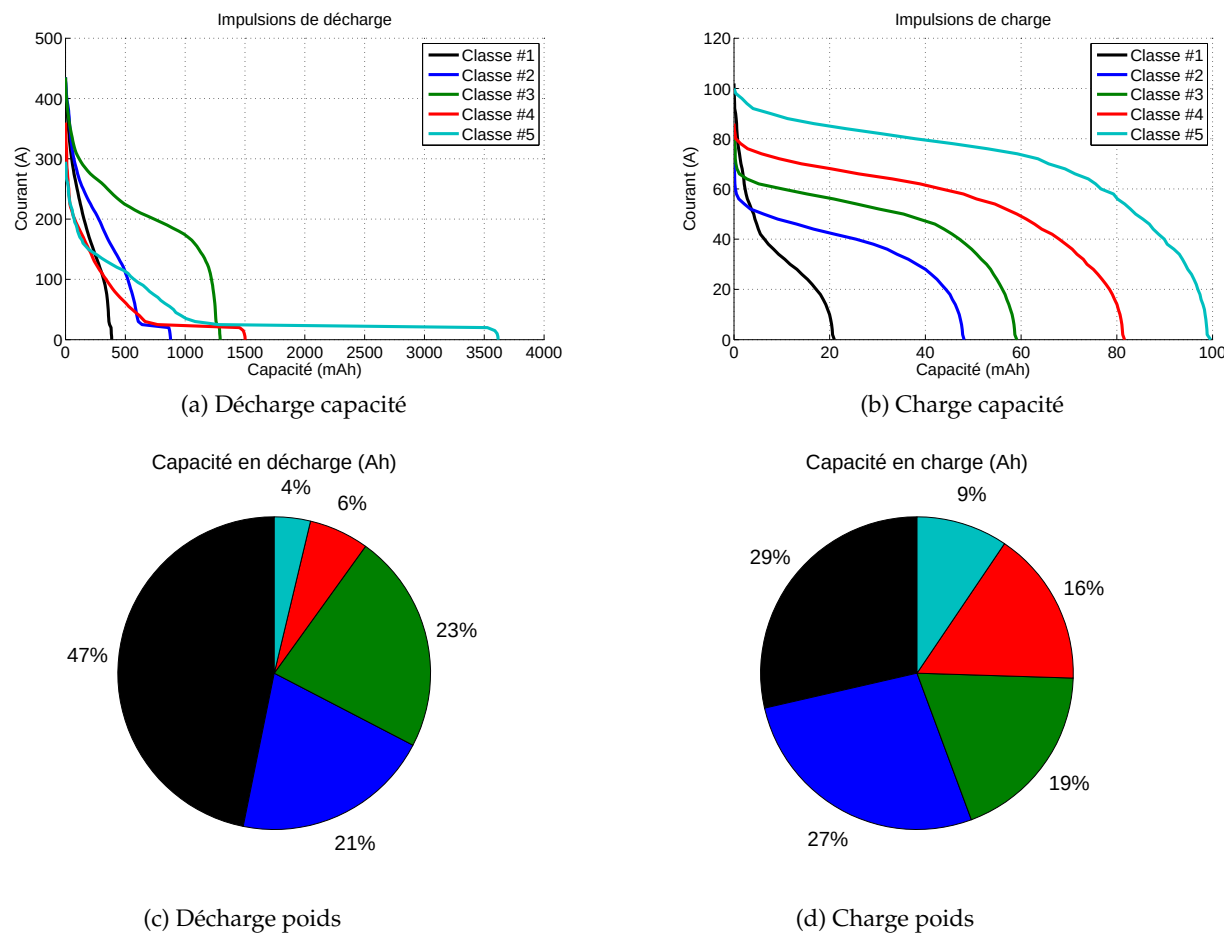


FIGURE 4.30 – Impulsions typiques de l'échantillon hivernal

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	Total
En décharge						
Occurrences par 100km	434	88	101	42	6.7	705
Consommation par km (Wh)	97.9	43.0	47.5	13.0	7.8	209
En charge						
Occurrences par 100km	291	120	68	42	20	542
Recharge par km (Wh)	3.0	2.9	2.0	1.7	1.0	10.6

TABLE 4.16 – Données kilométriques de l'échantillon hivernal

l'influence du climat hivernal sur la nature des impulsions est double. D'une part, sur les impulsions de décharges on observe l'apparition d'un plateau terminal à courant constant de faible valeur qui correspond en fait à la consommation des auxiliaires ($\approx 1000W$). On retrouve cette contribution des auxiliaires sur les impulsions de charge mais sous une forme plus discrète. En effet, les impulsions de charge de cet échantillon sont caractérisées par des courants maximums et efficaces en légère baisse en raison de la ponction d'une partie de l'énergie de freinage par les auxiliaires en marche. On note aussi que le contenu énergétique par impulsion est en baisse significative avec aucune impulsion typique au-dessus de 100mAh contrairement aux échantillons précédents. Au final, cette conduite

par météo hivernale offre à peine 10.6Wh/km d'opportunité de freinage récupératif, soit le score le plus bas constaté jusque-là. Pour conclure, rappelons qu'une température basse réduit également la capacité restituable par une batterie et détériore le rendement de charge/décharge par le biais d'une augmentation de l'impédance. Tous ces facteurs combinés expliquent la situation critique de l'autonomie des véhicules électriques sous des conditions hivernales.

4.2.1.4 Cycles représentatifs

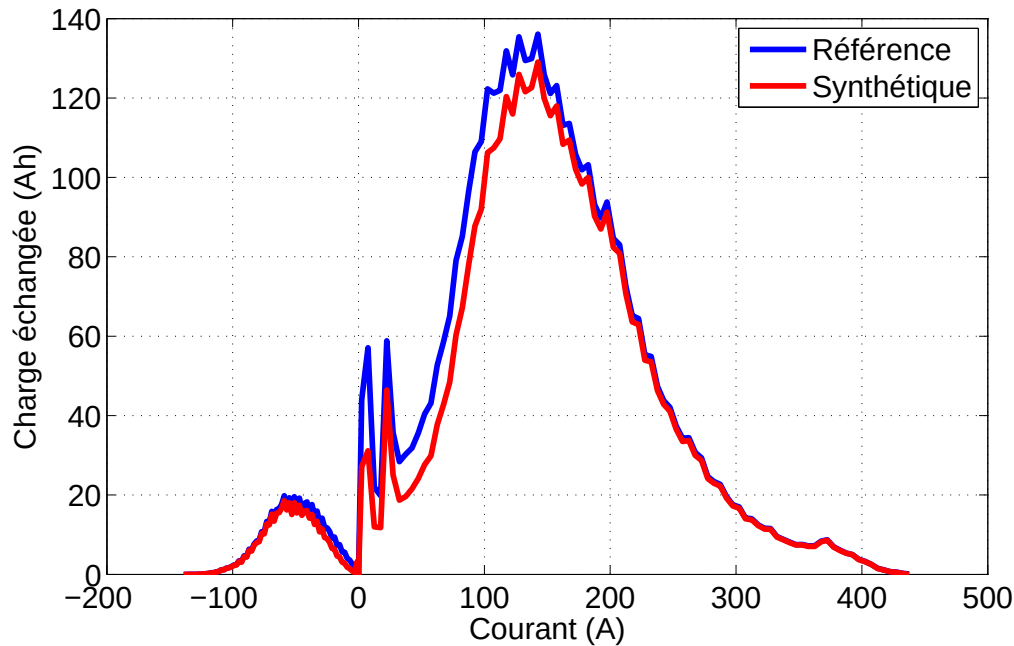


FIGURE 4.31 – Vérification du respect de la distribution du courant

Pour l'échantillon global, on vérifie que la perte d'information résultante de la classification en 5 classes est acceptable à l'aide de la figure 4.31. L'historique des tensions mesurées aux bornes de la batterie et qui peuvent servir à l'estimation des plages de SOC parcourues en utilisation sont données par la figure 4.32. Les températures relevées au niveau de la batterie de ce véhicule, en fonctionnement, sont reportées sur la figure 4.33.

Pour conclure l'étude de ce véhicule, un cycle représentatif a été généré. Il est proposé sur la figure 4.34. L'application du critère BIC a permis de déterminer l'ordre optimal de la chaîne de Markov à retenir comme étant égal à 13. C'est donc la chaîne de Markov d'ordre 13 qui a été retenue pour procéder à la génération de cycles représentatifs pour ce véhicule. L'objectif de reconstruction retenu pour cet exemple correspond à la réalisation d'une décharge couvrant 20% de la capacité nominale de la batterie équipant ce véhicule. Cette valeur correspond à un trajet de l'ordre de 10km en conditions normales. La figure 4.34a donne l'allure générale de ce cycle, la figure 4.34b renseigne sur la séquence d'états générée par la chaîne de Markov à l'ordre 13 pour réaliser l'objectif (20%DOD). Enfin, la figure 4.34c, permet de visualiser l'allure du courant du cycle représentatif sur une portion de 5 minutes. Par souci de lisibilité, les repos entre impulsions classées présentent une durée constante arbitraire de 3 secondes sous un courant de 0A.

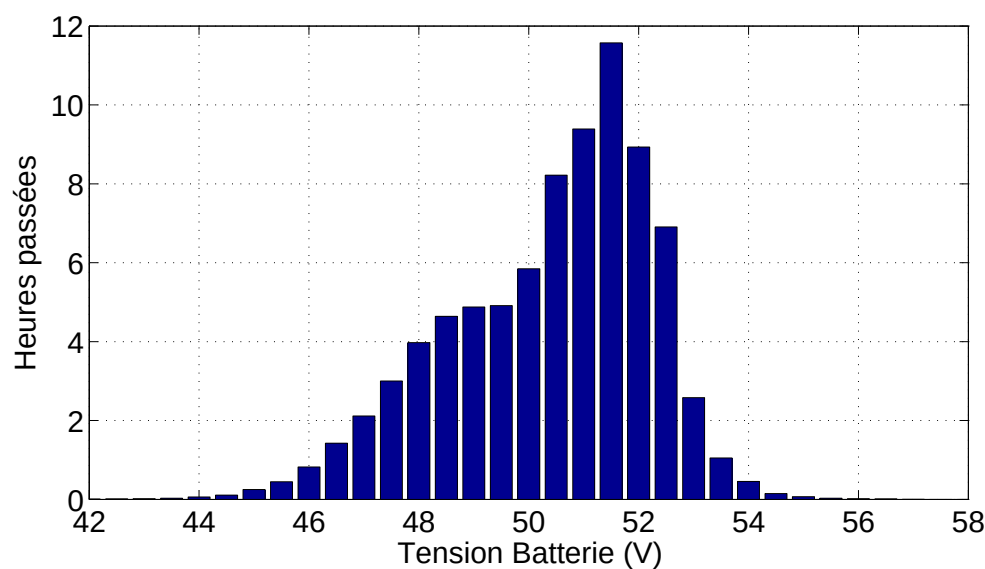


FIGURE 4.32 – Histogramme des tensions mesurées aux bornes de la batterie

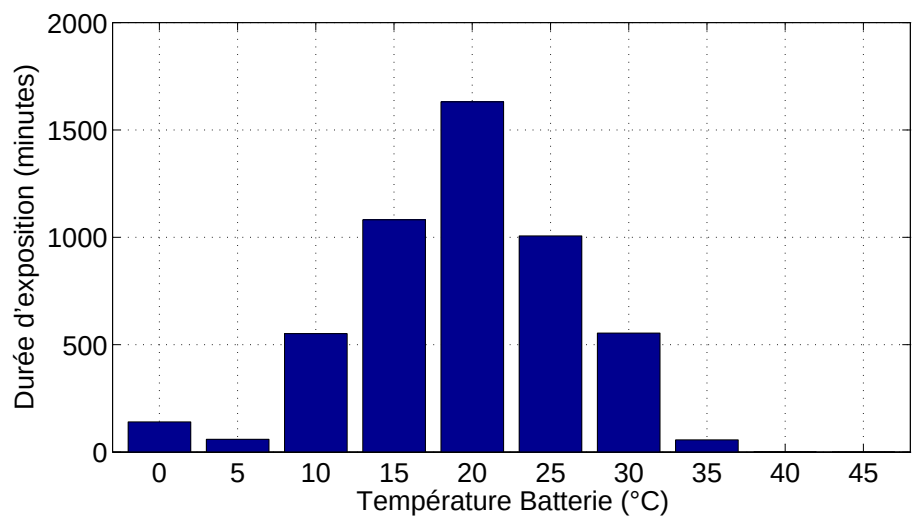
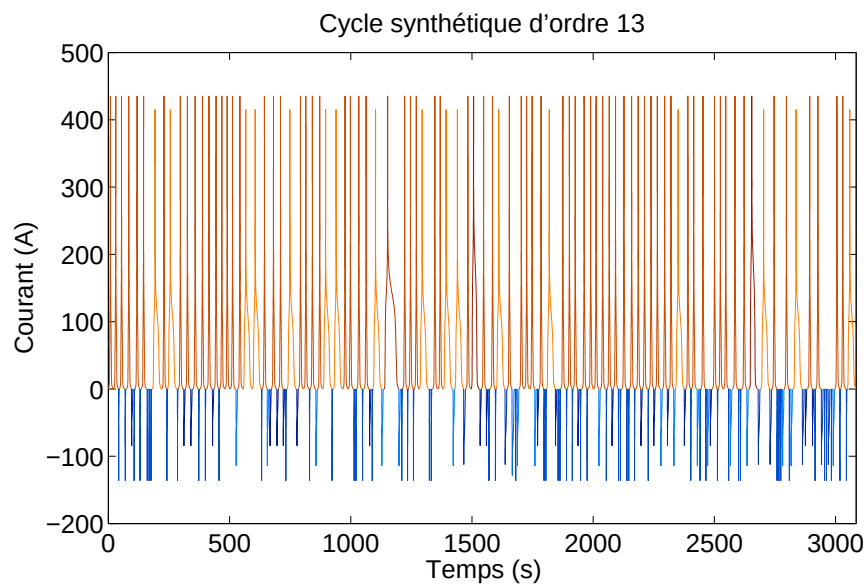
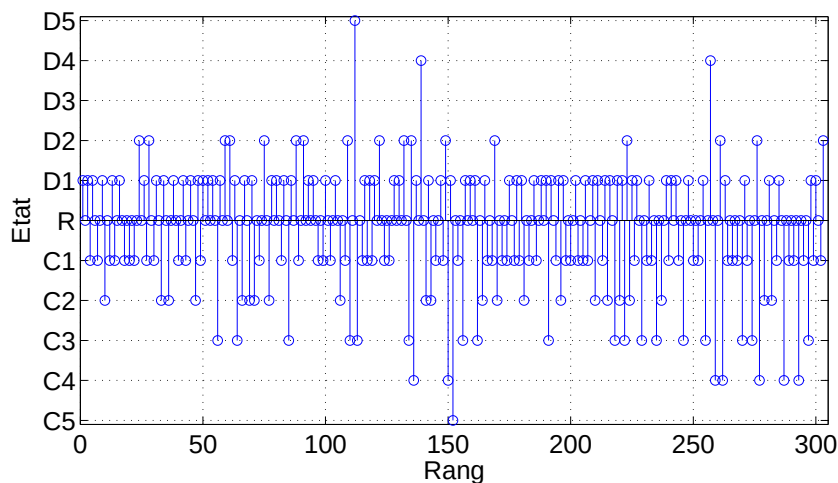


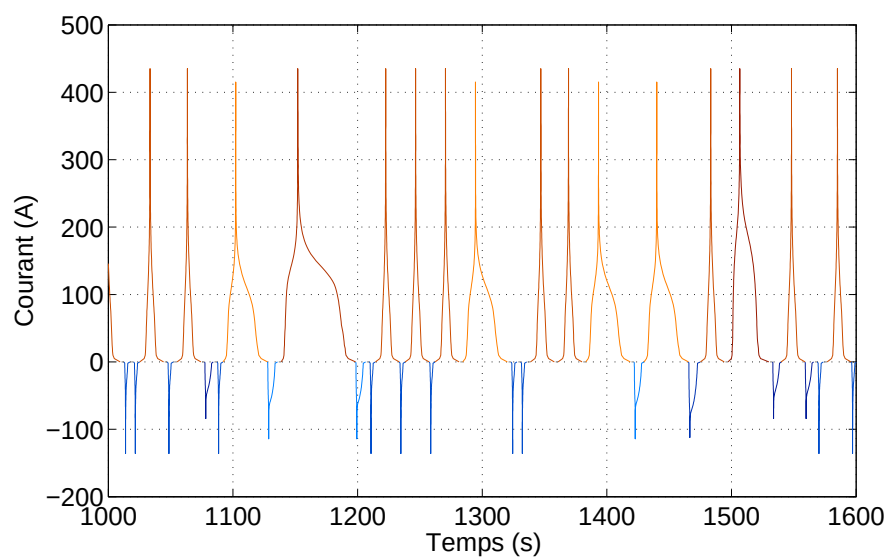
FIGURE 4.33 – Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie



(a) Profil synthétique de courant simulant 20%DOD



(b) Séquence synthétique obtenue d'après la chaîne de Markov d'ordre 13



(c) Zoom sur 5 minutes de ce cycle

FIGURE 4.34 – Cycle représentatif

4.3 Véhicules hybrides

Les véhicules hybrides représentent aujourd’hui l’essentiel des volumes commercialisés de véhicules électrifiés. Les batteries de traction utilisées avec cette architecture sont typées puissance. C’est un changement structurel majeur. Jusqu’en 2012, les véhicules hybrides les plus répandus (Toyota, Honda, Ford, ...) n’embarquaient que des batteries NiMH, produites par Panasonic ou Sanyo. La dernière évolution de la Toyota Prius, la Prius rechargeable, est commercialisée depuis le second trimestre 2012 aux Etats-Unis. Elle intègre cette fois-ci une batterie Lithium-ion. Il en va de même pour les Ford Fusion et C-Max hybrides ainsi que leurs versions rechargeables respectives (“Energi”). Pour tous ces véhicules, Panasonic fournira les batteries.

4.3.1 Toyota Prius



FIGURE 4.35 – Voiture hybride Toyota Prius II

L’étude des sollicitations typiques de ce véhicule a fait l’objet d’une publication dans la conférence internationale à comité de lecture “IEEE VPPC 2010” qui s’est tenue à Lille. L’article en langue anglaise est disponible en ligne [Devie 2010].

Pour cette étude, nous disposons des données recueillies sur une Toyota Prius II de 2004 que possède l’IFSTTAR. Les résultats obtenus sur la batterie NiMH qui l’équipe sont potentiellement applicables aux batteries Lithium-ion car la masse de la batterie reste faible par rapport à la masse totale du véhicule (4%) et n’influence donc pas le comportement dynamique de ce véhicule.

Fabricant	Toyota
Modèle (millésime)	Prius II (2004)
Poids	1360 kg
Motorisation	Hybride (essence + électrique), Hybrid Synergy Drive
Transmission	Variation continue (CVT) à train épicycloïdal, Dérivation de puissance à deux embrayages
Machine électrique	2 machines synchrones à aimants permanents (PMSM), 30 & 50kW, refroidissement liquide
Batterie	1.3kWh, $202V_{nom}$ ($225V_{mes}$), 6.5Ah, arrangement 168S1P, Panasonic, chimie NiMH, poids=53.3 kg, 25Wh/kg au niveau pack, $SOC_{cible} = 58\%$, $SOC_{plage} = [43; 73]$, 390Wh utilisables
Vitesse maximale	160km/h
Autonomie constructeur	N/A

TABLE 4.17 – Fiche technique de la voiture Toyota Prius II

4.3.1.1 Description du véhicule

La Toyota Prius est un véhicule emblématique dans la famille des véhicules électrifiés. Son succès commercial est avéré (au Japon et aux USA) et la technologie embarquée a fait ses preuves aussi bien en termes de fiabilité que de longévité. De nombreux exemples de Prius présentant 200000km ou plus au compteur attestent d'une très bonne tenue des performances (consommation, accélération) dans le temps, malgré la dégradation sensible de la batterie en termes de capacité (divisée par 2.5)[[Francfort 2006](#)]. L'étude des sollicitations typiques a déjà été proposée par [[Montaru 2009](#), Chapitre 11], mais il convient ici de présenter à nouveau ces résultats pour tenir compte de la mise à jour de la méthode de classification et pour aborder la question des cycles représentatifs par la suite.

La caractérisation poussée de ce véhicule a été réalisée en 2006 au LTE [[Vinot 2006](#)] et un modèle informatique a été proposé [[Vinot 2008](#)]. L'architecture de la chaîne de traction de la Toyota Prius est particulièrement complexe. On y retrouve un moteur thermique (1.5l - 57kW) couplé à deux machines électriques à travers un train épicycloïdal. La première machine électrique, de 30kW, est utilisée comme génératrice. La seconde, de 50kW, est utilisée comme moteur de traction. Cette machine est donc utilisée pour mettre en mouvement le véhicule mais aussi lors des phases de freinage récupératif. La génératrice est elle utilisée pour permettre la dérivation d'une partie de la puissance du moteur thermique vers le moteur électrique de traction afin d'optimiser le point de fonctionnement du moteur thermique (abaisser le régime et accroître le couple). On parle alors de flux série. La Prius est donc une hybride série-parallèle (cf. figure 2.16e). La génératrice sert également de démarreur et d'alternateur lorsque la batterie de traction a besoin d'être rechargée vers son état de charge cible. Cette opération peut se faire à l'arrêt.

Responsable	Bertrand Malaquin
Période	Octobre 2006 - Mars 2008 (par phases)
Lieu(x)	Agglomération Lyonnaise
Personnes impliquées	6 conducteurs de l'IFSTTAR
Type de trajets	Urbains (30), routiers (20) et autoroutiers (26), en journée
Nombre de trajets	76
Kilomètres enregistrés	787km (195km urbains, 237km routiers, 355km autoroutiers)
Kilomètres validés	787km
Enregistreur de données	PC embarqué Labview + interface bus CAN
Fréquence d'échantillonnage	5Hz
Données enregistrées	Tension batterie Courant batterie Température batterie Vitesse SOC

TABLE 4.18 – Conditions expérimentales pour Prius II

4.3.1.2 Description de l'expérimentation

Ce véhicule a été acquis par l'IFSTTAR (Inrets à cette époque) pour être évalué en profondeur en raison de son caractère profondément novateur. Ses émissions polluantes ont notamment été étudiées en fonction du type de trajet. Une instrumentation assez exhaustive a ainsi été mise en place [Vinot 2006]. Ce véhicule a été évalué sur routes ouvertes à la circulation et sur banc à rouleau selon les cycles HYZEM (urbain, routier, autoroutier). Au total, une centaine de trajets ont été enregistrés, dont certains sont labellisés comme appartenant spécifiquement à un parcours urbain, routier ou autoroutier. Nous nous appuyerons sur cette labellisation pour constituer des sous-échantillons spécifiques. Il faut noter que ces essais ont été menés en journée, par des personnels de l'IFSTTAR, et ne constituent donc pas un échantillon de déplacements domicile-travail. Par ailleurs, ces essais ne couvrent pas une année complète et ont été menés par phases discontinues. Les détails de l'expérimentation sont résumés par le tableau 4.18.

4.3.1.3 Sollicitations typiques

Comparativement aux autres véhicules considérés dans ces travaux, ce véhicule hybride a la possibilité d'évoluer au sein de différents contextes routiers. Nous distinguerons ici trois sous-échantillons de circulation (urbaine, routière et autoroutière). Précisons que les trajets routiers et autoroutiers incluent respectivement des portions urbaines et, urbaines et routières, généralement en début et en fin de trajet (pour accéder à un axe de circulation majeur). Le premier échantillon

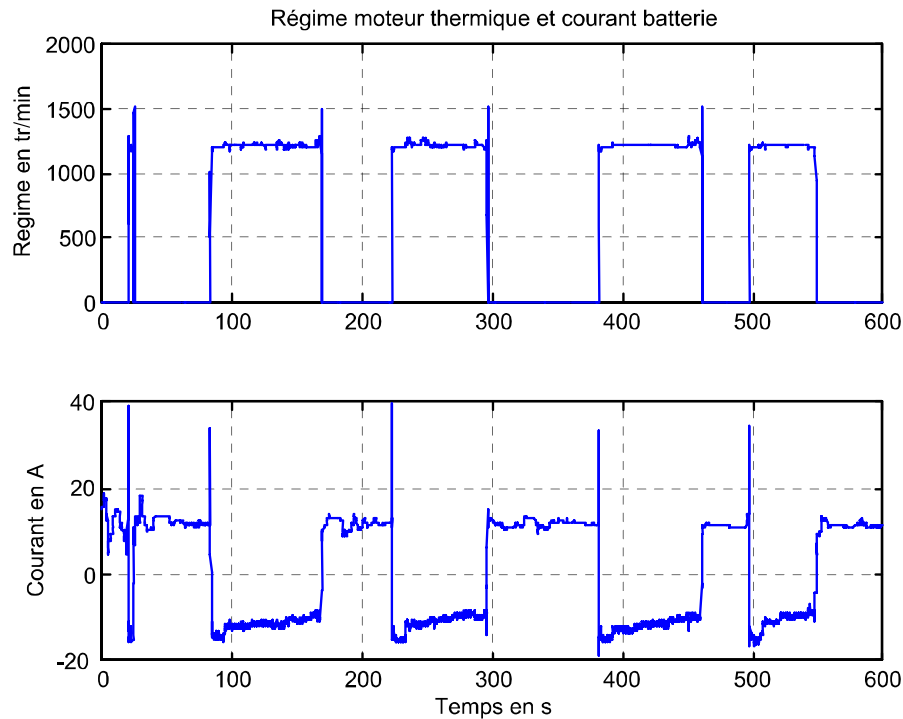


FIGURE 4.36 – Alternance de coupures et de redémarrages du moteur thermique à faible vitesse stabilisée (30km/h) sur le véhicule hybride Toyota Prius II (en haut). La traction électrique prend le relai (courant positif) pendant les coupures puis de l'énergie est ponctionnée sur le moteur thermique pour recharger la batterie (courant négatif) (en bas). On note la présence de pics de courant aux instants de redémarrage du moteur thermique. [Vinot 2006]

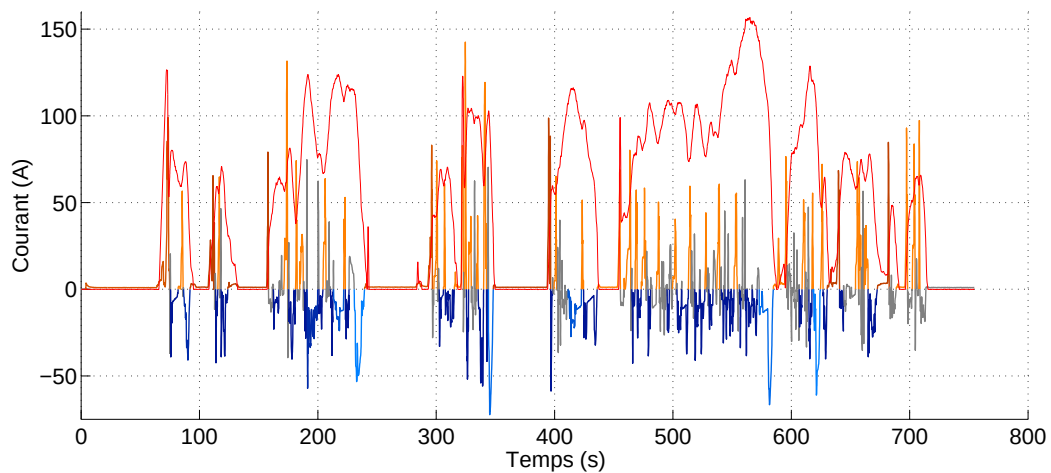


FIGURE 4.37 – Lien entre l'évolution de la vitesse du véhicule (en rouge, facteur 3) et les impulsions de courant observées, en usage urbain

considéré sera l'échantillon des trajets urbains.

En usage urbain, les interactions entre le moteur thermique et le système électrique sont nombreuses. En effet, d'après [Vinot 2006], le système hybride installé sur ce véhicule permet :

- des phases de « boost » pendant les accélérations ; le moteur thermique et la batterie (par l'in-

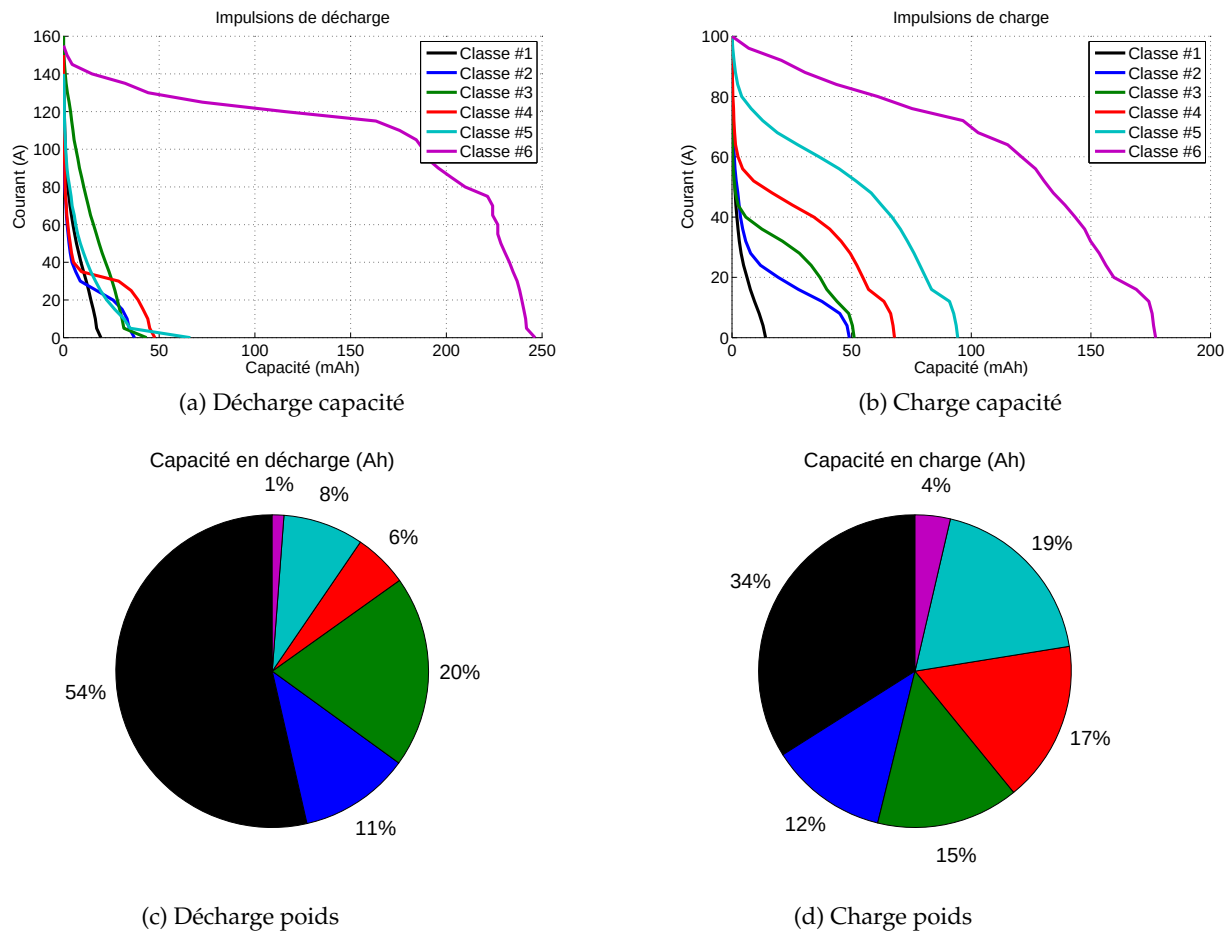


FIGURE 4.38 – Impulsions typiques de l'échantillon urbain

termédiaire de la machine de traction) fournissent de la puissance,

- l'arrêt du moteur thermique pendant les arrêts, les phases de décélération et les phases à faible vitesse ($<60\text{km/h}$) où la charge demandée est suffisamment faible pour autoriser un mode tout électrique (cf. figure 4.36),
- la récupération pendant les phases de freinage sans traînée du moteur thermique.

Pour cet échantillon, les impulsions typiques résultantes d'une analyse en 6 classes sont fournis par la figure 4.38 et le tableau 4.19. La figure 4.38a témoigne d'une forte disparité entre les impulsions

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
En décharge							
Occurences par 100km	860	97	143	37	39	1.5	1179
Consommation par km (Wh)	37.2	7.9	13.8	3.9	5.8	0.8	69.4
En charge							
Occurences par 100km	783	80	93	79	65	6.7	1107
Recharge par km (Wh)	24.3	8.7	10.5	11.9	13.5	2.6	71.6

TABLE 4.19 – Données kilométriques de l'échantillon urbain

de la classe n°6 et les 5 autres. Ces 5 premières classes (de 1 à 5), sont relativement semblables les unes aux autres et sont probablement liées à des phases de redémarrage du moteur thermique du véhicule ou à de brèves contributions à l'accélération du véhicule. Cela semble être le mode de fonctionnement dominant de ce véhicule hybride en ville. Les impulsions de la classe n°1 consomment 20mAh en moyenne soit 4.5Wh par impulsion environ. Celles des classes n°2 à 5 ne consomment guère plus, autour de 50mAh par impulsion, soit 11Wh environ. Une énergie de 4.5Wh en sortie de la batterie et hors rendement de la chaîne de traction, correspond à une accélération de 0 à 17.5km/h. Une énergie de 11Wh correspond elle à une accélération de 0 à 27.5km/h. Une distinction peut être faite entre les classes 1, 3 et 5 d'une part et 2 et 4 d'autre part. Les premières sont caractérisées par un courant efficace plus important et une bonne partie de la charge est consommée entre 0 et 100A, de façon régulière. Les secondes présentent un courant efficace plus faible et la majeure partie de la charge est consommée entre 20 et 40A seulement. En accord avec le fonctionnement décrit par la figure 4.36, il est raisonnable de penser que ces classes sont abondées par des phases de relai de la traction électrique lors de coupures du moteur thermique à faible allure en ville. L'étude de la position relative du maximum de courant lorsqu'on s'intéresse à la représentation temporelle de ces impulsions confirme que le pic de courant de ces impulsions se situe à environ 75% de la durée de l'impulsion. Avant cet instant qui correspond au démarrage du moteur thermique, le courant est relativement faible (20 à 40A) et stable, ce qui traduit une phase de maintien de la vitesse du véhicule par la machine électrique de traction. Les classes 3 et 5 sont, elles, à relier avec des démarrages du moteur thermique via le système électrique, sans phase de maintien de la vitesse auparavant. La forme temporelle moyenne de ces classes indique que le pic de courant se situe à la toute fin de l'impulsion (97%), précédé par un courant de décharge quasi-nul. Un redémarrage du véhicule après un arrêt complet semble constituer le scénario de base qui donne lieu à ce type d'impulsion. Sur la base des décomptes d'impulsions de type 2, 3, 4 et 5, on peut estimer donc à 3.2 le nombre moyen de redémarrages du moteur thermique par kilomètre parcouru en ville.

A l'opposé, les impulsions de la classe n°1, plus hétérogènes et très abondantes puisqu'elles représentent 54% de la charge consommée en décharge, découlent probablement de courtes et nombreuses phases d'accélération du véhicule en combinaison avec l'utilisation du moteur thermique (phases "boost" décrites précédemment). Les liens présumés énoncés ici sont visibles sur la figure 4.37.

Enfin, les impulsions de la classe n°6, peu nombreuses au sein de cet échantillon ($\approx 1\%$ de la charge consommée), correspondent probablement à des phases de fonctionnement en mode tout électrique, comme l'autorise ce véhicule à basse vitesse et sous une accélération faible. La capacité moyenne consommée par l'une de ces impulsions de courant correspond à une consommation énergétique de 56Wh. Si l'on se base sur la consommation moyenne d'un véhicule électrique (autour de 150Wh par kilomètre), ces phases peuvent correspondre à des parcours de l'ordre de 300 mètres en recourant uniquement à l'énergie stockée par la batterie de traction.

En charge, les impulsions typiques observées sont caractérisées par une plus grande disparité entre les classes. Par ailleurs le contenu énergétique par impulsion est en hausse sensible par rapport aux impulsions de décharge. L'étagement régulier des classes n°2 à 6 est identique à celui que nous avons pu observer sur le véhicule électrique Aixam Megacity. Cet étagement découle des variations d'énergie cinétique récupérable à la décélération en fonction de la vitesse du véhicule avant le début de la décélération. Plus le véhicule est lancé à une vitesse élevée, plus grande sera la puissance initiale de freinage récupératif et plus grande sera la quantité d'énergie régénérée. Par exemple, une décélération de 30 à 0km/h correspond à une variation d'énergie cinétique de l'ordre de 13Wh (proche du contenu énergétique d'une impulsion des classes 2, 3 et 4). Une décélération de 40 à 0km/h correspond à une variation d'énergie cinétique de l'ordre de 23Wh (proche du contenu énergétique d'une impulsion de la classe n°5). Enfin, une décélération de 52 à 0km/h correspond à une variation d'énergie cinétique de l'ordre de 40Wh (proche du contenu énergétique d'une impulsion de la classe n°6).

Les décélérations partielles sont bien évidemment également mise à profit par le système électrique pour procéder à de la récupération d'énergie. Par exemple, une décélération entre 50 et 40km/h correspond à une variation d'énergie cinétique de 13Wh environ, tandis qu'une décélération entre 40 et 30km/h correspond à 10Wh environ. Les impulsions de la classe n°1, qui comptent pour 34% de la charge récupérée en recharge, sont probablement attribuables à des décélérations partielles liées à la circulation. Les liens présumés énoncés ici sont visibles sur la figure 4.37.

En dehors des seules phases de décélération, ce véhicule hybride provoque régulièrement une recharge partielle des batteries en couplant la génératrice au moteur thermique, lorsque celui-ci est en fonctionnement et que la vitesse est relativement stable, afin de compenser la consommation d'énergie des phases d'accélération (cf. figure 4.36).

Au final, l'usage urbain est caractérisé par un grand nombre d'impulsions par kilomètre parcouru, une dizaine en décharge comme en charge dans le cas présent. Par kilomètre parcouru, les impulsions de décharge consomment 69.4Wh tandis que les impulsions de recharge permettent de récupérer 71.6Wh. D'après [Montaru 2009, §7.3.2], le rendement faradique de ce type de cellule NiMH, à 20°C et sur la plage de SOC considérée, s'établit à 98% environ, ce qui indique que la quasi-totalité de cette énergie rechargée est stockée par la batterie et restituable par la suite.

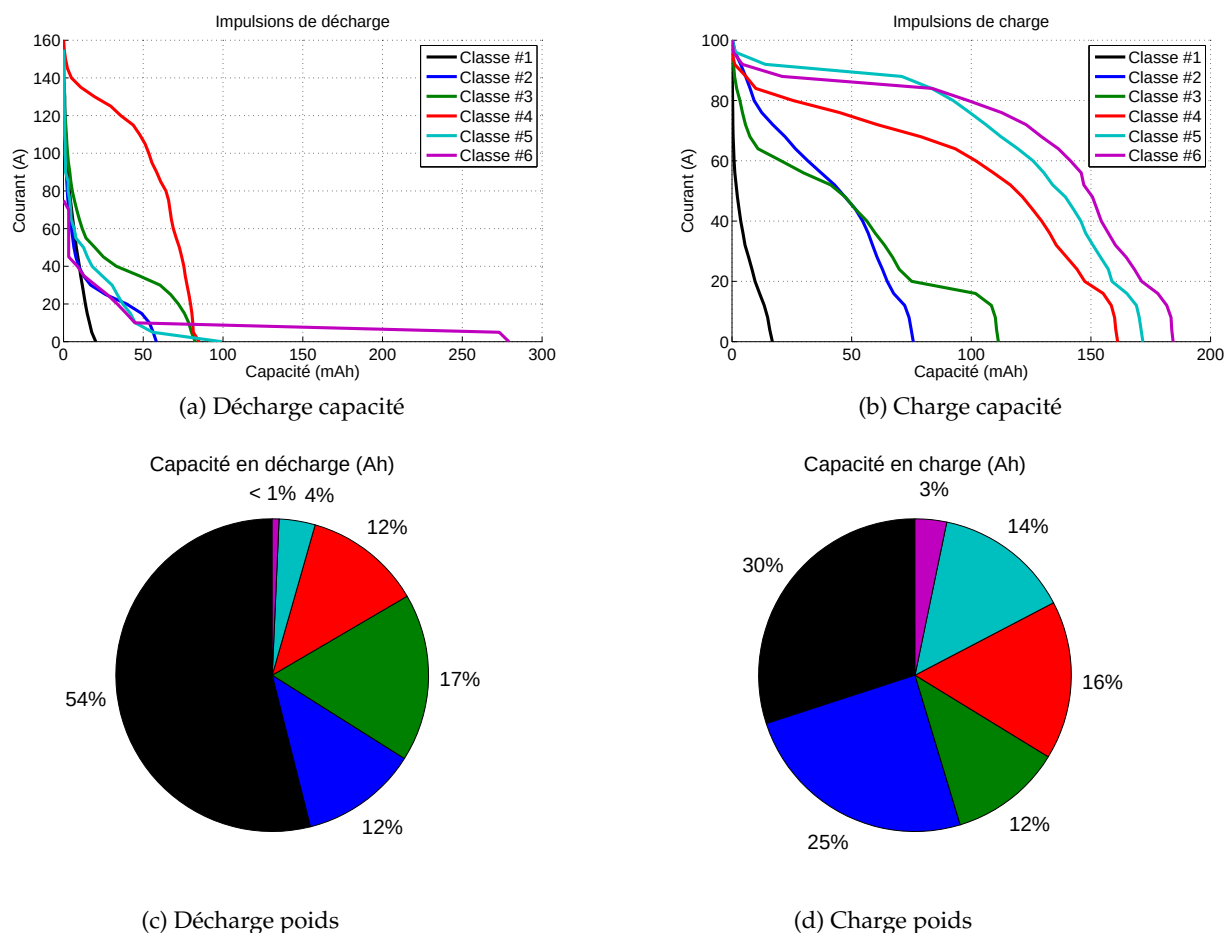


FIGURE 4.39 – Impulsions typiques de l'échantillon routier

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
En décharge							
Occurences par 100km	449	35	35	24	6.3	0.4	551
Consommation par km (Wh)	21.0	4.7	6.8	4.7	1.5	0.3	39.0
En charge							
Occurences par 100km	339	62	20	19	16	3.4	459
Recharge par km (Wh)	13.2	10.9	5.1	7.2	6.2	1.4	44.1

TABLE 4.20 – Données kilométriques de l'échantillon routier

L'usage routier d'un véhicule hybride met généralement moins à profit le système électrique qu'un usage urbain. Toutefois les puissances mises en jeu sont potentiellement plus élevées compte-tenu de l'accroissement de la vitesse d'évolution du véhicule (accélérations plus fortes et plus longues, énergie cinétique acquise plus importante). Les résultats de l'analyse des sollicitations typiques de la batterie de ce véhicule en usage routier sont présentés par la figure 4.39 et le tableau 4.20. A l'aide du tableau 4.20, on note que les impulsions sont deux fois moins nombreuses par unité de distance (≈ 1000 impulsions par 100km contre plus de 2200 en usage urbain). Identiquement, les énergies consommées et rechargées par kilomètre parcouru sont en baisse notable (de 69.4Wh/km

en décharge en usage urbain à 39.0 en usage routier, et de 71.6Wh/km en recharge à 44.1).

En décharge, on retrouve la même classe n°1, qui reste prépondérante au niveau de la charge consommée (54%). Les classes 3 et 5 de l'échantillon urbain (redémarrage moteur après arrêt du véhicule) sont rassemblées au sein de la nouvelle classe n°5. Toutefois, la fréquence d'apparition de ces impulsions est en très forte diminution (6.3 par 100km contre 182 avec l'échantillon urbain). La classe n°2 semble présenter les mêmes caractéristiques que les classes 2 et 4 de l'échantillon urbain (redémarrage moteur après un maintien de la vitesse par le moteur électrique). La classe n°3 semble d'ailleurs issue de ce même type de fonctionnement mais pour une phase relai sous une puissance plus élevée. La classe n°4, qui n'a pas d'équivalent en usage urbain, témoigne de phases d'accélération soutenues du véhicule. Par exemple, les impulsions de classe n°4 ont été observées lors de reprises de 25 à 50km/h. Une telle impulsion consomme environ 80mAh de la charge stockée par la batterie, ce qui permet de fournir 18 des 27Wh nécessaires au passage de 25 à 50km/h. La classe n°6, anecdotique de par sa contribution inférieure à 1% de la charge consommée, correspond à un fonctionnement tout-électrique sous faible puissance (2kW), peut-être pour alimenter des auxiliaires lors d'un arrêt en circulation, et se termine par un redémarrage du moteur thermique.

En charge, l'allure des impulsions typiques observées est quasiment identique à celle de l'échantillon urbain. La principale différence tient à l'accroissement du niveau de courant de charge et de la capacité par impulsion mesurée. Ce double accroissement est le résultat direct de l'augmentation de la vitesse de déplacement du véhicule et donc de l'énergie cinétique récupérable en décélération. Les impulsions des classes n°3 à 6, qui représentent 45% de la charge récupérée, présentent des capacités moyennes par impulsion supérieures à 100mAh tandis qu'en usage urbain, une seule classe (n°6), qui ne représentait que 3% de la charge récupérée dépassait ce seuil des 100mAh par impulsion (cf figure 4.38b). On retrouve en revanche la même classe n°1, dont la contribution est stable ($\approx 30\%$). Enfin, la classe n°2 semble regrouper les impulsions auparavant présentes dans les classes 4 et 5 de l'échantillon urbain.

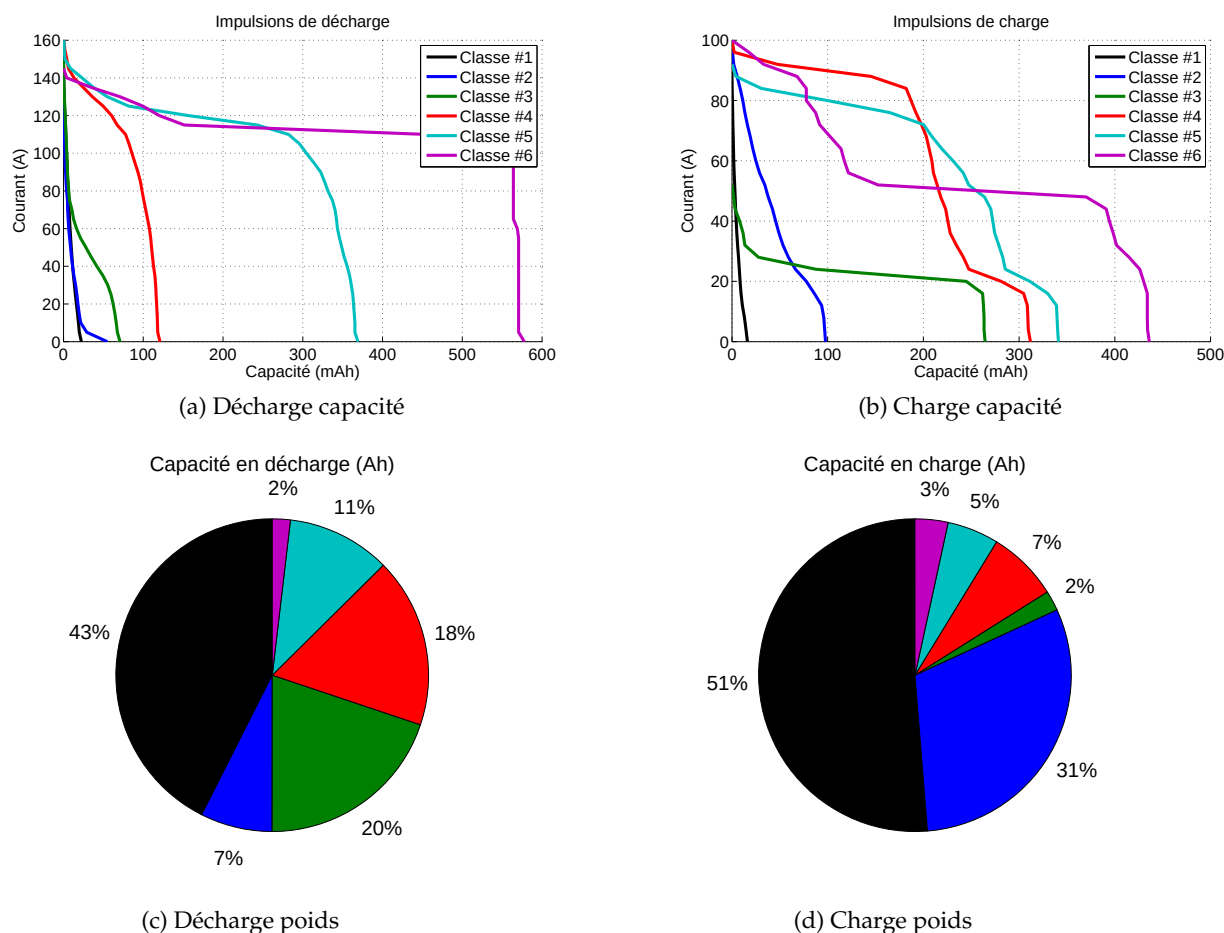


FIGURE 4.40 – Impulsions typiques de l'échantillon autoroutier

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
En décharge							
Occurrences par 100km	166	12	25	13	2.5	0.3	218
Consommation par km (Wh)	8.5	1.5	4.0	3.5	2.1	0.4	20.0
En charge							
Occurrences par 100km	343	34	0.8	2.5	1.7	0.8	382
Recharge par km (Wh)	12.7	7.5	0.5	1.8	1.3	0.8	24.7

TABLE 4.21 – Données kilométriques de l'échantillon autoroutier

L'analyse de l'échantillon autoroutier confirme que l'usage de la batterie y est largement restreint par rapport à l'usage urbain. Les résultats de cet échantillon autoroutier sont dépeints par la figure 4.40 et le tableau 4.21. Si l'on s'intéresse au tableau 4.21, on constate que le nombre d'impulsions par unité de distance a encore baissé (600 impulsions aux 100km contre plus de 2200 en usage urbain). De plus, un déséquilibre dans les occurrences est apparu entre les impulsions de charge et de décharge significatives (c'est-à-dire celles conservées après la sélection initiale). On dénombre en effet quasiment deux fois plus d'impulsions de charge que d'impulsions de décharge dans le cadre de cet usage autoroutier. Les consommations (20.0Wh/km) et recharges (24.7Wh/km) restent en revanche

proches de l'équilibre.

En décharge, on retrouve la classe n°3 de l'échantillon urbain sous les traits de la nouvelle classe n°2. On retrouve aussi la classe n°3 de l'échantillon routier sous les traits de la nouvelle classe n°3. Il est raisonnable de penser que celles-ci proviennent des courtes liaisons urbaines et routières avant et après la circulation autoroutière. Combinées, elles contribuent à un quart de la charge consommée en décharge.

Identiquement, on retrouve la classe n°1 observée dans tous les échantillons, avec une contribution relative en légère baisse (43% contre 54% en usage routier et urbain). La classe n°4 se rapproche de la classe n°4 observée dans l'échantillon routier. Cette classe n°4 semble correspondre à des reprises entre les vitesses routières et autoroutières (de 70 à 120km/h par exemple). Enfin, les classes 5 et 6, inédites, contribuent à 13% de la charge consommée en décharge. Elles témoignent d'un fonctionnement de la chaîne de traction électrique sous sa puissance maximale ($\approx 25\text{kW}$) pendant des durées relativement conséquentes. On a pu corréliser ces impulsions avec des reprises entre des vitesses routières et autoroutières (de 85 à 130km/h par exemple), avec une contribution majoritaire de la traction électrique à la réalisation de cette accélération (90Wh sur les 140Wh requis). On peut noter qu'un événement de la classe n°5 décharge 20% de la capacité utilisable de la batterie embarquée (400mAh sur 2Ah utiles) tandis qu'un événement de la classe n°6 en décharge 30%.

En charge, l'allure des impulsions typiques évolue sensiblement avec l'apparition de grands plateaux à courant constant sur les impulsions des classes n°3 à 6. Combinées, ces 4 classes représentent 17% de la charge récupérée. Il semble que de lentes décélérations, à partir des vitesses autoroutières usuelles vers des vitesses réglementaires sur routes ou en agglomération, soient à l'origine de ces impulsions. Compte tenu de la régularité des courants observés, il semble raisonnable de penser que le calculateur embarqué gère le couple de freinage électrique régénératif afin de simuler un frein moteur de puissance constante. A titre d'exemple, la variation d'énergie cinétique entre 130 et 90km/h ou entre 110 et 50km/h est de l'ordre de 130Wh. Les impulsions des classes n°3 à 6 équivalent à une récupération de 60 à 100Wh d'énergie par impulsion. On retrouve la même classe n°1 que dans les échantillons précédents, avec une contribution relative quasiment doublée. Enfin, la classe n°2 est à rapprocher des classes 2 et 3 de l'échantillon routier, ou encore de la classe n°5 de l'échantillon urbain, et représente environ un tiers de la charge récupérée, comme les classes 2 et 3 de l'échantillon routier.

4.3.1.4 Cycles représentatifs

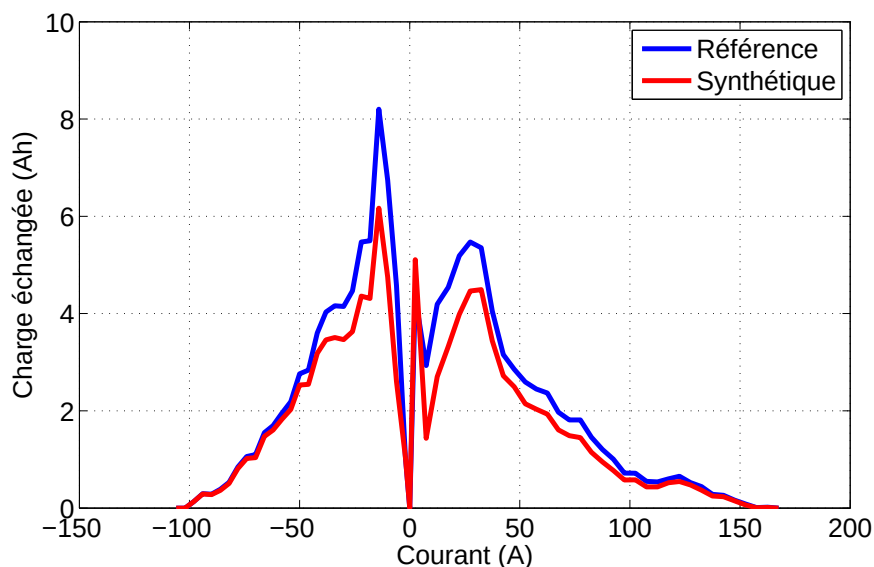


FIGURE 4.41 – Vérification du respect de la distribution du courant pour l'échantillon urbain

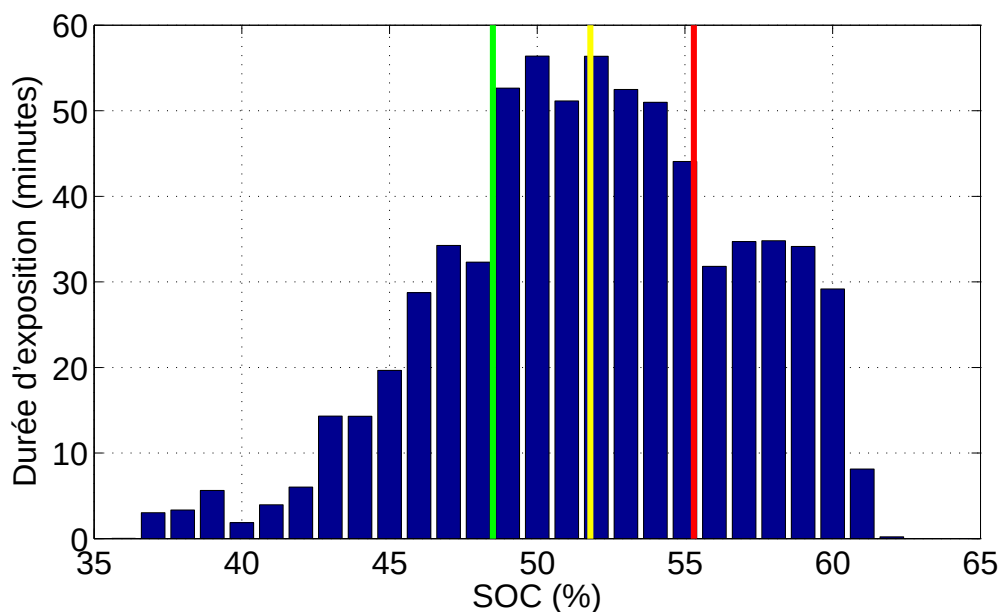


FIGURE 4.42 – Histogramme des états de charge relevés sur la batterie. En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.

Pour l'échantillon urbain, on vérifie que la perte d'information résultante de la classification en 6 classes est acceptable à l'aide de la figure 4.41. L'histogramme des SOC relevés est donné par la figure 4.42. Les températures relevées au niveau de la batterie de ce véhicule, en fonctionnement, sont reportées sur la figure 4.43.

Pour conclure l'étude de ce véhicule, un cycle représentatif a été généré. Il est proposé sur la figure

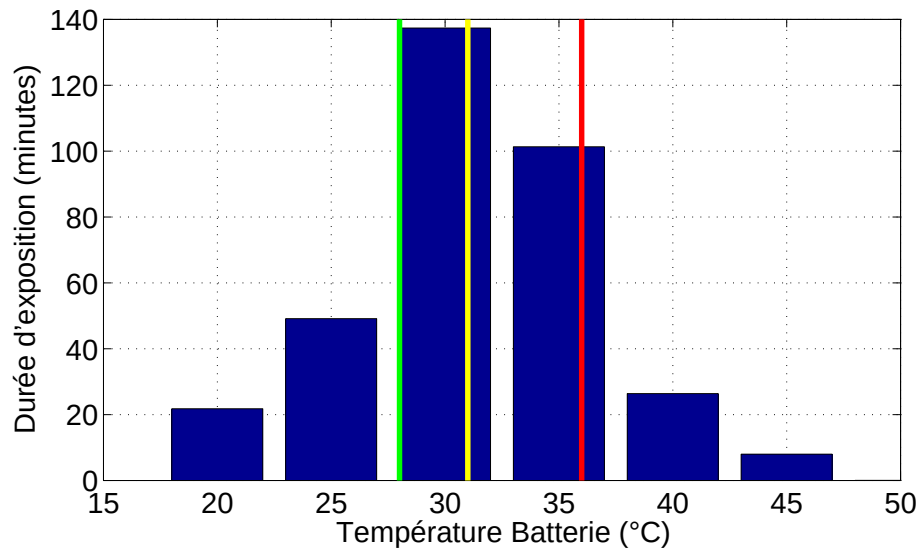


FIGURE 4.43 – Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie. En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.

4.44. L'application du critère BIC a permis de déterminer l'ordre optimal de la chaîne de Markov à retenir comme étant égal à 10. C'est donc la chaîne de Markov d'ordre 10 qui a été retenue pour procéder à la génération de cycles représentatifs pour ce véhicule. L'objectif de reconstruction retenu pour cet exemple correspond à la réalisation d'un trajet de l'ordre de 10km. La figure 4.44a donne l'allure générale de ce cycle, la figure 4.44b renseigne sur la séquence d'états générée par la chaîne de Markov à l'ordre 10 pour réaliser l'objectif (10km). Enfin, la figure 4.44c, permet de visualiser l'allure du courant du cycle représentatif sur une portion de 5 minutes. Par souci de lisibilité, les repos entre impulsions classées présentent une durée constante arbitraire de 3 secondes sous un courant de 0A.

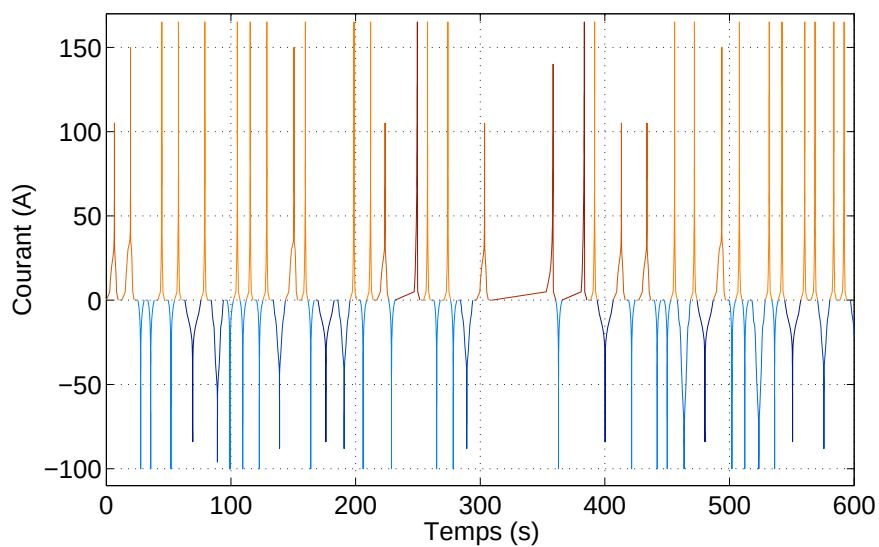
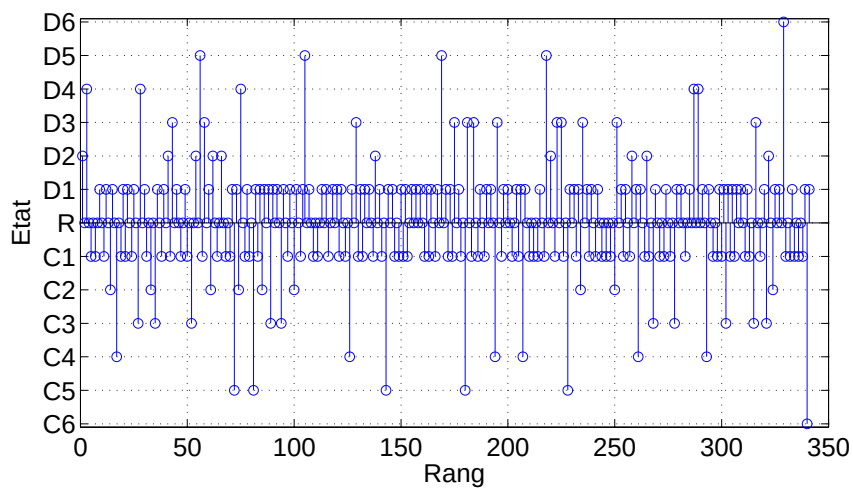
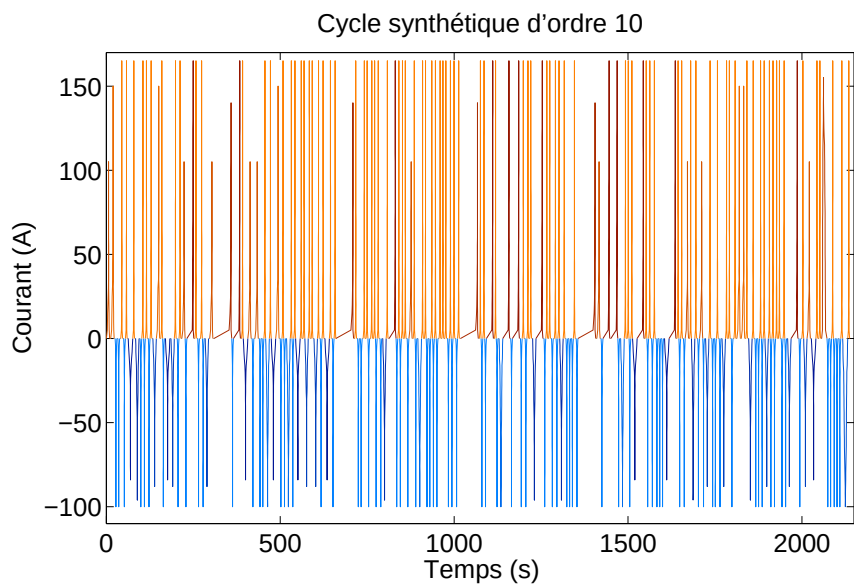


FIGURE 4.44 – Cycle représentatif

4.4 Véhicules lourds

4.4.1 Trolleybus Irisbus



FIGURE 4.45 – Trolleybus Irisbus ETB12 avec ses perches déployées

L'étude des sollicitations typiques de ce véhicule a fait l'objet d'une publication dans la conférence internationale à comité de lecture "IEEE VPPC 2012" qui s'est tenue à Séoul. L'article en langue anglaise sera prochainement disponible en ligne [Devie 2012a].

Le dernier véhicule auquel nous nous intéressons est un véhicule électrique mais dépourvu de système de stockage d'énergie électrique. Toutefois, par son dimensionnement et par les trajets qu'il effectue, les résultats obtenus sur ce véhicule préfigure des sollicitations typiques que nous pourrions rencontrer sur un autobus électrique autonome. Enfin, il complète le panel des véhicules étudiés jusque-là en raison de sa double spécificité de véhicule lourd et de véhicule commercial à haut niveau de service. On trouve quelques études qui portent sur ce type de véhicule [Kellaway 2007, Groot 2012].

4.4.1.1 Description du véhicule

Un trolleybus est un véhicule de transport de passagers, de forte capacité, et généralement employé en milieu urbain dense en raison du coût linéaire de l'infrastructure périphérique. Il est à mi-chemin entre un tramway, auquel il emprunte son alimentation électrique par ligne aérienne, et un autobus, auquel il emprunte sa liaison au sol (pneus sur chaussée), tel que dépeint par la figure 4.45. La chaîne de traction de ce trolleybus s'articule autour de moteurs roues, en nombre pair, de 160kW par essieu moteur. Sur la version 12 mètres de ce véhicule, on ne trouve qu'un essieu moteur alors qu'on en trouve deux sur la version 18 mètres (articulée). Il s'agit de machine asynchrone, de conception Alstom. Chaque machine est pilotée dans les quatre quadrants par un onduleur triphasé. En fonctionnement moteur, celui-ci puise de l'énergie sur le bus continu 350V du véhicule. Cette même énergie provient des lignes électriques aériennes caractéristiques des trolleybus. Ce réseau aérien présente une tension continue de 600V_{DC}. Un hacheur abaisseur réversible en courant adapte cette haute tension à la tension du bus continu. Des perches articulées sont utilisées pour créer le contact élec-

Fabricant	Iveco Irisbus
Modèle	Cristalis ETB 12m
Poids	13400 kg
Motorisation	Electrique, diesel pour phase autonome
Transmission	Prise directe, moteurs roues
Machine électrique	2 machines asynchrones 80kW
Batterie	Pas de batterie Bus continu 350V, alimenté par lignes aériennes 600V _{DC} Banque optionnelle de supercondensateurs, Maxwell/Erctel, 150Wh, 50kW, 110kg
Vitesse maximale	N/A
Autonomie constructeur	N/A (1.5kWh/km)

TABLE 4.22 – Fiche technique du Trolleybus Cristalis ETB12

trique entre le véhicule en mouvement et les lignes fixes. Lors du freinage, les machines asynchrones sont utilisées et l'énergie cinétique est distribuée vers deux chemins distincts. Le premier chemin, celui que l'on souhaite maximiser, consiste à réinjecter cette énergie sur le réseau aérien en recourant au caractère réversible de toute la chaîne de traction électrique. Malheureusement, le réseau électrique aérien a souvent des difficultés à absorber un tel afflux, faute de synchronisme entre l'accélération et la décélération de deux trolleybus reliés au même tronçon électrique. Pour éviter un phénomène de surtension sur ce tronçon, l'énergie de décélération est généralement dissipée par un ensemble de rhéostats, localisés sur le toit du véhicule. Ce freinage rhéostatique garantit des capacités de freinage constantes mais entraîne un gaspillage de l'énergie cinétique acquise par ce véhicule de plus de 13 tonnes (environ 350Wh potentiellement récupérable entre 50 et 0km/h). Enfin, pour garantir le déplacement du trolleybus en dehors du réseau aérien (déviation, retour au hangar) ou lors d'une panne de courant, une génératrice diesel de 88ch (60kW) est installée sur le véhicule. L'électricité produite par cet ensemble est injectée sur le bus continu pour permettre le fonctionnement du trolleybus sous une puissance dégradée. Les caractéristiques techniques de ce véhicule sont rappelées dans le tableau 4.22. Comme dit précédemment, ce véhicule est dépourvu de SSE à ce stade. Toutefois, si l'on considère sa consommation énergétique moyenne (1.5kWh/km) ainsi que la longueur de ses routes commerciales (de l'ordre de 10km par sens), on peut imaginer une configuration avec une batterie offrant une capacité utilisable de 15kWh et une recharge rapide (3 à 5 minutes) en bout de ligne. Ce scénario d'exploitation (et ses déclinaisons) est d'ailleurs en cours d'évaluation en France (projet Ellisup) et ailleurs dans le monde (JO Pékin 2008).

4.4.1.2 Description de l'expérimentation

Les essais qui ont permis de recueillir ces données datent de 2008. Ils faisaient partie des essais d'évaluation de l'utilisation de supercondensateurs comme dispositif anti-rupture d'alimentation électrique des trolleybus. Ce projet "Hybus" a été mené par les sociétés Irisbus, Erctel et le

Responsable	Gilles Rousseau
Période	Janvier 2008 et Avril 2008
Lieu(x)	Agglomération Lyonnaise (intra-urbain), lignes TCL 13-18-C3
Personnes impliquées	Conducteur TCL
Type de trajets	Parcours des routes commerciales, en journée, sans passager, en marquant les arrêts aux stations
Nombre de trajets	5 sans SC, 6 avec SC
Kilomètres enregistrés	35.4km sans SC, 51.9km avec SC
Kilomètres validés	35.4km et 51.9km
Enregistreur de données	Enregistreur de bus CAN (2 x CANCARD XL)
Fréquence d'échantillonnage	10Hz
Données enregistrées	Tension bus DC Courant bus DC Tension SC Courant SC Température ambiante Vitesse

TABLE 4.23 – Conditions expérimentales pour Trolleybus

laboratoire Ampère [Kreczanik 2009, Hijazi 2010, Kreczanik 2011]. Un nombre limité de trajets ont été réalisés, sur un véhicule Cristalis ETB12, et en empruntant les routes commerciales usuelles de ce véhicule (lignes 13, 18 et C3 de la ville de Lyon). Ces essais se sont déroulés dans des conditions normales de circulation, en semaine, et en journée. Les arrêts aux stations le long du parcours ont été observés mais le véhicule n'acceptait pas de passagers commerciaux. Les détails de cette expérimentation sont synthétisés dans le tableau 4.23.

4.4.1.3 Sollicitations typiques

Deux échantillons distincts ont pu être constitués à partir des données enregistrés sur ces trolleybus. Le premier échantillon intègre 5 trajets réalisés sur les routes commerciales L13 et L18 de la ville de Lyon. Une distance totale de 35.4km a été couverte par des véhicules ETB12, dans leur configuration d'origine, c'est-à-dire sans banque de supercondensateurs contre les micro-coupures d'alimentation aérienne. On se réfèrera à cet échantillon sous l'appellation "échantillon sans SC". Un second échantillon a été constitué en utilisant 6 trajets réalisés sur les routes commerciales L13, L18 et C3 (soit 3 allers/retours). Pour ce second échantillon, des versions modifiées des véhicules ont été utilisées. Ces versions intégraient en effet une banque de supercondensateurs réalisée par la société Ercteel à base de composants Maxwell. Cette banque optionnelle de SC affiche une puissance maximale de

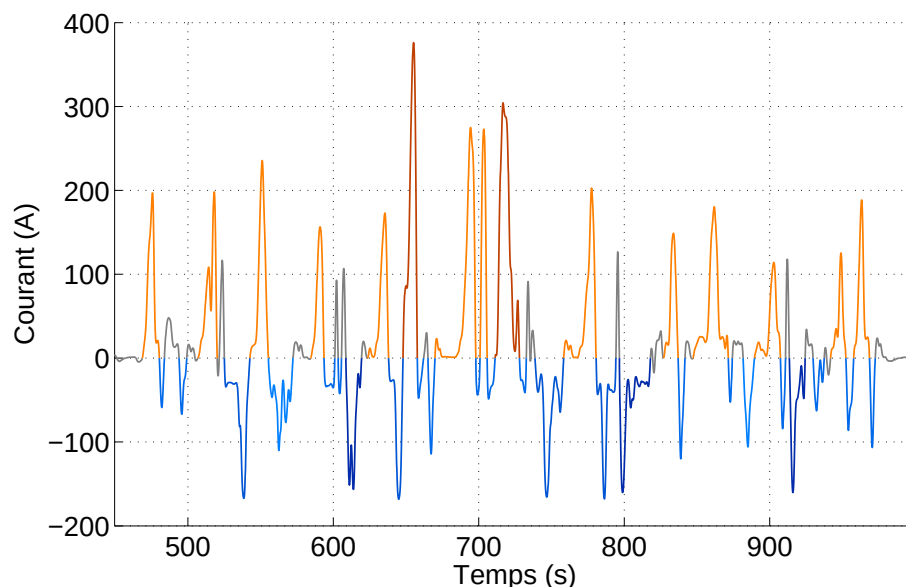


FIGURE 4.46 – Allure du profil de courant

50kW et une énergie utile de 150Wh (cf. tableau 4.22). Sa recharge s'effectue principalement lors des décélérations du trolleybus et l'énergie emmagasinée est restituée pour palier aux micro-coupures d'alimentation aérienne qui provoquent l'arrêt d'un certain nombre d'auxiliaires (compresseurs, ventilation, ...) sans ce système de stockage d'énergie. Cet échantillon sera dénommé "échantillon avec SC". Les conditions expérimentales sont fournies dans le tableau 4.23.

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
En décharge							
Occurences par 100km	672	141	40	8.5	8.5	2.8	873
Consommation par km (Wh)	717	386	213	53.4	79.4	40.6	1490
En charge							
Occurences par 100km	604	110	79	14	2.8	2.8	814
Recharge par km (Wh)	58.3	28.0	24.1	9.6	3.6	5.2	128.9

TABLE 4.24 – Données kilométriques de l'échantillon sans SC

La figure 4.47 et le tableau 4.24 présentent les résultats obtenus sur l'échantillon sans SC. D'après les figures 4.47a et 4.47c, les trois quarts (48% + 26%) de la charge consommée en décharge le sont par des impulsions (classes 1 et 2) relativement brèves (≈ 20 secondes en moyenne) et présentant un courant efficace modéré (l'essentiel de la charge est échangée en-dessous de 200A). A l'inverse, un quart de la charge consommée en décharge est attribuable aux classes n°3 à 6, qui présentent une grande capacité déchargée par impulsion (1.5 à 4Ah) et un courant efficace significativement supérieur (l'essentiel de la charge est échangée au-dessus de 300A pour les impulsions des classes 4, 5 et 6). Les classes 2 et 3 sont probablement reliées aux longues accélérations du véhicule après un arrêt en circulation jusqu'à atteindre sa vitesse de croisière. En effet, la variation d'énergie cinétique correspondant au passage de 0km/h à 50km/h s'établit à 360Wh environ. Une impulsion de la classe

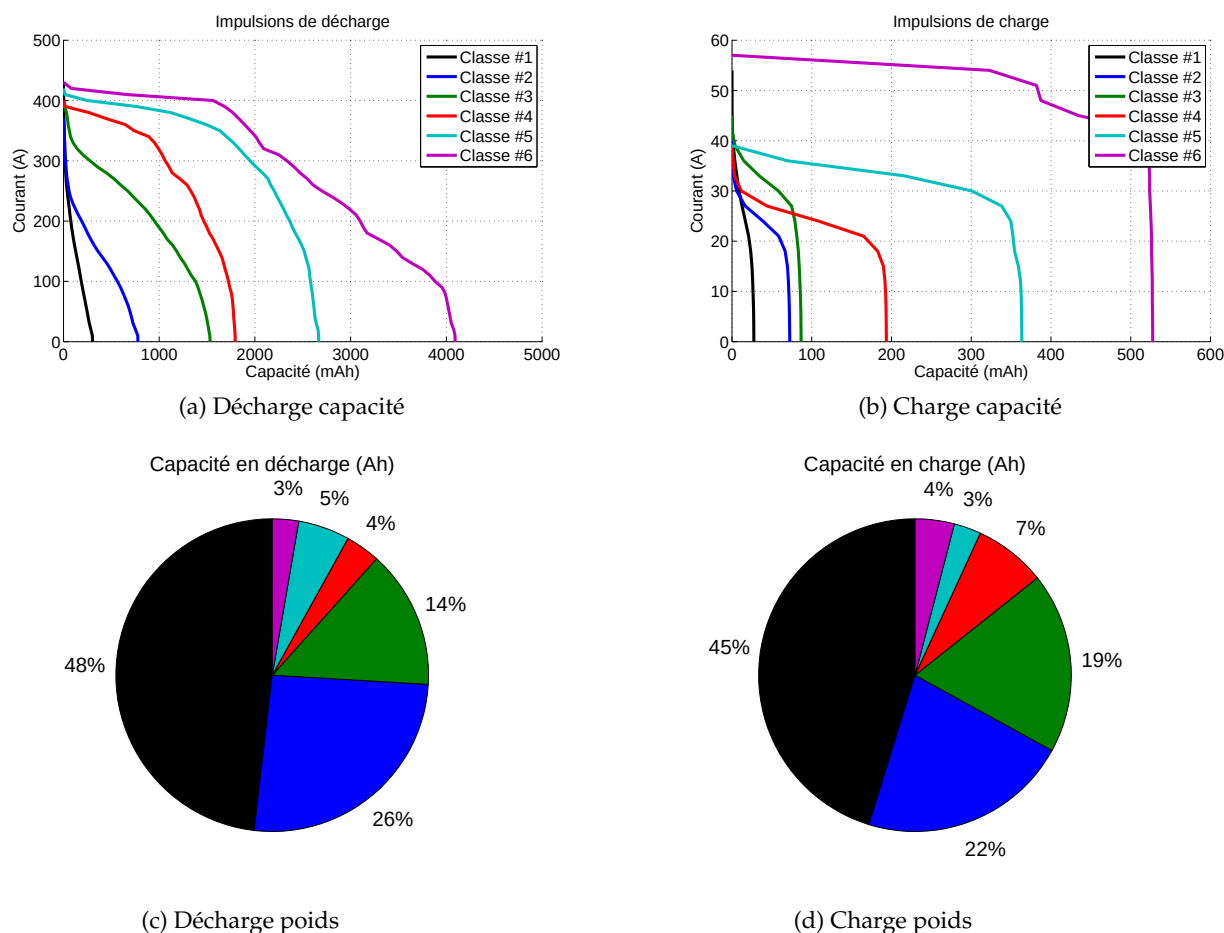


FIGURE 4.47 – Impulsions typiques de l'échantillon sans SC

n°2 consomme 280Wh environ tandis qu'une impulsion de la classe n°3 consomme 525Wh environ. Les impulsions des classes n°4 à 6, découlent peut-être des passages des pentes rencontrées sur les trajets de ce véhicule. En effet, les lignes L13 et L18 empruntent la montée de la Croix-Rousse (petite colline surplombant Lyon), dont l'altitude minimale est de 180m environ et celle du point culminant de 260m environ. Pour un véhicule de 13.4t, la variation d'énergie potentielle associée s'élève à 3kWh environ. Une impulsion de la classe n°5 consomme près d'un kWh tandis qu'une impulsion de la classe n°6 consomme près de 1.5kWh.

Dans sa configuration d'origine, les possibilités de freinage récupératif sont minimales en raison de la difficulté logistique à injecter l'énergie de freinage sur le réseau électrique aérien sans provoquer de surtension sur celui-ci. Aussi la majeure partie de l'énergie cinétique se retrouve dissipée au freinage sous forme de chaleur aux travers de rhéostats installés sur le toit du véhicule. Nous ne nous attarderons donc pas sur les figures 4.47b et 4.47d qui décrivent les impulsions typiques en charge. Les impulsions des classes n°1 à 3, qui représentent 86% de la charge récupérée, ne déplacent pas plus de 35Wh chacune, sous une puissance plafonnant à 14kW (40A). A l'opposé, les impulsions de la classe n°6 déplacent 180Wh environ soit la moitié de l'énergie cinétique acquise par ce véhicule à 50km/h. Elles ne représentent toutefois que 4% de la charge récupérée.

Globalement, ce véhicule consomme 1490Wh en décharge par kilomètre parcouru et ne récupère que 129Wh/km malgré sa masse très élevée et son usage urbain qui en font un parfait candidat aux bénéfices du freinage récupératif. On observe environ 800 impulsions de charge et 800 impulsions de décharge aux 100km, ce qui se rapproche des valeurs obtenus avec le VAE à assistance proportionnelle, et de celle du quadricycle électrique en conduite nerveuse.

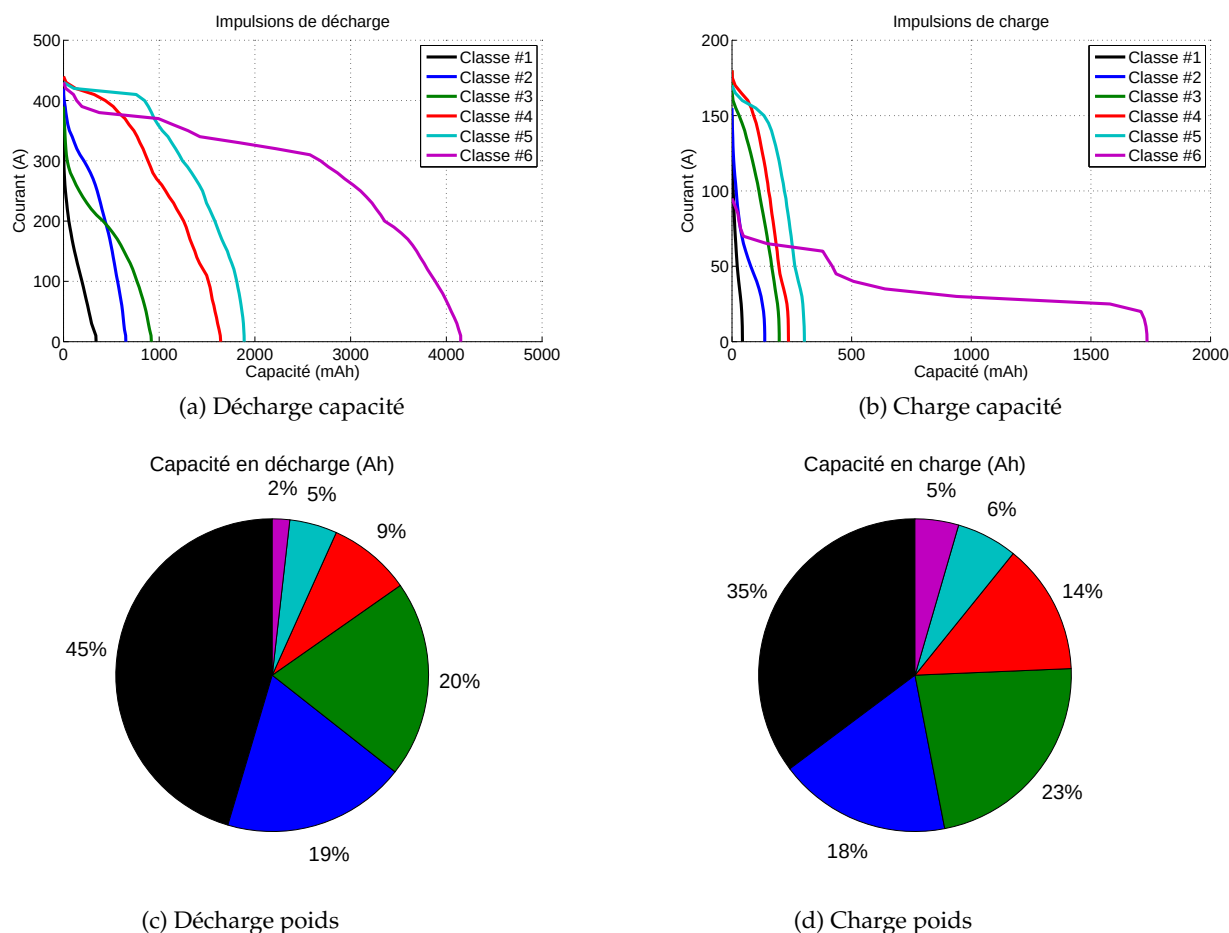


FIGURE 4.48 – Impulsions typiques de l'échantillon avec SC

Impulsions de la Classe n°	1	2	3	4	5	6	Total
En décharge							
Occurences par 100km	592	129	98	23	12	1.9	856
Consommation par km (Wh)	710	296	318	134	76.8	28.2	1562
En charge							
Occurences par 100km	596	96	85	42	15	1.9	837
Recharge par km (Wh)	91.8	46.5	59.0	35.2	16.4	11.8	260.8

TABLE 4.25 – Données kilométriques de l'échantillon avec SC

Concernant l'échantillon avec SC, la modification de l'architecture de traction électrique (ajout d'une banque de supercondensateurs) ne modifie pas les résultats obtenus en décharge par rapport à l'échantillon sans SC de façon significative. En effet, en se reportant aux figures 4.48a et 4.48c, on observe que les classes n°1 et 6 sont inchangées, aussi bien dans leurs aspects que dans leurs proportions. Les classes 4 et 5 ne changent que très peu, avec une légère diminution de la capacité par impulsion mais un renforcement dans les proportions. Les classes 2 et 3 représentent, elles, toujours 40% environ de la charge consommée en décharge. Les impulsions de la nouvelle classe n°3 se rapprochent de l'ancienne classe n°2 tandis que la nouvelle classe n°2 intègre des impulsions qui

déplacent deux fois moins de capacité par impulsion que celles de l'ancienne classe n°2. Les niveaux de courants rencontrés restent en revanche quasiment inchangés.

Les changements les plus intéressants s'opèrent parmi les résultats obtenus en charge. En effet, l'ajout de la banque de supercondensateurs, dont la recharge s'opère pendant les décélérations du trolleybus, permet de récupérer une part plus importante de l'énergie cinétique acquise par le véhicule avant les décélérations. Le tableau 4.25 confirme que l'énergie récupérée par unité de distance a fortement cru, de 100% environ (260Wh/km contre 129Wh/km). Dans le même temps, la consommation en décharge reste inchangée (1562Wh/km contre 1490Wh/km sans SC). Au final, un gain de consommation électrique globale de l'ordre de 5% est obtenu.

Si l'on descend au niveau des impulsions de charge (cf. figure 4.48b et 4.48d), on note dans un premier temps le fort accroissement des niveaux de courant atteints pendant les phases de freinage récupératif. La limite imposée de 50kW au niveau des SC, à laquelle on peut ajouter les quelques 10kW atteignables avant la modification du véhicule (renvoi sur le réseau), permet maintenant une récupération d'énergie au freinage sous une puissance proche de 60kW (175A). La classe n°1 apparaît globalement inchangée. En revanche, on note l'émergence de nouvelles classes 2 à 5, dont les impulsions déplacent 200 à 400mAh de capacité chacune (des quantités doublées par rapport à l'échantillon sans SC). Ces 4 classes, qui présentent de forts courants efficaces de recharge, représentent 60% de la charge récupérée sur ce véhicule prototype. Rappelons que l'énergie stockable dans la banque de supercondensateurs ne peut pas dépasser 150Wh, soit la quantité d'énergie déplacée par une impulsion de la classe n°5. Enfin, la classe n°6, qui représente 5% de la charge récupérée, correspond à des phases de freinage récupératif en descente (pente de la Croix-Rousse), comme le laisse supposer les quelques 600Wh récupérés (impossible à stocker dans les SC) et la limitation de puissance autour de 10kW (renvoi sur le réseau aérien bridé par le risque de surtension).

4.4.1.4 Cycles représentatifs

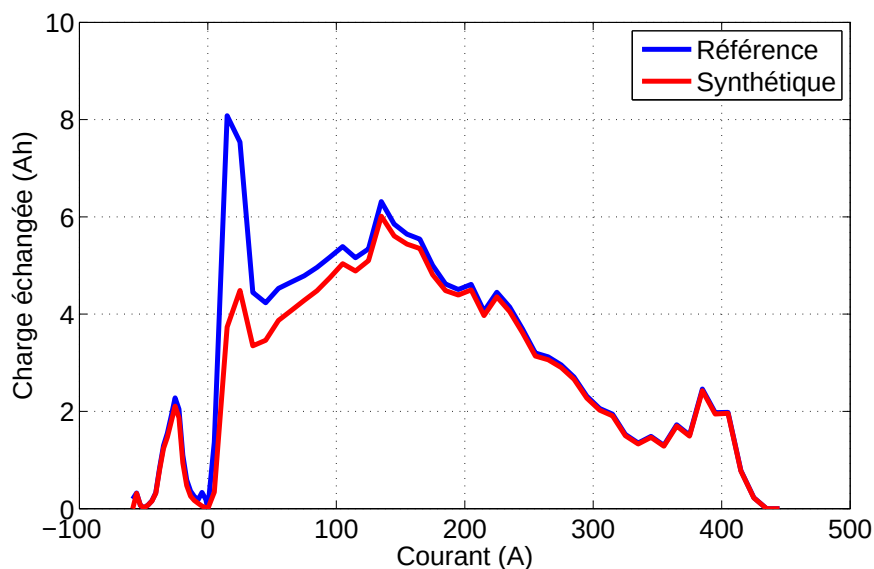


FIGURE 4.49 – Vérification du respect de la distribution du courant sans SC

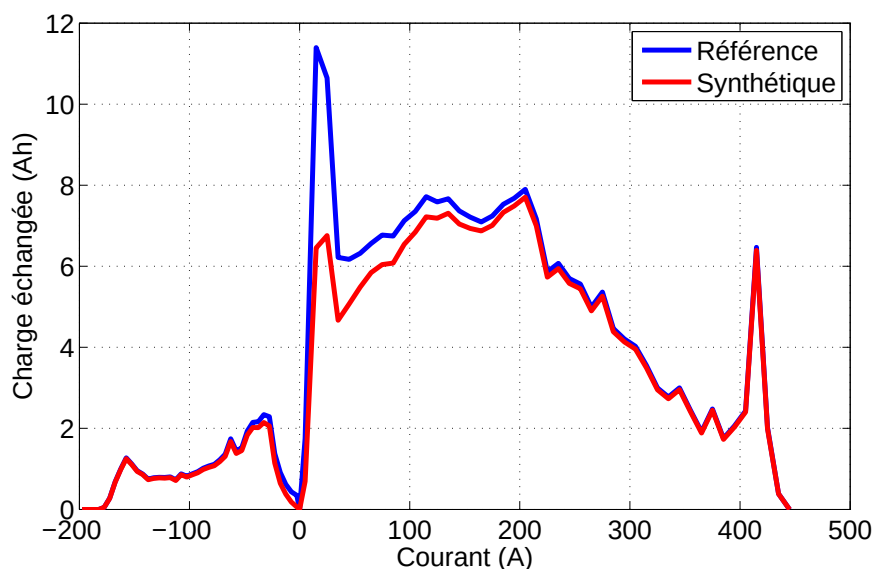
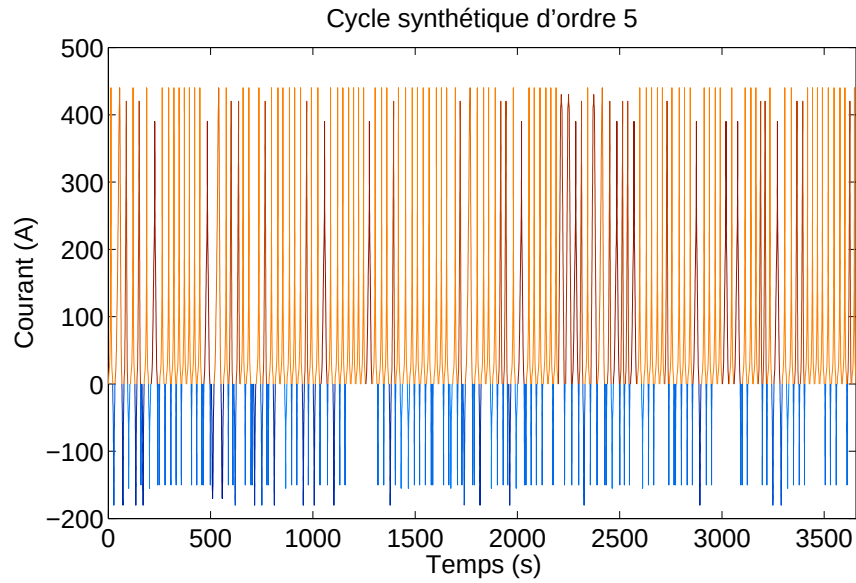


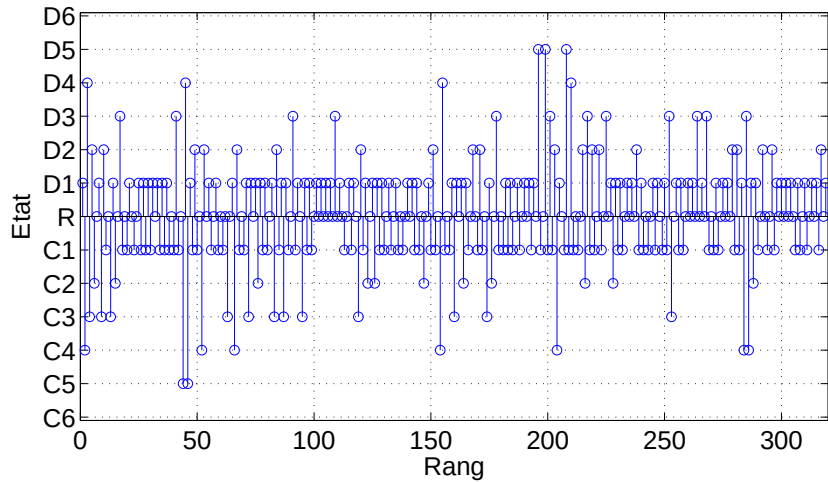
FIGURE 4.50 – Vérification du respect de la distribution du courant avec SC

Les figures 4.49 et 4.50 témoignent d'un bon niveau de préservation des histogrammes de courant entre les profils réels et leurs représentations simplifiées en 12 classes. L'écart observable sous les faibles courants découle de l'éviction de certaines impulsions jugées trop courtes ou trop peu énergétiques.

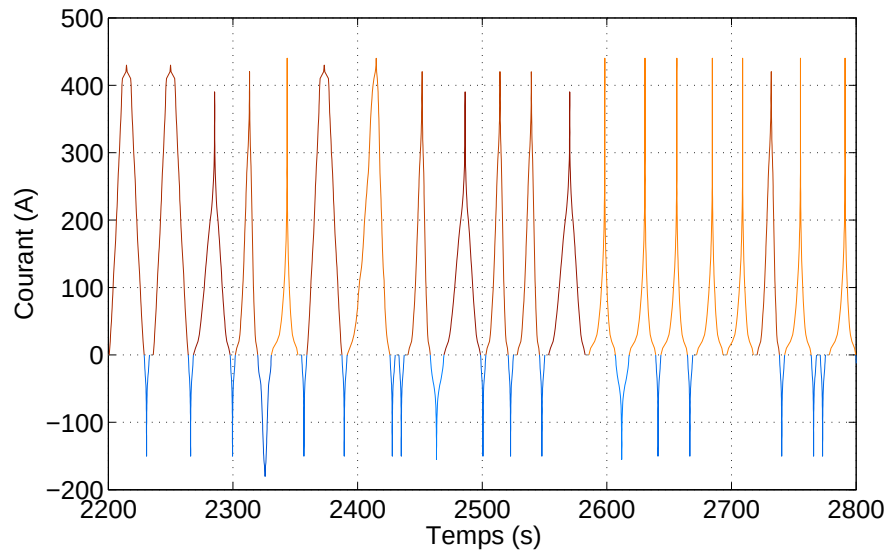
L'étude des deux échantillons au regard du critère BIC indique que l'ordre optimal de la chaîne de Markov à utiliser pour modéliser les cycles représentatifs de l'échantillon sans SC est de 4 tandis qu'un ordre 5 s'avère plus favorable pour l'échantillon avec SC. Dans l'optique de prédire l'usage



(a) Profil synthétique de courant simulant 20km



(b) Séquence synthétique obtenue d'après la chaîne de Markov d'ordre 5



(c) Zoom sur 5 minutes de ce cycle

FIGURE 4.51 – Cycle représentatif

représentatifs de batteries dans le cadre d'un bus électrique autonome, nous allons procéder à la génération d'un cycle représentatif représentant un parcours de 20km (ordre de grandeur d'une route commerciale aller/retour) avec le trolleybus équipé de supercondensateurs. Il est proposé sur la figure 4.51. La figure 4.51a donne l'allure générale de ce cycle, la figure 4.51b renseigne sur la séquence d'états générée par la chaîne de Markov à l'ordre 5 pour réaliser l'objectif (20km). Enfin, la figure 4.51c, permet de visualiser l'allure du courant du cycle représentatif sur une portion de 5 minutes. Par souci de lisibilité, les repos entre impulsions classées présentent une durée constante arbitraire de 3 secondes sous un courant de 0A.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus sur cinq véhicules électrifiés, instrumentés puis étudiés en usage réel, suite à l'application de l'approche proposée. Plusieurs sous-échantillons ont été présentés afin d'illustrer les possibilités d'analyses de notre outil et de quantifier la dépendance des profils de mission des batteries de traction aux environnements rencontrés. Pour chaque véhicule, les données relatives aux excursions de profondeur de décharge et aux températures mesurées ont été renseignées lorsque cela était possible. Enfin, un cycle représentatif de l'usage, généré par la chaîne de Markov retenue selon le critère BIC à partir des motifs élémentaires que constituent les impulsions typiques identifiées, a été proposé pour chaque véhicule.

Au chapitre suivant, nous étudierons les résultats expérimentaux obtenus à la suite de campagnes de cyclage visant à valider certaines hypothèses de reconstruction des cycles représentatifs ou à évaluer la performance d'ensemble de notre approche pour la prédiction de durée de vie.

Validation Expérimentale

Sommaire

5.1 Etudes individuelles sur les impulsions	147
5.1.1 Comparaison de trois impulsions	150
5.1.2 Influence de la forme	152
5.1.3 Influence de la température	156
5.1.4 Influence du niveau de courant	157
5.2 Apport potentiel des Super-Condensateurs	159
5.3 Cas appliqué	161

Au cours des trois années écoulées, quelques campagnes de vieillissement ont été conduites pour tester certaines hypothèses et pour tenter de valider l'approche adoptée. Ces différents essais ont été réalisés dans les installations de l'IFSTTAR, à Bron. Pour chaque essai, les conditions expérimentales (matériel, échantillon, protocole) sont décrites sous la forme d'un tableau de synthèse. Comme souvent avec ce genre d'essai, la contrainte de temps est problématique et il est difficile d'effectuer tous les essais que l'on voudrait.

5.1 Etudes individuelles sur les impulsions

Après avoir isolé différentes familles d'impulsions de courant, nous nous sommes intéressés à l'influence individuelle que pourrait avoir telle ou telle impulsion. L'absence de différence entre impulsions sur le plan du vieillissement invaliderait la stratégie adoptée. Toutefois, démontrer une telle sensibilité ou insensibilité et la généraliser à toutes les technologies de batteries Lithium-ion sort du cadre de cette seule étude. Soulignons d'ailleurs que l'extrapolation des résultats obtenus à d'autres cellules que celles utilisées lors des essais n'est aucunement garantie.

En se basant sur un échantillon partiel des données recueillies à bord du véhicule Aixam Megacity, différentes impulsions typiques ont été utilisées lors des campagnes de vieillissement. Les impulsions (ou motifs ou profils) utilisées sont décrites dans la figure 5.1 et leurs caractéristiques électriques principales sont données dans le tableau 5.1. La labellisation adoptée (A à H) reflète la chronologie des essais menés.

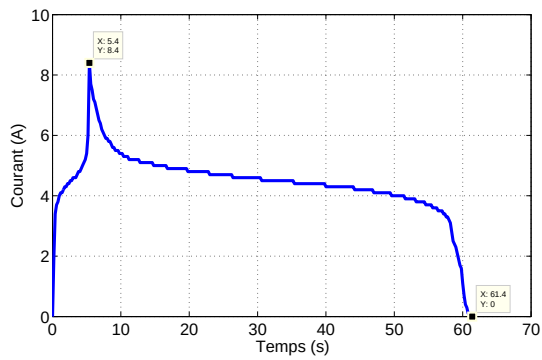
Un soin particulier a été porté d'une part à la taille des échantillons sous test et d'autre part à la régularité et à la fréquence élevée des caractérisations intermédiaires. Le premier point est essentiel pour garantir la validité du résultat obtenu et s'assurer qu'il ne s'agit pas d'une variabilité due au composant. Lors de la caractérisation initiale, certaines cellules présentant des capacités ou des impédances éloignées du reste de la population ont été écartées et remplacées par des cellules aux caractéristiques plus communes. Pour chaque test, un échantillon de trois cellules a été constitué. Ces cellules ont été cyclées en association série à l'aide d'un circuit électronique d'interface développé sur mesure. Le rôle de ce système, appelé "routeur 3 cellules", consiste à commuter l'arrangement des cellules pour permettre une association série des trois cellules ou la sélection individuelle de chaque cellule. Cette sélection individuelle permet à la fois de caractériser une cellule donnée et de procéder

à sa mise à SOC individuelle. Cette dernière opération permet de s'affranchir d'un système d'équilibrage externe. En effet, chaque cellule étant entièrement rechargée de façon individuelle toutes les 48h, aucune divergence des états de charge n'est possible. Ce système a correctement rempli son office lors de l'intégralité des campagnes et aucune surcharge ni surdécharge n'a été détectée. La variabilité entre cellules d'un même échantillon a été évaluée et les courbes de résultats ci-après intègrent des barres d'erreur pour indiquer les écarts min-max mesurés. Dans l'ensemble, les résultats présentent une homogénéité tout à fait satisfaisante.

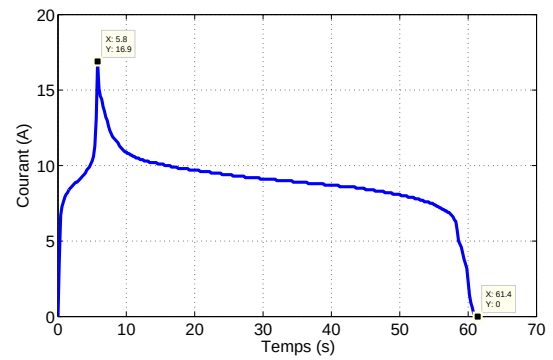
Enfin, il est nécessaire de préciser que les valeurs indiquées à propos des plages de SOC parcourues ou de la DOD s'entendent dans les conditions initiales nominales. La mise à SOC à 90% est réalisée en déchargeant 10% de la capacité nominale de ces cellules (soit 230mAh) à la suite d'une recharge complète selon les préconisations du constructeur. La quantité de charge consommée par un cycle en décharge est constante et établie elle-aussi sur la base de la capacité nominale. Avec la diminution de la capacité et compte tenu que les quantités décrites précédemment sont maintenues constantes, la plage de SOC balayée a tendance à se dilater et à se déplacer vers des valeurs inférieures. A partir de 20% de diminution de la capacité résiduelle par rapport à la capacité initiale, les cellules sont intégralement vidées lors de chaque cycle. Ce cas de figure n'a été rencontré qu'une fois ; lors de la campagne GH, à 10°C puis à 30°C. Les valeurs de SOC et de DOD utilisées ont été choisies arbitrairement de manière à se placer dans le cadre d'une application "véhicule électrique" plutôt conservatrice.

Profil	A	B	C	D	E	F	G	H
Classe n° (/5)	5	5	3	1	3	1	5	5
Position du pic (%)	9	50	17	48	17	48	9	50
Capacité (mAh)	75.4	75.4	34.9	5.3	69.9	10.6	150.8	150.8
Durée (s)	61.4	61.4	54.8	17.2	54.8	17.2	61.4	61.4
Courant moyen (A)	4.4	4.4	2.3	1.1	4.6	2.2	8.8	8.8
Courant max. (A)	8.4	8.4	7.8	9.2	18.8	18.8	16.9	16.9
Courant efficace (A)	4.5	4.5	2.7	2.0	5.5	4.0	9.1	9.1
Motifs pour 70%DOD	21	21	46	301	23	157	11	11

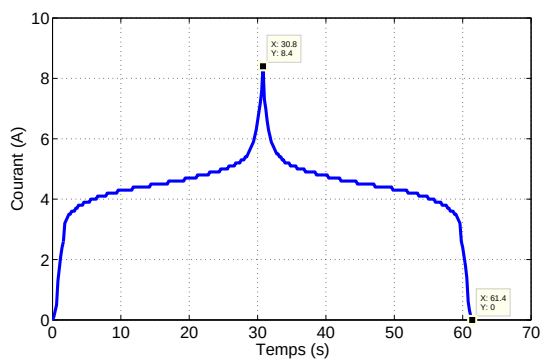
TABLE 5.1 – Caractéristiques des impulsions



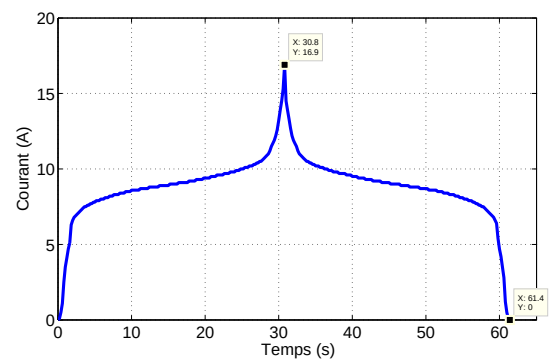
(a) Profil A



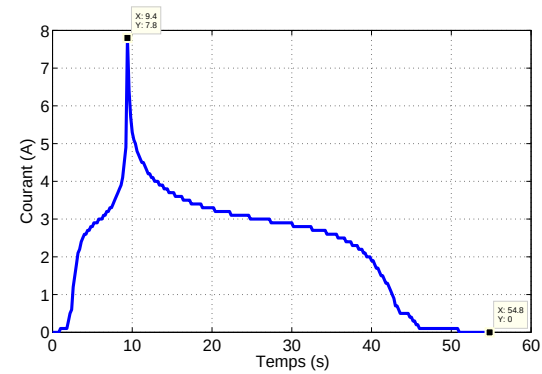
(b) Profil G



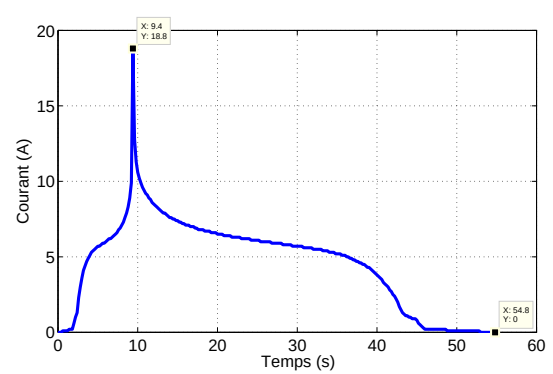
(c) Profil B



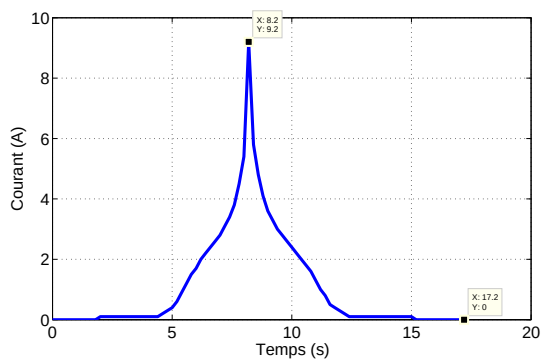
(d) Profil H



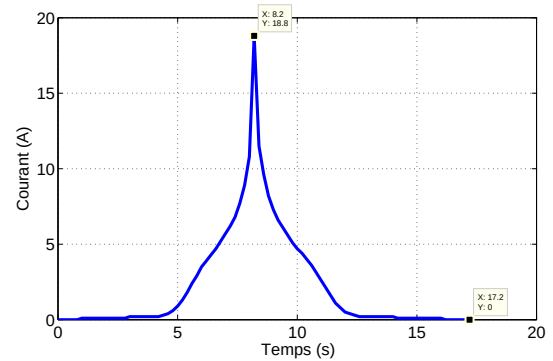
(e) Profil C



(f) Profil E



(g) Profil D



(h) Profil F

FIGURE 5.1 – Impulsions utilisées pour le vieillissement

5.1.1 Comparaison de trois impulsions

La figure 5.2 présentent les résultats de vieillissement obtenus lors des cyclages selon les motifs E, F et G qui représentent trois impulsions typiques de décharge relevées sur le véhicule Aixam Megacity. Ces impulsions sont représentés dans les figures 5.1f, 5.1h et 5.1b. Les conditions expérimentales de cet essai sont décrites par le tableau 5.2.

A la suite d'un partitionnement en 5 classes, nous avons retenu les deux classes extrêmes (1 et 5) ainsi que la classe médiane (n°3). Ces impulsions présentent donc des caractéristiques de courants efficaces et moyens assez variables (cf. tableau 5.1). On observe clairement un effet distinct de chaque classe d'impulsion lors d'un cyclage individuel. La classe n°1 (profil F) a provoqué la plus faible diminution de la capacité par unité de charge consommée. La classe n°3 (profil E) a eu un effet légèrement plus important mais la séparation entre les deux courbes est très faible. On note toutefois la plus grande dispersion des résultats avec la classe n°3 alors que les résultats de la classe n°1 (profil F) sont très homogènes. Enfin la classe n°5 (profil G), celle des impulsions les plus énergétiques et affichant le plus grand courant efficace, a provoqué une dégradation beaucoup plus importante, en particulier si l'on s'intéresse à la portion de la courbe au-delà des 300Ah (≈ 150 cycles). La séparation entre les résultats de la classe n°5 et ceux des deux autres classes est clairement marquée. Ainsi comme nous avons pu le voir en 2.3.2, les événements de charge et de décharge les plus extrêmes semblent provoquer une dégradation plus rapide des batteries Lithium-ion, en tout cas lorsqu'ils sont considérés individuellement. A contrario, sur cet échantillon de cellules plutôt performantes (en terme de durée de vie), la distinction entre les impulsions les plus courantes est peu marquée. Ces observations partielles doivent être complétées par des campagnes de vieillissement sur d'autres échantillons (électrochimie différente, fabricant différent).

Période	Février-Juin 2012
Matériel	Banc Arbin, enceinte climatique, routeur 3 cellules, 2 voies
Caractérisations	Intervalle 48h, 50°C
Nombre de cycles	>600
Plage de SOC (DOD)	20-90% (70%)
Température	50°C ambiant
Protocole de charge	Courant constant, 2.3A, 1610mAh, pas de phase CV
Profil(s)	E, F et G (cf. figure 5.1)
Echantillon sous test	9 Cellules $LiFePO_4$ /graphite A123 26650 2.3Ah 3 cellules cyclées selon le profil E 3 cellules cyclées selon le profil F 3 cellules cyclées selon le profil G

TABLE 5.2 – Conditions expérimentales de l'essai sur l'impact individuel des impulsions

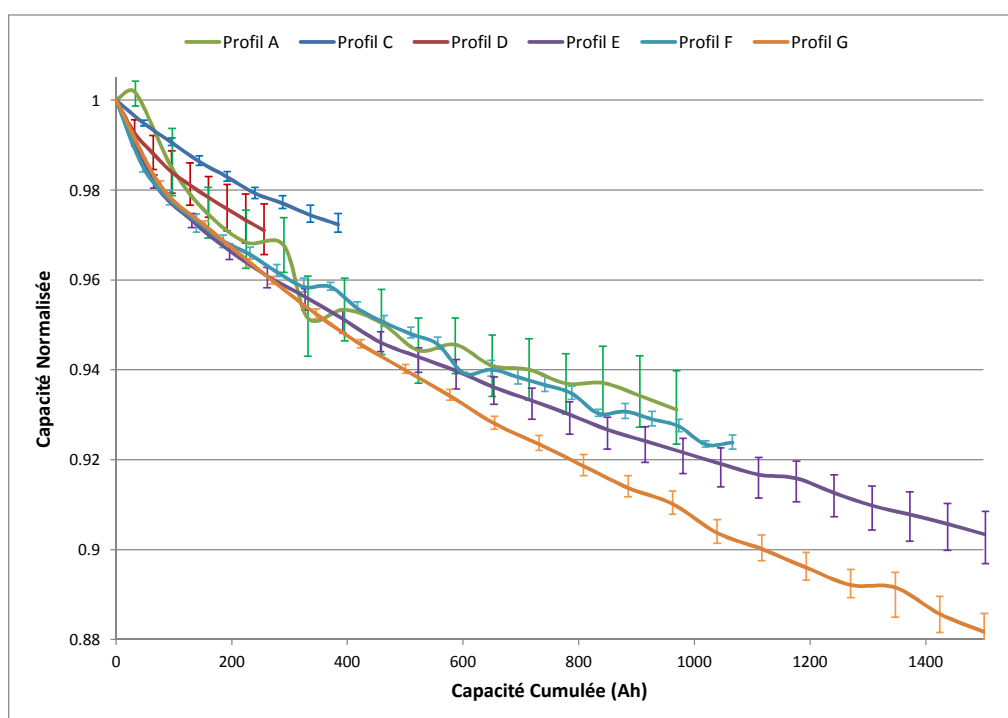


FIGURE 5.2 – Evolution des capacités des cellules selon les profils de cyclage

5.1.2 Influence de la forme

L'un des inconvénients de la transformation des impulsions que nous opérons tient au fait que l'allure temporelle de l'impulsion se retrouve perdue. En vue de procéder à la reconstruction de cycles représentatifs, il était nécessaire de déterminer si la forme temporelle de l'impulsion reconstruite pouvait avoir une quelconque influence sur la dégradation des cellules Lithium-ion. En particulier, nous avons testé deux variantes d'une même impulsion typique. La première variante présentait une forme temporelle symétrique avec un maximum de courant situé à l'exacte moitié de la durée de l'impulsion. La seconde variante s'inspirait elle des observations faites sur les relevés et le pic de l'impulsion était placé à l'abscisse moyenne des pics de chaque impulsion de la classe considéré. Souvent, ce point se situe autour de 10% de la durée de l'impulsion. Dans les deux cas, le courant croît et décroît de façon monotone de part et d'autre du pic.

Cet essai a été mené à deux reprises, en doublant le niveau de courant entre les deux campagnes. Les conditions expérimentales de ces deux campagnes sont données par les tableaux 5.3 et 5.4 (courant doublé). Les figures 5.3 et 5.4 (courant doublé) représentent l'évolution comparée des capacités normalisées des cellules constituant l'échantillon. La courbe donne la valeur moyenne des trois cellules cyclées selon un profil en particulier, tandis que les barres verticales renseignent sur les écarts parmi ces trois cellules. On constate que lors des deux campagnes, la forme de l'impulsion utilisée ne produit pas d'effet mesurable sur la dégradation des cellules. En effet, ces courbes ne sont pas séparables deux à deux. Cette insensibilité à la forme temporelle de l'impulsion semble perdurer lors des changements de températures (cf. figure 5.4).

Une analyse par capacité incrémentale (ICA) peut être conduite afin de tenter de déterminer les mécanismes de diminution de la capacité. Cette technique est décrite dans les travaux de [Dubarry 2009a, Dubarry 2011b, Dubarry 2011a, Groot 2012]. Ici l'obtention de ces profils a été obtenue à partir des courbes de charges réalisées à C/1. Ce taux de recharge relativement élevé ne constitue pas une condition optimale pour la réalisation d'une ICA dans la mesure où il conduit à une dilatation généralisée du spectre en raison des limitations cinétiques au sein de la cellule [Dubarry 2009a]. Toutefois, les résultats bénéficient d'une résolution suffisante pour discriminer les signatures des principaux modes de diminution de la capacité (cf. figure 2.43). Si l'on s'intéresse maintenant à la figure 5.5, et que l'on compare les profils deux à deux (A et B, G et H), on observe que les signatures de dégradation des cellules sont rigoureusement identiques. Ceci confirme que la forme temporelle d'une impulsion ne semble pas avoir d'influence sur la dégradation des cellules testées. Les cellules cyclées selon les profils A et B présentent une diminution de leur capacité de l'ordre de 7%. A ce stade, qui représente un tiers de la vie commerciale des batteries Lithium-ion pour véhicule électrique, la signature observée sur les graphes ICA indique que cette perte de capacité est principalement imputable à une diminution de la quantité de Lithium cyclable. En effet, en accord avec la figure 2.43a (page 60), la seule diminution du pic localisé à 3.4V, toutes choses égales par ailleurs, est caractéristique d'une perte de Lithium cyclable. Sur les échantillons cyclés à l'aide des profils G et H, là encore les signatures sont rigoureusement identiques. Cette fois-ci la diminution de capacité des cellules s'élève à 21% de la capacité initiale. Cet essai couvre donc l'ensemble de la vie d'une batterie Li-ion pour véhicule électrique. A ce stade de vieillissement, la perte de Lithium cyclable s'est encore accentuée avec la disparition complète du pic localisé à 3.4V. Toutefois, ce n'est plus le seul mode de diminution de capacité mesurable. En effet, on note la légère diminution de l'amplitude du pic localisé à 3.28V et l'apparition d'un plateau entre 3.4 et 3.5V. Ces deux observations sont compatibles avec la signature d'une perte de matière active d'anode (graphite). Par rapport à la figure 2.43b (page 60), la signature est légèrement différente car elle se combine avec celle de la perte de Lithium cyclable. En particulier le pic central ne semble pas décroître. Avec une cellule de composition LFP/graphite, il est cohérent d'observer ces deux modes de diminution de la capacité plutôt que celui impliquant la perte de matière active à la cathode car les cathodes LFP sont notablement stables en cyclage. Si

le cyclage devait continuer, il est probable qu'un nouveau pic se manifesterait entre 3.5 et 3.6V en lien avec une accumulation massive de Lithium métallique en surface de l'anode en fin de charge. Il s'agit en effet de la conséquence logique de la perte significative de matière active d'anode. Enfin, on note une augmentation de l'impédance dont le marqueur est la translation du profil final vers la droite (tension plus élevée lors de la charge).

Période	Juin-Septembre 2011
Matériel	Banc Digatron, enceinte climatique, routeur 3 cellules, PC Labview
Caractérisations	Intervalle 40 cycles (48h), 50°C
Nombre de cycles	>600
Plage de SOC (DOD)	20-90% (70%)
Température	50°C ambiant
Protocole de charge	Courant constant, 2.3A, 1596mAh, pas de phase CV
Profil(s)	A Vs. B (cf. figure 5.1)
Echantillon sous test	6 Cellules $LiFePO_4$ /graphite A123 26650 2.3Ah 3 cellules cyclées selon le profil A "réel" 3 cellules cyclées selon le profil B "centré"

TABLE 5.3 – Conditions expérimentales de l'essai sur l'influence de la forme AB

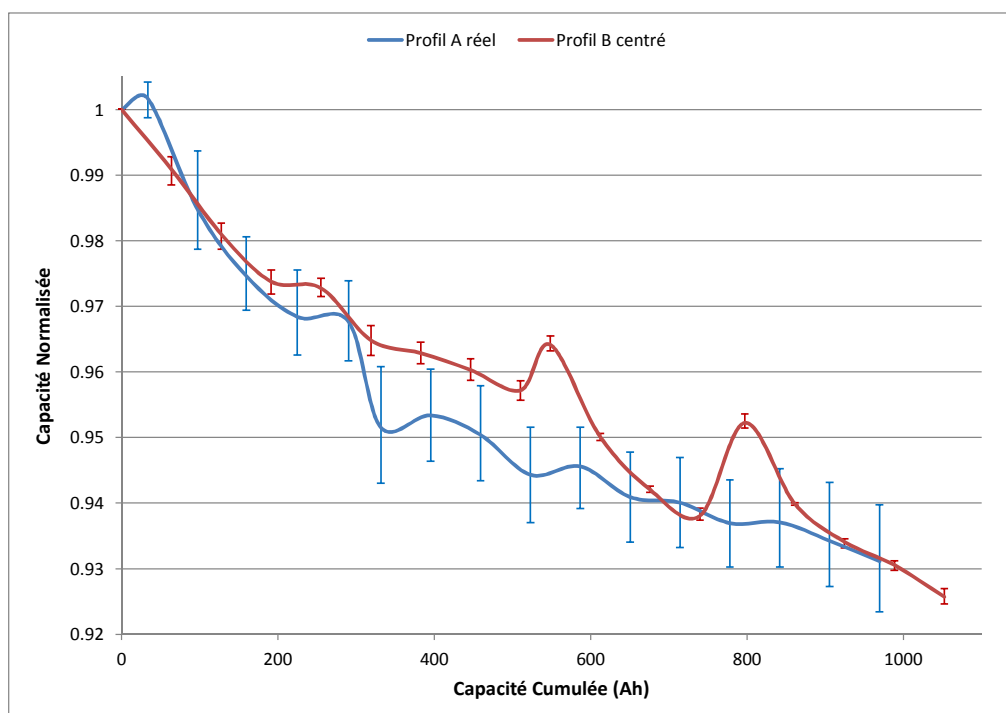


FIGURE 5.3 – Evolution des capacités des cellules A et B

Période	Mars-Juin 2012
Matériel	Banc Arbin, enceinte climatique, routeur 3 cellules, 2 voies
Caractérisations	Intervalle 40 cycles (48h), température identique au cyclage
Nombre de cycles	>1800
Plage de SOC (DOD)	20-90% (70%)
Température	50°C ambiant, puis 10°C puis 30°C
Protocole de charge	Courant constant, 2.3A, 1638mAh, pas de phase CV
Profil(s)	G Vs. H (cf. figure 5.1)
Echantillon sous test	6 Cellules $LiFePO_4$ /graphite A123 26650 2.3Ah 3 cellules cyclées selon profil le G "réel" 3 cellules cyclées selon le profil H "centré"

TABLE 5.4 – Conditions expérimentales de l'essai sur l'influence de la forme GH

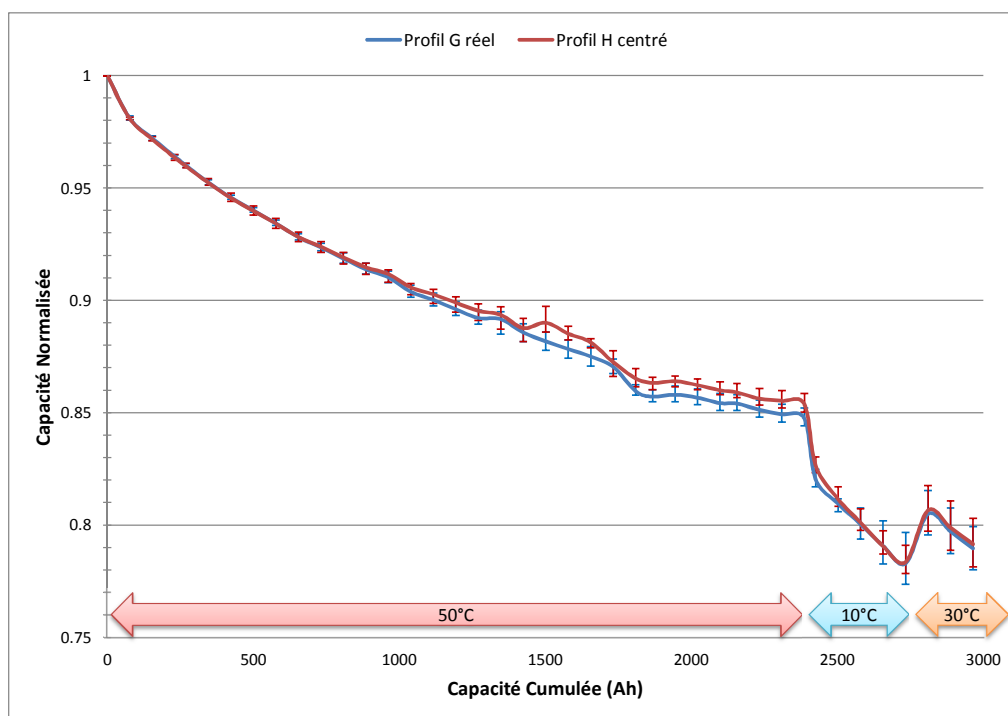


FIGURE 5.4 – Evolution des capacités des cellules G et H

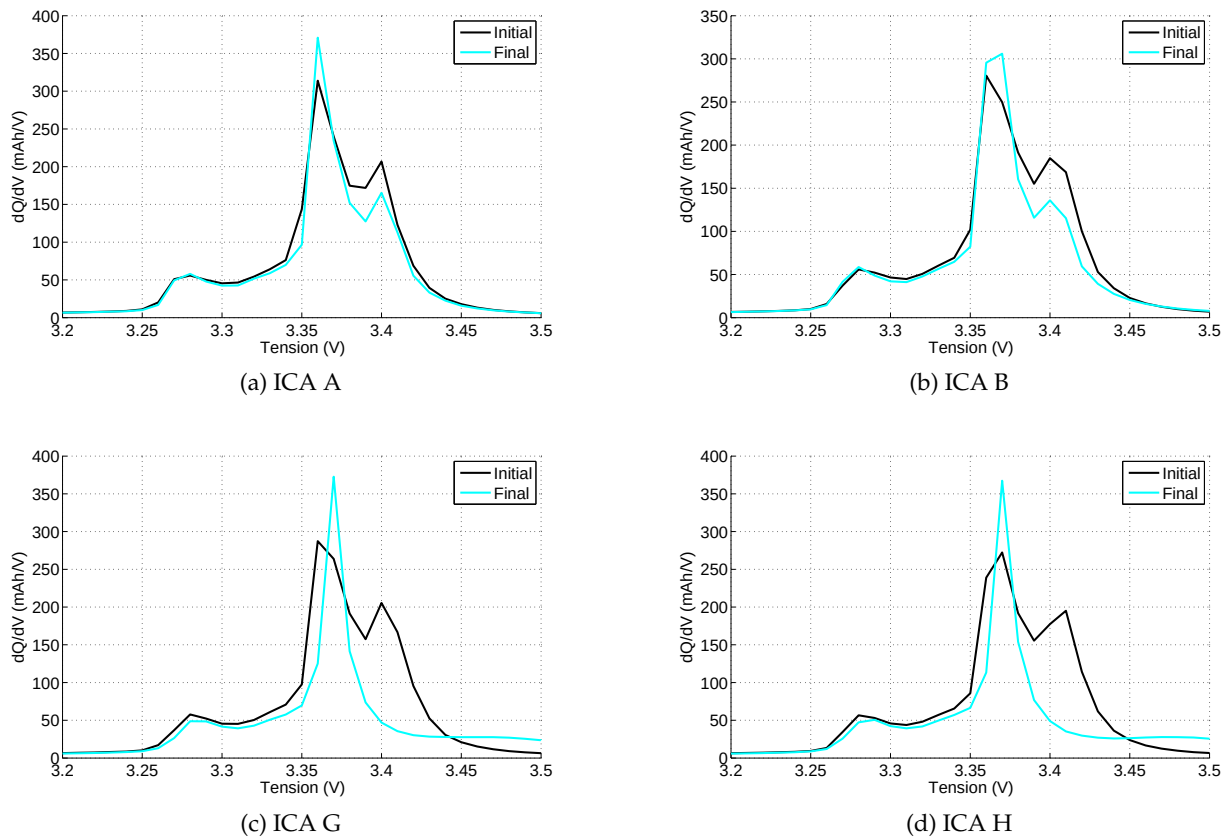


FIGURE 5.5 – Analyse par capacité incrémentale sur les cellules A, B, G et H

5.1.3 Influence de la température

Lors de la campagne de vieillissement G et H (cf. figure 5.4 et tableau 5.4), la température a été modifiée lors des deux dernières semaines. La température ambiante de 50°C a été abaissée à 10°C en cours de cyclage et maintenue pendant 10 jours. Ensuite, la température ambiante a été remontée à 30°C, toujours en cours de cyclage. Le résultat obtenu en termes de dégradation des cellules sous test a été contre-intuitif. En effet, en référant à la figure 5.4, on remarque que le rythme de dégradation des cellules testées (les 6) s'est accéléré en passant de 50 à 10°C alors que cette variation de température est censé produire l'effet inverse d'après la littérature (cf. §2.3.2.1). D'après les pentes mesurées, l'ordre des températures selon le facteur d'accélération de la dégradation est le suivant : $10 > 30 > 50$. Les sauts de capacités observables sont le résultat de la variation de température lors de la mesure de capacité. Rappelons que celle-ci décroît avec la diminution de la température.

Il est difficile de proposer une explication pour ce phénomène inattendu. Toutefois, sur la base des mesures de capacités effectuées et de leur analyse par ICA, il semble se produire une accélération du rythme de dégradation de l'anode graphite lorsque la température chute. En s'attardant sur la figure 5.6, on reconnaît la signature (disparition du pic localisé à 3.47V) d'une diminution de la capacité par la perte d'une partie du Lithium cyclable entre 0 et 2300Ah (1000 cycles complets équivalents). Entre 2300 et 2500Ah, l'abaissement de la température provoque une augmentation (temporaire) de l'impédance de la cellule ce qui provoque la translation du profil ICA vers la droite. On constate également la diminution des amplitudes des pics localisés à 3.35 et 3.43V (abscisses à 50°C). Ces réductions d'amplitude, accompagnées de l'émergence d'un plateau entre 3.54 et 3.59V, sont potentiellement symboliques d'une diminution de la capacité par perte de matière active à l'anode.

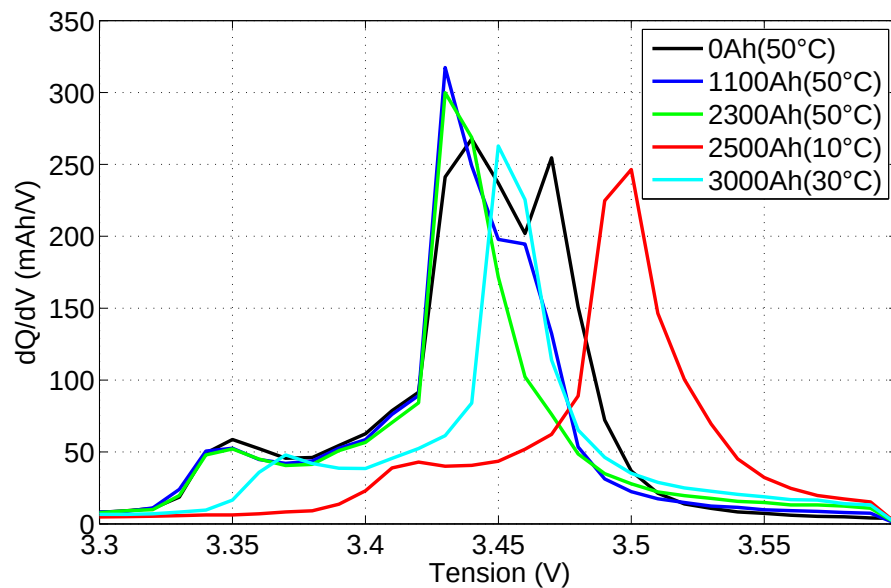


FIGURE 5.6 – Analyse par capacité incrémentale sur une cellule G, avec suivi de l'évolution en fonction des Ah déchargés au cours de la vie de la cellule.

5.1.4 Influence du niveau de courant

Période	Juin-Août 2011 puis Janvier-Juin 2012
Matériel	Banc Digatron, enceinte climatique, routeur 3 cellules, PC Labview
Caractérisations	Intervalle 48h, 50°C
Nombre de cycles	>600
Plage de SOC (DOD)	20-90% (70%)
Température	50°C ambiant
Protocole de charge	Courant constant, 2.3A, 1610mAh, pas de phase CV
Profil(s)	A, C, D, E, F ,G (cf. figure 5.1)
Echantillon sous test	18 Cellules $LiFePO_4$ /graphite A123 26650 2.3Ah 3 cellules cyclées selon chaque profil

TABLE 5.5 – Conditions expérimentales de l'essai sur l'influence du niveau de courant

Comme en témoigne la figure 5.1, les profils E, F et G sont respectivement identiques aux profils C, D et A avec un doublement du niveau de courant. Ce doublement du niveau de courant a été rendu nécessaire en vue d'accélérer les campagnes de vieillissement en raison du temps imparti limité. La figure 5.2 permet de jauger l'effet de ce doublement de courant sur le rythme de dégradation des

cellules. Si l'on compare les profils deux à deux, on constate que ce sont les cyclages C et E, basés sur la classe n°3 (intermédiaire), qui présentent la plus forte variation en termes de perte de capacité (2.8% contre 4.9% après 400Ah déchargés). Les profils D et F, basés sur la classe n°1 (minimale), ne divergent que très peu (2.9% contre 3.6% après 250Ah déchargés). De plus, leur séparation est tout juste suffisante. Enfin les profils A et G, basés sur la classe n°5 (maximale), présentent un écart de 2% de la capacité nominale après environ 1000Ah déchargés (6.9 contre 9%).

La proximité des courbes de capacité en réponse aux cyclages A et F semble indiquer que le courant efficace qui caractérise le profil de cyclage constitue la métrique de choix pour juger de la sévérité d'un cyclage. En effet, les cyclages A et F partagent des valeurs de courant efficace assez proches (4.5 et 4.0A resp.) alors que toutes leurs autres caractéristiques diffèrent significativement (rapport 2 à 7 sur courant moyen, max., durée, capacité par impulsion). Néanmoins, ces deux cyclages, à l'instar des cyclages C et D, présentent des variabilités intra-échantillon très différentes. Dans une batterie, les variations de dégradation d'une cellule à une autre sont potentiellement dommageables à la durée de vie de l'ensemble de la batterie. En effet, une cellule présentant une dégradation plus rapide que les autres constituera un maillon faible et pénalisera la performance d'ensemble de la batterie.

Enfin, toujours en se basant sur la figure 5.2, on constate que les observations faites au paragraphe 5.1.1 sur l'impact individuel des impulsions des classes 1, 3 et 5 ne sont pas intégralement vérifiées avec ces niveaux de courant divisés par deux. En effet, les classes 1, 3 et 5 (D, C et A resp.) ne présentent pas le même ordre que précédemment en termes de dégradation des cellules. En particulier les classes 1 et 3 restent proches mais présentent une inversion sur l'échelle de l'impact individuel. En revanche, la classe n°5 conserve son caractère de sollicitation la plus sévère. La séparation des effets des classes 1 et 5 (D et A resp.) n'est pas très claire, en tout cas à ce stade de vieillissement.

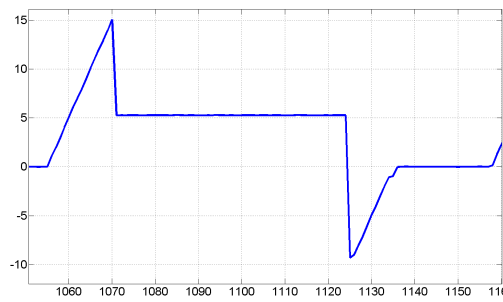
5.2 Apport potentiel des Super-Condensateurs

Période	Automne 2009
Matériel	Banc Digatron, enceinte climatique Friocell, PC Labview
Caractérisations	Intervalle 150 cycles (7j), Impédancemètre Biologic, 25°C
Nombre de cycles	600
Plage de SOC (DOD)	17-97% (80%)
Température	58°C ambiant
Protocole de charge	Courant constant, 3A, 3.6V, pas de phase CV
Profil(s)	NEDC sans SC dit "profil 1", batterie seule (cf. figure 5.7a) NEDC avec SC dit "profil 2", batterie+SC (cf. figure 5.7c)
Echantillon sous test	4 Cellules $LiFePO_4$ /graphite A123 26650 2.2Ah (lot CEA) 1 cellule cyclée selon profil batterie seule (49) 1 cellule cyclée selon profil batterie + SC (51) 1 cellule cyclée selon profils alternés tous les 100 cycles (52) 1 cellule témoin en vieillissement calendaire (47)

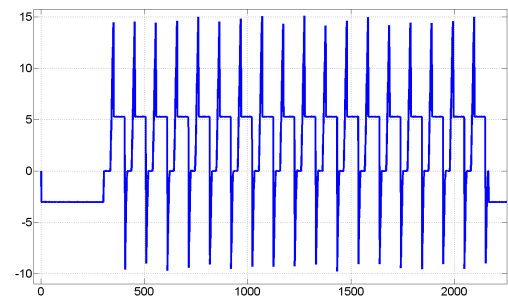
TABLE 5.6 – Conditions expérimentales de l'essai

Pour faire suite à quelques résultats antérieurs obtenus par l'IFSTTAR et Ampère en 2009, un vieillissement par cyclages comparés a été conduit. Son objectif consistait à déterminer si l'altération volontaire d'un profil de courant élémentaire était susceptible d'engendrer une différence significative au niveau de la durée de vie des batteries testées. L'objectif visé consistait à établir si l'usage conjoint de batteries Lithium-ion et de supercondensateurs constituait une piste intéressante pour prolonger la vie des batteries. Les cycles utilisés ainsi que les conditions expérimentales sont décrites par la figure 5.7 et le tableau 5.6. Les profils 1 (batterie seule) et 2 (batterie+SC) ont d'abord été utilisés de façon indépendante. Ensuite une cellule a été cyclée en alternant ces deux profils tous les 100 cycles afin de déterminer s'il était possible d'observer des ruptures de pente propres à chaque profil. Enfin, une cellule témoin a été placée en vieillissement calendaire dans la même enceinte pour quantifier la contribution du seul vieillissement calendaire sous cette température élevée. La cellule n°47 a été placée dans l'enceinte climatique avec un SOC de 100% sur les 150 premiers cycles puis 40% sur les 450 derniers.

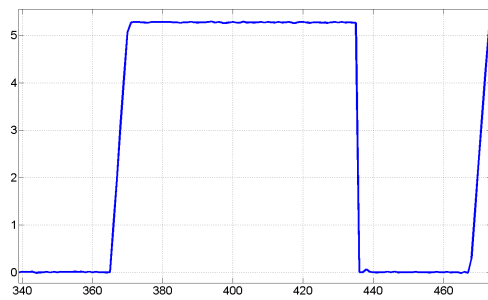
En s'appuyant sur la figure 5.8, il semble que l'usage de supercondensateurs pour soulager les batteries d'une partie des sollicitations rencontrées soit bénéfique. En effet, la capacité de la cellule cyclée selon le profil n°1 affiche une perte 40% supérieure à celle cyclée selon le profil n°2 (17.9 contre 11.7%). L'autre différence très significative se situe au niveau de l'augmentation de l'impédance qui est divisée par un facteur 3 avec l'assistance des supercondensateurs. Par ailleurs, l'effet du cyclage est distinct de l'effet du vieillissement calendaire. En revanche, la cellule n°52, cyclée selon le profil alterné (1 puis 2 puis 1 ...) ne présente pas les ruptures de pente espérées. En l'état, ces résultats sont questionnables car l'échantillon d'une seule cellule par essai est insuffisant pour se prémunir contre la variabilité inter-cellules. En particulier, il est surprenant que la cellule n°52 sous cyclage alterné



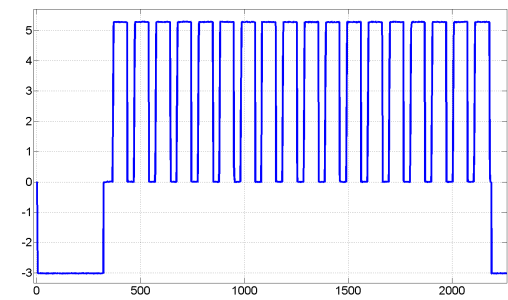
(a) Batterie Seule : Motif



(b) Batterie Seule : Cycle



(c) Batterie + SC : Motif



(d) Batterie + SC : Cycle

FIGURE 5.7 – Cycles utilisés pour le vieillissement

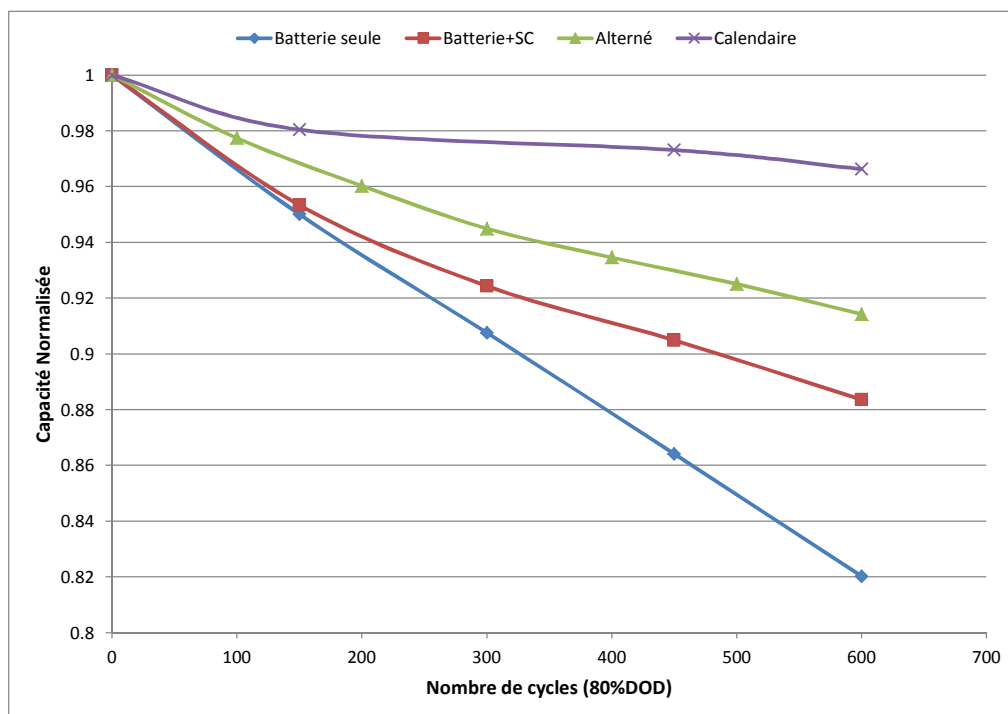


FIGURE 5.8 – Evolution des capacités des cellules 47, 49, 51 et 52

présente une perte de capacité sensiblement plus faible que les deux autres essais.

5.3 Cas appliqué

Période	Juillet-Août 2012
Matériel	Banc Arbin, enceinte climatique pilotée par Arduino, routeur 3 cellules, 2 voies
Caractérisations	Intervalle 4 cycles complets (48h), 25°C
Nombre de cycles	Equivalent à 2200km/an, 2 ans
Plage de SOC (DOD)	25-100% (25-50-75%)
Température	0 à 40°C ambiant (cf. figure 5.11)
Protocole de charge	CC-CV, C/6, 4.2V (Sanyo) et 3.6V (A123), 50mA, 25°C
Profil(s)	Cycle synthétique VAE Kalkhoff (cf. figures 5.12 et 5.13)
Echantillon sous test	6 Cellules 3 cellules $LiNi_{.33}Co_{.33}Mn_{.33}O_2$ /graphite Sanyo 18650 2Ah 3 cellules $LiFePO_4$ /graphite A123 26650 2.3Ah

TABLE 5.7 – Conditions expérimentales de l'essai Kalkhoff

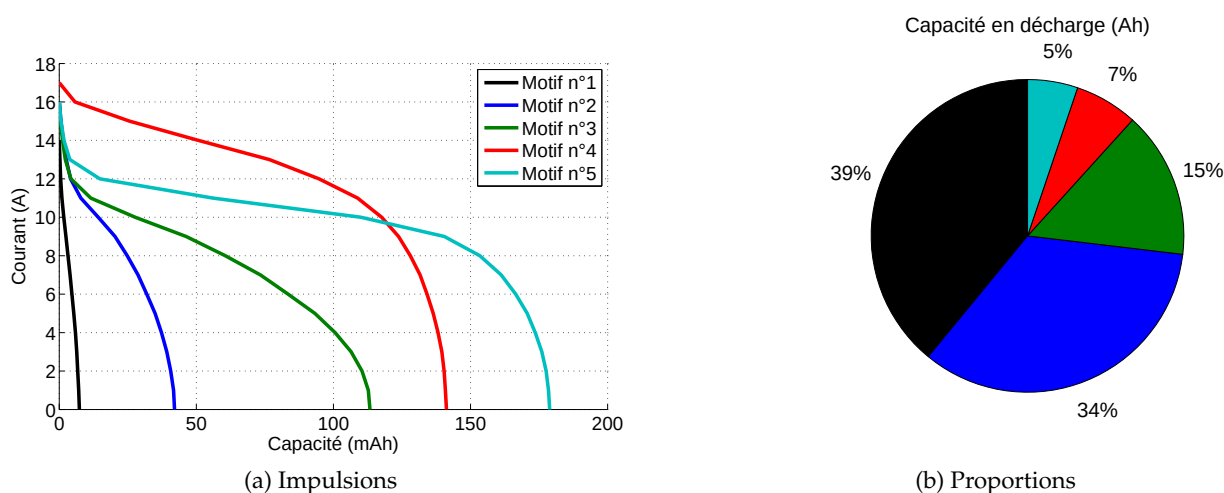
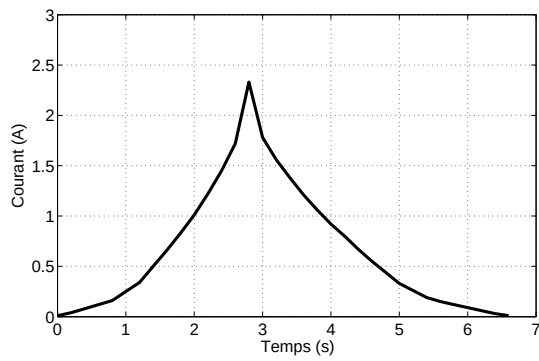
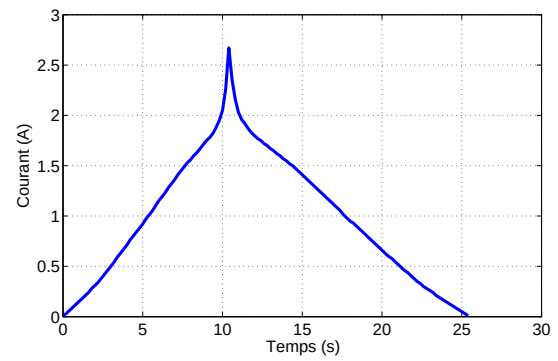


FIGURE 5.9 – Les 5 classes d'impulsions typiques du VAE Kalkhoff reprises pour ce cyclage. Représentation dans le domaine de charge, avant la mise à l'échelle.

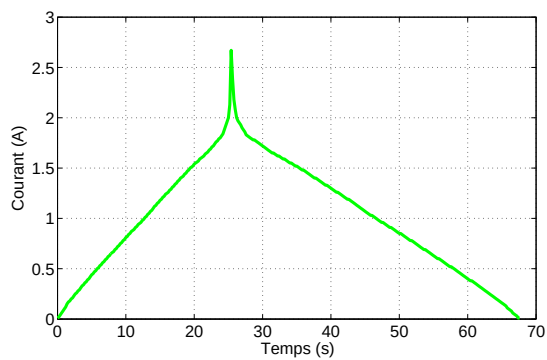
Pour conclure, une campagne de vieillissement plus ambitieuse a été menée. L'objectif était de créer un cyclage qui reprendrait les principales caractéristiques des sollicitations rencontrées en usage réel sur l'un des véhicules étudiés. Le véhicule retenu pour cette étude fut le VAE Kalkhoff à assistance proportionnelle Panasonic (cf. § 4.1.2). Une batterie identique à celle qui équipe le véhicule a été achetée puis démontée pour extraire quelques cellules échantillons (Sanyo). Les conditions expérimentales sont décrites par le tableau 5.7. Les phases de recharge se sont déroulées à 25°C après



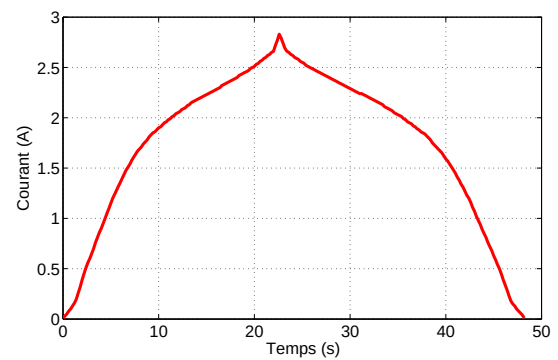
(a) Motif n°1



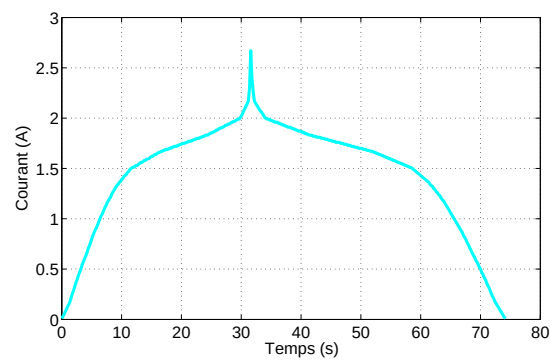
(b) Motif n°2



(c) Motif n°3



(d) Motif n°4



(e) Motif n°5

FIGURE 5.10 – Motifs (impulsions) utilisées pour le vieillissement selon le cycle VAE Kalkhoff. Représentation temporelle et mise à l'échelle (facteur 1/6).

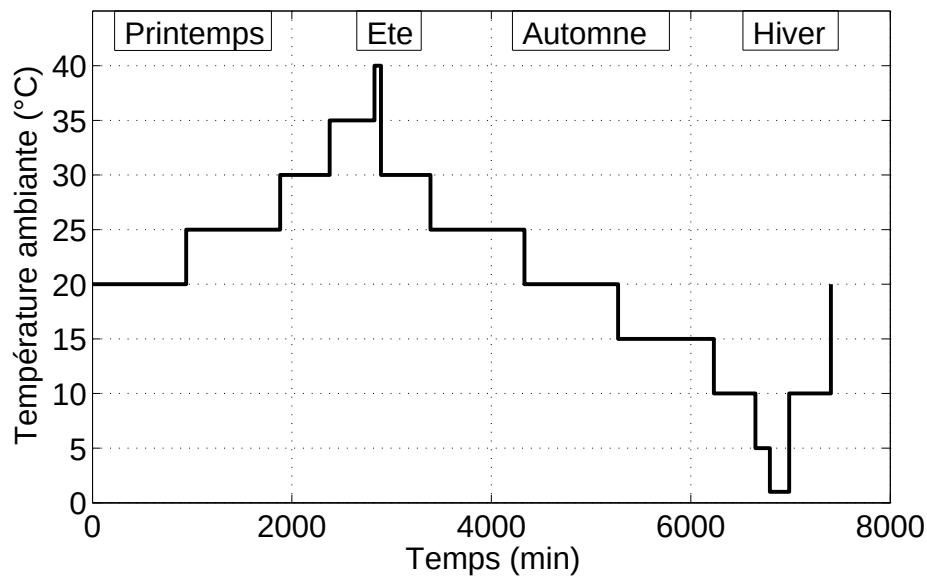


FIGURE 5.11 – Cycle de température représentant une année d'utilisation du VAE Kalkhoff et utilisé lors du cyclage

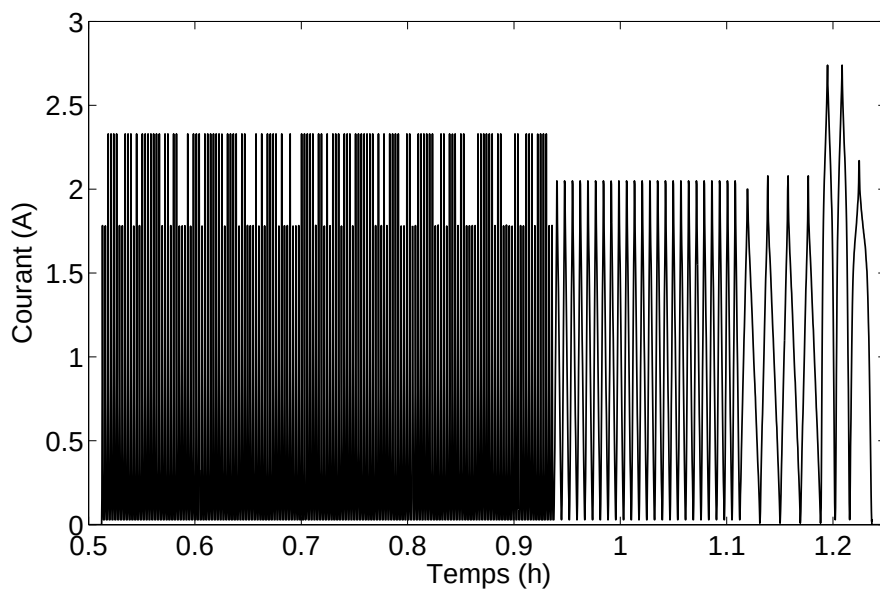


FIGURE 5.12 – Cycle synthétique élémentaire utilisé lors du cyclage (25%DOD). Enchainement de 159 motifs n°1, 24 motifs n°2, 4 motifs n°3, 2 motifs n°4 et 1 motif n°5. Cycle répété 2 fois pour couvrir 50%DOD et 3 fois pour 75%DOD.

30 minutes de repos afin de simuler les conditions de recharges observées en pratique (chargeur C/6 au bureau ou au domicile de l'utilisateur). Le profil de décharge est constitué par la juxtaposition des 5 impulsions typiques obtenues pour ce véhicule (fonctionnement uniquement en décharge pour rappel). Les répétitions appliquées sont conformes aux proportions mesurées sur l'échantillon. Ces impulsions typiques et leurs proportions sont représentées sur la figure 5.9. La figure 5.10 décrit les représentations temporelles de ces 5 impulsions typiques, avec la mise à l'échelle du courant par

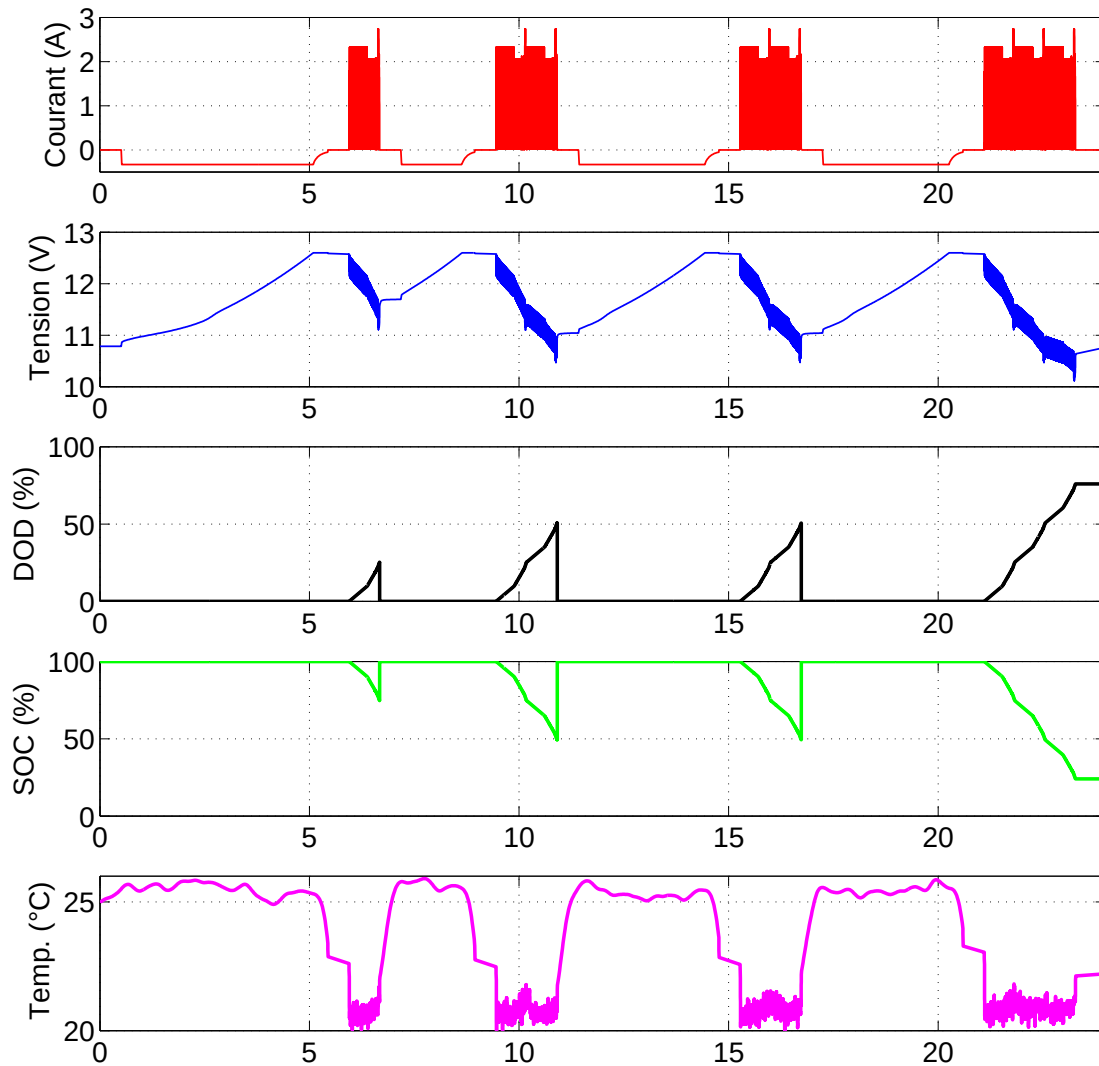


FIGURE 5.13 – 24h de cyclage selon le profil de mission VAE Kalkhoff. 4 décharges partielles par 24h (1 fois 25%DOD, 2 fois 50%DOD, 1 fois 75%DOD). Charge à C/6 et 25°C après 30 minutes de repos pour stabilisation de la température. Le SOC et la DOD présentés correspondent aux phases de décharge uniquement

un facteur 1/6 (correspondant à la différence de capacité entre une cellule Sanyo 2Ah et celle de la batterie complète de 12Ah). La reconstruction temporelle s’est appuyée sur la mesure de la position moyenne du maximum de courant (pic) pour chacune des classes d’impulsions typiques.

L’utilisation de cycles synthétiques obtenus par génération par chaîne de Markov n’a pas été rendue possible du fait de la complexité à programmer de tels cycles sous l’interface de pilotage du banc Arbin. En revanche les paramètres environnementaux tels que les températures rencontrées en utilisation ainsi que les DOD constatées ont été intégrés à cette campagne de cyclage. Le cycle annuel de température appliqué est présenté sur la figure 5.11 tandis qu’un cycle synthétique élémentaire correspondant à 25%DOD est dépeint par la figure 5.12. Conformément aux observations faites sur la figure 4.20 (page 105), le cyclage opéré incluait un cycle de 25%DOD (premier quartile), deux cycles de 50%DOD (médiane) et un cycle de 75%DOD (troisième quartile). La figure 5.13 décrit l’évolution de différentes grandeurs (courant, tension, DOD, SOC et température) au cours d’une période cou-

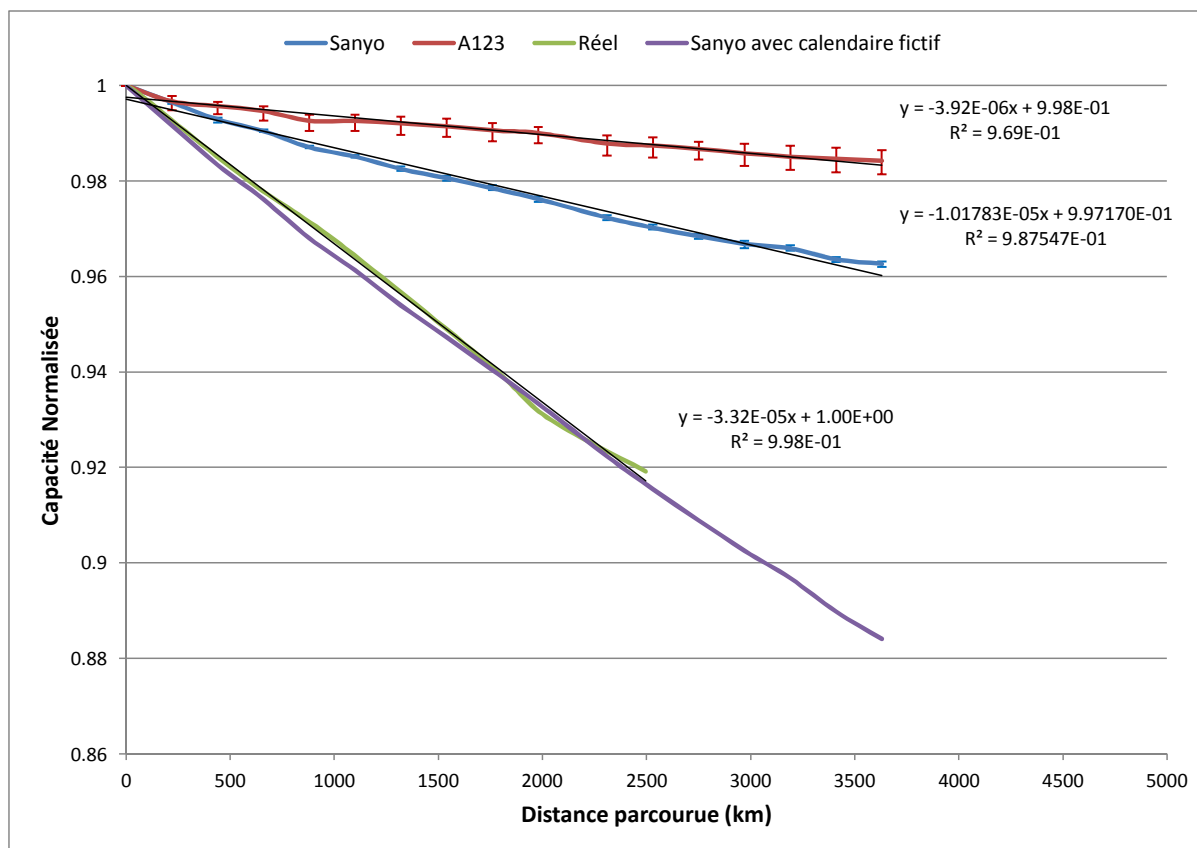


FIGURE 5.14 – Evolution des capacités des cellules cyclées selon le profil de mission VAE Kalkhoff

vrant 24 heures du cyclage employé lors de cette campagne. On y note le passage de la température de cyclage (20°C à cet instant) à celle de recharge (25°C) à l'issue de chacune des décharges partielles.

D'après la figure 5.14, les cellules Sanyo cyclées selon ce profil Kalkhoff ont perdu de l'ordre de 1% de leur capacité initiale par tranche de 1000km parcourus. On note au passage la parfaite homogénéité des résultats inter-cellules (très faible dispersion). [Dubarry 2011b] a fait cette même observation à propos de ces cellules.

Dans l'optique de comparer deux technologies, des cellules A123 LFP ont subi le même cyclage, à la mise à l'échelle près (2.3Ah contre 2Ah pour les cellules Sanyo). Le résultat obtenu témoigne d'une bien meilleure tenue au cyclage de ces dernières. En effet, la perte de capacité relative par unité de distance est 2.5 fois inférieure à celle des Sanyo NCM. Cette très bonne performance au niveau de la durée de vie doit être contre-balançée par le fait que ces cellules A123 LFP sont environ deux fois plus lourdes et plus volumineuses par unité d'énergie. Ceci est dommageable pour l'application visée où les clients apprécient la compacité et la transportabilité de la batterie amovible. Les coûts de fabrication sont probablement différents également (deux fois plus de matières premières par unité d'énergie et format moins répandu).

Au niveau de la prédiction de la durée de vie des batteries à partir d'un cycle représentatif des sollicitations liées à ce véhicule, on observe un écart très important entre le résultat obtenu en cyclage et celui obtenu dans le monde réel. Au bout de la première année, on constate un écart de 5% de la capacité nominale entre les deux courbes (3% contre 8%). Cet écart peut éventuellement être expliqué par la contribution du vieillissement calendaire à la perte de capacité. En effet, le cyclage simulant une année d'utilisation ne requiert que trois semaines de temps. Le vieillissement calendaire y est donc minime. Il serait intéressant de connaître les propriétés du vieillissement calendaire sur ces

cellules. La documentation fournie avec le VAE Kalkhoff donne quelques renseignements utiles. A propos des versions 8 et 10Ah de la batterie, le fabricant annonce une durée de vie de 3 à 4 ans, ou jusqu'à 500 cycles (en considérant une diminution de la capacité de 20%). Si l'on se réfère à la durée de vie calendaire donnée, il serait cohérent de rencontrer une diminution de la capacité de la batterie de l'ordre de 5 à 7% par année, hors utilisation du vélo. Rappelons toutefois que les versions 8 et 12Ah des batteries pour moteur pédalier Panasonic n'intègrent pas les mêmes cellules (NEC LMS contre Sanyo NCM). Aucune donnée plus précise n'a pas eu être obtenue concernant le modèle de batterie que nous possédons (12Ah). On peut toutefois noter que les cellules Sanyo 18650 employées sur notre modèle sont issues du domaine de l'électronique grand public où la durée de vie calendaire des produits excède rarement 4 années. Une courbe simulée, se basant sur cette hypothèse de 4 années de durée de vie calendaire (à un rythme constant de diminution de 5% de la capacité nominale par année) et une combinaison linéaire avec la courbe obtenue en cyclage est proposée ("Sanyo avec calendaire fictif"). Son accord avec les mesures réalisées sur le véhicule et sa batterie en usage réel est satisfaisant (cf. figure 5.14).

Conclusion

Sommaire

6.1 Conclusions générales	167
6.2 Perspectives	168

6.1 Conclusions générales

L'émergence de nouvelles solutions de mobilité, telles que les véhicules électriques et hybrides, comme réponse au défi énergétique du 21^{ème} siècle, pose la problématique de la viabilité technico-économique des batteries Lithium-ion comme système de stockage d'énergie. Ces batteries Lithium-ion, sur lesquelles se concentre un effort de recherche conséquent dans le monde, ont été décrites dans la section 2.1 (page 17). Un ensemble de simulations simplifiées, présentées dans l'annexe A (page 171) indique que la rentabilité économique des véhicules électriques comparativement à leurs homologues thermiques est atteignable sur le cycle de vie complet du véhicule. Ceci se traduit par une contrainte élevée en termes de durée de vie des batteries de traction, entre 1500 et 2000 cycles de charge/décharge complets. Cet impératif technique nécessite un effort conséquent de développement des batteries actuelles sur le plan de la cyclabilité.

Un recueil bibliographique, présenté dans la section 2.3.2 (page 36), a permis d'établir des relations qualitatives fortes entre certaines contraintes environnementales liées aux applications envisagées (température, DOD, SOC, courant, tension) et les rythmes de dégradation des échantillons de cellules Lithium-ion testées.

En revanche, l'aspect quantitatif de ces influences, qui dicte les durées de vie envisageables en situation réelle, semble plus complexe à établir. La dispersion quantitative des résultats obtenus nous incite à proposer un outil d'analyse des sollicitations typiques des batteries Lithium-ion dans les applications de transport (véhicule électrique, véhicule hybride). Cet outil d'analyse, présenté dans le chapitre 3 (page 63), a pour objectif de simplifier l'étude de ces sollicitations rencontrées, sur la base d'enregistrements obtenus sur des véhicules électrifiés utilisés en usage réel. Cet outil repose sur l'emploi successif d'une méthode de partitionnement afin de regrouper les milliers d'impulsions mesurées en charge comme en décharge en quelques classes d'impulsions typiques homogènes (algorithme des Kmeans), puis sur l'utilisation d'une modélisation par chaîne de Markov afin de prendre en compte les propriétés d'enchaînement des impulsions. Cette prise en compte des aspects temporels des profils de courant batterie permet de reproduire les variations locales du courant efficace¹ (constante de temps lente de l'ordre de la dizaine de minutes). L'élévation de température apparaissant comme le facteur aggravant du vieillissement le plus sensible pour les batteries Lithium-ion, cette prise en compte des variations lentes du courant efficace au cours d'un trajet permet de reproduire de façon plus fidèle les sollicitations typiques rencontrées en usage réel.

Dans le cadre de ces travaux, cinq véhicules, de natures très différentes, ont pu être étudiés. Nous comptons deux vélos à assistance électrique (VAE), dont les résultats sont présentés dans la section

1. le courant efficace influe sur l'effet joule et l'auto-échauffement des batteries

4.1 (page 88), un quadricycle électrique, étudié au paragraphe 4.2 (page 109), un véhicule hybride, dont les résultats sont présentés dans la section 4.3 (page 123) et enfin un trolleybus, véhicule lourd à vocation commerciale, étudié au paragraphe 4.4 (page 137). Pour chacun de ces véhicules, une analyse des sollicitations typiques en courant (impulsions de charge et décharge) a été conduite à l'aide l'outil de partitionnement et les résultats ont permis d'élaborer des cycles représentatifs de l'usage à l'aide de la modélisation par chaîne de Markov de l'enchaînement des impulsions sur chacun de ces véhicules.

Enfin, une série de campagnes de cyclages a été réalisée sur des cellules Lithium-ion (A123 LFP et Sanyo NCM) afin :

- de vérifier l'impact différencié des différentes classes d'impulsions typiques (celle présentant le courant efficace le plus faible, celle intermédiaire et celle présentant le courant efficace le plus élevé) sur le rythme de dégradation (cf. section 5.1.1, page 150),
- de vérifier l'absence d'impact de la forme temporelle sur le rythme de dégradation (cf. section 5.1.2, page 152),
- d'établir la corrélation entre le vieillissement d'une batterie de VAE en cyclage en laboratoire, selon le cycle de sollicitations typiques obtenu à la suite de l'analyse des données enregistrées en usage réel, et le vieillissement réel mesuré sur la batterie du véhicule instrumenté (cf. section 5.3, page 161),
- de comparer les deux électrochimies (LFP et NCM) sur la base d'un profil de mission donné (sollicitations typiques du VAE Kalkhoff) en termes de rythme de dégradation de la capacité des cellules cyclées (cf. section 5.3, page 165).

Le principal enseignement que nous pouvons retirer des travaux présentés tient à la nature des sollicitations en courant des batteries utilisées pour la traction électrique. En effet, malgré des différences d'architecture (électrique ou hybride) ou de dimensions (de 20kg à 13t) conséquentes, tous ces véhicules électrifiés présentent un caractère impulsif et fortement dynamique des courants batterie. Aucune phase à courant constant, à l'exception des recharges sur le réseau électrique, n'a été observée alors même que la quasi-totalité des campagnes de vieillissement publiées dans la littérature adoptent ce protocole expérimental.

Au final, l'approche proposée semble apte à étudier de manière fine les profils de mission des batteries équipant tout type de véhicule électrifié. Cette amélioration du niveau de représentativité des campagnes de vieillissement est certes coûteuse en termes de planification des protocoles expérimentaux mais le développement rapide et continu des outils informatiques à notre disposition rend l'adoption de ces nouveaux types de protocoles expérimentaux plus aisée.

6.2 Perspectives

Malgré des résultats préliminaires encourageants, de nombreux essais de validation doivent encore être menés avant de pouvoir conclure sur l'adéquation de l'approche présentée et l'objectif poursuivi de juste prédiction de la durée de vie des batteries de traction dans les applications de transport électrifié. En particulier, les impulsions de charge n'ont pas été étudiées expérimentalement par les présents travaux.

La définition des cycles représentatifs, à partir des impulsions typiques obtenues après étude du véhicule en situation réelle, doit encore être améliorée afin de représenter au mieux les contraintes environnementales autres que le courant appliqué (DOD, température ambiante, SOC, ...). Sur ce même registre, des modifications sur les réglages de l'algorithme de partitionnement (choix de la distance, du nombre de classes, préfiltrage de impulsions "mineures") sont envisageables sur la base d'observations expérimentales futures à propos de l'influence de tel ou tel paramètre sur le résultat final de prédiction de la durée de vie.

Une amélioration logicielle des équipements de cyclages serait également appréciable afin de permettre l'utilisation directe des résultats obtenus (cycle représentatif représenté par une séquence d'impulsions typiques) par une programmation simplifiée des séquences. En effet, dans le cadre de la validation expérimentale sur le cas d'exemple (VAE Kalkhoff), les enchainements entre impulsions n'ont pu être programmés conformément aux résultats de la modélisation par chaîne de Markov et un simple respect des proportions relatives des classes d'impulsions a été retenu comme principe d'élaboration du profil de cyclage (cf. section 5.3, page 161).

Enfin, la délicate problématique de la combinaison des effets du vieillissement calendaire (lié aux périodes de stationnement du véhicule) et du vieillissement en cyclage n'est pas traitée par cette approche qui se concentre uniquement sur les phases de roulage. A ce titre, la prédiction de durée de vie basée sur l'utilisation de l'approche décrite par ces travaux fournira probablement un meilleur résultat dans le cadre de véhicules à usage commercial (taxi, transport en commun, livraison, ...) dont les périodes d'inutilisation sont moindres et les distances parcourues annuellement beaucoup plus importantes que les véhicules particuliers.

Simulation de rentabilité économique et durabilité associée

Sommaire

A.1 Hypothèses	171
A.2 2012	173
A.2.1 Voiture	173
A.2.2 Deux roues	176
A.3 2020	178
A.4 Conclusion	181

A.1 Hypothèses

Consommation de carburant	6l/100km (2012), 4l/100km(2020)
Recharge	en heures creuses, tarif Bleu ciel EDF
Tarif du kWh	9.36c€(2012), 14.04c€(2020)
Consommation électrique (à la prise)	200Wh/km
Rendement de la recharge	90%
Gamme de prix du litre de carburant	1-3€/litre
Gamme de prix des batteries Li-ion	50-1000€/kWh avec intégration
Energie de la batterie	16-25-50-75 kWh

TABLE A.1 – Hypothèses pour la simulation de rentabilité

$$km = \frac{100 \cdot \text{Energie Batterie} \cdot \text{Prix Li-ion}}{(\text{Consommation Carburant} \cdot \text{Prix Carburant}) - \left(\frac{\text{Consommation Electrique} \cdot \text{Tarif kWh}}{1000}\right)} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{cycles} = km \cdot \left(\frac{\text{Energie Batterie} \cdot 1000}{\text{Consommation Electrique} \cdot \text{Rendement Recharge}}\right)^{-1} \quad (\text{A.2})$$

De nombreuses hypothèses simplificatrices ont été faites pour réaliser ces simulations. En particulier, le taux d'actualisation financier (1€ aujourd'hui vaut plus que 1€ demain) a été négligé. Le

Consommation de carburant	3l/100km (2012)
Recharge	en heures creuses, tarif Bleu ciel EDF
Tarif du kWh	9.36c€(2012)
Consommation électrique (à la prise)	40Wh/km
Rendement de la recharge	90%
Gamme de prix du litre de carburant	1-3€/litre
Gamme de prix des batteries Li-ion	50-1000€/kWh avec intégration
Energie de la batterie	2 kWh

TABLE A.2 – Hypothèses pour scooter 50cc

tarif du litre de carburant est supposé constant sur l'ensemble de la vie du véhicule, idem pour le tarif du kWh électrique. La consommation du véhicule électrique n'a pas été ajustée en fonction de la masse de batterie embarquée. L'objectif est simplement de proposer une estimation de la durée de vie requise pour la batterie (en nombre de cycles). Trois cas sont testés : une voiture électrique en 2012 puis en 2020, et un scooter électrique en 2012. La lecture du résultat s'effectue en fixant le tarif du carburant et celui de la batterie, ce qui permet de déterminer le seuil de rentabilité en termes de kilomètres à parcourir. Le cout du litre de carburant pour les interprétations à suivre a été fixé à 1.6€. Dans le cas du gazole, on peut se placer autour de 1.45€/litre.

A.2 2012

A.2.1 Voiture

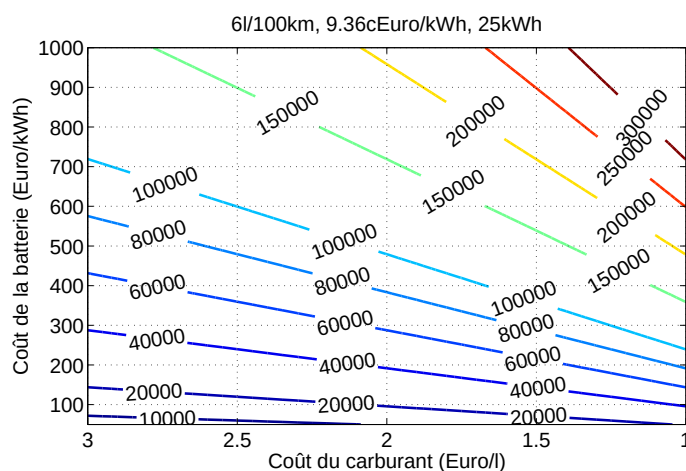


FIGURE A.1 – Cible kilométrique pour véhicule électrique 100 km compétitif en 2012

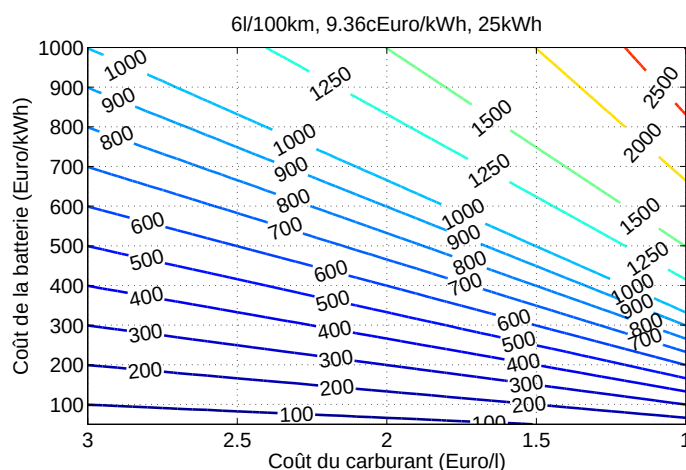


FIGURE A.2 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 100 km compétitif en 2012

Les figures A.1 à A.8 présentent les résultats de simulation obtenus pour différentes tailles de batterie. Avec l'architecture de base de la voiture électrique (25kWh, cf. figure A.1) et un coût de revient de 900€/kWh, on atteint le seuil de rentabilité à partir de 250000km, soit la durée de vie totale du véhicule. Si l'on se base sur les estimations faites à propos de la Nissan Leaf ou de la Chevrolet Volt, environ 600€/kWh, la rentabilité est potentiellement atteinte à partir de 160000km. Ces deux hypothèses se traduisent par un besoin de cyclabilité de 1100 à 1800 cycles (cf. figure A.2), soit des valeurs rarement atteintes avec les technologies courantes. Si l'on intègre le vieillissement calendaire, on aboutit à la conclusion que seuls de gros rouleurs au quotidien peuvent espérer un retour sur investissement.

A l'aide de la figure A.3, on constate que la rentabilité d'un véhicule électrique équipé d'une batterie plus petite (16kWh), est atteinte beaucoup plus rapidement (-40%), au détriment d'une autonomie davantage restreinte. Cela ne relâche toutefois pas la contrainte de durabilité (1100 à 1800 cycles requis). A contrario, l'acquisition d'une voiture électrique affichant une autonomie supérieure (200 ou

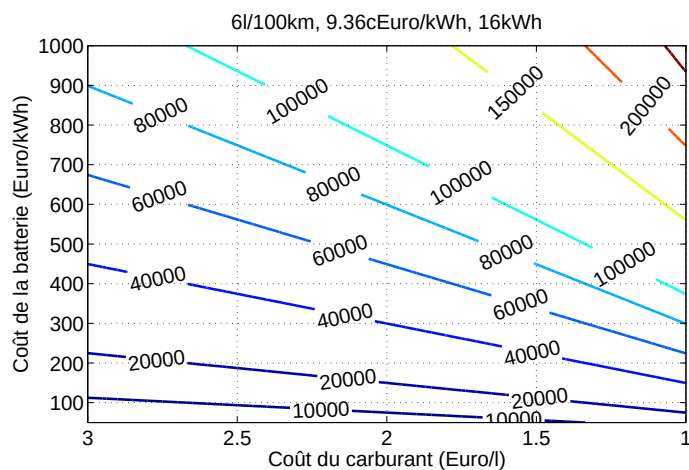


FIGURE A.3 – Cible kilométrique pour véhicule électrique <100km compétitif en 2012

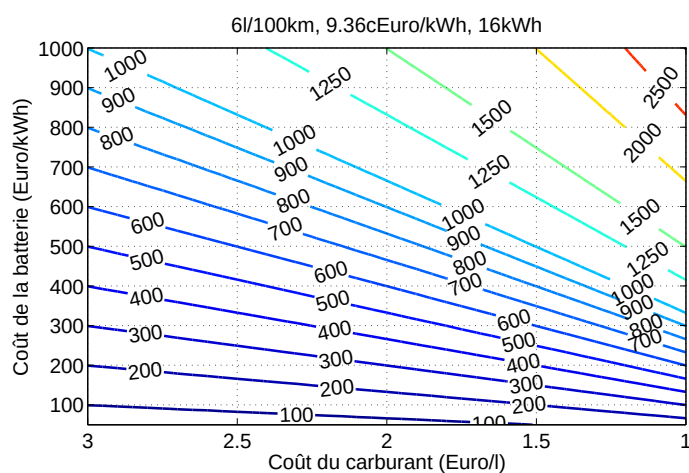


FIGURE A.4 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique <100km compétitif en 2012

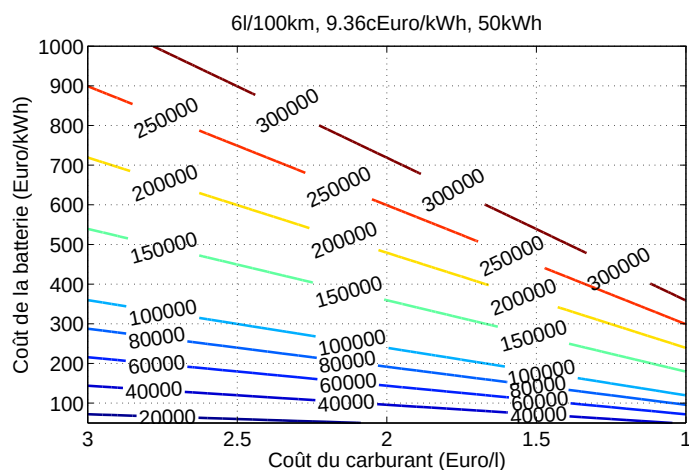


FIGURE A.5 – Cible kilométrique pour véhicule électrique 200km compétitif en 2012

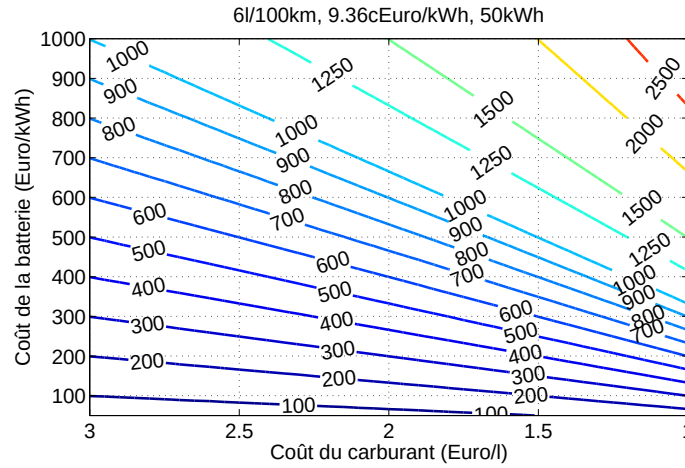


FIGURE A.6 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 200km compétitif en 2012

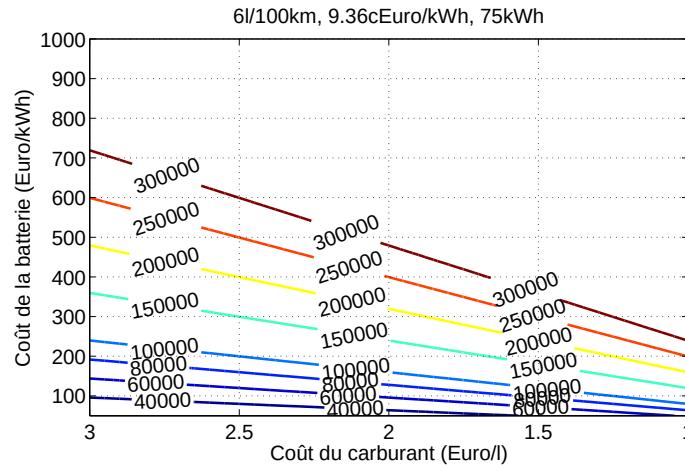


FIGURE A.7 – Cible kilométrique pour véhicule électrique 300km compétitif en 2012

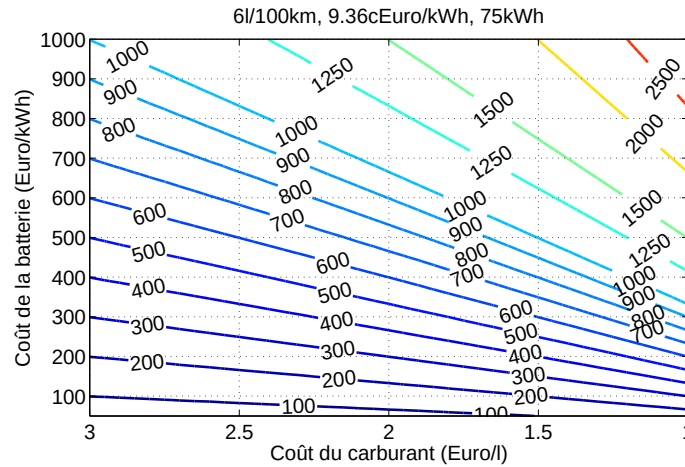


FIGURE A.8 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 300km compétitif en 2012

300km) ne saurait se justifier par une recherche de rentabilité financière. Dans les deux cas, il faudrait parcourir des distances très importantes (300000km pour une batterie de 50kWh et 400000km pour une batterie de 75kWh), même avec des batteries à 500€/kWh pour obtenir un retour sur investissement (cf. figures A.5 à A.7). On remarque que quel que soit l'autonomie choisie, la contrainte de cyclabilité pour atteindre l'équilibre financier n'est fonction que du coût de revient de la batterie. Une batterie moins chère pourra présenter une cyclabilité inférieure et rester compétitive. L'optimum se situera probablement autour de 350€/kWh et 1000 cycles.

A.2.2 Deux roues

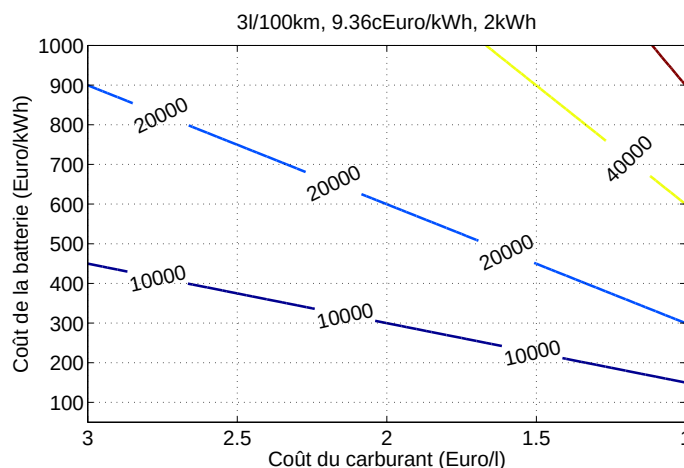


FIGURE A.9 – Cible kilométrique pour scooter électrique compétitif en 2012

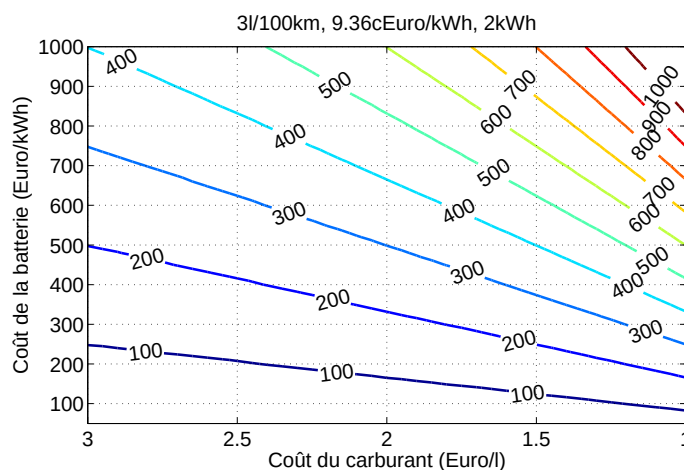


FIGURE A.10 – Nombre de cycles requis pour scooter électrique 60km compétitif en 2012

Une simulation s'intéressant au cas des deux roues urbains du type scooter 50cc (45km/h) a également été réalisée. Sur ce type de véhicule, la consommation d'un modèle récent tourne autour de 3l au 100km. Quelques modèles descendent jusqu'à 2.7l/100km. Sur les modèles périurbains (125cc, 110km/h), la consommation s'établit à 3.5l/100km environ. L'adoption de la traction électrique sur ce type de véhicule est comparativement plus intéressante qu'entre une voiture thermique et une voiture électrique. De plus, l'usage classique d'un scooter urbain se cantonne à de courtes distances

quotidiennes, parfaitement en accord avec les performances actuelles des batteries Lithium-ion (30 à 40 km seraient confortables pour de nombreux utilisateurs). Un modèle récent comme le Peugeot e-Vivacity (équivalent 50cc, 45km/h, 60km d'autonomie réelle, 2kWh de batteries Li-ion) a besoin d'environ 35Wh pour parcourir un kilomètre, à rythme soutenu. Les différentes hypothèses retenues sont regroupées dans le tableau [A.2](#).

La figure [A.9](#) indique qu'au cours actuel de l'essence, la rentabilité est atteinte au bout de 40000km environ si l'on fait l'hypothèse de batteries Lithium-ion à 900€/kWh. Cela correspond à l'écart de tarification constatée entre les versions électriques et thermiques de ce scooter. Cette distance correspond à la durée de vie maximale usuelle de ce type de véhicule (une dizaine d'années de circulation). Avec des batteries à 600€/kWh, la rentabilité est avérée à partir de 25000km environ, ce qui serait nettement plus acceptable. A l'aide la figure [A.10](#), on identifie qu'avec ce véhicule, la rentabilité n'est atteignable que si la batterie affiche une cyclabilité environ égale à son cout de revient (500 cycles pour 600€/kWh, 700 cycles pour 900€/kWh). Comme avec la voiture électrique, la rentabilité se rapproche avec la diminution de la taille de la batterie (et de l'autonomie par charge). Cela se traduit toutefois par une sollicitation relative accrue des batteries.

A.3 2020

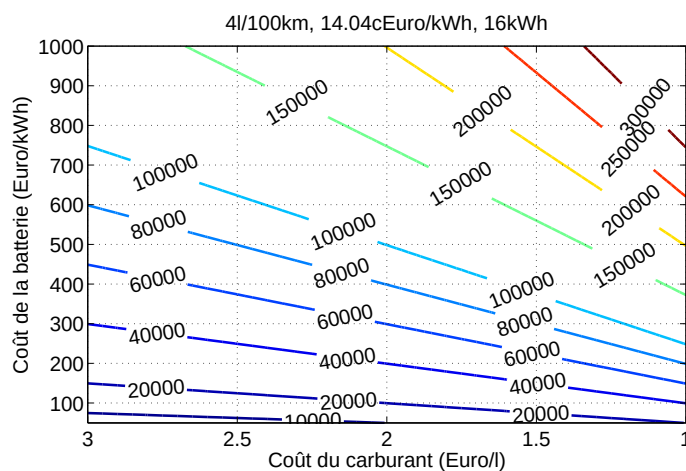


FIGURE A.11 – Cible kilométrique pour véhicule électrique <100km compétitif en 2020

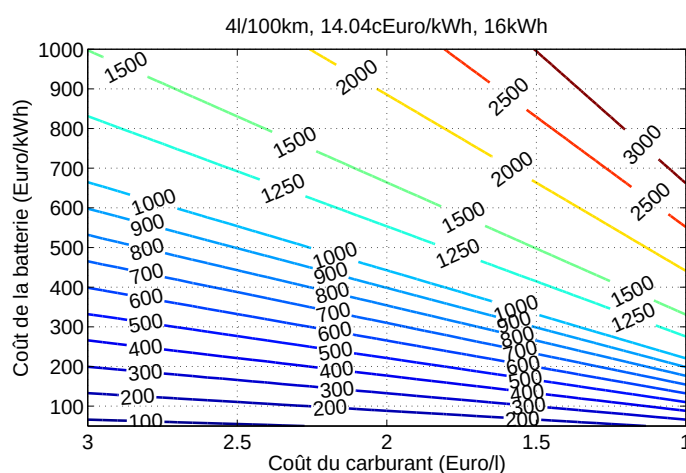


FIGURE A.12 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique <100km compétitif en 2020

Entre 2012 et 2020, le coût de l'électricité devrait croître de 50%, d'après un rapport commandé par le Sénat. L'évolution du coût des carburants pétroliers est elle beaucoup plus imprévisible mais nous ferons l'hypothèse conservatrice de 2.5€/litre pour les interprétations. Avec les progrès technologiques au niveau des moteurs à combustion, sous la pression des directives européennes (Euro 6, etc...), une consommation de 4l/100km a été retenue comme hypothèse de base. Ces différentes évolutions de la consommation et du prix du carburant permettent un maintien du coût kilométrique du véhicule thermique (autour de 10€/100km). Avec une batterie de 25kWh et un coût de revient de 350€/kWh, la rentabilité est atteignable autour de 90000km (cf. figure A.13). La batterie devra alors être cyclée un peu plus de 600 fois pour couvrir la distance (cf. figure A.14). Avec des véhicules offrant davantage d'autonomie, la rentabilité se dégrade. Avec 50kWh de batterie, le potentiel de rentabilité se dessine autour de 150000km avec une batterie à 300€/kWh. Avec un véhicule offrant plus de 300km d'autonomie, il faut atteindre un coût de revient de moins de 200€/kWh pour espérer un retour sur investissement aux termes de ces mêmes 150000km. En revanche, de façon généralisée, la contrainte de durabilité de la batterie se relâche un peu.

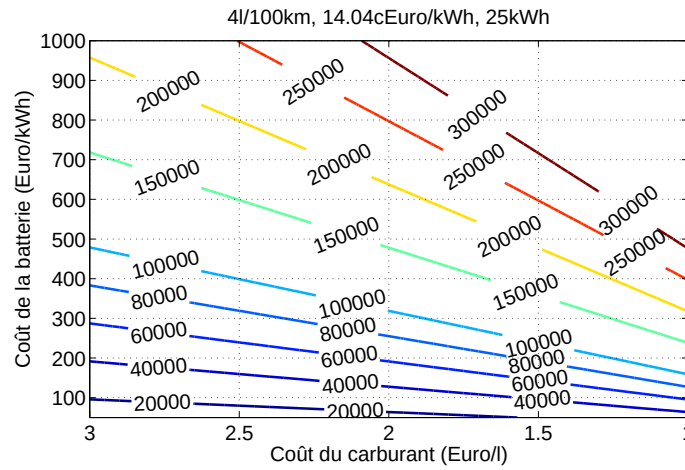


FIGURE A.13 – Cible kilométrique pour véhicule électrique 100km compétitif en 2020

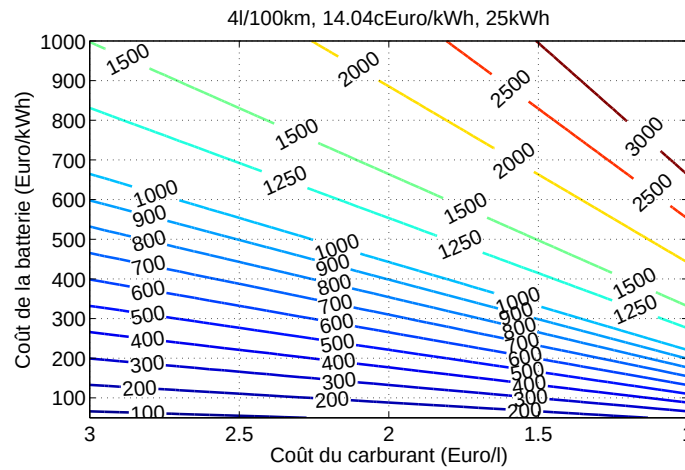


FIGURE A.14 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 100km compétitif en 2020

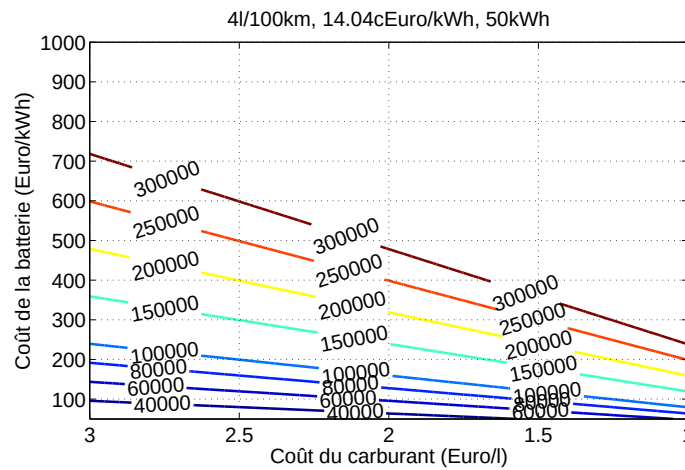


FIGURE A.15 – Cible kilométrique pour véhicule électrique 200km compétitif en 2020

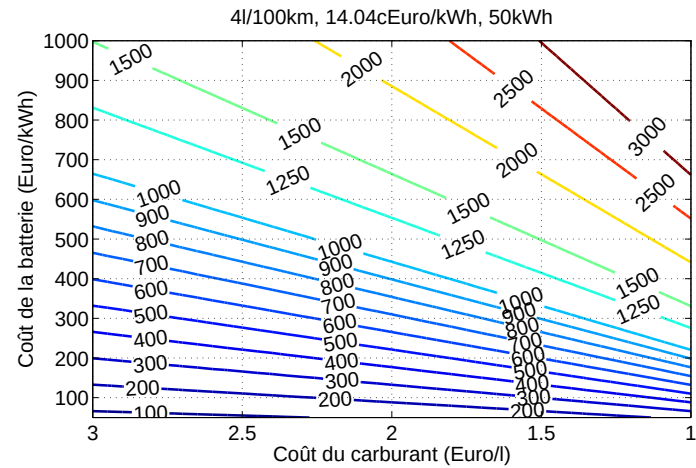


FIGURE A.16 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 200km compétitif en 2020

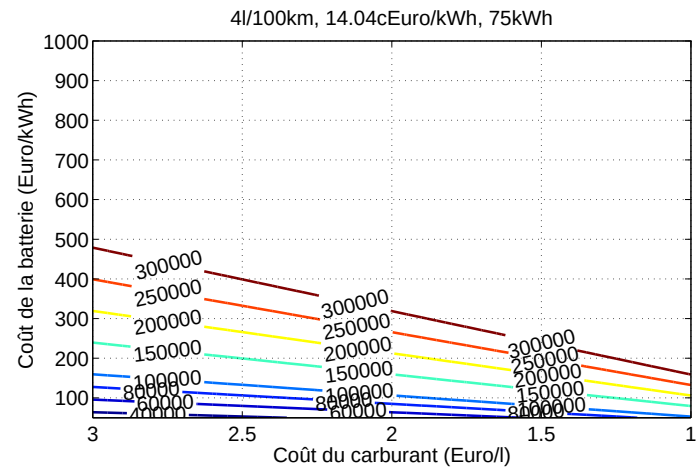


FIGURE A.17 – Cible kilométrique pour véhicule électrique 300km compétitif en 2020

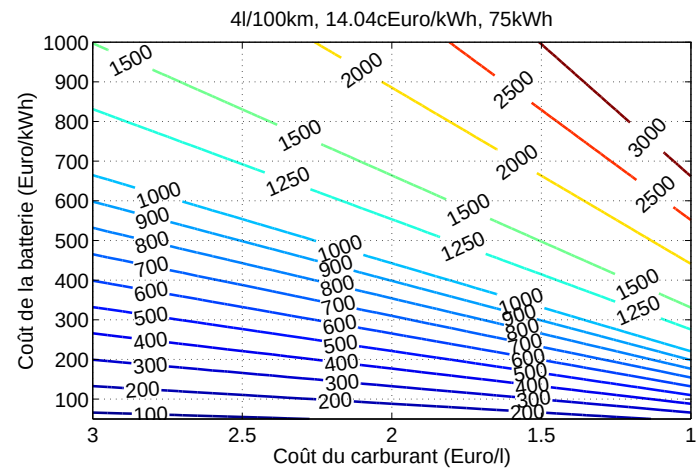


FIGURE A.18 – Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 300km compétitif en 2020

A.4 Conclusion

Malgré l'augmentation prévisible du coût des carburants pétroliers, la rentabilité de la traction électrique restera conditionnée à la production de véhicules légers offrant une centaine de kilomètres d'autonomie (en toutes circonstances) avec un coût de fabrication des batteries qui s'approcherait des standards de l'électronique grand public (environ 350€/kWh). La contrainte de durabilité des batteries Lithium-ion pour garantir cette rentabilité est assez sévère ; elle est en réalité directement liée au coût de fabrication des batteries. A condition d'atteindre ce niveau de performance élevé, la voiture électrique pourrait alors offrir le même coût de revient kilométrique que les motorisations thermiques sur l'ensemble de la vie du véhicule. Ceci constituerait déjà une belle performance. L'avènement d'une voiture électrique sensiblement moins chère à propulser que son homologue thermique semble inatteignable (la prise en compte des coûts de maintenance et de ceux des différentes motorisations pourrait changer cette conclusion).

La baisse des coûts de fabrication des batteries Lithium-ion, par le recours à des matériaux plus denses et moins coûteux, permettrait de relâcher progressivement la contrainte de cyclabilité des batteries utilisées. Je pense ici notamment aux anodes Silicium dont la cyclabilité ne rattrapera peut-être jamais celle des autres anodes. Sur le seul plan économique, l'intérêt de la traction électrique se dessine autour de véhicules plus légers et moins autonomes que leurs homologues thermiques. Les considérations énergétiques et environnementales n'ont pas été intégrées à ces calculs.

Revue bibliographique de la dégradation des batteries Lithium-ion

Sommaire

B.1 Influence de la température	183
B.2 Influence de la profondeur de décharge (DOD)	186
B.3 Influence de l'état de charge (SOC)	187
B.4 Influence de la tension de charge	188
B.5 Influence du niveau de courant	189

B.1 Influence de la température

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Ramasamy2005	LCO	Calendaire	5, 35	1, 3.2	[Ramasamy 2005]
Brown2008_LEO	NCA	Calendaire	35, 45, 55	1, 1, 4.42	[Brown 2008]
Bloom2003	NCA	Calendaire	45, 55	1, 1.84	[Bloom 2003]
Ramasamy2005	LCO	Floating	5, 35	1, 2.67	[Ramasamy 2005]
Asakura2003	LCO	Floating	25, 45, 55	1, 2.56, 3.1	[Asakura 2003]
Matsushima2009	LMS	Floating	45, 55, 60	1, 1.34, 1.81	[Matsushima 2009]
Abraham2007	NCA	Calendaire	45, 55	1, 1.17	[Abraham 2007]
Kassem2012_SOC30	LFP	Calendaire	30, 45, 60	1, 2, 5	[Kassem 2012]
Kassem2012_SOC65	LFP	Calendaire	30, 45, 60	1, 2.06, 4.60	[Kassem 2012]
Kassem2012_SOC100	LFP	Calendaire	30, 45, 60	1, 2.17, 5.17	[Kassem 2012]
Christophersen2006 _ALT_SOC60	NCA	Calendaire	25, 35, 45, 55	1, 1.37, 2.30, 3.91	[Christophersen 2006]
Christophersen2006 _ALT_SOC80	NCA	Calendaire	25, 35, 45, 55	1, 1.31, 2.38, 4.62	[Christophersen 2006]
Christophersen2006 _ALT_SOC100	NCA	Calendaire	25, 35, 45, 55	1, 1.42, 2.02, 2.93	[Christophersen 2006]
Broussely2005_LLI	NCA	Floating	40, 60	1, 3.83	[Broussely 2005]
Broussely2005_3.8V	NCA	Floating	40, 60	1, 8.52	[Broussely 2005]
Broussely2005_3.9V	NCA	Floating	40, 60	1, 4.17	[Broussely 2005]

TABLE B.1 – Diminution de la capacité due à la température, en calendaire, figure 2.22

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Abraham2007	NCA	Cyclage	25, 45	1, 1.76	[Abraham 2007]
Brown2008_LEO	NCA	Cyclage	35, 45, 55	1, 0.86, 2.71	[Brown 2008]
Belt2005	NCA	Cyclage	30, 40, 50	1, 0.90, 0.76	[Belt 2005]
Bloom2003	NCA	Cyclage	25, 45	1, 2.05	[Bloom 2003]
Shim2002	NCA	Cyclage	25, 60	1, 16.25	[Shim 2002]
Kobayashi2007	NCA	Cyclage	0, 20, 40, 60, 80	1, 1.03, 1.49, 2.35, 6.01	[Kobayashi 2007]
Wright2003_C/1	NCA	Cyclage	25, 45	1, 1.5	[Wright 2003]
Wright2003_C/25	NCA	Cyclage	25, 45	1, 2	[Wright 2003]
Liu2011a	NCA	Cyclage	40, 50	1, 1	[Liu 2011]

TABLE B.2 – Diminution de la capacité due à la température, en cyclage, NCA uniquement, figure 2.23

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Pasquier2009_Directe	LMS-LTO	Cyclage	25, 55	1, 2.67	[Pasquier 2009]
Pasquier2009_Inv	LMS-LTO	Cyclage	25, 55	1, 3.53	[Pasquier 2009]
Brown2008_HEV	LMS	Cyclage	25, 45	1, 2.55	[Brown 2008]
Ichimura2005_DOD50	LCO	Cyclage	25, 40, 50	1, 4.74, 5.58	[Ichimura 2005]
Ichimura2005_DOD100	LCO	Cyclage	25, 40, 50	1, 2.75, 4.81	[Ichimura 2005]
Ichimura2005_200c	LCO	Cyclage	25, 40, 50	1, 1.46, 1.46	[Ichimura 2005]
Ramadass2003_150c	LCO	Cyclage	25, 50	1, 1.01	[Ramadass 2003]
Ramadass2003_300c	LCO	Cyclage	25, 50	1, 1.18	[Ramadass 2003]
Ramadass2003_600c	LCO	Cyclage	25, 50	1, 1.93	[Ramadass 2003]
Liu2010	LFP	Cyclage	15, 60	1, 8.53	[Liu 2010]
Groot2012_A	LFP	Cyclage	23, 35	1, 0.70	[Groot 2012]
Groot2012_C	LFP	Cyclage	23, 35	1, 1	[Groot 2012]
Safari2011_simple	LFP	Cyclage	25, 45	1, 3.59	[Safari 2011]
Safari2011_complexe	LFP	Cyclage	25, 45	1, 3.5	[Safari 2011]
A123	LFP	Cyclage	25, 45, 60	1, 2.26, 4.36	[A123 2009]

TABLE B.3 – Diminution de la capacité due à la température, en cyclage, figure 2.24

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Thomas2003_SOC60	NCA	Calendaire	25, 35, 45, 55	1, 1.32, 1.64, 2.29	[Thomas 2003]
Thomas2003_SOC80	NCA	Calendaire	25, 35, 45, 55	1, 1.23, 1.52, 2.47	[Thomas 2003]
Thomas2003_SOC100	NCA	Calendaire	25, 35, 45, 55	1, 1.30, 1.45, 2.17	[Thomas 2003]
Sarre2004	NCA	Calendaire	20, 40	1, 3.5	[Sarre 2004]
Jungst2000_1mois	NiCo	Calendaire	40, 50, 70	1, 1.29, 2.21	[Jungst 2000]
Jungst2000_2mois	NiCo	Calendaire	40, 50, 70	1, 1.67, 1.87	[Jungst 2000]
Mori2009	NCA	Calendaire	40, 60	1, 3.31	[Mori 2009]
Abraham2007_Cal	NCA	Calendaire	45, 55	1, 1.06	[Abraham 2007]
Wright2002	NiCo	Calendaire	40, 50, 60, 70	1, 0.98, 0.83, 0.99	[Wright 2002]
Kassem2012_SOC30	LFP	Calendaire	30, 45, 60	1, 2.67, 2.42	[Kassem 2012]
Kassem2012_SOC65	LFP	Calendaire	30, 45, 60	1, 5.75, 8.38	[Kassem 2012]
Kassem2012_SOC100	LFP	Calendaire	30, 45, 60	1, 4.67, 6.22	[Kassem 2012]
Amine2001_SOC40	NiCo	Calendaire	40, 50, 60, 70	1, 2.19, 5.75, 13.75	[Amine 2001]
Amine2001_SOC60	NiCo	Calendaire	40, 50, 60, 70	1, 1.71, 4.36, 9.57	[Amine 2001]
Broussely2005_SOC50	NCA	Calendaire	40, 60	1, 10.67	[Broussely 2005]
Broussely2005_SOC100	NCA	Calendaire	40, 60	1, 12.27	[Broussely 2005]

TABLE B.4 – Augmentation d'impédance due à la température, en calendaire, figure 2.25

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Bloom2003_Cyc	NCA	Cyclage	25, 45	1, 2.32	[Bloom 2003]
Bloom2003_Cal	NCA	Cyclage	45, 55	1, 1.45	[Bloom 2003]
Haifeng2009	-	Cyclage	20, 30, 40, 50	1, 1.92, 2.27, 6.66	[Haifeng 2009]
Takei2001	LCO	Cyclage	10, 25, 40, 55	1, 2.71, 7.46, 13.17	[Takei 2001]
Kobayashi2007	NCA	Cyclage	0, 20, 40, 60, 80	1, 1, 1.05, 1.14, 1.57	[Kobayashi 2007]
Abraham2007_Cyc	NCA Gen2	Cyclage	25, 45	1, 1.76	[Abraham 2007]
Matsushima2009_Z200	LMS	Floating	45, 55, 60	1, 1.27, 1.33	[Matsushima 2009]
Matsushima2009_Zrise	LMS	Floating	45, 55, 60	1, 1.01, 2.90	[Matsushima 2009]
Wright2003	NCA	Cyclage	25, 45	1, 2	[Wright 2003]
Thomas2008_7mois	NCA	Cyclage	30, 40, 47.5, 55	1, 2.14, 3.29, 4.57	[Thomas 2008]
Thomas2008_lin	NCA	Cyclage	30, 40, 47.5, 55	1, 1.92, 2.67, 3.33	[Thomas 2008]
Itou2005	NCA	Cyclage	20, 60	1, 2.23	[Itou 2005]
Belt2005	NCA	Cyclage	30, 40, 50	1, 0.97, 1.07	[Belt 2005]
Groot2012_A	LFP	Cyclage	23, 35	1, 0.95	[Groot 2012]
Groot2012_C	LFP	Cyclage	23, 35	1, 1	[Groot 2012]
Liu2011a	NCA	Cyclage	40, 50	1, 2	[Liu 2011]

TABLE B.5 – Augmentation d'impédance due à la température, en cyclage, figure 2.26

B.2 Influence de la profondeur de décharge (DOD)

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Shim2003b_C/2	NCA	Cyclage	70, 100	1, 4.46	[Shim 2003]
Shim2003b_C/25	NCA	Cyclage	70, 100	1, 2.65	[Shim 2003]
Takei2001	LCO	Cyclage	70, 80, 90, 100	1, 1.32, 1.30, 1.46	[Takei 2001]
Brown2008_25°C	LMS	Cyclage	20, 40	1, 1.10	[Brown 2008]
Brown2008_45°C	LMS	Cyclage	20, 40	1, 1.50	[Brown 2008]
Guena2006_CF	LMP	Cyclage	50, 60, 70, 80, 100	1, 1.89, 1.87, 3.18, 4.76	[Guena 2006]
Guena2006_CycleLife	LMP	Cyclage	50, 60, 70, 80, 100	1, 1.63, 1.63, 2.71, 2.6	[Guena 2006]
Takeno2005	LCO	Cyclage	3, 6, 12, 25, 50, 100	1, 0.51, 0.37, 0.34, 0.22, 0.15	[Takeno 2005]
Ning2004_200cycles	LCO	Cyclage	40, 60	1, 1.92	[Ning 2004]
Ning2004_400cycles	LCO	Cyclage	40, 60	1, 1.41	[Ning 2004]
Ning2004_600cycles	LCO	Cyclage	40, 60	1, 1.30	[Ning 2004]
Ning2004_800cycles	LCO	Cyclage	40, 60	1, 1.26	[Ning 2004]
Peterson2010	LFP	Cyclage	35, 59, 73, 97	1, 0.80, 0.75, 0.59	[Peterson 2010]
Fellner2003_CycleLife	NiCo	Cyclage	40, 50, 60	1, 1.91, 2.64	[Fellner 2003]
Fellner2003_CTLife	NiCo	Cyclage	40, 50, 60	1, 1.53, 1.76	[Fellner 2003]
Ichimura2005_Fin	LCO	Cyclage	25, 50, 100	1, 1.15, 1.82	[Ichimura 2005]
Ichimura2005_180cycles	LCO	Cyclage	25, 50, 100	1, 1, 1	[Ichimura 2005]
Groot2012	LFP	Cyclage	17, 100	1, 22.93	[Groot 2012]
Liu2011a	NCA	Cyclage	20, 40	1, 2.8	[Liu 2011]
Herb2009_5C	LFP	Cyclage	5, 10	1, 1.58	[Herb 2009]
Herb2009_14C	LFP	Cyclage	30, 60	1, 1.54	[Herb 2009]

TABLE B.6 – Diminution de la capacité due à la DOD, figure 2.27

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Haifeng2009	-	Cyclage	20, 40, 60	1, 1.16, 1.37	[Haifeng 2009]
Shim2003b	NCA	Cyclage	70, 100	1, 3.24	[Shim 2003]
Groot2012	LFP	Cyclage	17, 100	1, 16.67	[Groot 2012]
Liu2011a	NCA	Cyclage	20, 40	1, 2.4	[Liu 2011]

TABLE B.7 – Augmentation d'impédance due à la DOD, figure 2.28

B.3 Influence de l'état de charge (SOC)

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Takei2001	LCO	Cyclage	37.5, 50, 62.5, 75, 87.5, 100	0.06, 1, 2.63, 3.63, 4.5, 5.13	[Takei 2001]
Brown2008	NCA	Cyclage	40, 60, 80	1, 1.12, 1.06	[Brown 2008]
Takeno2005_2mois	LCO	Cycl+Cal	50, 75, 100	1, 2.02, 3	[Takeno 2005]
Takeno2005_8mois	LCO	Cycl+Cal	50, 75, 100	1, 1.73, 2.63	[Takeno 2005]
Ichimura2005_Cal	LCO	Calendaire	50, 75, 100	1, 1.69, 2.56	[Ichimura 2005]
Ichimura_Cycl	LCO	Cyclage	25, 75	1, 5.42	[Ichimura 2005]
Kassem2012_30°C	LFP	Calendaire	30, 65, 100	1, 1.26, 1.2	[Kassem 2012]
Kassem2012_45°C	LFP	Calendaire	30, 65, 100	1, 1.3, 1.3	[Kassem 2012]
Kassem2012_60°C	LFP	Calendaire	30, 65, 100	1, 1.16, 1.24	[Kassem 2012]
Safari2011_25°C	LFP	Calendaire	50, 100	1, 1.73	[Safari 2011]
Safari2011_45°C	LFP	Calendaire	50, 100	1, 1.23	[Safari 2011]
Christophersen2006_25°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.5, 2.04	[Christophersen 2006]
Christophersen2006_35°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.39, 2.13	[Christophersen 2006]
Christophersen2006_45°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.53, 1.81	[Christophersen 2006]
Christophersen2006_55°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.71, 1.53	[Christophersen 2006]

TABLE B.8 – Diminution de la capacité due au SOC, figure 2.29

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Amine2001_40°C	NiCo	Calendaire	40, 60	1, 1.75	[Amine 2001]
Amine2001_50°C	NiCo	Calendaire	40, 60	1, 1.37	[Amine 2001]
Amine2001_60°C	NiCo	Calendaire	40, 60	1, 1.32	[Amine 2001]
Amine2001_70°C	NiCo	Calendaire	40, 60	1, 1.22	[Amine 2001]
Broussely2005_20°C	NCA	Calendaire	50, 100	1, 1.67	[Broussely 2005]
Broussely2005_40°C	NCA	Calendaire	50, 100	1, 2.47	[Broussely 2005]
Broussely2005_60°C	NCA	Calendaire	50, 100	1, 4.07	[Broussely 2005]
Kassem2012_30°C	LFP	Calendaire	30, 65, 100	1, 0.67, 0.75	[Kassem 2012]
Kassem2012_45°C	LFP	Calendaire	30, 65, 100	1, 1.44, 1.31	[Kassem 2012]
Kassem2012_60°C	LFP	Calendaire	30, 65, 100	1, 2.31, 1.93	[Kassem 2012]
Christophersen2006_25°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.21, 1.60	[Christophersen 2006]
Christophersen2006_35°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.17, 1.83	[Christophersen 2006]
Christophersen2006_45°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.24, 1.54	[Christophersen 2006]
Christophersen2006_55°C	NCA	Calendaire	60, 80, 100	1, 1.64, 1.74	[Christophersen 2006]

TABLE B.9 – Augmentation d'impédance due au SOC, en calendaire, figure 2.30

B.4 Influence de la tension de charge

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Choi2002_U	LCO	Cyclage	4.2, 4.25, 4.3, 4.35	1, 3.62, 3.85, 7.88	[Choi 2002]
Ramasamy2005_5Fl	LCO	Floating	4, 4.2	1, 2.54	[Ramasamy 2005]
Ramasamy2005_35Fl	LCO	Floating	4, 4.2	1, 1.07	[Ramasamy 2005]
Ramasamy2005_5Ca	LCO	Calendaire	4, 4.2	1, 1.65	[Ramasamy 2005]
Ramasamy2005_35Ca	LCO	Calendaire	4, 4.2	1, 1.30	[Ramasamy 2005]
Asakura2003	LCO	Floating	4, 4.1, 4.2, 4.3	1, 2.67, 5.20, 12.16	[Asakura 2003]
Ramadass2002	LCO	Cyclage	4, 4.05, 4.1, 4.17, 4.3	1, 0.89, 2.40, 1.29, 1.66	[Ramadass 2002]
Ning2004	LCO	Cyclage	4, 4.2	1, 1.5	[Ning 2004]
Broussely2001	LCO	Floating	3.8, 3.9, 4	1, 1.05, 1.44	[Broussely 2001]
Sarre2004	NCA	Floating	3.6, 3.8, 4	1, 2.05, 3.85	[Sarre 2004]
Broussely2005_40°C	NCA	Floating	3.8, 3.9	1, 2.05	[Broussely 2005]
Broussely2005_60°C	NCA	Floating	3.8, 3.9	1, 1	[Broussely 2005]

TABLE B.10 – Dégradation due à la tension, figure 2.31

B.5 Influence du niveau de courant

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Choi2002_charge	LCO	Cyclage	1, 1.2, 1.4	1, 3.02, 4.30	[Choi 2002]
Choi2002_décharge	LCO	Cyclage	1, 1.1, 1.3, 1.5, 2	1, 1.18, 1.34, 1.69, 3.27	[Choi 2002]
Liu2010	LFP	Cyclage	0.5, 6	1, 5.01	[Liu 2010]
Ning2003_total	LCO	Cyclage	1, 2, 3	1, 1.39, 1.78	[Ning 2003]
Ning2003_tendance	LCO	Cyclage	1, 2, 3	1, 1.6, 2.42	[Ning 2003]
Takei2001_charge	LCO	Cyclage	0.2, 0.5, 1	1, 1, 1.7	[Takei 2001]
Takei2001_décharge	LCO	Cyclage	0.2, 0.5, 1	1, 1, 1.5	[Takei 2001]
Kim2009	LMS	Cyclage	1, 5	1, 1.19	[Kim 2009]
Ramadass2002	LMS	Cyclage	0.25, 0.5, 0.75, 1	1, 0.93, 1.1, 1.05	[Ramadass 2002]
Liu2011a_20%DOD	NCA	Cyclage	10, 20	1, 1.17	[Liu 2011]
Liu2011a_40%DOD	NCA	Cyclage	10, 20	1, 2.46	[Liu 2011]
Liu2011a_40%DOD_CT/2	NCA	Cyclage	10, 20	1, 1.61	[Liu 2011]

TABLE B.11 – Diminution de la capacité due au courant, en cyclage, figure 2.32

Série	Techno	Nature	Paramètres	Scores	Référence
Liu2011a_20%DOD	NCA	Cyclage	10, 20	1, 0.74	[Liu 2011]
Liu2011a_40%DOD	NCA	Cyclage	10, 20	1, 1.95	[Liu 2011]
Liu2011a_40%DOD_CT/2	NCA	Cyclage	10, 20	1, 1	[Liu 2011]
Haifeng2009	-	Cyclage	2, 3, 5	1, 1.41, 1.98	[Haifeng 2009]

TABLE B.12 – Augmentation de l'impédance due au courant, en cyclage, figure 2.33

Cycles normalisés dans le domaine du transport

Sommaire

C.1 Cycles US	192
C.2 Cycles Europe	196
C.3 Cycles Japon	197
C.4 Cycles Chine	198
C.5 Uniformisation	199
C.6 Véhicules Lourds	200
C.7 Récapitulatif	203

La notion de cycles normalisés ou standardisés est très répandue dans l'univers automobile. En effet, il a été assez rapidement nécessaire de proposer une méthode pour comparer différents véhicules dans un référentiel commun afin d'en déterminer la performance relative (notamment en terme de consommation de carburant). <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>

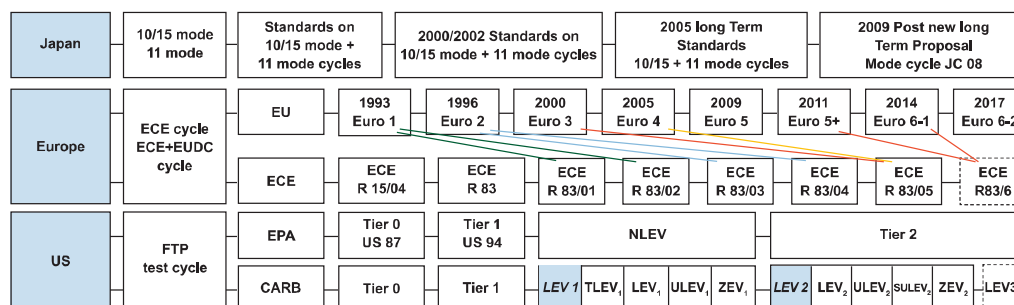


FIGURE C.1 – Panoramas des procédures de test d'émissions

C.1 Cycles US

Aux Etats-Unis, les agences EPA et CARB proposent cycles et procédures normalisés pour l'évaluation des véhicules légers (passengers vehicles, light-duty vehicles) et lourds (heavy-duty vehicles).

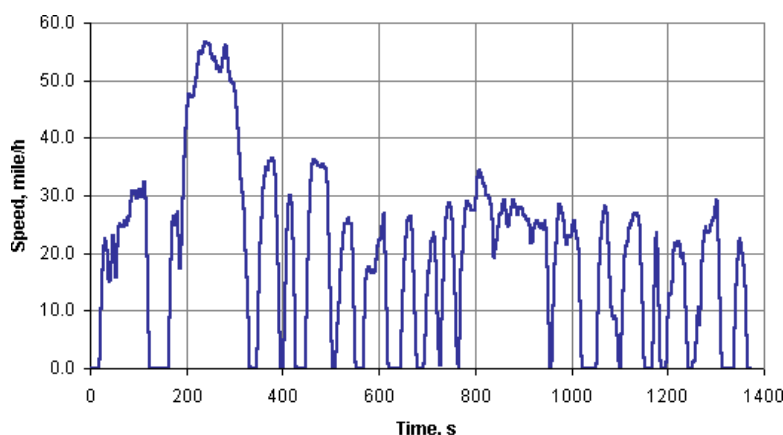


FIGURE C.2 – Cycle Federal Test Procedure 72

Le cycle FTP-72 est un cycle à destination des véhicules légers. Il comporte deux phases, séparées entre elles par un arrêt moteur de 10 minutes. La première phase commence moteur froid. Il simule un tracé plutôt urbain, avec des arrêts fréquents, une vitesse moyenne de 31.5km/h et une vitesse maximale de 91.2km/h. Ce cycle de 12.07km dure 1369 secondes, sans comptabiliser la coupure moteur intercalée. Les deux phases sont pondérées par les facteurs 0.43 et 0.57 respectivement. Ce cycle est aussi nommé UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) ou LA-4.

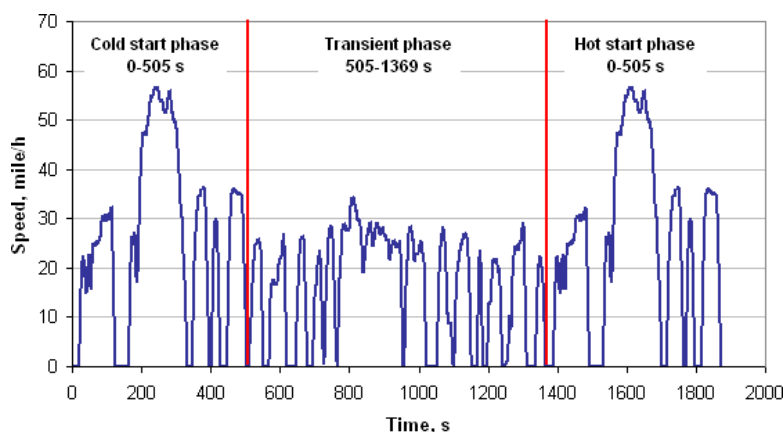


FIGURE C.3 – Cycle Federal Test Procedure 75

Le cycle FTP-75 est une variante du cycle FTP-72. La phase n°1 est répétée à l'issue du cycle FTP-72, avec un démarrage à chaud cette fois-ci. L'ajout dure 505 secondes ce qui porte la durée totale du cycle à 1874 secondes, la distance parcourue à 17.77km et la vitesse moyenne à 34.1 km/h. Ce cycle admet à son tour deux variantes : US06 dans lequel la conduite est plus agressive et à vitesse plus élevée, et SC03 qui inclut l'emploi de la climatisation.

Le cycle US06 simule un trajet autoroutier de 12.8km parcouru à une vitesse moyenne de 77.9km/h (soit 596 secondes) et atteignant 129.2km/h de vitesse de pointe. Le cycle SC03 présente lui des caractéristiques assez proches de la phase n°1 du cycle FTP-72. Ces cycles font partie du SFTP

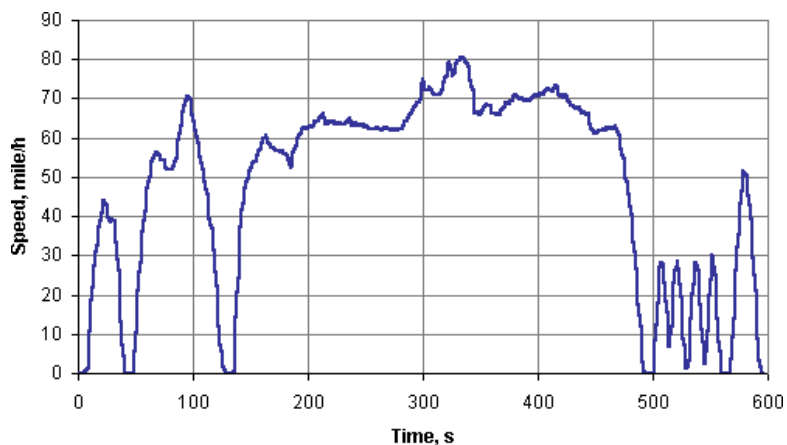


FIGURE C.4 – Cycle Federal Test Procedure US06

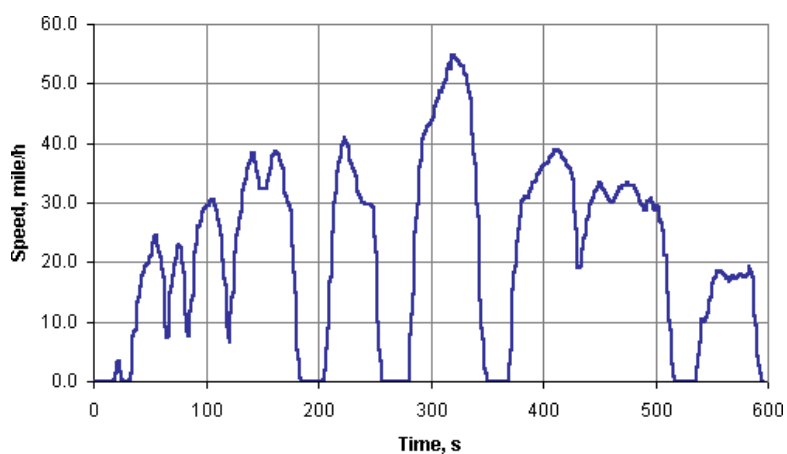


FIGURE C.5 – Cycle Federal Test Procedure SC03

(Supplemental Federal Test Procedure), qui est censé compenser quelques lacunes du cycle FTP-75.

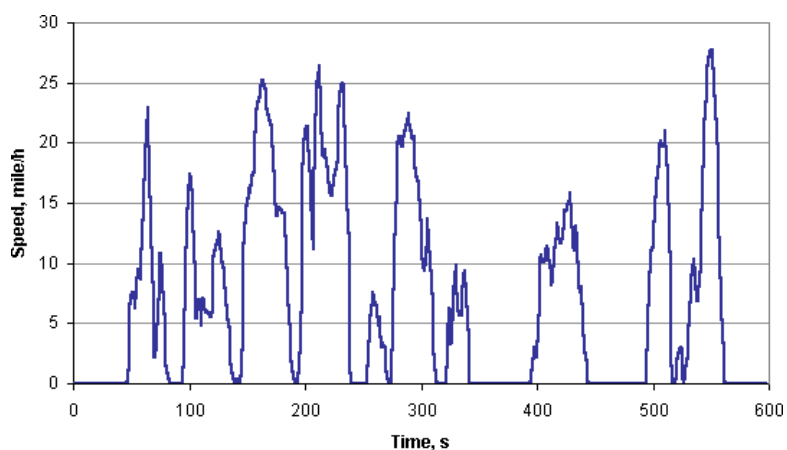


FIGURE C.6 – Cycle EPA NYCC

Le cycle EPA NYCC peut se révéler intéressant pour l'évaluation d'un véhicule dans le cadre d'un trafic très congestionné. Sa durée de 598 secondes pour 1.89km lui confère une vitesse moyenne de

seulement 11.4km/h et une fréquence d'arrêt proche de 5 arrêts par kilomètre.

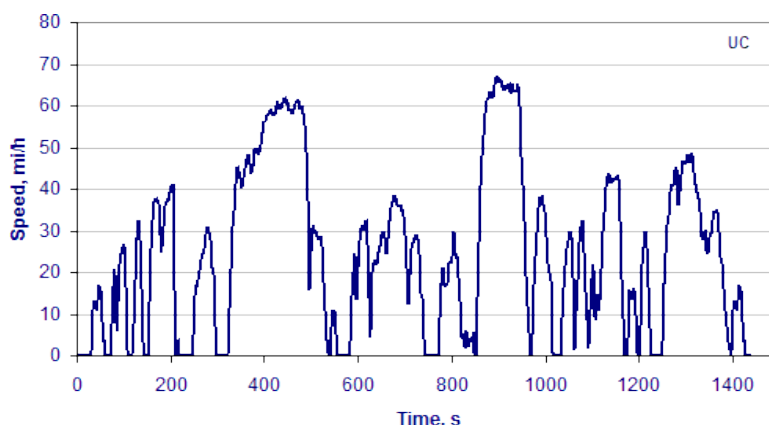


FIGURE C.7 – Cycle CARB UC (unified cycle)

Le cycle UC ou LA92 proposé par le CARB (California Air Ressource Board) est un cycle dans le même esprit que le FTP-75 mais qui présente un profil plus "agressif" (accélération, vitesse, mais moins d'arrêts et de ralenti moteur). Il dure 1435 secondes pour 15.7km parcourus à 39.6km/h de moyenne.

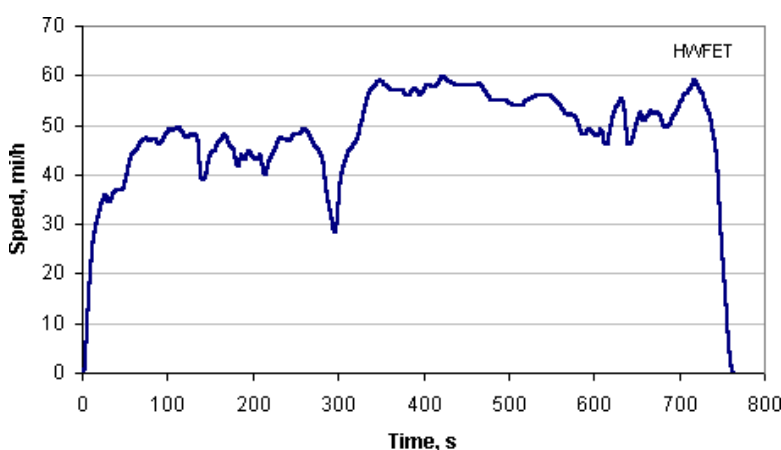


FIGURE C.8 – Highway Federal Emission Test

Le cycle HWFET est un cycle autoroutier, de 16.45km parcourus à 77.7km/h de moyenne.

Les cycles Standard Road Cycle (SRC) and Standard Bench Cycle (SBC) ont été développés pour étudier l'évolution des émissions polluantes d'un véhicule jusqu'à la fin de sa vie commerciale (120 000 miles). Ils ont été proposés par l'agence de protection environnementale américaine (EPA) en 2005. Le cycle SRC s'adresse aux véhicules complets passés sur des bancs à rouleaux alors que le cycle SBC concerne uniquement le moteur. Tous deux sont caractérisés par une extrême simplicité.

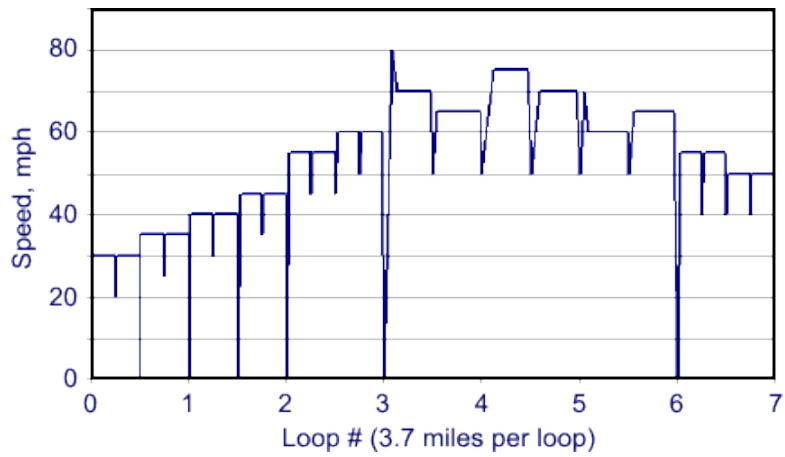


FIGURE C.9 – Standard Road Cycle

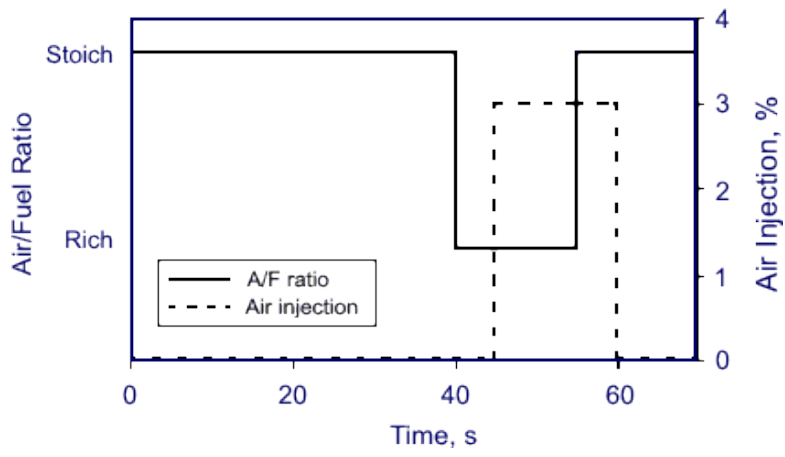


FIGURE C.10 – Standard Bench Cycle

C.2 Cycles Europe

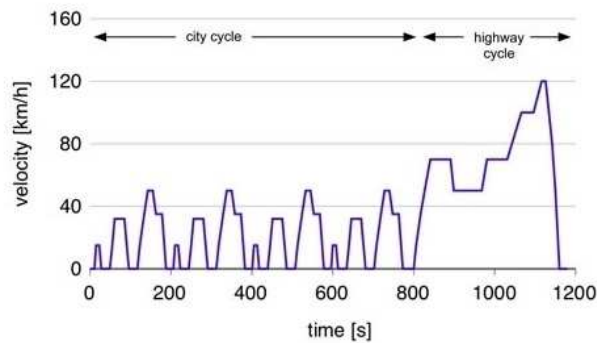


FIGURE C.11 – New European Driving Cycle

En Europe, c'est la commission européenne qui réglemente les procédures d'évaluation des véhicules. Le cycle de référence se nomme NEDC pour New European Driving Cycle ou encore MVEG-A. Il se compose de deux phases. La première phase consiste en la répétition à 4 reprises d'un cycle élémentaire ECE-15, de caractère plutôt urbain avec une vitesse moyenne 18.7km/h sur un trajet de 1km environ sur lequel la vitesse ne dépasse pas 50km/h. La seconde phase est un cycle à vocation extra-urbaine (EUDC) de 7km de long environ parcouru à une vitesse moyenne de 62.6km/h et atteignant 120km/h en pointe. La combinaison des deux phases résulte en un cycle de 11km environ parcouru à 33.6km/h de moyenne. On peut noter qu'une variante existe dans laquelle la seconde phase est plafonnée à 90km/h afin de tester des véhicules aux performances plus modestes.

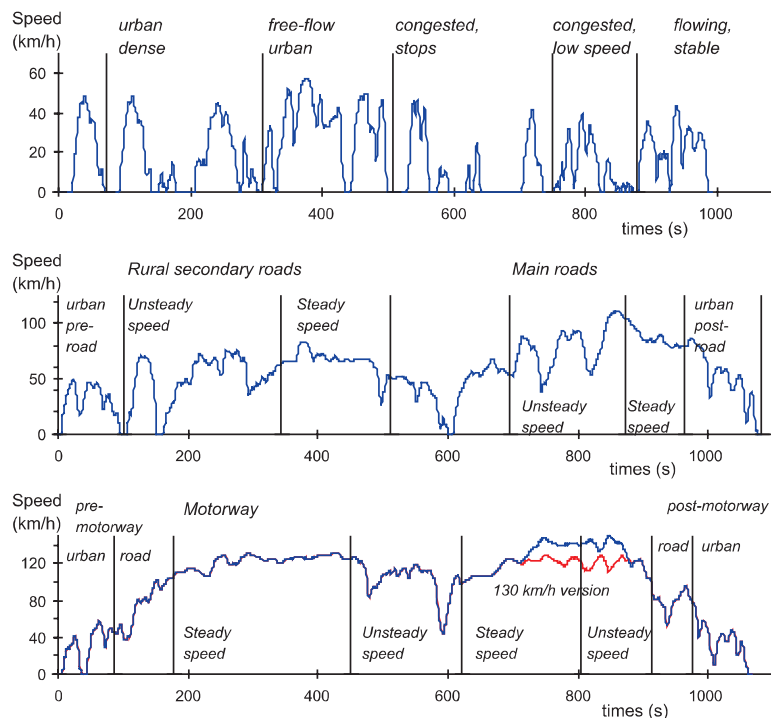


FIGURE C.12 – Cycles représentatifs ARTEMIS

Plus récemment, le projet “ARTEMIS”(Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) a proposé 3 nouveaux cycles représentatifs des usages urbain, routier et auto-routier [André 2004]. Ils sont reproduits en figure C.12. Ces cycles intègrent également des consignes de changement de rapport.

C.3 Cycles Japon

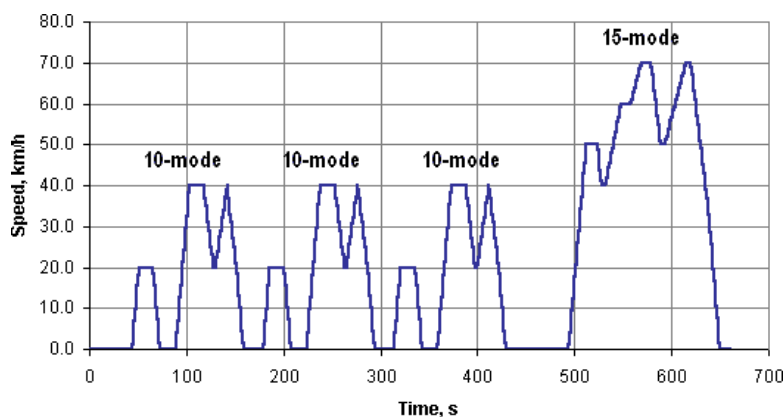


FIGURE C.13 – Cycle 10-15 Mode

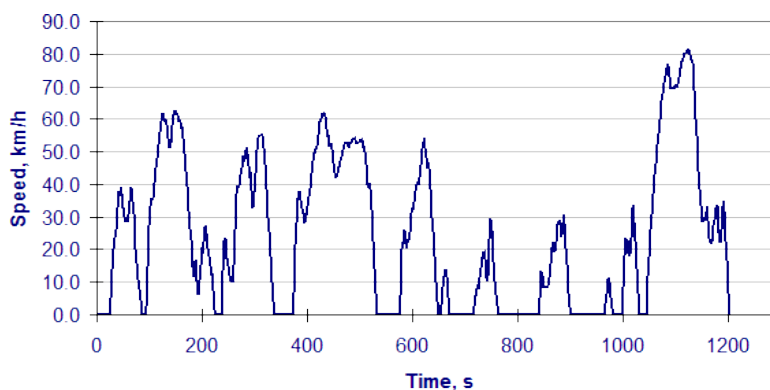


FIGURE C.14 – Cycle JC08

Le cycle 10-15 mode est le cycle réglementaire japonais. Il combine trois répétitions du mode 10 suivies d’une itération du mode 15. C’est le plus lent des cycles réglementaires décrits ici avec une vitesse moyenne de 22.7km/h sur un trajet de 4.16km. La vitesse maximale atteinte n’est que de 70km/h.

Un nouveau cycle, baptisé “JC08”, s’apprête à entrer en vigueur pour l’évaluation des émissions polluantes et des consommations des véhicules introduit sur la marché japonais.

C.4 Cycles Chine

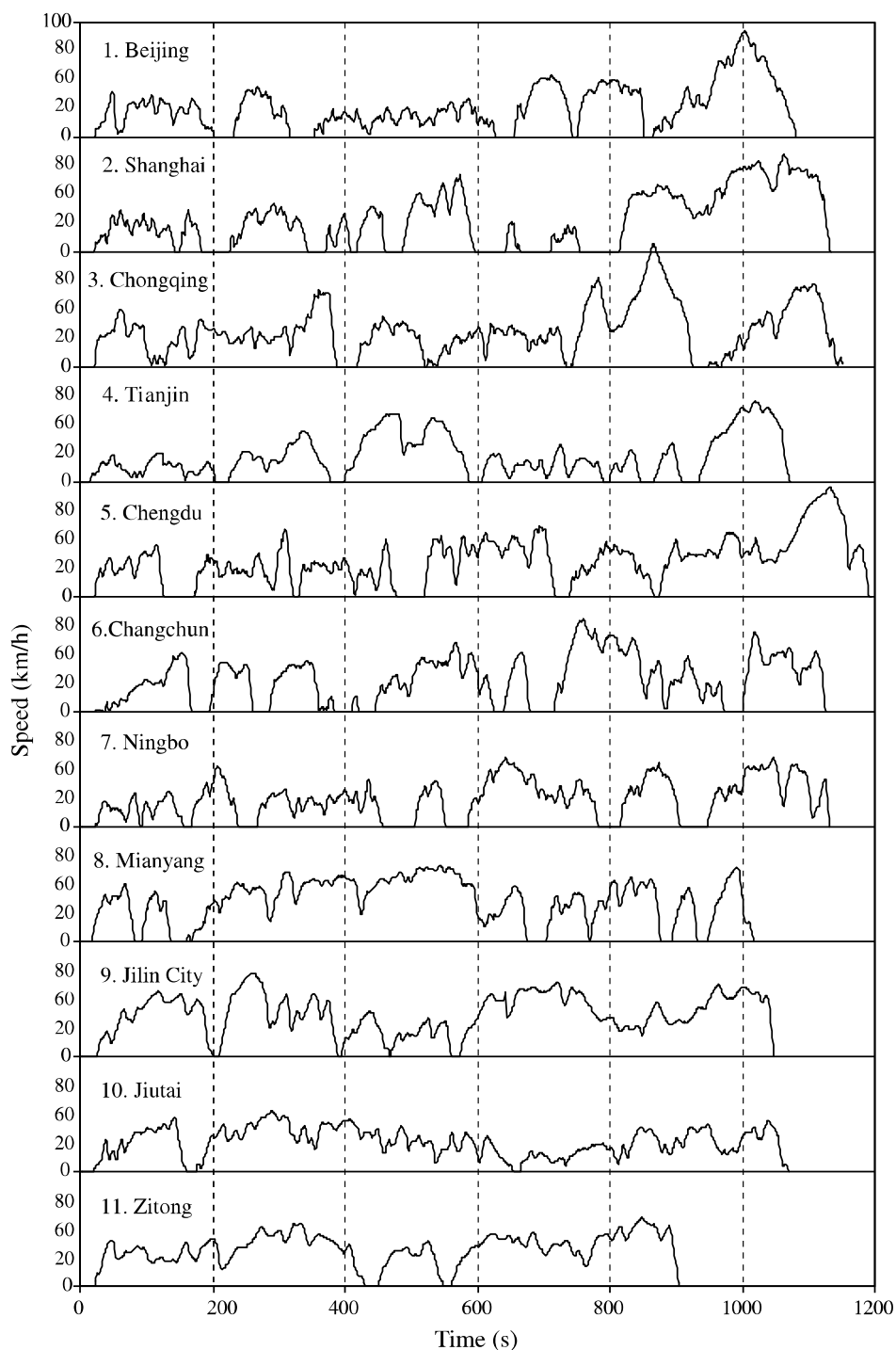
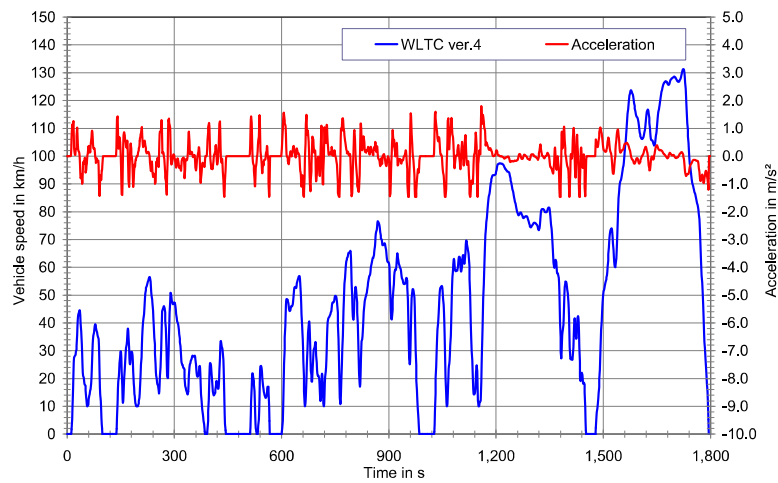


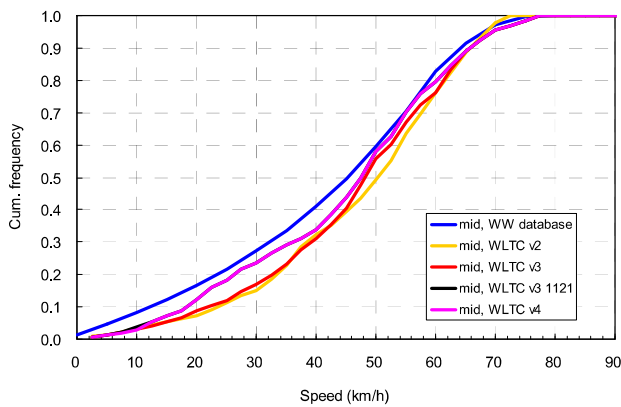
FIGURE C.15 – Cycles représentatifs pour plusieurs agglomérations chinoises [Wang 2008]

Avec 18 millions de véhicules vendus par an et une croissance soutenue des ventes, le contexte chinois mérite une certaine attention. [Wang 2008] propose des cycles représentatifs pour plusieurs villes chinoises.

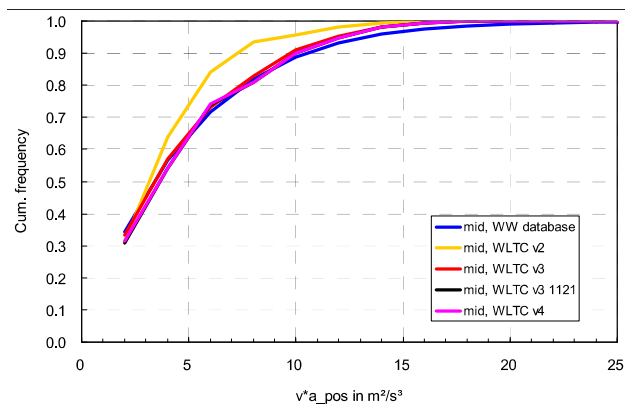
C.5 Uniformisation



(a) Cycle WLTC dans sa version 4



(b) Respect de la distribution des vitesses



(c) Respect de la distribution des accélérations

FIGURE C.16 – Le projet de cycle WLTC [WLTP 2012]

Un projet international en cours vise à établir un cycle réglementaire, à l'échelle mondiale (USA, UE, Japon, Corée, Chine, Inde), dont la représentativité serait en progrès par rapport aux cycles régionaux existants (FTP-75,10-15 mode, NEDC). Ce cycle WLTC (pour World-wide Light-duty Test Cycle) s'adresse aux véhicules légers [WLTP 2012].

C.6 Véhicules Lourds

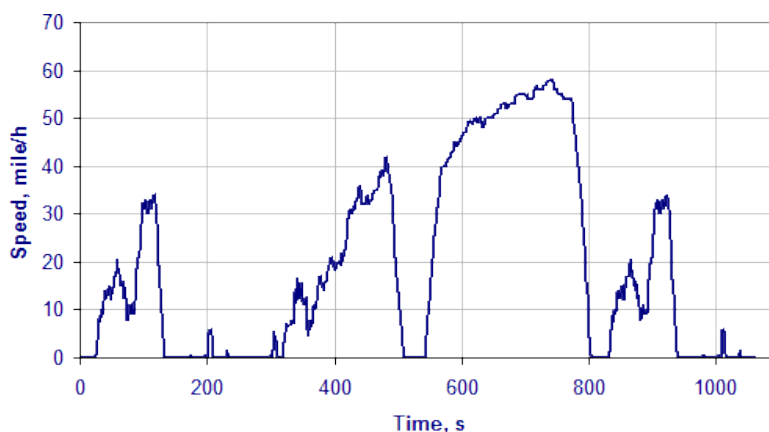


FIGURE C.17 – Heavy-Duty Urban Dynamometer Driving Schedule

Le cycle HD-UDDS (Heavy-Duty Urban Dynamometer Driving Schedule) est un cycle destiné aux véhicules lourds. Proposé par l'EPA, il comprend 8.9km parcourus à 30.4km/h de moyenne et 93.3km/h de vitesse de pointe.

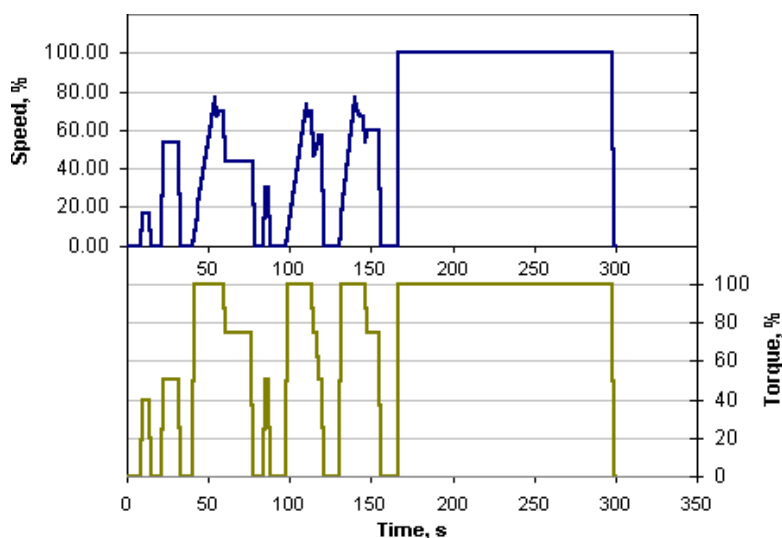


FIGURE C.18 – Chicago Transit Authority

Le cycle CTA (Chicago Transit Authority), pour véhicules de transport en commun, est à destination des essais moteurs. Il sert au vieillissement sur banc moteur des moteurs et de leurs composants mais aussi des organes de dépollution. Il est généralement conduit en continu, pendant des centaines d'heures parfois.

Le cycle Manhattan Bus Cycle s'adresse aux autobus urbains complets pour essais sur banc à rouleaux. Il a été développé en s'inspirant d'observations réelles sur les bus utilisés dans le centre de New York. Il présente la plus faible vitesse moyenne de tous les cycles présentés ici.

Le "Orange County Bus Cycle" a été mis au point par l'Université de West Virginia¹, sur la base de mesures faites sur les bus urbains de LA.

1. <http://cafee.wvu.edu/>

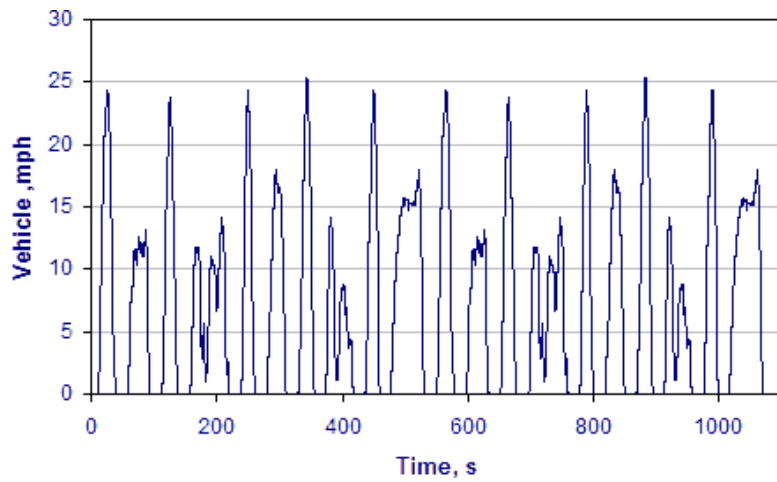


FIGURE C.19 – Manhattan

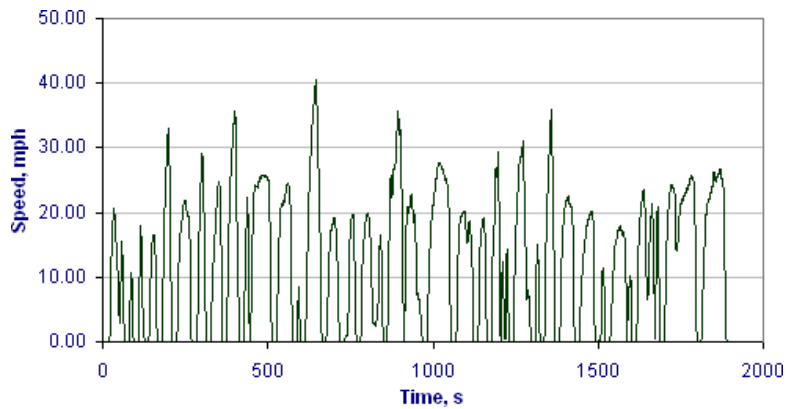


FIGURE C.20 – Orange County Bus Cycle

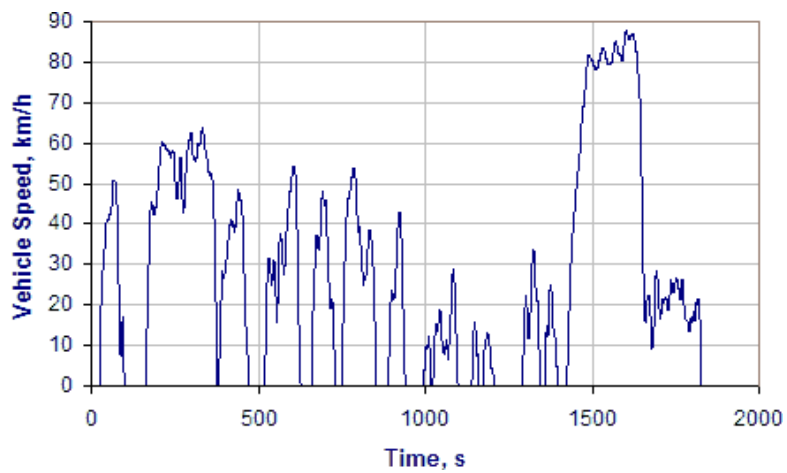
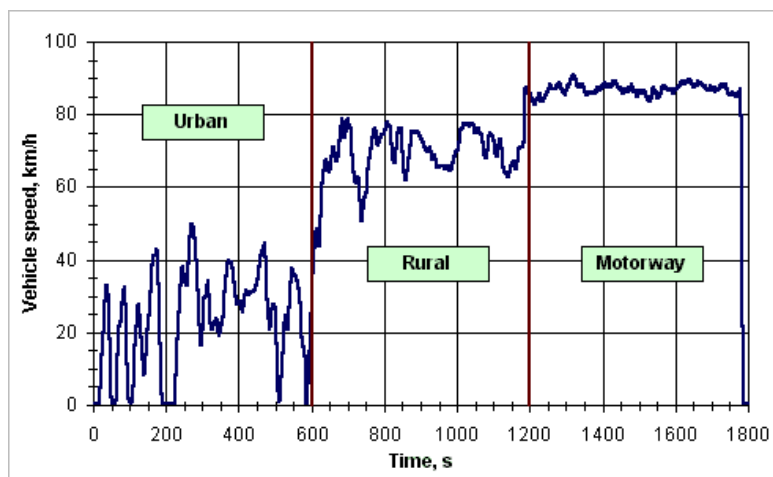
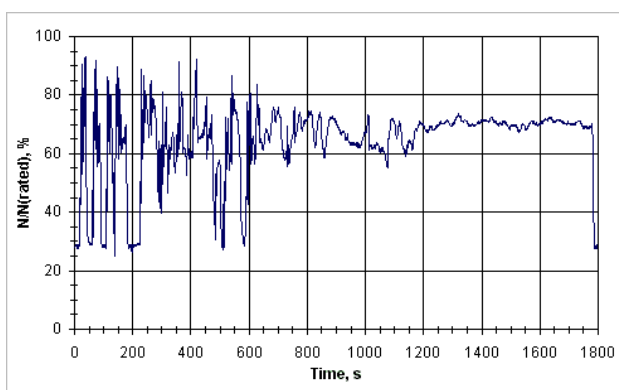


FIGURE C.21 – Cycle Japonais pour véhicule lourd : JE05 ou ED12

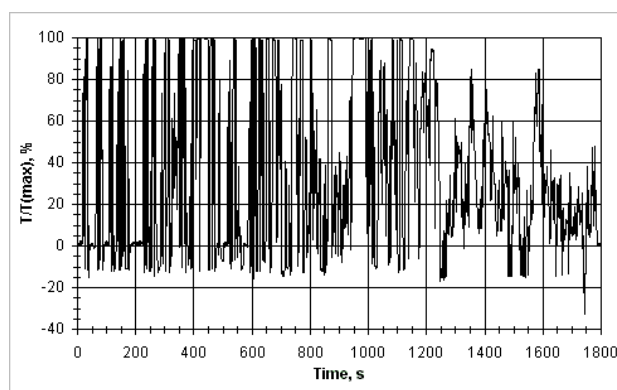
Le cycle japonais JE05 s'adresse aux véhicules de plus de 3.5t. Il est censé représenter les conditions de circulation rencontrées à Tokyo. Il existe également une version banc moteur de ce cycle.



(a) Cycle ETC pour véhicule



(b) Régime pour cycle moteur



(c) Couple pour cycle moteur

FIGURE C.22 – Cycle européen pour véhicule lourd : ETC (ex-Fige)

En Europe, un cycle dédié aux poids lourds et comportant trois portions distinctes a été proposé par le FIGE. Deux versions de ce cycle ETC existent : l'une pour l'évaluation du véhicule sur banc à rouleaux, l'autre pour l'évaluation du seul moteur (consignes régime-couple).

C.7 Récapitulatif

Cycle	Pays	Véh.	Distance km	Durée s	Vmoy km/h	Vmax km/h	Représentativité	Sévérité
FTP72	USA	VL	12.07	1369	31.5	91.2	*	*
FTP75	USA	VL	17.77	1874	34.1	91.2	*	**
SFTP-US06	USA	VL	12.8	596	77.9	129.6	*	***
SFTP-SC03	USA	VL	5.8	596	34.8	88.2	*	***
EPA NYCC	USA	VL	1.89	598	11.4	44.6	*	**
CARB UC	USA	VL	15.7	1435	39.6	107	*	**
HWFET	USA	VL	16.45	765	77.7	96	*	**
SRC	USA	VL	41.4	2014	74.1	120	-	-
NEDC	UE	VL	11.01	1180	33.6	120	--	--
ECE-15	UE	VL	1.01	195	18.7	50	--	--
EUDC	UE	VL	6.96	400	62.6	120	--	--
ARTURB	UE	VL	4.47	920	17.5	58	***	**
ARTROUT	UE	VL	17.27	1081	57.5	112	***	**
ARTAUT	UE	VL	28.74	1067	97.0	132	***	**
10-15 mode	Japon	VL	4.16	660	22.7	70	--	--
JC08	Japon	VL	8.17	1204	24.4	81.6	*	-
Beijing	Chine	VL	7.8	1075	26.1	92.1	**	-
Shanghai	Chine	VL	8.5	1125	27.2	85	**	*
WLTC	Monde	VL		1800		132	**	**
HD-UDDS	USA	PL	8.9	1060	30.4	93.3	*	*
Manhattan	USA	Bus	3.3	1089	11	40.9	*	*
OC bus	USA	Bus	12.07	1369	31.5	91.2	*	*
JE05	Japon	PL	13.5	1800	26.9	88	*	*
ETCURB	UE	PL	3.9	600	23.3	50	*	*
ETCROUT	UE	PL	11.6	600	69.3	80	*	*
ETCAUT	UE	PL	14.1	600	84.4	90	*	*

TABLE C.1 – Caractéristiques des cycles normalisés

Détails des paramètres utilisés pour l'analyse des différents véhicules

Sommaire

D.1 Vélos à assistance électrique	206
D.1.1 Assistance fixe - moteur roue	206
D.1.2 Assistance proportionnelle - système Panasonic	207
D.2 Véhicules électriques	208
D.2.1 Quadricycle urbain - Aixam Megacity	208
D.3 Véhicules hybrides	209
D.3.1 Toyota Prius	209
D.4 Véhicules lourds	210
D.4.1 Trolleybus Irisbus	210

D.1 Vélos à assistance électrique

D.1.1 Assistance fixe - moteur roue

Variable	Traitement appliqué	Réglages
Courant	Points aberrants	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5
Tension	Points aberrants	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5
Vitesse	Points aberrants, Filtrage BF	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5, $F_{coupure} = F_{\text{échantillonnage}} / 40$
Température	Points aberrants, Filtrage BF	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5, $F_{coupure} = F_{\text{échantillonnage}} / 100$

TABLE D.1 – Filtrages appliqués aux données du VAE Sparta

Paramètre	Valeur
Décharge	
IMAX_DE_dbl	16A
PAS_DE_dbl	1A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	3.6mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	0.5s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	2A
I_SEUIL_DE_dbl	0.4A
Partionnement	
NB_CLASSES_dbl	6
ORDRE_MAX_dbl	15

TABLE D.2 – Paramètres de classification pour VAE Sparta

D.1.2 Assistance proportionnelle - système Panasonic

Variable	Traitement appliqué	Réglages
Courant	Points aberrants	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5
Tension	Points aberrants	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5
Vitesse	Points aberrants, Filtrage BF	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5, $F_{coupure} = F_{\text{échantillonnage}} / 40$
Température	Points aberrants, Filtrage BF	boxplot() avec whisker=20, filtre_pic() avec fenêtre=5, $F_{coupure} = F_{\text{échantillonnage}} / 100$

TABLE D.3 – Filtrages appliqués aux données du VAE Kalkhoff

Paramètre	Valeur
Décharge	
IMAX_DE_dbl	18A
PAS_DE_dbl	1A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	3.6mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	0.5s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	2A
I_SEUIL_DE_dbl	0.4A
Partionnement	
NB_CLASSES_dbl	6
ORDRE_MAX_dbl	15

TABLE D.4 – Paramètres de classification pour VAE Kalkhoff

D.2 Véhicules électriques

D.2.1 Quadricycle urbain - Aixam Megacity

Variable	Traitement appliqué	Réglages
-	-	-

TABLE D.5 – Filtrages appliqués aux données de l'Aixam Megacity

Paramètre	Valeur
Décharge	
IMAX_DE_dbl	440A
PAS_DE_dbl	5A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	100mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	2s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	50A
I_SEUIL_DE_dbl	0A
Charge	
IMAX_DE_dbl	140A
PAS_DE_dbl	2A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	10mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	1s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	20A
I_SEUIL_DE_dbl	0A
Partionnement	
NB_CLASSES_dbl	5
ORDRE_MAX_dbl	14

TABLE D.6 – Paramètres de classification pour Aixam Megacity

D.3 Véhicules hybrides

D.3.1 Toyota Prius

Variable	Traitement appliqué	Réglages
-	-	-

TABLE D.7 – Filtrages appliqués aux données de la Toyota Prius

Paramètre	Valeur
Décharge	
IMAX_DE_dbl	170A
PAS_DE_dbl	5A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	5mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	1s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	0A
I_SEUIL_DE_dbl	0A
Charge	
IMAX_DE_dbl	100A
PAS_DE_dbl	4A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	5mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	1s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	0A
I_SEUIL_DE_dbl	0A
Partionnement	
NB_CLASSES_dbl	6
ORDRE_MAX_dbl	13

TABLE D.8 – Paramètres de classification pour Toyota Prius

D.4 Véhicules lourds

D.4.1 Trolleybus Irisbus

Variable	Traitement appliqué	Réglages
Courant	Filtrage BF	$F_{coupure} = F_{échantillonnage} / 40$
Tension	Filtrage BF	$F_{coupure} = F_{échantillonnage} / 40$
Température	Filtrage BF	$F_{coupure} = F_{échantillonnage} / 4000$

TABLE D.9 – Filtrages appliqués aux données du Trolleybus ETB12

Paramètre	Valeur
Décharge	
IMAX_DE_dbl	450A
PAS_DE_dbl	10A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	100mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	2s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	50A
I_SEUIL_DE_dbl	0A
Charge	
IMAX_DE_dbl	200A
PAS_DE_dbl	4A
QCHARGE_MIN_DE_dbl	10mAh
DUREE_MIN_DE_dbl	1s
DUREE_MAX_DE_dbl	30*60s
IMAX_MIN_DE_dbl	20A
I_SEUIL_DE_dbl	0A
Partionnement	
NB_CLASSES_dbl	6
ORDRE_MAX_dbl	13

TABLE D.10 – Paramètres de classification pour Trolleybus

Liste des Abréviations

AIC	Akaike Information Criterion
BIC	Bayesian Information Criterion
C₀	Capacité initiale telle que mesurée par nos soins
C_n	Capacité nominale, fournie par le fabricant
C	C-rate, taux de charge/décharge, $1C=C_n/1h$
DOD	Depth Of Discharge, profondeur de décharge ; dans ce mémoire $DOD=\Delta SOC$
Lanthanides	Eléments chimiques aussi appelés Terres rares
LCO	Oxyde de Cobalt Lithié, $LiCoO_2$
LFP	Lithium-Fer-Phosphate, $LiFePO_4$
LMO	Oxyde de Manganèse Lithié, $LiMnO_2$
LMR	Lithium Manganese Rich
LMS	Lithium-Manganèse-Spinelle, $LiMn_2O_4$
LNO	Oxyde de Nickel Lithié, $LiNiO_2$
LTO	Oxyde de Titanate de Lithium, $Li_4Ti_5O_{12}$
NCA	Nickel-Cobalt-Aluminium, $LiNi_{.80}Co_{.15}Al_{.05}O_2$
NCM	Nickel-Cobalt-Manganèse, $LiNi_{.33}Co_{.33}Mn_{.33}O_2$
SOC	State Of Charge, état de charge
VAE	Vélo à Assistance Electrique

Bibliographie

- [A123 2009] A123. *26650 M1 datasheet*. Rapport technique, A123Systems, 2009. (Cité en page 184.)
- [Abraham 2007] D.P. Abraham, J.L. Knuth, D.W. Dees, I. Bloom et J.P. Christophersen. *Performance degradation of high-power lithium-ion cells—Electrochemistry of harvested electrodes*. Journal of Power Sources, vol. 170, no. 2, pages 465 – 475, 2007. (Cité en pages 39, 183, 184 et 185.)
- [Adornato 2009] B. Adornato, R. Patil, Z. Filipi, Z. Baraket et T. Gordon. *Characterizing naturalistic driving patterns for Plug-in Hybrid Electric Vehicle analysis*. Dans Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. VPPC '09, pages 655–660, 2009. (Cité en page 58.)
- [Amine 2001] K. Amine, C. H. Chen, J. Liu, M. Hammond, A. Jansen, D. Dees, I. Bloom, D. Vissers et G. Henriksen. *Factors responsible for impedance rise in high power lithium ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 97-98, pages 684 – 687, 2001. (Cité en pages 39, 44, 50, 185 et 187.)
- [Anderman 2012] Menahem Anderman. *Battery Technologies*. Dans Advanced Automotive Batteries, Mars 2012. (Cité en page 24.)
- [André 1987] M. André, J.P. Roumégoux, J. Delsey, J.P. Guitton et R. Vidon. *Étude expérimentale sur les utilisations réelles des véhicules (EUREV)*. Rapport INRETS 48, INRETS, 1987. (Cité en page 53.)
- [André 1995] M. André, J. Hickman, D. Hassel et R. Joumard. *Driving cycles for emission measurements under European conditions*. Dans SAE congress, Detroit, Feb. 27 - March 2 1995. (Cité en page 53.)
- [André 1998] M. André, D. Hassel et F.J. Weber. *Short and reference European driving cycles, for the inspection of in-use cars, as regards their pollutant emissions and energy consumption*. Rapport technique LEN 9809, INRETS, 1998. (Cité en page 54.)
- [André 2004] Michel André. *The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions*. Science of The Total Environment, vol. 334-335, pages 73 – 84, 2004. (Cité en pages 53, 54, 197 et 228.)
- [Appert 2012] Olivier Appert. *Marchés de l'énergie 2012 : risques de tensions persistantes*. Colloque Panorama 2012, Paris, <http://www.ifpennergiesnouvelles.fr/content/download/71854/1530946/file/Marchésf>, IFPen, Janvier 2012. (Cité en pages 13 et 227.)
- [Asakura 2003] Kaoru Asakura, Makoto Shimomura et Takahisa Shodai. *Study of life evaluation methods for Li-ion batteries for backup applications*. Journal of Power Sources, vol. 119?121, no. 0, pages 902 – 905, 2003. (Cité en pages 39, 46, 183 et 188.)
- [Baccaïni 2007] Brigitte Baccaïni, François Sémécurbe et Gwenaëlle Thomas. *Les déplacements domicile-travail amplifiés par la périurbanisation*. Dans Insee Première, numéro 1229. Insee, Mars 2007. (Cité en page 3.)
- [Belt 2005] Jeffrey R. Belt, Chinh D. Ho, Ted J. Miller, M. Ahsan Habib et Tien Q. Duong. *The effect of temperature on capacity and power in cycled lithium ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 142, no. 1-2, pages 354 – 360, 2005. (Cité en pages 39, 184 et 185.)
- [Bloom 2003] Ira Bloom, Scott A. Jones, Vincent S. Battaglia, Gary L. Henriksen, Jon P. Christophersen, Randy B. Wright, Chinh D. Ho, Jeffrey R. Belt et Chester G. Motloch. *Effect of cathode composition on capacity fade, impedance rise and power fade in high-power, lithium-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 124, no. 2, pages 538 – 550, 2003. (Cité en pages 39, 183, 184 et 185.)
- [BP 2011] BP. *Statistical Review of World Energy*. Rapport technique, British Petroleum, June 2011. (Cité en pages 5, 11 et 227.)

- [Broussely 2001] M. Broussely, S. Herreyre, P. Biensan, P. Kasztejna, K. Nechev et R. J. Staniewicz. *Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions*. Journal of Power Sources, vol. 97-98, pages 13 – 21, 2001. (Cité en pages 37, 46, 48 et 188.)
- [Broussely 2005] M. Broussely, Ph. Biensan, F. Bonhomme, Ph. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev et R.J. Staniewicz. *Main aging mechanisms in Li ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 146, no. 1-2, pages 90 – 96, 2005. (Cité en pages 37, 39, 44, 50, 183, 185, 187 et 188.)
- [Brown 2008] Shelley Brown. *Diagnosis of the Lifetime Performance Degradation of Lithium-Ion Batteries : Focus on Power-Assist Hybrid Electric Vehicle and Low-Earth-Orbit Satellite Applications*. Thèse de Doctorat, KTH, Applied Electrochemistry, 2008. QC 20100621. (Cité en pages 17, 20, 21, 22, 39, 42, 44, 183, 184, 186, 187 et 227.)
- [Cardoso 2012] Ricardo Sales Cardoso, Enver Doruk Özdemir et Ludger Eltrop. *Environmental and economic assessment of international ethanol trade options for the German transport sector*. Biomass and Bioenergy, vol. 36, pages 20 – 30, 2012. (Cité en page 6.)
- [Castro 2012] L. Castro, R. Dedryvère, J.-B. Ledeuil, J. Bréger, C. Tessier et D. Gonbeau. *Aging Mechanisms of LiFePO₄ // Graphite Cells Studied by XPS : Redox Reaction and Electrode/Electrolyte Interfaces*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 159, no. 4, pages A357–A363, 2012. (Cité en page 39.)
- [Cazacioc 2005] Liana Cazacioc et Elena Corina Cipu. *Evaluation of the transition probabilities for daily precipitation time series using a Markov chain model*. Dans Mathematics in Engineering and Numerical Physics, Bucharest 2004, volume 12. Balkan Society of Geometers, 2005. (Cité en page 82.)
- [Choi 2002] Soo Seok Choi et Hong S. Lim. *Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂*. Journal of Power Sources, vol. 111, no. 1, pages 130 – 136, 2002. (Cité en pages 46, 47, 50, 188 et 189.)
- [Christophersen 2006] Jon P. Christophersen, Ira Bloom, Edward V. Thomas, Kevin L. Gering, Gary L. Henriksen, Vincent S. Battaglia et David Howell. *Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries : Gen 2 Performance Evaluation Final Report*. Rapport technique INL/EXT-05-00913, INL, July 2006. (Cité en pages 39, 44, 183 et 187.)
- [Come 2009] Etienne Come. *Apprentissage de modèles génératifs pour le diagnostic de systèmes complexes avec labellisation douce et contraintes spatiale*. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2009. (Cité en page 64.)
- [Crauser 1989] JP Crauser. *Méthodologie statistique pour l'étude des cinématiques et des consommations de véhicules légers*. Thèse de Doctorat, Université Scientifique et Technique du Languedoc/INRETS, 1989. (Cité en page 53.)
- [Daniotti 2010] Bruno Daniotti et Fulvio Re Cecconi. *Test Methods for Service life Prediction : State of the art report on accelerated laboratory test procedures and correlation between laboratory tests and service life data*. Rapport technique 331, Politecnico di Milano, CIB, 2010. (Cité en pages 35, 36 et 227.)
- [de Azevedo 1994] Ana Luiza M.S. de Azevedo, Flamarion B. Diniz et Benício B. Neto. *A chemometric evaluation of battery performance under overcharge conditions*. Journal of Power Sources, vol. 52, no. 1, pages 87 – 92, 1994. (Cité en page 56.)
- [Delacourt 2012] C. Delacourt et M. Safari. *Life Simulation of a Graphite/LiFePO₄ Cell under Cycling and Storage*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 159, no. 8, pages A1283–A1291, 2012. (Cité en page 57.)
- [Deshpande 2011] Rutooj D. Deshpande. *Understanding and improving Lithium ion batteries through mathematical modeling and experiments*. Thèse de Doctorat, University of Kentucky, 2011. (Cité en pages 17 et 47.)

- [Devie 2010] A. Devie, M. Montaru, S. Pelissier et P. Venet. *Classification of duty pulses affecting energy storage systems in vehicular applications*. Dans Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), 2010. (Cité en page 123.)
- [Devie 2012a] Arnaud Devie, Pascal Venet, Serge Pelissier et Rochdi Trigui. *Battery duty profile of a heavy-duty trolleybus*. Dans Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), 2012. (Cité en page 137.)
- [Devie 2012b] Arnaud Devie, Emmanuel Vinot, Serge Pelissier et Pascal Venet. *Real-world battery duty profile of a neighbourhood electric vehicle*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 25, no. 0, pages 122 – 133, 2012. (Cité en page 109.)
- [Diesel 2012] Diesel. Emission test cycles. Site Internet, <http://www.dieselnets.com/>, Diesel-Net, 2012. (Cité en pages 52 et 228.)
- [Dubarry 2005] Matthieu Dubarry, Morgan Bonnet, Benoit Dailliez, Alea Teeters et Bor Yann Liaw. *Analysis of Electric Vehicle Usage of a Hyundai Santa Fe Fleet in Hawaii*. Journal of Asian Electric Vehicles, vol. 3, no. 1, pages 657–663, 2005. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2007a] Matthieu Dubarry et Bor Yann Liaw. *Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries*. Journal of Power Sources, vol. 174, no. 2, pages 856 – 860, 2007. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2007b] Matthieu Dubarry, Vojtech Svoboda, Ruey Hwu et Bor Yann Liaw. *Capacity and power fading mechanism identification from a commercial cell evaluation*. Journal of Power Sources, vol. 165, no. 2, pages 566 – 572, 2007. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2007c] Matthieu Dubarry, Vojtech Svoboda, Ruey Hwu et Bor Yann Liaw. *Capacity loss in rechargeable lithium cells during cycle life testing : The importance of determining state-of-charge*. Journal of Power Sources, vol. 174, no. 2, pages 1121 – 1125, 2007. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2007d] Matthieu Dubarry, Vojtech Svoboda, Ruey Hwu et Bor Yann Liaw. *A roadmap to understand battery performance in electric and hybrid vehicle operation*. Journal of Power Sources, vol. 174, no. 2, pages 366 – 372, 2007. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2007e] Matthieu Dubarry, Nicolas Vuillaume, Bor Yann Liaw et Thomas Quinn. *Vehicle Evaluation, Battery Modeling, and Fleet-testing Experiences in Hawaii*. Journal of Asian Electric Vehicles, vol. 5, no. 2, pages 1033–1042, 2007. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2009a] Matthieu Dubarry et Bor Yann Liaw. *Identify capacity fading mechanism in a commercial LiFePO₄ cell*. Journal of Power Sources, vol. 194, no. 1, pages 541 – 549, 2009. (Cité en pages 51, 59 et 152.)
- [Dubarry 2009b] Matthieu Dubarry, Nicolas Vuillaume et Bor Yann Liaw. *From single cell model to battery pack simulation for Li-ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 186, no. 2, pages 500 – 507, 2009. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2010] Matthieu Dubarry, Cyril Truchot, B. Y. Liaw, Kevin L. Gering, Sergiy V. Sazhin, David K. Jamison et Chris J. Michelbacher. *Degradation of Commercial Li-Ion Cells Chosen for PHEV Duty Cycle Applications*. ECS Meeting Abstracts, vol. 1002, no. 11, pages 1118–1118, 2010. (Cité en page 59.)
- [Dubarry 2011a] Matthieu Dubarry, Cyril Truchot, Mikaël Cugnet, Bor Yann Liaw, Kevin Gering, Sergiy Sazhin, David Jamison et Christopher Michelbacher. *Evaluation of commercial lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug-in hybrid electric vehicle applications. Part I : Initial characterizations*. Journal of Power Sources, vol. 196, no. 23, pages 10328 – 10335, 2011. (Cité en pages 51, 59 et 152.)

- [Dubarry 2011b] Matthieu Dubarry, Cyril Truchot, Bor Yann Liaw, Kevin Gering, Sergiy Sazhin, David Jamison et Christopher Michelbacher. *Evaluation of commercial lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug-in hybrid electric vehicle applications. Part II. Degradation mechanism under 2C cycle aging*. Journal of Power Sources, vol. 196, no. 23, pages 10336 – 10343, 2011. (Cité en pages 51, 59, 152 et 165.)
- [Dubarry 2012] Matthieu Dubarry, Cyril Truchot et Bor Yann Liaw. *Synthesize battery degradation modes via a diagnostic and prognostic model*. Journal of Power Sources, no. 0, pages –, 2012. (Cité en page 59.)
- [Dupré 2010] Nicolas Dupré, Jean-Frédéric Martin, Jeremy Degryse, Vincent Fernandez, Patrick Soudan et Dominique Guyomard. *Aging of the LiFePO₄ positive electrode interface in electrolyte*. Journal of Power Sources, vol. 195, no. 21, pages 7415 – 7425, 2010. (Cité en page 39.)
- [Erdinc 2009a] O. Erdinc, B. Vural et M. Uzunoglu. *A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system*. Journal of Power Sources, vol. 194, no. 1, pages 369 – 380, 2009. (Cité en page 57.)
- [Erdinc 2009b] O. Erdinc, B. Vural, M. Uzunoglu et Y. Ates. *Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a wavelet-fuzzy logic based load sharing and control algorithm*. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, no. 12, pages 5223 – 5233, 2009. (Cité en page 57.)
- [Fellner 2003] J.P. Fellner, G.J. Loeber, S.P. Vukson et C.A. Riepenhoff. *Lithium-ion testing for spacecraft applications*. Journal of Power Sources, vol. 119-121, pages 911 – 913, 2003. (Cité en pages 42 et 186.)
- [Fischer-Kowalski 2011] M. Fischer-Kowalski, M. Swilling, E.U. von Weizsäcker, Y. Ren, Y. Moriguchi, W. Crane, F. Krausmann, N. Eisenmenger, S. Giljum, P. Hennicke, P. Romero Lankao et A. Siriban Manalang. *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. Rapport technique, UNEP, 2011. (Cité en page 1.)
- [Francfort 2006] James Francfort, Donald Karner, Ryan Harkins et Joseph Tardiolo. *Hybrid Electric Vehicle End-of-Life Testing On Honda Insights Honda Gen I Civics and Toyota Gen I Priuses*. Rapport technique, INL, February 2006. (Cité en page 124.)
- [Gaines 2009] Linda Gaines. *Lithium-Ion Battery Recycling Issues*. Rapport technique, Argonne National Laboratory, 2009. (Cité en page 14.)
- [Gargett 2009] David Gargett. *Transport energy futures : long-term oil supply trends and projections*. Rapport technique 117, Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics (BITRE), 2009. (Cité en pages 7 et 227.)
- [Gering 2011] Kevin L. Gering, Sergiy V. Sazhin, David K. Jamison, Christopher J. Michelbacher, Bor Yann Liaw, Matthieu Dubarry et Mikael Cugnet. *Investigation of path dependence in commercial lithium-ion cells chosen for plug-in hybrid vehicle duty cycle protocols*. Journal of Power Sources, vol. 196, no. 7, pages 3395 – 3403, 2011. (Cité en pages 51 et 59.)
- [Groot 2003] Jens Groot et Tobias Andersson. *Alternative energy storage system for hybrid electric vehicles*. Electrical engineering, Chalmers University, 2003. (Cité en page 59.)
- [Groot 2009] Jens Groot. *Statistic Method for Extraction of Synthetic Load Cycles for Cycle life Tests of HEV Li-ion Batteries*. Dans EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 2009. (Cité en pages 58, 59, 78, 79 et 228.)
- [Groot 2010] Jens Groot. *Battery benchmarking and cyclife test methods*. Dans Transport Research Arena Europe 2010, Brussels, 2010. (Cité en pages 58, 59, 78 et 228.)

- [Groot 2012] Jens Groot. *State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries : Cycle Life Test Methods*. Thèse de Doctorat, Chalmers University of Technology, 2012. (Cité en pages 17, 39, 42, 50, 59, 60, 137, 152, 184, 185, 186 et 228.)
- [Guena 2006] T. Guena et P. Leblanc. *How Depth of Discharge Affects the Cycle Life of Lithium-Metal-Polymer Batteries*. Dans *Telecommunications Energy Conference*, 2006. INTELEC '06. 28th Annual International, pages 1–8, sept. 2006. (Cité en pages 39, 42 et 186.)
- [Hagan 2003] Paul Hagan et Dymphna Fellowes. *Multivariate statistical methods in battery research*. *Journal of Power Sources*, vol. 122, no. 1, pages 77 – 84, 2003. (Cité en page 56.)
- [Haifeng 2009] Dai Haifeng, Wei Xuezhe et Sun Zechang. *A new SOH prediction concept for the power lithium-ion battery used on HEVs*. Dans *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009. VPPC '09. IEEE, pages 1649 –1653, 7-10 2009. (Cité en pages 39, 42, 47, 185, 186 et 189.)
- [He 2011] Wei He, Nicholas Williard, Michael Osterman et Michael Pecht. *Prognostics of lithium-ion batteries based on Dempster-Shafer theory and the Bayesian Monte Carlo method*. *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 23, pages 10314 – 10321, 2011. (Cité en page 57.)
- [Herb 2009] Frieder Herb, Andreas Jossen, Stefan Reiff et Martin Wöhr. *Investigation of Li-battery and fuel cell aging in FC hybrid car model*. Dans *Eleventh Grove Fuel Cell Symposium*, London. Daimler, Sep 2009. (Cité en pages 42 et 186.)
- [Hijazi 2010] Alaa Hijazi. *Modélisation électrothermique, commande et dimensionnement d'un système de stockage d'énergie par supercondensateurs avec prise en compte de son vieillissement : application à la récupération de l'énergie de freinage d'un trolleybus*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2010. (Cité en page 139.)
- [Huang 2012] Hsiao-Ying Shadow Huang et Yi-Xu Wang. *Dislocation Based Stress Developments in Lithium-Ion Batteries*. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 159, no. 6, pages A815–A821, 2012. (Cité en page 47.)
- [Huggins 2008] R.A. Huggins. *Advanced batteries : Materials science aspects*. SpringerLink : Springer e-Books. Springer, 2008. (Cité en page 17.)
- [Ichimura 2005] M. Ichimura, M. Shimomura, K. Takeno, R. Shirota et J. Yamaki. *Synergistic Effect of Charge/Discharge Cycle and Storage in Degradation of Lithium-ion Batteries for Mobile Phones*. Dans *Telecommunications Conference*, 2005. INTELEC '05. Twenty-Seventh International, pages 245 –250, sept. 2005. (Cité en pages 39, 42, 44, 50, 184, 186 et 187.)
- [Inman 2011] Mason Inman. *From Wikileaks or Saudi Sheiks ? Why the World Needs Better Data on Oil and How We Might Get It*. *The Islamic Monthly*, pages 66–71, 2011. (Cité en page 6.)
- [Itou 2005] Yuichi Itou et Yoshio Ukyo. *Performance of LiNiCoO₂ materials for advanced lithium-ion batteries*. *Journal of Power Sources*, vol. 146, no. 1-2, pages 39 – 44, 2005. 12th International Meeting on Lithium Batteries. (Cité en pages 39 et 185.)
- [Jancovici 2004] Jean-Marc Jancovici. *Faut-il souhaiter la croissance du trafic aérien ?* Site Internet, <http://www.manicore.com/documentation/aeroport.html>, Manicore, Novembre 2004. (Cité en page 2.)
- [Jancovici 2006] Jean-Marc Jancovici. *La pile à combustible est-elle la solution idéale pour la "production" d'énergie ?* Site Internet, http://www.manicore.com/documentation/pile_combust.html, Manicore, Août 2006. (Cité en page 11.)
- [Jancovici 2008] J.-M. Jancovici. *Cours ensmp, Manicore, Mai 2008. Données du Musée de l'Homme*. (Cité en pages 6 et 227.)
- [Jancovici 2010a] Jean-Marc Jancovici. *Le prix du pétrole gouverne-t-il l'économie ?* Site Internet, http://www.manicore.com/documentation/petrole/petrole_economie.html, Manicore, Août 2010. (Cité en page 8.)

- [Jancovici 2010b] Jean-Marc Jancovici. Quelles surfaces mobiliser pour recourir massivement à l'énergie solaire? Site Internet, <http://www.manicore.com/documentation/solaire.html>, Manicore, Février 2010. (Cité en page 10.)
- [Jancovici 2011] Jean-Marc Jancovici. Qu'est-ce qu'une réserve de pétrole? Site Internet, http://www.manicore.com/documentation/petrole/reserve_petrole.html, Manicore, Août 2011. (Cité en page 6.)
- [Joly 2003] Iragaël Joly, S. Masson et R. Petiot. *La part modale des transports en commun dans les villes du monde*. Rapport technique, LET-ENTPE, 2003. (Cité en pages 2 et 233.)
- [Joumard 1999] Robert Joumard, Michel André, Robert Vidon, Patrick Tassel et Christophe Pruvost. *Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières*. Rapport technique LTE-9902, INRETS, 1999. (Cité en pages 51 et 53.)
- [Jungst 2000] Rudolph G. Jungst, Ganesan Nagasubramanian, Chris C Crafts, David Ingersoll et Daniel H. Doughty. *Analysis of Lithium-Ion Battery Degradation During Thermal Aging*. Sandia, 2000. (Cité en pages 39 et 185.)
- [Kara 2010] Hüdaï Kara, Adrian Chapman, Trevor Crichton, Peter Willis et Nick Morley. *Lanthanide Resources and Alternatives*. Rapport technique, Oakdene Hollins, May 2010. (Cité en pages 14 et 233.)
- [Karditsas 2012] Nick Karditsas. *USABC Development of Advanced High-Performance Batteries for EV Applications*. Dans US DOE : 2012 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Cobasys LLC, May 2012. (Cité en pages 49 et 228.)
- [Karlaftis 2009] Matthew G. Karlaftis et Eleni I. Vlahogianni. *Memory properties and fractional integration in transportation time-series*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 17, no. 4, pages 444 – 453, 2009. (Cité en page 56.)
- [Karlaftis 2011] M.G. Karlaftis et E.I. Vlahogianni. *Statistical methods versus neural networks in transportation research : Differences, similarities and some insights*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 19, no. 3, pages 387 – 399, 2011. (Cité en page 56.)
- [Karner 2007] Donald Karner et James Francfort. *Hybrid and plug-in hybrid electric vehicle performance testing by the US Department of Energy Advanced Vehicle Testing Activity*. Journal of Power Sources, vol. 174, no. 1, pages 69 – 75, 2007. Hybrid Electric Vehicles. (Cité en page 57.)
- [Kassem 2012] M. Kassem, J. Bernard, R. Revel, S. Péliissier, F. Duclaud et C. Delacourt. *Calendar aging of a graphite/LiFePO₄ cell*. Journal of Power Sources, vol. 208, no. 0, pages 296 – 305, 2012. (Cité en pages 37, 39, 44, 59, 183, 185 et 187.)
- [Kellaway 2007] M.J. Kellaway. *Hybrid buses - What their batteries really need to do*. Journal of Power Sources, vol. 168, pages 95 – 98, 2007. (Cité en page 137.)
- [Kim 2009] Ui Seong Kim, Jeong Bin Kim, Chee Burm Shin, Je Hun Choi et Seokbeom Lee. *Modeling of Capacity Fade during Cycling of Lithium-Ion Polymer Battery*. Dans Z. Ogumi, A. Manivannan et S. Narayanan, éditeurs, 216th ECS Meeting, volume 902, pages 309–309. ECS, 2009. (Cité en pages 47 et 189.)
- [Kim 2011] Jonghoon Kim, Seongjun Lee et B.H. Cho. *Discrimination of Li-ion batteries based on Hamming network using discharging-charging voltage pattern recognition for improved state-of-charge estimation*. Journal of Power Sources, vol. 196, no. 4, pages 2227 – 2240, 2011. (Cité en page 57.)
- [Kobayashi 2007] Hironori Kobayashi, Masahiro Shikano, Shinji Koike, Hikari Sakaebe et Kuniaki Tatsumi. *Investigation of positive electrodes after cycle testing of high-power Li-ion battery cells : I. An approach to the power fading mechanism using XANES*. Journal of Power Sources, vol. 174, no. 2, pages 380 – 386, 2007. (Cité en pages 39, 184 et 185.)

- [Kolmanovsky 2002] I. Kolmanovsky, I. Siverguina et B. Lygoe. *Optimization of powertrain operating policy for feasibility assessment and calibration : stochastic dynamic programming approach*. Dans Proc. American Control Conf the 2002, volume 2, pages 1425–1430, 2002. (Cité en page 79.)
- [Kreczanik 2009] Paul Kreczanik, Christian Martin, Pascal Venet, Guy Clerc, Gerard Rojat et Younes Zitouni. *Constant power cycling for accelerated ageing of supercapacitors*. Dans Proceeding of the 13th European Conference on Power Electronics and Applications, page électronique, Barcelone, Espagne, Septembre 2009. INSPEC Accession Number : 10939720. (Cité en page 139.)
- [Kreczanik 2011] Paul Kreczanik. *Etude de la fiabilité et du vieillissement d'un système de stockage par supercondensateurs pour l'alimentation partielle et ponctuelle d'un trolleybus grâce à la récupération de l'énergie de freinage. Approche du composant au système de stockage*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2011. (Cité en page 139.)
- [Lamiot 2011] Lamiot. Nombre de voitures dans le monde. Image Wikimedia, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nombre_véhicules_monde.jpg?uselang=fr, 2011. (Cité en pages 3 et 227.)
- [Lazri 2007] M. Lazri, S. Ameur et B. Haddad. *Analyse de données de précipitations par approche Markovienne*. Larhyss Journal, vol. 06, pages 7–20, Dec 2007. (Cité en page 79.)
- [Lee 2010] Tae-Kyung Lee et Z. S. Filipi. *Synthesis and validation of representative real-world driving cycles for Plug-In Hybrid vehicles*. Dans Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), pages 1–6, 2010. (Cité en page 58.)
- [Lestienne 1979] R. Lestienne. *Application du modèle Markovien simplifié à l'étude du comportement du stockage d'une centrale solaire*. Rev. Phys. Appl., vol. 14, pages 139–144, Jan 1979. (Cité en page 79.)
- [Li 2007] Ying-zi Li, Niu Jin-cang, Luan Ru et Jiang Zhi-jian. *Optimal control for dynamic grid connected photovoltaic system based on Markov chain*. Dans Proc. ICEMS Electrical Machines and Systems Int. Conf, pages 227 – 231, 2007. (Cité en page 79.)
- [Li 2009] Ying-Zi Li, Lin He et Ru-Qing Nie. *Short-Term Forecast of Power Generation for Grid-Connected Photovoltaic System Based on Advanced Grey-Markov Chain*. Dans Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, volume 02 of ICEET '09, pages 275–278, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society. (Cité en page 79.)
- [Liaw 2002] Bor Yann Liaw, Keith P. Bethune et Chul Soo Kim. *Time-Series Field Trip Data Analysis Using Adaptive Recognition Approach. Analysis on Driving Patterns and Vehicle Usage for Electric Vehicles*. Dans EVS 19, 2002. (Cité en page 59.)
- [Liaw 2003] Bor Yann Liaw, E.Peter Roth, Rudolph G Jungst, Ganesan Nagasubramanian, Herbert L Case et Daniel H Doughty. *Correlation of Arrhenius behaviors in power and capacity fades with cell impedance and heat generation in cylindrical lithium-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 119 ?121, no. 0, pages 874 – 886, 2003. (Cité en pages 44 et 59.)
- [Liaw 2004] Bor Yann Liaw. *Fuzzy Logic Based Driving Pattern Recognition for Driving Cycle Analysis*. Journal of Asian Electric Vehicles, vol. 2, no. 1, pages 551–556, 2004. (Cité en page 59.)
- [Liaw 2005] Bor Yann Liaw, Rudolph G. Jungst, Ganesan Nagasubramanian, Herbert L. Case et Daniel H. Doughty. *Modeling capacity fade in lithium-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 140, no. 1, pages 157 – 161, 2005. (Cité en page 59.)
- [Liaw 2007] Bor Yann Liaw et Matthieu Dubarry. *From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation*. Journal of Power Sources, vol. 174, no. 1, pages 76 – 88, 2007. (Cité en pages 56, 57, 59 et 228.)
- [Linden 2001] D. Linden et T. Reddy. *Handbook of batteries*. McGraw-Hill Handbooks. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2001. (Cité en pages 17, 23 et 227.)

- [Liu 2002] Xun Liu et M. C. Papaefthymiou. *A Markov chain sequence generator for power macromodeling*. Dans Proc. IEEE/ACM Int. Conf. Computer Aided Design ICCAD 2002, pages 404–411, 2002. (Cité en page 79.)
- [Liu 2010] Ping Liu, John Wang, Jocelyn Hicks-Garner, Elena Sherman, Souren Soukiazian, Mark Verbrugge, Harshad Tataria, James Musser et Peter Finamore. *Aging Mechanisms of LiFePO₄ Batteries Deduced by Electrochemical and Structural Analyses*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 157, no. 4, pages A499–A507, 2010. (Cité en pages 39, 47, 50, 184 et 189.)
- [Liu 2011] Weiping Liu, C. Delacourt, C. Forgez et S. Pelissier. *Study of graphite/NCA Li-ion cell degradation during accelerated aging tests — Data analysis of the SIMSTOCK project*. Dans Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), pages 1–6, 2011. (Cité en pages 37, 39, 42, 47, 184, 185, 186 et 189.)
- [Marano 2009] V. Marano, S. Onori, Y. Guezennec, G. Rizzoni et N. Madella. *Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles*. Dans Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE, pages 536–543, 7-10 2009. (Cité en page 57.)
- [Matsushima 2009] Toshio Matsushima. *Deterioration estimation of lithium-ion cells in direct current power supply systems and characteristics of 400-Ah lithium-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 189, no. 1, pages 847–854, 2009. (Cité en pages 39, 183 et 185.)
- [Maurin 1990] M Maurin et JP Crauser. *The kinematic sequences, an "atomistic" approach to automobile travel and the effects of traffic*. Rech. Transp. Sécurité, revue de l'INRETS, English Issue, vol. 5, pages 53–62, 1990. (Cité en page 53.)
- [Mazza 2005] P. Mazza et R. Hammerschlag. *Wind-to-Wheel Energy Assessment*. Dans Institute for Lifecycle Environmental Assessment (ILEA), 2005. (Cité en page 10.)
- [Montaru 2009] Maxime Montaru. *Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*. Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009. (Cité en pages 30, 31, 65, 124, 129 et 227.)
- [Mori 2009] Daisuke Mori, Hironori Kobayashi, Masahiro Shikano, Hiroaki Nitani, Hiroyuki Kageyama, Shinji Koike, Hikari Sakaebe et Kuniaki Tatsumi. *Bulk and surface structure investigation for the positive electrodes of degraded lithium-ion cell after storage test using X-ray absorption near-edge structure measurement*. Journal of Power Sources, vol. 189, no. 1, pages 676–680, 2009. Selected Papers presented at the 14th INTERNATIONAL MEETING ON LITHIUM BATTERIES (IMLB-2008). (Cité en pages 39 et 185.)
- [Nelson 2011] P.A. Nelson, K.G. Gallagher, I. Bloom, et D.W. Dees. *Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles*. Rapport technique ANL-11/32, Argonne National Laboratory, Septembre 2011. (Cité en page 24.)
- [Ning 2003] Gang Ning, Bala Haran et Branko N. Popov. *Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates*. Journal of Power Sources, vol. 117, no. 1-2, pages 160–169, 2003. (Cité en pages 47 et 189.)
- [Ning 2004] Gang Ning et Branko N. Popov. *Cycle Life Modeling of Lithium-Ion Batteries*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 151, no. 10, pages A1584–A1591, 2004. (Cité en pages 42, 46, 186 et 188.)
- [Ning 2006] Gang Ning, Ralph E. White et Branko N. Popov. *A generalized cycle life model of rechargeable Li-ion batteries*. Electrochimica Acta, vol. 51, no. 10, pages 2012–2022, 2006. (Cité en page 57.)
- [OCDE 2011] OCDE. *Mondialisation, transport et environnement*. Éditions OCDE, 2011. (Cité en page 1.)

- [ONU 2004] ONU. *World population to 2300*. Rapport technique ST/ESA/SER.A/236, Organisation des Nations Unies, 2004. (Cité en page 5.)
- [Pasquier 2009] Aurelien Du Pasquier, C.C. Huang et Timothy Spitler. *Nano Li₄Ti₅O₁₂-LiMn₂O₄ batteries with high power capability and improved cycle-life*. Journal of Power Sources, vol. 186, no. 2, pages 508 – 514, 2009. (Cité en pages 39 et 184.)
- [Perone 1992] Sam P. Perone, Robert Petesch, Pei-Hwei Chen, William C. Spindler et Sanjay L. Deshpandé. *Multivariate analysis of data from fabrication, testing and operation of a large lead/acid peak-shaving battery*. Journal of Power Sources, vol. 37, no. 3, pages 379 – 402, 1992. (Cité en page 56.)
- [Peterson 2010] Scott B. Peterson, Jay Apt et J.F. Whitacre. *Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization*. Journal of Power Sources, vol. 195, no. 8, pages 2385 – 2392, 2010. (Cité en pages 42 et 186.)
- [Ramadass 2002] Premanand Ramadass, Anand Durairajan, Bala Haran, Ralph White et Branko Popov. *Studies on Capacity Fade of Spinel-Based Li-Ion Batteries*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 149, no. 1, pages A54–A60, 2002. (Cité en pages 46, 47, 188 et 189.)
- [Ramadass 2003] P. Ramadass, Bala Haran, Ralph White et Branko N. Popov. *Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 123, no. 2, pages 230 – 240, 2003. (Cité en pages 39 et 184.)
- [Ramadass 2004] P. Ramadass, Bala Haran, Parthasarathy M. Gomadam, Ralph White et Branko N. Popov. *Development of First Principles Capacity Fade Model for Li-Ion Cells*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 151, no. 2, pages A196–A203, 2004. (Cité en page 57.)
- [Ramasamy 2005] Ramaraja P. Ramasamy, Ralph E. White et Branko N. Popov. *Calendar life performance of pouch lithium-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 141, no. 2, pages 298 – 306, 2005. (Cité en pages 39, 46, 183 et 188.)
- [Ramasamy 2007] Ramaraja P. Ramasamy, Jong-Won Lee et Branko N. Popov. *Simulation of capacity loss in carbon electrode for lithium-ion cells during storage*. Journal of Power Sources, vol. 166, no. 1, pages 266 – 272, 2007. (Cité en page 57.)
- [Reddy 2010] T. Reddy et D. Linden. *Linden's handbook of batteries*. McGraw-Hill, 4th édition, 2010. (Cité en page 17.)
- [Roblès 2012] Bernard Roblès, Manuel Avila, Florent Duculty, Pascal Vignat, Stéphane Begot et Frédéric Kratz. *Mesures de pertinence par les critères du " maximum de vraisemblance " de " BIC " et " AIC " appliqués à l'évaluation des paramètres stochastiques de Modèles de Markov Cachés*. Journal national de la recherche en IUT, vol. 1, no. 3, pages 1–12, Mai 2012. (Cité en page 82.)
- [Rong 2006] Peng Rong et M. Pedram. *An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries*. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on, vol. 14, no. 5, pages 441 – 451, may 2006. (Cité en page 57.)
- [RTE 2011] RTE. *Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*. Rapport technique, Réseau de Transport de l'Electricité, 2011. (Cité en pages 12 et 227.)
- [Rubin 2008] Jeff Rubin et Peter Buchanan. *What's the Real Cause of the Global Recession ?* StrategEcon, vol. 31, pages 4–6, October 2008. (Cité en pages 8, 10 et 227.)
- [Safari 2009] M. Safari, M. Morcrette, A. Teyssot et C. Delacourt. *Multimodal Physics-Based Aging Model for Life Prediction of Li-Ion Batteries*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 156, no. 3, pages A145–A153, 2009. (Cité en page 57.)
- [Safari 2010a] M. Safari, M. Morcrette, A. Teyssot et C. Delacourt. *Life-Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries Derived from a Fatigue Approach I*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 157, no. 6, pages A713–A720, 2010. (Cité en page 57.)

- [Safari 2010b] M. Safari, M. Morcrette, A. Teyssot et C. Delacourt. *Life Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries Derived from a Fatigue Approach II*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 157, no. 7, pages A892–A898, 2010. (Cité en page 57.)
- [Safari 2011] M. Safari et C. Delacourt. *Aging of a Commercial Graphite/LiFePO₄ Cell*. Journal of The Electrochemical Society, vol. 158, no. 10, pages A1123–A1135, 2011. (Cité en pages 39, 44, 59, 184 et 187.)
- [Samba 2005] Gaston Samba et Marcel Mpounza. *Application du processus de Markov sur les occurrences des précipitations journalières au Congo-Brazzaville*. Comptes Rendus Geoscience, vol. 337, no. 15, pages 1355 – 1364, 2005. (Cité en page 79.)
- [Saniere 2010] Armelle Saniere et Simon Vinot. *Li, Ni, Pt, Pd : des métaux "critiques" ? Rapport technique*, IFP, 2010. (Cité en pages 13 et 14.)
- [Santhanagopalan 2006] Shriram Santhanagopalan, Qingzhi Guo, Premanand Ramadass et Ralph E. White. *Review of models for predicting the cycling performance of lithium ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 156, no. 2, pages 620 – 628, 2006. (Cité en page 57.)
- [Sarre 2004] Guy Sarre, Philippe Blanchard et Michel Broussely. *Aging of lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 127, no. 1-2, pages 65 – 71, 2004. (Cité en pages 39, 46, 48, 185 et 188.)
- [Sauer 2008] Dirk Uwe Sauer et Heinz Wenzl. *Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems—Using lead-acid batteries as example*. Journal of Power Sources, vol. 176, no. 2, pages 534 – 546, 2008. (Cité en page 57.)
- [Savoye 2012] François 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 oeuvre dans une application transport*. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 2012. (Cité en page 74.)
- [Schimm 2011] Andreas Schimm. *World Airport Traffic Report 2010*. Rapport technique, Airports Council International, August 2011. (Cité en page 2.)
- [Schwarzer 2010] V. Schwarzer, R. Ghorbani et R. Rocheleau. *Drive cycle generation for stochastic optimization of energy management controller for hybrid vehicles*. Dans Proc. IEEE Int Control Applications (CCA) Conf, pages 536–540, 2010. (Cité en page 57.)
- [Serrao 2005] L. Serrao, Z. Chehab, Y. Guezennet et G. Rizzoni. *An aging model of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicles*. Dans Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference, pages 8 pp.–, Sept. 2005. (Cité en page 57.)
- [Serrao 2010] Lorenzo Serrao. *A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles*. Thèse de Doctorat, The Ohio State University, 2010. 3375775. (Cité en page 57.)
- [Shamshad 2005] A. Shamshad, M.A. Bawadi, W.M.A. Wan Hussin, T.A. Majid et S.A.M. Sanusi. *First and second order Markov chain models for synthetic generation of wind speed time series*. Energy, vol. 30, no. 5, pages 693 – 708, 2005. (Cité en page 79.)
- [Shim 2002] J. Shim, R. Kosteki, T. Richardson, X. Song et K. A. Striebel. *Electrochemical analysis for cycle performance and capacity fading of a lithium-ion battery cycled at elevated temperature*. Journal of Power Sources, vol. 112, no. 1, pages 222 – 230, 2002. (Cité en pages 39, 50 et 184.)
- [Shim 2003] Joongpyo Shim et Kathryn A. Striebel. *Characterization of high-power lithium-ion cells during constant current cycling : Part I. Cycle performance and electrochemical diagnostics*. Journal of Power Sources, vol. 122, no. 2, pages 188 – 194, 2003. (Cité en pages 42 et 186.)
- [Silverman 2005] Mike Silverman. *How to move from HALT to HASS to HASA*. Rapport technique, Ops A La Carte LLC, 2005. (Cité en pages 34 et 227.)
- [Snare 2002] Matthew C. Snare. *Dynamics model for predicting maximum and typical acceleration rates of passenger vehicles*. Thèse de Master, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002. (Cité en pages 68, 69 et 228.)

- [SOeS 2010] SOeS. *La mobilité des Français : Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*. Rapport technique, Service de l'Observation et des Statistiques, Dec 2010. (Cité en pages 1 et 3.)
- [Souffran 2011] Gwenaëlle Souffran, Laurence Miegerville et Patrick Guerin. *Simulation of Real-World Vehicle Missions Using a Stochastic Markov Model for Optimal Design Purposes*. Dans Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011. VPPC '11. IEEE, 2011. (Cité en pages 57 et 79.)
- [Staackmann 1997] M. Staackmann, Bor Yann Liaw et D.Y.Y. Yun. *Dynamic driving cycle analyses using electric vehicle time-series data*. Dans Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97., Proceedings of the 32nd Intersociety, volume 3, pages 2014–2018, Jul 1997. (Cité en page 59.)
- [Stathopoulos 2003] Anthony Stathopoulos et Matthew G. Karlaftis. *A multivariate state space approach for urban traffic flow modeling and prediction*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 11, no. 2, pages 121 – 135, 2003. (Cité en page 56.)
- [Takei 2001] K. Takei, K. Kumai, Y. Kobayashi, H. Miyashiro, N. Terada, T. Iwahori et T. Tanaka. *Cycle life estimation of lithium secondary battery by extrapolation method and accelerated aging test*. Journal of Power Sources, vol. 97-98, pages 697 – 701, 2001. (Cité en pages 39, 42, 44, 47, 50, 185, 186, 187 et 189.)
- [Takeno 2005] Kazuhiko Takeno, Masahiro Ichimura, Kazuo Takano et Junichi Yamaki. *Influence of cycle capacity deterioration and storage capacity deterioration on Li-ion batteries used in mobile phones*. Journal of Power Sources, vol. 142, no. 1-2, pages 298 – 305, 2005. (Cité en pages 42, 44, 186 et 187.)
- [Takeshita 2007] Hideo Takeshita. *Worldwide Market Update on NiMH, Li Ion and Polymer Batteries for Portable Applications and HEVS*. Dans The 24th International Battery Seminar & Exhibit, Mars 2007. Pre-Seminar Tutorial II. (Cité en page 24.)
- [Thomas 2003] E. V. Thomas, H. L. Case, D. H. Doughty, R. G. Jungst, G. Nagasubramanian et E. P. Roth. *Accelerated power degradation of Li-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 124, no. 1, pages 254 – 260, 2003. (Cité en pages 39, 44 et 185.)
- [Thomas 2008] E.V. Thomas, I. Bloom, J.P. Christophersen et V.S. Battaglia. *Statistical methodology for predicting the life of lithium-ion cells via accelerated degradation testing*. Journal of Power Sources, vol. 184, no. 1, pages 312 – 317, 2008. (Cité en pages 39, 44, 57 et 185.)
- [Thomas 2012] E.V. Thomas, I. Bloom, J.P. Christophersen et V.S. Battaglia. *Rate-based degradation modeling of lithium-ion cells*. Journal of Power Sources, vol. 206, no. 0, pages 378 – 382, 2012. (Cité en page 39.)
- [Toyota 2011] Toyota. *Environmental Report*. Rapport technique, Toyota Motor Corp., 2011. (Cité en page 14.)
- [Truchetet 1998] Fred Truchetet. *Ondelettes pour le signal numérique*. Editions Hermes, 1998. (Cité en pages 64 et 228.)
- [TSP 2012] TSP. The shift project data portal. Site Internet, <http://www.tsp-data-portal.org/>, The Shift Project, 2012. (Cité en pages 9 et 227.)
- [USGS 2012] USGS. *Mineral commodity summaries 2012*. Rapport technique, U.S. Geological Survey, 2012. (Cité en page 13.)
- [Venet 2007] Pascal Venet. *Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie*. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). Université Lyon 1, 2007. (Cité en pages 27 et 227.)

- [Vetter 2005] J. Vetter, P. Novak, M.R. Wagner, C. Veit, K.-C. Muller, J.O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler et A. Hammouche. *Ageing mechanisms in lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 147, no. 1-2, pages 269 – 281, 2005. (Cité en pages 36, 37 et 227.)
- [Vinot 2006] Emmanuel Vinot, François Badin, Robert Vidon, Bertrand Malaquin, Pascal Perret et Patrick Tassel. *Evaluation du véhicule hybride Toyota PRIUS 2004 et de ses composants*. Rapport final LTE 0626, INRETS LTE, Novembre 2006. Projet EVALVH. (Cité en pages 124, 125, 126 et 230.)
- [Vinot 2008] Emmanuel Vinot, Julien Scordia, Rochdi Trigui, Bruno Jeanneret et François Badin. *Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius*. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, vol. 3, no. 3, pages 139–167, 2008. (Cité en page 124.)
- [Vlahogianni 2005] Eleni I. Vlahogianni, Matthew G. Karlaftis et John C. Golias. *Optimized and meta-optimized neural networks for short-term traffic flow prediction : A genetic approach*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 13, no. 3, pages 211 – 234, 2005. (Cité en page 56.)
- [Vlahogianni 2006] Eleni I. Vlahogianni, Matthew G. Karlaftis et John C. Golias. *Statistical methods for detecting nonlinearity and non-stationarity in univariate short-term time-series of traffic volume*. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, vol. 14, no. 5, pages 351 – 367, 2006. (Cité en page 56.)
- [Volt 2012] Volt. 2013 chevrolet volt boosts ev range to 38 miles. Site Internet, http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Jun/0607_volt.html, General Motors, Juin 2012. (Cité en page 42.)
- [Wakihara 2001] Masataka Wakihara. *Recent developments in lithium ion batteries*. Materials Science and Engineering : R : Reports, vol. 33, no. 4, pages 109 – 134, 2001. (Cité en pages 18 et 227.)
- [Wang 2008] Qidong Wang, Hong Huo, Kebin He, Zhiliang Yao et Qiang Zhang. *Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities*. Transportation Research Part D : Transport and Environment, vol. 13, no. 5, pages 289 – 297, 2008. (Cité en pages 198 et 231.)
- [Wang 2011a] John Wang, Souren Soukiazian, Mark Verbrugge, Harshad Tataria, Dwaine Coates, David Hall et Ping Liu. *Active lithium replenishment to extend the life of a cell employing carbon and iron phosphate electrodes*. Journal of Power Sources, vol. 196, no. 14, pages 5966 – 5969, 2011. (Cité en page 36.)
- [Wang 2011b] Rui Wang et Srdjan Lukic. *Review of Driving Conditions Prediction and Driving Style Recognition Based Control Algorithms for Hybrid Electric Vehicles*. Dans Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011. VPPC '11. IEEE, 2011. (Cité en page 57.)
- [Wenzl 2005] Heinz Wenzl, Ian Baring-Gould, Rudi Kaiser, Bor Yann Liaw, Per Lundsager, Jim Maxwell, Alan Ruddell et Vojtech Svoboda. *Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery*. Journal of Power Sources, vol. 144, no. 2, pages 373 – 384, 2005. (Cité en page 57.)
- [WLTP 2012] WLTP. Worldwide harmonized light vehicles test procedure. Rapports intermédiaires, <https://www2.unece.org/wiki/pages/viewpage.action?pageId=2523434>, UNECE, 2012. (Cité en pages 199 et 231.)
- [Wright 2002] R. B. Wright, C. G. Motloch, J. R. Belt, J. P. Christophersen, C. D. Ho, R. A. Richardson, I. Bloom, S. A. Jones, V. S. Battaglia, G. L. Henriksen, T. Unkelhaeuser, D. Ingersoll, H. L. Case, S. A. Rogers et R. A. Sutula. *Calendar- and cycle-life studies of advanced technology development program generation 1 lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 110, no. 2, pages 445 – 470, 2002. (Cité en pages 39 et 185.)

- [Wright 2003] R. B. Wright, J. P. Christophersen, C. G. Motloch, J. R. Belt, C. D. Ho, V. S. Battaglia, J. A. Barnes, T. Q. Duong et R. A. Sutula. *Power fade and capacity fade resulting from cycle-life testing of Advanced Technology Development Program lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, vol. 119-121, pages 865 – 869, 2003. (Cité en pages 39, 184 et 185.)
- [Ycharts 2012] Ycharts. Site internet, <http://ycharts.com/>, Ycharts, 2012. (Cité en pages 8 et 227.)
- [Yoshio 2009] M. Yoshio, R.J. Brodd et A. Kozawa. Lithium-ion batteries : Science and technologies. Springer, 2009. (Cité en pages 17, 19, 21, 24 et 227.)
- [You 2009] Wei You, Zhen Qiao, Xiaoxia Li, Fan Feng, Weiei Huo et Haibo Wang. *Predicting the Aging Rate of Capacity in Ni/H Battery Using Artificial Neural Network*. Dans Proc. Second Int. Symp. Computational Intelligence and Design ISCID '09, volume 2, pages 400–404, 2009. (Cité en page 57.)
- [Zhang 2011] Jingliang Zhang et Jay Lee. *A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery*. Journal of Power Sources, vol. In Press, Corrected Proof, pages –, 2011. (Cité en page 57.)

Table des figures

1.1	Evolution du parc automobile mondial [Lamiot 2011]	3
1.2	Vues nocturnes reconstituées de la planète Terre [NASA]	5
1.3	Evolution de la démographie mondiale [Jancovici 2008]	6
1.4	Prédiction du pic pétrolier [Gargett 2009]	7
1.5	Evolution du spread Brent-WTI [Ycharts 2012]	8
1.6	Productions et consommations nationales de quelques pays phares [TSP 2012]	9
1.7	Corrélation entre chocs pétroliers et économie [Rubin 2008]	10
1.8	Réserves fossiles [BP 2011]	11
1.9	Charges électriques typiques d'une journée en été, hiver et demi-saison (DS). [RTE 2011]	12
1.10	Evolutions de la consommation et des prix des matières premières au regard de l'accroissement de population [Appert 2012]	13
2.1	Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion [Wakihara 2001]	18
2.2	Modes de conduction (électronique ou ionique) en haut et réactions associées en bas [Yoshio 2009]	19
2.3	Evolutions des concentrations en Lithium au sein des deux électrodes en charge et en décharge [Brown 2008]	20
2.4	(a) Schéma de principe d'une batterie Li-ion avec évolution de la tension aux bornes de la cellule et des potentiels d'anode et de cathode en fonction de l'état de charge, (b) Matériaux d'anode et de cathode couramment utilisés et classés selon leur potentiel d'insertion Vs. Li/Li^+ [Brown 2008]	20
2.5	Représentation des chemins empruntés par les charges ioniques (Li^+) et électroniques lors de l'insertion [Brown 2008]	21
2.6	(a) Cellule typée énergie, (b) Cellule typée puissance, (c) Comparaison des performances en fonction du régime de décharge. [Brown 2008]	22
2.7	Constituants d'une batterie Lithium-ion [Linden 2001]	23
2.8	Cible kilométrique pour véhicule électrique compétitif en 2012	25
2.9	Nombre de cycles requis pour véhicule électrique compétitif en 2012	25
2.10	Cible kilométrique pour véhicule électrique 300km compétitif en 2012	25
2.11	Cible kilométrique pour véhicule électrique compétitif en 2020	26
2.12	Nombre de cycles requis pour véhicule électrique compétitif en 2020	26
2.13	Schéma de principe d'un supercondensateur [Venet 2007]	27
2.14	Panorama des systèmes de stockage de l'énergie	29
2.15	Flux énergétiques sur cycles normalisés [Montaru 2009, Annexe B.2]	30
2.16	Architectures possibles de la chaîne de traction [Montaru 2009, Annexe B.1]	31
2.17	Fonctions assumées par la batterie de traction en fonction de l'architecture	32
2.18	Dimensionnement en fonction de l'architecture	33
2.19	Méthode HALT [Silverman 2005]	34
2.20	Approche factorielle appliquée aux matériaux de construction [Daniotti 2010]	35
2.21	Analyse qualitative des mécanismes et modes de dégradation d'une anode graphite et de leurs influences [Vetter 2005]	36
2.22	Influence normalisée de la température sur la diminution de la capacité lors de vieillissement calendaire (cf. tableau B.1)	39
2.23	Influence normalisée de la température sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage - NCA (cf. tableau B.2)	40

2.24	Influence normalisée de la température sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.3)	40
2.25	Influence normalisée de la température sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement calendaire (cf. tableau B.4)	41
2.26	Influence normalisée de la température sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.5)	41
2.27	Influence normalisée de la DOD sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.6)	43
2.28	Influence normalisée de la DOD sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.7)	43
2.29	Influence normalisée du SOC sur la diminution de la capacité lors de vieillissement calendaire ou en cyclage (cf. tableau B.8)	45
2.30	Influence normalisée du SOC sur l'augmentation de l'impédance lors de vieillissement calendaire ou en cyclage (cf. tableau B.9)	45
2.31	Influence normalisée de la tension de fin de charge sur la diminution de la capacité lors de vieillissement calendaire ou en cyclage (cf. tableau B.10)	46
2.32	Influence normalisée du courant (C-rate) sur la diminution de la capacité lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.11)	47
2.33	Influence normalisée du courant (C-rate) sur l'augmentation d'impédance lors de vieillissement en cyclage (cf. tableau B.12)	48
2.34	Effet de l'amélioration par étape de l'électrolyte [Karditsas 2012]	49
2.35	Les trois principaux cycles réglementaires [Diesel 2012]	52
2.36	Cycles représentatifs ARTEMIS : urbain, routier et autoroutier de haut en bas [André 2004]	53
2.37	Résultats de simulation de la Toyota Prius II sur différents cycles (en rouge sont représentées les bornes typiques mesurées du courant batterie lors d'essais dans le monde réel)	54
2.38	Mise en place des règles d'inférence floue sur 2 variables pour la classification de portions de trajet [Liaw 2007]	56
2.39	Carte de sévérité résultante pour l'étude des impulsions de puissance [Liaw 2007]	57
2.40	Résultat de la classification des impulsions de puissance par logique floue [Liaw 2007]	57
2.41	Comparaison des distributions de puissance entre le profil de mission enregistré et à sa compression statistique à 5% par chaîne de Markov [Groot 2009]	58
2.42	Comparaison expérimentale entre le vieillissement dû à un profil de mission enregistré par rapport à sa compression statistique par chaîne de Markov [Groot 2010]	58
2.43	Les différentes signatures des modes de diminution de la capacité d'une batterie Lithium-ion en utilisant la technique ICA [Groot 2012]	60
3.1	Démarche retenue	63
3.2	Quelques techniques de représentation compressée d'un signal numérique [Truchetet 1998]	64
3.3	Modélisation du processus de recueil de données par une loi normale et une performance à 2σ	65
3.4	Lien entre accélération et courant mesuré	67
3.5	Phase d'accélération maximale d'une berline américaine [Snare 2002]. Les points rouges symbolisent la mesure, la courbe bleue est une modélisation de l'accélération.	68
3.6	Densité spectrale des courants mesurés	68
3.7	Découpage en impulsions pour un fonctionnement réversible	70
3.8	Découpage en impulsions pour un fonctionnement 1 quadrant	70

3.9	Illustration de la conversion sur une impulsion	71
3.10	Organigramme logique représentant l'algorithme des K-means	73
3.11	Sensibilité de la performance de classification au nombre de classes	75
3.12	Impulsions typiques en charge et décharge à l'issue de la classification	76
3.13	Représentation de toutes les impulsions en classes avec l'impulsion typique résultante	77
3.14	Visualisation du résultat de classification dans différents repères usuels	77
3.15	Comparaison des distributions de courant entre l'échantillon de référence et le résultat synthétique	78
3.16	Chaine de Markov à deux états (E1,E2), régie par la matrice de transition P et la loi initiale Π	79
3.17	Séquence d'états observés sur un échantillon	81
3.18	Chaine de Markov à 5 états (2 en décharge, 2 en charge, 1 état repos), à l'ordre 1, représentée sous forme de graphe	83
4.1	Potentialités de récupération d'énergie au freinage	87
4.2	Vélo à assistance électrique Sparta e-Motion C2	89
4.3	Allure du profil de courant	90
4.4	Consommations relevées	91
4.5	Impulsions typiques globales à l'issue de la classification	92
4.6	Impulsions typiques sur parcours vallonnés	93
4.7	Impulsions typiques des cyclistes gros consommateurs	93
4.8	Vérification du respect de la distribution du courant	95
4.9	Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie	95
4.10	Histogramme des profondeurs de décharges constatées (estimation). En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.	96
4.11	Cycle représentatif	97
4.12	Vélo à assistance électrique Kalkhoff Agattu C8	98
4.13	Principe de l'assistance proportionnelle	98
4.14	Allure du profil de courant	101
4.15	Consommations relevées	101
4.16	Impulsions typiques globales à l'issue de la classification	102
4.17	Impulsions typiques sur parcours vallonnés	102
4.18	Vérification du respect de la distribution du courant	104
4.19	Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie	104
4.20	Histogramme des profondeurs de décharges constatées (estimation). En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.	105
4.21	Cycle représentatif	106
4.22	Evolutions des capacités des batteries pendant 16 mois	107
4.23	Quadricycle électrique Aixam Megacity	109
4.24	Allure du profil de courant	112
4.25	Consommations relevées (à la prise)	112
4.26	Impulsions typiques globales à l'issue de la classification	113
4.27	Impulsions typiques de l'échantillon éco-conduite	115
4.28	Impulsions typiques de l'échantillon conduite agressive	116
4.29	Impulsions typiques de l'échantillon estival	118
4.30	Impulsions typiques de l'échantillon hivernal	119
4.31	Vérification du respect de la distribution du courant	120
4.32	Histogramme des tensions mesurées aux bornes de la batterie	121
4.33	Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie	121

4.34	Cycle représentatif	122
4.35	Voiture hybride Toyota Prius II	123
4.36	Alternance de coupures et de redémarrages du moteur thermique à faible vitesse stabilisée (30km/h) sur le véhicule hybride Toyota Prius II (en haut). La traction électrique prend le relai (courant positif) pendant les coupures puis de l'énergie est ponctionnée sur le moteur thermique pour recharger la batterie (courant négatif) (en bas). On note la présence de pics de courant aux instants de redémarrage du moteur thermique. [Vinot 2006]	126
4.37	Lien entre l'évolution de la vitesse du véhicule (en rouge, facteur 3) et les impulsions de courant observées, en usage urbain	126
4.38	Impulsions typiques de l'échantillon urbain	127
4.39	Impulsions typiques de l'échantillon routier	130
4.40	Impulsions typiques de l'échantillon autoroutier	132
4.41	Vérification du respect de la distribution du courant pour l'échantillon urbain	134
4.42	Histogramme des états de charge relevés sur la batterie. En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.	134
4.43	Histogramme des températures relevées au niveau de la batterie. En vert le 1er quartile, en jaune le second et en rouge le 3ème quartile.	135
4.44	Cycle représentatif	136
4.45	Trolleybus Irisbus ETB12 avec ses perches déployées	137
4.46	Allure du profil de courant	140
4.47	Impulsions typiques de l'échantillon sans SC	141
4.48	Impulsions typiques de l'échantillon avec SC	142
4.49	Vérification du respect de la distribution du courant sans SC	144
4.50	Vérification du respect de la distribution du courant avec SC	144
4.51	Cycle représentatif	145
5.1	Impulsions utilisées pour le vieillissement	149
5.2	Evolution des capacités des cellules selon les profils de cyclage	151
5.3	Evolution des capacités des cellules A et B	154
5.4	Evolution des capacités des cellules G et H	155
5.5	Analyse par capacité incrémentale sur les cellules A, B, G et H	156
5.6	Analyse par capacité incrémentale sur une cellule G, avec suivi de l'évolution en fonction des Ah déchargés au cours de la vie de la cellule.	157
5.7	Cycles utilisés pour le vieillissement	160
5.8	Evolution des capacités des cellules 47, 49, 51 et 52	160
5.9	Les 5 classes d'impulsions typiques du VAE Kalkhoff reprises pour ce cyclage. Représentation dans le domaine de charge, avant la mise à l'échelle.	161
5.10	Motifs (impulsions) utilisées pour le vieillissement selon le cycle VAE Kalkhoff. Représentation temporelle et mise à l'échelle (facteur 1/6).	162
5.11	Cycle de température représentant une année d'utilisation du VAE Kalkhoff et utilisé lors du cyclage	163
5.12	Cycle synthétique élémentaire utilisé lors du cyclage (25%DOD). Enchaînement de 159 motifs n°1, 24 motifs n°2, 4 motifs n°3, 2 motifs n°4 et 1 motif n°5. Cycle répété 2 fois pour couvrir 50%DOD et 3 fois pour 75%DOD.	163
5.13	24h de cyclage selon le profil de mission VAE Kalkhoff. 4 décharges partielles par 24h (1 fois 25%DOD, 2 fois 50%DOD, 1 fois 75%DOD). Charge à C/6 et 25°C après 30 minutes de repos pour stabilisation de la température. Le SOC et la DOD présentés correspondent aux phases de décharge uniquement	164

5.14 Evolution des capacités des cellules cyclées selon le profil de mission VAE Kalkhoff	165
A.1 Cible kilométrique pour véhicule électrique 100 km compétitif en 2012	173
A.2 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 100 km compétitif en 2012	173
A.3 Cible kilométrique pour véhicule électrique <100km compétitif en 2012	174
A.4 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique <100km compétitif en 2012	174
A.5 Cible kilométrique pour véhicule électrique 200km compétitif en 2012	174
A.6 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 200km compétitif en 2012	175
A.7 Cible kilométrique pour véhicule électrique 300km compétitif en 2012	175
A.8 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 300km compétitif en 2012	175
A.9 Cible kilométrique pour scooter électrique compétitif en 2012	176
A.10 Nombre de cycles requis pour scooter électrique 60km compétitif en 2012	176
A.11 Cible kilométrique pour véhicule électrique <100km compétitif en 2020	178
A.12 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique <100km compétitif en 2020	178
A.13 Cible kilométrique pour véhicule électrique 100km compétitif en 2020	179
A.14 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 100km compétitif en 2020	179
A.15 Cible kilométrique pour véhicule électrique 200km compétitif en 2020	179
A.16 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 200km compétitif en 2020	180
A.17 Cible kilométrique pour véhicule électrique 300km compétitif en 2020	180
A.18 Nombre de cycles requis pour véhicule électrique 300km compétitif en 2020	180
C.1 Panoramas des procédures de test d'émissions	191
C.2 Cycle Federal Test Procedure 72	192
C.3 Cycle Federal Test Procedure 75	192
C.4 Cycle Federal Test Procedure US06	193
C.5 Cycle Federal Test Procedure SC03	193
C.6 Cycle EPA NYCC	193
C.7 Cycle CARB UC (unified cycle)	194
C.8 Highway Federal Emission Test	194
C.9 Standard Road Cycle	195
C.10 Standard Bench Cycle	195
C.11 New European Driving Cycle	196
C.12 Cycles représentatifs ARTEMIS	196
C.13 Cycle 10-15 Mode	197
C.14 Cycle JC08	197
C.15 Cycles représentatifs pour plusieurs agglomérations chinoises [Wang 2008]	198
C.16 Le projet de cycle WLTC [WLTP 2012]	199
C.17 Heavy-Duty Urban Dynamometer Driving Schedule	200
C.18 Chicago Transit Authority	200
C.19 Manhattan	201
C.20 Orange County Bus Cycle	201
C.21 Cycle Japonais pour véhicule lourd : JE05 ou ED12	201
C.22 Cycle européen pour véhicule lourd : ETC (ex-Fige)	202

Liste des tableaux

1.1	Part modale des modes mécanisés dans différentes zones géographiques [Joly 2003]	2
1.2	Scenarii de parc automobile électrifié	11
1.3	Usage de terres rares dans les applications modernes [Kara 2010]	14
3.1	Degré de confiance portant sur $r \geq 90\%$	67
3.2	Degré de confiance portant sur $r \geq 97.5\%$	67
3.3	Représentation numérique d'une impulsion dans le domaine temporel	72
3.4	Représentation numérique d'une impulsion "i" dans le domaine de charge à "p" dimensions	72
3.5	Décompte des transitions	82
3.6	Matrice de transition P	82
3.7	Matrice des probabilités cumulées P_s	82
4.1	Fiche technique du VAE Sparta	90
4.2	Conditions expérimentales pour VAE Sparta	91
4.3	Données kilométriques globales	91
4.4	Données kilométriques sur parcours vallonnés	93
4.5	Données kilométriques des cyclistes gros consommateurs	93
4.6	Fiche technique du VAE Kalkhoff	99
4.7	Conditions expérimentales pour VAE Kalkhoff	100
4.8	Données kilométriques globales	100
4.9	Données kilométriques sur parcours vallonnés	102
4.10	Fiche technique du quadricycle Aixam Megacity	110
4.11	Conditions expérimentales pour Aixam Megacity	111
4.12	Données kilométriques de l'échantillon global	114
4.13	Données kilométriques de l'échantillon éco-conduite	115
4.14	Données kilométriques de l'échantillon conduite agressive	116
4.15	Données kilométriques de l'échantillon estival	118
4.16	Données kilométriques de l'échantillon hivernal	119
4.17	Fiche technique de la voiture Toyota Prius II	124
4.18	Conditions expérimentales pour Prius II	125
4.19	Données kilométriques de l'échantillon urbain	127
4.20	Données kilométriques de l'échantillon routier	130
4.21	Données kilométriques de l'échantillon autoroutier	132
4.22	Fiche technique du Trolleybus Cristalis ETB12	138
4.23	Conditions expérimentales pour Trolleybus	139
4.24	Données kilométriques de l'échantillon sans SC	140
4.25	Données kilométriques de l'échantillon avec SC	142
5.1	Caractéristiques des impulsions	148
5.2	Conditions expérimentales de l'essai sur l'impact individuel des impulsions	151
5.3	Conditions expérimentales de l'essai sur l'influence de la forme AB	154
5.4	Conditions expérimentales de l'essai sur l'influence de la forme GH	155
5.5	Conditions expérimentales de l'essai sur l'influence du niveau de courant	157
5.6	Conditions expérimentales de l'essai	159

5.7	Conditions expérimentales de l'essai Kalkhoff	161
A.1	Hypothèses pour la simulation de rentabilité	171
A.2	Hypothèses pour scooter 50cc	172
B.1	Diminution de la capacité due à la température, en calendaire, figure 2.22	183
B.2	Diminution de la capacité due à la température, en cyclage, NCA uniquement, figure 2.23	184
B.3	Diminution de la capacité due à la température, en cyclage, figure 2.24	184
B.4	Augmentation d'impédance due à la température, en calendaire, figure 2.25	185
B.5	Augmentation d'impédance due à la température, en cyclage, figure 2.26	185
B.6	Diminution de la capacité due à la DOD, figure 2.27	186
B.7	Augmentation d'impédance due à la DOD, figure 2.28	186
B.8	Diminution de la capacité due au SOC, figure 2.29	187
B.9	Augmentation d'impédance due au SOC, en calendaire, figure 2.30	187
B.10	Dégradation due à la tension, figure 2.31	188
B.11	Diminution de la capacité due au courant, en cyclage, figure 2.32	189
B.12	Augmentation de l'impédance due au courant, en cyclage, figure 2.33	189
C.1	Caractéristiques des cycles normalisés	203
D.1	Filtrages appliqués aux données du VAE Sparta	206
D.2	Paramètres de classification pour VAE Sparta	206
D.3	Filtrages appliqués aux données du VAE Kalkhoff	207
D.4	Paramètres de classification pour VAE Kalkhoff	207
D.5	Filtrages appliqués aux données de l'Aixam Megacity	208
D.6	Paramètres de classification pour Aixam Megacity	208
D.7	Filtrages appliqués aux données de la Toyota Prius	209
D.8	Paramètres de classification pour Toyota Prius	209
D.9	Filtrages appliqués aux données du Trolleybus ETB12	210
D.10	Paramètres de classification pour Trolleybus	210