



HAL
open science

Optimisation du coût de revient global (TCO) d'un véhicule utilitaire électrique 3,5t ; modélisation multi-physique, dimensionnement et recharge intelligente

Anthony Babin

► To cite this version:

Anthony Babin. Optimisation du coût de revient global (TCO) d'un véhicule utilitaire électrique 3,5t ; modélisation multi-physique, dimensionnement et recharge intelligente. Energie électrique. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. NNT : 2018SACLS356 . tel-04315042

HAL Id: tel-04315042

<https://theses.hal.science/tel-04315042>

Submitted on 30 Nov 2023

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.

Optimisation du coût de revient global (TCO) d'un véhicule utilitaire électrique 3,5t ; modélisation multi-physique, dimensionnement et recharge intelligente

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université Paris-Sud

École doctorale n°575 Electrical, Optical, Bio: Physics-and-
Engineering (EOBE)
Spécialité de doctorat: Physique

Thèse présentée et soutenue à LAVAL, le 28 Novembre 2018, par

M. Anthony Babin

Composition du Jury :

M. Christophe Forgez Professeur, UTC (ROBERVAL)	Rapporteur
M. Hamid Gualous Professeur, UniCaen (LUSAC)	Rapporteur
M. Claude Marchand Professeur, Université Paris-Sud (GEEPS)	Président
Mme Delphine Riu (absente) Professeure, Grenoble INP (G2ELAB)	Examinatrice
M. Chérif Larouci Enseignant-Chercheur (HDR), ESTACA (ESTACA'LAB)	Directeur de thèse
M. Nassim Rizoug Enseignant-Chercheur, ESTACA (ESTACA'LAB)	Co-Encadrant
M. Rémy Richard Directeur Etudes & Développements, GRUAU	Invité
M. Christophe Lefebvre Responsable Programme, CEA (LITEN)	Invité

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse sont le fruit d'une collaboration CIFRE entre ESTACA'LAB, le Laboratoire de l'Ecole des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA) et l'entreprise GRUAU, constructeur-carrossier leader européen dans l'aménagement des véhicules utilitaires. Je tenais tout d'abord à souligner la chance qui m'a été donnée de pouvoir travailler sur une thématique très passionnante liée à l'automobile et à l'énergie électrique.

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant ma thèse, à commencer par mon directeur monsieur Cherif LAROUCI, pour son intérêt, sa bienveillance et son suivi tout au long de ce doctorat afin de garantir le bon déroulement de la thèse.

Je tiens particulièrement à remercier mes encadrants monsieur Nassim RIZOUG, enseignant/chercheur à l'ESTACA, pour sa disponibilité, son aide précieuse, ses connaissances scientifiques et ses qualités humaines, et monsieur David BOSCHER, directeur recherche innovation et prototype chez GRUAU, pour son accueil, son suivi et pour m'avoir sélectionné pour cette thèse.

J'adresse mes remerciements à monsieur Rémy RICHARD, responsable études et développements chez GRUAU, et également responsable du projet véhicule électrique, pour son suivi, ses conseils et son écoute durant ces trois années de thèse et également pour son accompagnement sur le suivi du projet VUE-Flex. Je remercie également l'ensemble de l'équipe projet véhicule électrique de GRUAU et plus largement, l'ensemble du personnel pour les moments passés.

Je tiens ensuite à remercier les membres du jury qui me font l'honneur de participer à cette soutenance de thèse. Je remercie tout particulièrement monsieur Christophe FORGEZ et monsieur Hamid GUALOUS, respectivement professeur de l'université de technologie de Compiègne et professeur de l'université de Caen, pour avoir accepté de rapporter ma thèse.



Remerciements

Je remercie l'ensemble des membres du consortium du projet VUE-Flex, projet qui a permis la concrétisation de ma thèse en m'apportant des ressources indispensables. Merci à Florian BERTRAND, pilote du projet, et à Laurent VINIT, chef de projet au CEA et interlocuteur pour la réalisation des essais batterie.

J'adresse mes sincères remerciements à madame Delphine RIU, professeure à Grenoble INP, à monsieur Claude MARCHAND, Professeur à l'Université Paris-Sud et directeur du GEEPS et à monsieur Christophe LEFEBVRE, Responsable programme au CEA pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail de thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres des équipes de recherche de l'ESTACA-Laval, ainsi que tous le personnel de l'ESTACA, pour leur accueil, les moments agréables passés avec eux et pour m'avoir donné gout à la recherche. Merci à Romaingue, Federico, Yann, Sandrine, Dorothée, Montassar, Victor, Gérard, Mélanie, Judicael, Bertrand, Sébastien, Stéphane, Michael, Julien, Toufik pour nos discussions et autres moments sympas.

Je ne peux évidemment pas oublier de remercier mes proches, en commençant par mon ami pour le soutien mutuel que nous nous sommes apportés au quotidien et qui nous a permis de grandir dans la vie. Enfin mes remerciements vont à mes parents, mes grands-parents et à toute ma famille, mes amis, et surtout mon chaton d'amour, sur qui je peux toujours compter et que j'ai quelque peu délaissés ces derniers mois pour achever ce mémoire. Merci à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien cette thèse et que je n'ai peut-être pas mentionné.

... MERCI

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	3
TABLE DES MATIERES	5
GLOSSAIRE	9
INTRODUCTION GENERALE	11
PROJET VUE-FLEX ET CONTEXTE DE LA THESE	15
CONTEXTE ECOLOGIQUE	18
CHAPITRE I. CADRE GLOBAL DE LA THESE	21
I - 1. INTRODUCTION DU CHAPITRE I	23
I - 2. INTERET DE LA MODELISATION DU SYSTEME	25
I - 2.1 Batterie : quel modèle ?.....	27
I - 2.2 Les générations récentes de véhicules électriques sur le marché.....	28
I - 3. CAHIER DES CHARGES	31
I - 3.1 Mission	31
I - 3.1.1 Résultats d'analyse de missions.....	33
I - 3.1.2 Donnés techniques des résultats.....	35
I - 3.2 Véhicule	36
I - 3.3 Technologie de Stockage embarqué d'énergie électrique	39
I - 3.3.1 Le stockage électrochimique.....	39
I - 3.3.2 Les différentes technologies de batteries au lithium.....	41
I - 4. CONCLUSION DU CHAPITRE I	47
CHAPITRE II. MODELES MULTI-PHYSIQUES DU VEHICULE UTILITAIRE ET DE SON SYSTEME DE STOCKAGE	49
II - 1. INTRODUCTION DU CHAPITRE II	51
II - 2. MODELE DU VEHICULE : DYNAMIQUE	53
II - 2.1 Identification des paramètres du modèle dynamique	55
II - 2.2 Calcul de l'énergie consommée sur les parcours types.....	57



II - 2.3	Calcul des taux de courant	59
II - 3.	MODELISATION MULTI-PHYSIQUE DE LA CELLULE DE BATTERIE.....	61
II - 3.1	Caractérisation de la cellule à réception.....	63
II - 3.2	Modèle électrique	65
II - 3.2.1	Caractérisation des performances électriques.....	65
II - 3.2.1	Identification des paramètres du modèle électrique	67
II - 3.3	Modèle thermique	70
II - 3.3.1	Caractérisation des performances des cellules	70
II - 3.3.2	Identification des paramètres du modèle thermique	74
II - 3.4	Modèle de vieillissement.....	76
II - 3.4.1	Modélisation du vieillissement calendaire	77
II - 3.4.2	Vieillissement en cyclage	83
II - 4.	CONCLUSION DU CHAPITRE II	93
 CHAPITRE III. CALCUL DU TCO ET OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT		95
III - 1.	INTRODUCTION DU CHAPITRE III : PROGRAMME DE SIMULATION	97
III - 2.	CALCUL DU TCO	99
III - 2.1	Impact de la mission sur le TCO	103
III - 2.1.1	Calcul du vieillissement en fonction de la mission	104
III - 2.1.2	Calcul du TCO en fonction de la mission.....	105
III - 2.2	Impact de la température sur le TCO	107
III - 2.2.1	Calcul du vieillissement en fonction de la température.....	107
III - 2.2.2	Calcul du TCO en fonction de la température	108
III - 2.3	Impact de la capacité et dimensionnement de la batterie sur le TCO	110
III - 2.3.1	Simulations de vieillissement en fonction de la taille de la batterie.....	110
III - 2.3.2	Calcul du TCO en fonction de la capacité	112
III - 3.	OPTIMISATION DE LA CAPACITE	115
III - 3.1	Accélération des calculs	116
III - 3.2	Calculs d'optimisation de la capacité suivant la mission.....	119
III - 3.2.1	Calcul du vieillissement en fonction de la mission et de la capacité.....	119
III - 3.2.2	Calcul du TCO en fonction de la mission et de la capacité	121
III - 3.3	Calculs d'optimisation de la capacité suivant la température	123
III - 3.3.1	Calcul du vieillissement en fonction de la température et de la capacité	123
III - 3.3.2	Calcul du TCO en fonction de la température et de la capacité	125
III - 3.4	Calculs d'optimisation de la capacité suivant la masse du véhicule	128
III - 3.4.1	Calcul du vieillissement en fonction de la masse et de la capacité.....	128
III - 3.4.2	Calcul du TCO en fonction de la masse et de la capacité.....	129
III - 4.	CONCLUSION DU CHAPITRE III.....	131

CHAPITRE IV. STRATEGIE DE RECHARGE INTELLIGENTE	133
IV - 1. INTRODUCTION DU CHAPITRE IV.....	135
IV - 2. LA STRATEGIE DEVELOPPEE	137
IV - 2.1 Interprétation des essais de vieillissement cellule.....	137
IV - 2.2 Résultats de vieillissement avec la stratégie de recharge intelligente	142
IV - 2.3 Résultats de coût de revient avec la stratégie de recharge intelligente	144
IV - 2.4 Interaction de la recharge intelligente sur le dimensionnement.....	147
IV - 3. LOGICIEL DE CALCUL DU TCO	151
IV - 4. CONCLUSION DU CHAPITRE IV	155
CONCLUSION GENERALE.....	157
LISTE DES FIGURES	161
LISTE DES TABLEAUX	165
BIBLIOGRAPHIE.....	167
ANNEXES	175
A - 1. NORMES EUROPEENNES SUR LES EMISSIONS DES VEHICULES	177
A - 2. OUTIL D'ACQUISITION	179
A - 3. ALGORITHME D'OPTIMISATION HYBRIDE (PSO/NM) [39]	181
A - 4. DONNEES TECHNIQUES DE LA CELLULE CHOISIE	187
A - 5. RESULTATS DE SIMULATION EN FONCTION DE LA MASSE A 10°C ET 37°C	189
A - 6. EXEMPLE DE LA RECHARGE INTELLIGENTE PAR ENEDIS.....	191
RESUME	194



GLOSSAIRE

BMS : Battery Management System, soit le système de gestion de la batterie

BPI : Banque Publique d'Investissement

BTP : Bâtiment et Travaux Publiques

CAN : Controller Area Network

CTE : Chaîne de Traction Electrique

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

CO : Monoxyde de Carbone

CO₂ : DiOxyde de Carbone

DOD : Depth Of Discharge, soit la profondeur de décharge de la cellule de batterie

ESTACA : Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile

GES : Gaz à Effet de Serre

GPS : Global Positioning System

HC : Hydrocarbures

HCNM : Hydrocarbures Non Méthaniques

HE : Haute Energie

HP : Haute Puissance

IMU : Inertial Measurement Unit, ou centrale de mesure à inertie

LCO : Lithium Oxyde de Cobalt

LFP : Lithium Phosphate de Fer

LMO : Lithium Oxyde de Manganèse

LTO : Lithium titanate (Titanium Oxyde)

NCA : Nickel Cobalt Aluminium



Glossaire

NEDC : New European Driving Cycle

NiCd : Nickel Cadmium

NiMH : Nickel Metal Hydride

NMC : Nickel Manganèse Cobalt

NO_x : Oxydes d'azote

OCV : Open Circuit Voltage ; ou tension à vide, en circuit ouvert

PM : Particule Matérielle

PME : Petite et Moyenne Entreprise

PSO-NM : Particular Swarm Optimization – Nelder Mead

PTAC : Poids Total Autorisé en Charge

SD : Secure Digital card

SEI : Solid Electrolyte Interphase

SOC : State Of Charge, soit l'état de charge de la batterie

SOH : State of Health, soit l'état de santé de la batterie

TCO : Total Cost of Ownership

TPMR : Transport de Personne à Mobilité Réduite

UHP : Ultra Haute Puissance

V2G : Vehicle to Grid

VU : Véhicule Utilitaire

VUE : Véhicule Utilitaire Electrique

WLTP : Worldwide harmonised Light vehicle Test Procedure

INTRODUCTION GENERALE

Le coût de l'électrification d'un véhicule, l'autonomie, la durée de vie des batteries et l'adaptation des infrastructures électriques pour la recharge sont les principaux freins au développement des ventes de véhicules électriques. La problématique est de rendre le véhicule électrique plus attractif pour le client et compétitif d'un point de vue économique. Le verrou principal aujourd'hui est le coût de la batterie qui représente jusqu'à 50% du prix d'achat du véhicule (Figure 1), $40\% \pm 10\%$ pour l'application étudiée et suivant la capacité de la batterie.

Coût du VUE

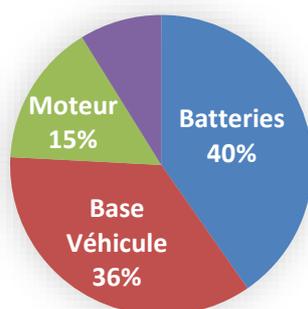


Figure 1 : Répartition des coûts du véhicule

Dans le domaine de l'utilisation professionnelle du véhicule électrique utilitaire, l'équation économique n'est pas satisfaite par les offres du marché. Le véhicule utilitaire, notamment le segment du 3,5t, est très diversifié et comprend de nombreuses variations de configurations de bases (longueur, hauteur, PTAC...). A cela vient s'ajouter une grande diversité de clients avec des contraintes métier pouvant impacter la dynamique et l'architecture électrique du véhicule, allant de la rampe de chargement motorisée aux systèmes de température dirigée pour le transport de denrées périssables ou de médicaments fragiles. Pour la grande majorité, les professionnels utilisent des véhicules utilitaires de manière ritualisée et effectuent les mêmes types de trajets quotidiens.

Dans ce contexte la rentabilité est plus facile à appréhender. En effet, la meilleure connaissance des attendus quotidiens du véhicule sont mieux définis et l'investissement que



représente le coût d'achat est, dans ce cas, plus simplement justifiable. Cependant le client a besoin d'une garantie pour être rassuré sur les performances et la fiabilité du véhicule. La batterie, qui est le composant le plus sensible que ce soit économiquement ou en fiabilité, doit être convenablement garantie. Les tests sur les cellules de batteries sont dès lors indispensables et la modélisation apparaît nécessaire pour appréhender au mieux les différents cas de figure de vieillissement susceptibles de survenir. L'objectif de garantie est fixé à 3 ans ou 100'000km pour la chaîne de traction et le véhicule de base, et à 5 ans ou 1500 cycles pour la batterie. Un cycle de la batterie est considéré comme étant une charge-décharge complète (100% du DOD). Toute charge-décharge incomplète sera comptabilisée comme une fraction de cycle. Aussi le calcul sera fait par comptabilisation des « ampères-heures » déchargés, puis convertis en cycles en divisant le nombre d'ampère-heure déchargés par la capacité de la batterie (en Ah). La durée de vie de la batterie, en cycles, est définie comme le nombre de cycles complets équivalents qu'une batterie peut effectuer avant que sa capacité ne descende en dessous de 80% de sa capacité initiale. A l'inverse, le nombre de cycles peut être converti en quantité d'énergie déchargée afin de prendre en compte les portions de cycle ($DOD < 100\%$). Considérant une capacité initiale de 100Ah et une perte maximum de 20% de la capacité nominale au bout de 1500 cycles, le nombre d'Ah déchargés garantis est déterminé par le calcul :

$$1\ 500 \cdot \left(100Ah \frac{100\% + (100\% - 20\%)}{2} \right) = 135\ 000Ah.$$

Le côté économique étant le verrou principal à la démocratisation de la chaîne de traction électrique, il faudra donc agir sur le coût de fabrication du véhicule en électrifiant « au plus juste » chaque véhicule utilitaire 3,5t dans son usage professionnel spécifique, à l'aide d'une conception modulaire et flexible.

Pour cela il est nécessaire de développer une méthode de calcul du coût de revient global que représente le véhicule dans son utilisation professionnelle. L'objectif est ensuite de s'assurer que le dimensionnement du véhicule est adapté au mieux pour l'utilisation du client. Pour atteindre ce but, il est nécessaire de réaliser un modèle complet de conception et d'optimisation énergétique du véhicule électrique utilitaire 3,5t. La modélisation doit être à l'image du système, modulaire et évolutive, suivant les éventuelles évolutions du véhicule. Afin de bien représenter les pertes énergétiques, le modèle doit être capable d'estimer le comportement énergétique de chaque composant. L'outil développé, intégrant cette modélisation multi-physique associée à une méthodologie d'optimisation de l'énergie embarquée, sera utilisé pour l'estimation des performances du véhicule en termes d'autonomie, de coût, de durée de vie, ... Pour cela une modélisation fine du système de stockage embarqué est exigée. Ainsi, l'objectif majeur de ce travail est le développement d'un modèle multi-physique de la batterie Li-ion (électrique, thermique, vieillissement) [5] [6] [7]. L'utilisation de l'outil à développer doit permettre entre autres la validation des méthodes de gestion avec différents types de missions et conditions d'utilisation (météo, état de charge de la batterie

(SOC), distance, trafic, ...) [8] [9]. Les méthodes de gestion doivent prendre en considération la consommation des auxiliaires (figure 7) plus importante pour des véhicules utilitaires aménagés (frigorifique, outils électriques, ...). Une seconde partie des travaux s'attache à l'automatisation de la recharge des batteries suivant une prévision de la mission [10] [11]. Cette automatisation doit se baser sur l'optimisation de la durée de vie de la batterie et la réduction de la consommation électrique [12]. Les stratégies mises en place doivent optimiser la puissance de recharge suivant les temps de repos disponibles entre deux missions.

Cette thèse s'articule en quatre parties.

Dans le premier Chapitre, le cadre global de la thèse est décrit, l'intérêt de la modélisation du véhicule est présenté et le cahier des charges du produit détaillé. Le but est d'appréhender au mieux le véhicule utilitaire électrique qui sera étudié, son système de stockage ainsi que son utilisation. La première partie du chapitre est consacrée à la présentation du modèle souhaitée et à une présentation des générations actuelles de véhicules électriques afin de situer le véhicule étudié par rapport au marché. Une seconde partie traite le cahier des charges du véhicule et de son utilisation. Une étude sur les habitudes des clients de ce type de véhicule est réalisée. Ensuite les caractéristiques du véhicule utilitaire électrique sont détaillées. Enfin, c'est le cahier des charges du système de stockage qui est présenté ainsi qu'un état de l'art des différentes technologies de stockage électrochimiques présentent sur le marché.

Un second Chapitre traite de la modélisation multi-physique du véhicule et de son système de stockage d'énergie. La modélisation a pour objectif de prédire le comportement du système étudié. Le but est de caractériser le comportement du véhicule complet pour optimiser ses composants et son utilisation. La première étape de la modélisation est celle de la dynamique du véhicule. Cette étape permet de décrire les besoins en énergie du véhicule en fonction du profil de mission à parcourir. Ensuite une campagne de tests sur le composant de stockage est réalisée et va permettre de le caractériser pour réaliser un modèle électrique, un modèle thermique, puis un modèle de vieillissement. Les différents modèles seront enfin associés pour représenter le comportement du véhicule complet.

Le troisième Chapitre sera axé sur le calcul du TCO et l'optimisation du dimensionnement dans le but d'assurer un TCO minimal. Le TCO est outil d'achat qui permet d'appréhender le coût réel lié à l'achat d'un produit ou d'un service. La première partie du chapitre a pour but de présenter la méthode de calcul du TCO retenue de sorte à tenir compte de l'impact de la mission de l'utilisateur ainsi que du comportement des éléments de stockage de l'énergie. Grace aux modèles du véhicule et des cellules de batterie, le vieillissement des packs de batteries sera simulé à partir de différentes missions, températures et capacités de la batterie (trois capacités au catalogue). Le but est de comparer et identifier la meilleure solution pour assurer une durée de vie de la batterie optimale et surtout un coût de revient global le plus



faible possible. Dans un second temps, un algorithme de calcul d'optimisation selon le dimensionnement de la capacité sera mis en place. Afin de pouvoir réaliser les calculs d'optimisation dans un temps raisonnable, une méthode d'accélération des calculs est utilisée. L'optimisation de la capacité sera alors étudiée en fonction de la mission, de la température mais également de la masse du véhicule, afin de mettre en avant une solution optimale pour le futur acquéreur d'un véhicule électrique utilitaire.

Dans l'optique de trouver de nouvelles voies d'amélioration du TCO, le dernier chapitre de cette thèse traite de stratégie de recharge intelligente. L'objectif est de regarder l'impact de la manière de charger la batterie du VUE en fonction de la mission, de la température et de la capacité du pack batterie. Dans un premier temps les essais de vieillissement de la batterie sont analysés afin d'élaborer une stratégie de recharge dont le but sera de limiter le vieillissement. Ensuite, le vieillissement, puis le TCO, en fonction de la méthode de recharge, seront calculés et analysés. Enfin une dernière partie sera consacrée à la présentation d'un outil de calcul du TCO et de conseil marketing pour le choix du dimensionnement du pack batterie du client. Cet outil intègre l'ensemble des modèles et stratégies développés dans cette thèse.

Le contexte de la thèse et le projet VUE-Flex dans lequel s'inscrivent ces travaux, ainsi qu'une présentation du contexte écologique vont maintenant être brièvement présentés.

Projet VUE-Flex et Contexte de la thèse

Les travaux de thèse ont été réalisés avec le groupe Gruau. Gruau est spécialisé dans la carrosserie de véhicules utilitaires. En effet, depuis 128 ans, Gruau aménage et transforme des véhicules utilitaires. Ce groupe est reconnu pour son innovation et sa qualité qui ont contribué à le placer premier constructeur-carrossier en Europe. Cette entreprise se divise en 15 sociétés spécialisées chacune dans leur domaine de carrosserie. La raison d'être du groupe est de compléter les gammes de véhicules des constructeurs. Pour cela, le groupe apporte des fonctionnalités et des solutions globales de transports ou de mobilités sur des véhicules utilitaires dans des domaines très variés tels que la sécurité, le médical, le bâtiment...



Figure 3: secteur d'activité Gruau

L'histoire Gruau naît à Laval, aujourd'hui le site Gruau Laval est resté le siège du groupe.

Depuis les années 2000, par volonté d'accroître la croissance du groupe, Gruau souhaite se positionner sur



Figure 2 : Diversité des produits Gruau

une nouvelle voie de progrès et s'axe sur les systèmes embarqués. Entre 2002 et 2004 Gruau développe le microbus et devient carrossier constructeur. Une version hybride du microbus est également développée afin de proposer un véhicule plus écologique à sa gamme. Dès 2006, Gruau s'associe à Bolloré pour développer le microbus électrique. Dans une démarche de développement durable du groupe appelée « BlueGreen » et afin de répondre à la demande du marché sur le secteur du 3,5t électrique, Gruau décide de déployer une branche « véhicules propres ». En 2011, Gruau monte la chaîne de traction électrique de la société Microvet et



Introduction Generale

Projet VUE-Flex et Contexte de la thèse

propose à sa gamme « l'Electron » un véhicule utilitaire électrique 3,5t. C'est alors en 2014 que Gruau se lance dans la conception de sa propre chaîne de traction électrique flexible et sûre pour équiper sa gamme de véhicules utilitaires 3t5 100% électrique : « ELECTRON II ». Ce véhicule reprend la base d'un véhicule FIAT Ducato 3,5t à moteur diesel qui sera remplacé par une chaîne de traction électrique conçue par Gruau en partenariat avec Actia Automotive. Cette nouvelle activité véhicule propre a pour rôle d'assurer la pérennité du groupe. Afin d'assurer son attractivité face aux autres constructeurs, Gruau et son partenaire Actia ont monté un consortium pour trouver des solutions innovantes aux problématiques posées par le véhicule utilitaire électrique dans la diversité des clients professionnels visés. Le projet intitulé « VUE-FLEX » pour « Véhicule Utilitaire Electrique et FLEXible » est un « Projet de recherche et développement structurant pour la compétitivité » (PSPC), piloté par le consortium de partenaires industriels (Gruau, Actia Automotive, Enedis et la PME Sector) et académiques (Le CEA et le laboratoire LAPLACE) et supporté par le programme d'investissement d'avenir opéré par la BPI (Banque Publique d'Investissement). L'objectif est d'optimiser la chaîne de traction, de la rendre plus flexible et d'intégrer une dimension d'intelligence dans l'utilisation du véhicule électrique.

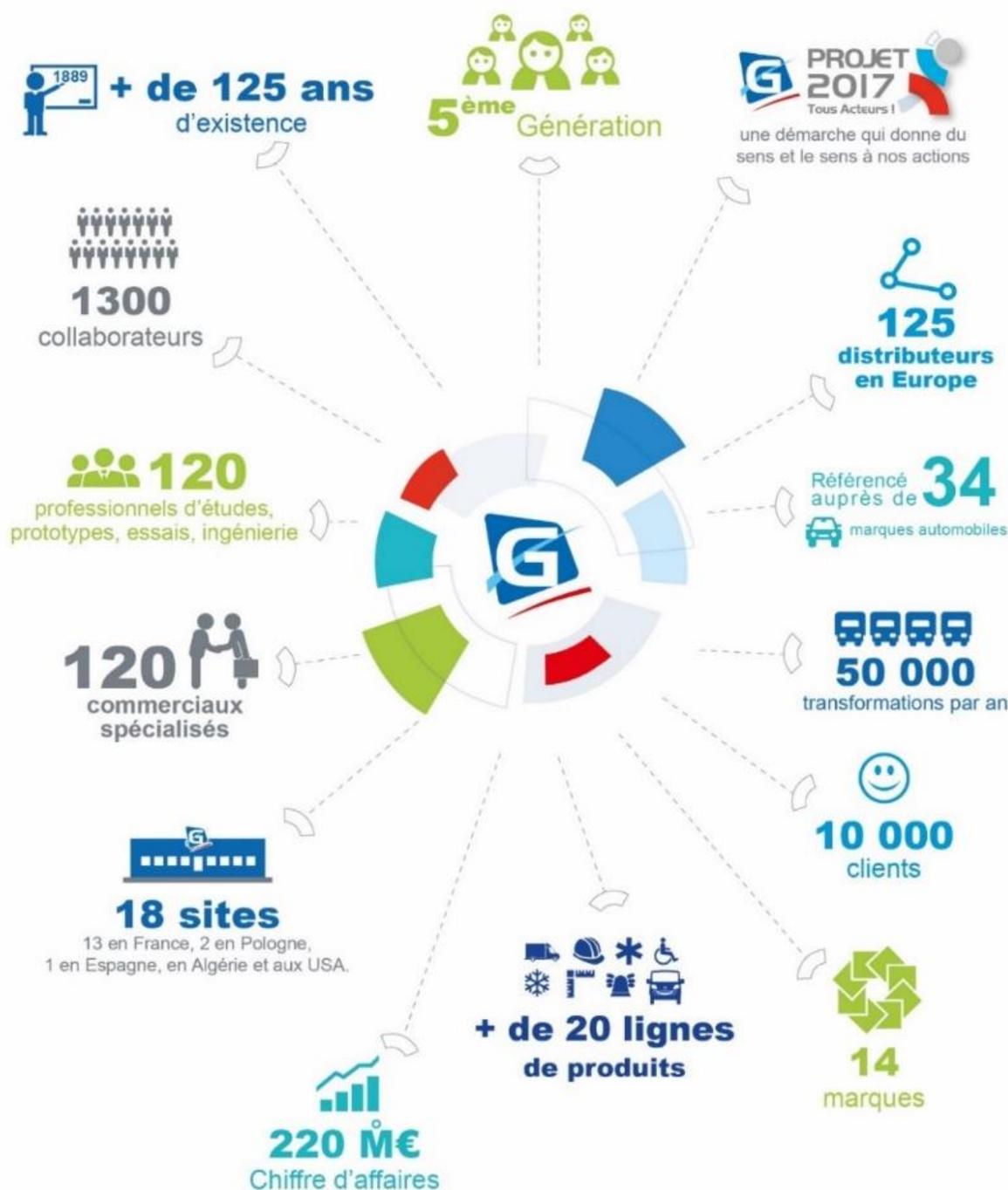


Figure 4 : Chiffres clés Gruau



Contexte écologique

Depuis le début de l'ère industrielle, l'homme n'a cessé d'exploiter les ressources de la terre mais ne s'est soucié que récemment de la durabilité de ces ressources. Outre le fait que les ressources d'énergies traditionnelles fossiles sont présentes en quantités limitées sur la terre, l'utilisation de celles-ci contribuent à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) qui accentuent le réchauffement climatique.

Le transport représente une part importante des émissions de GES. En plus de ces gaz, la combustion des énergies fossiles, notamment dans le domaine du transport, rejette également des gaz polluants, tels que les NOx, et des particules fines, qui sont nocifs pour la santé des êtres vivants. La démographie mondiale croissante adjointe à un parc automobile mondial qui ne cesse de croître, Figure 5, dépassant les 1 milliards de véhicules, conduit sans cesse à l'augmentation de la consommation d'énergie fossile et le rejet de gaz d'échappement. [1]

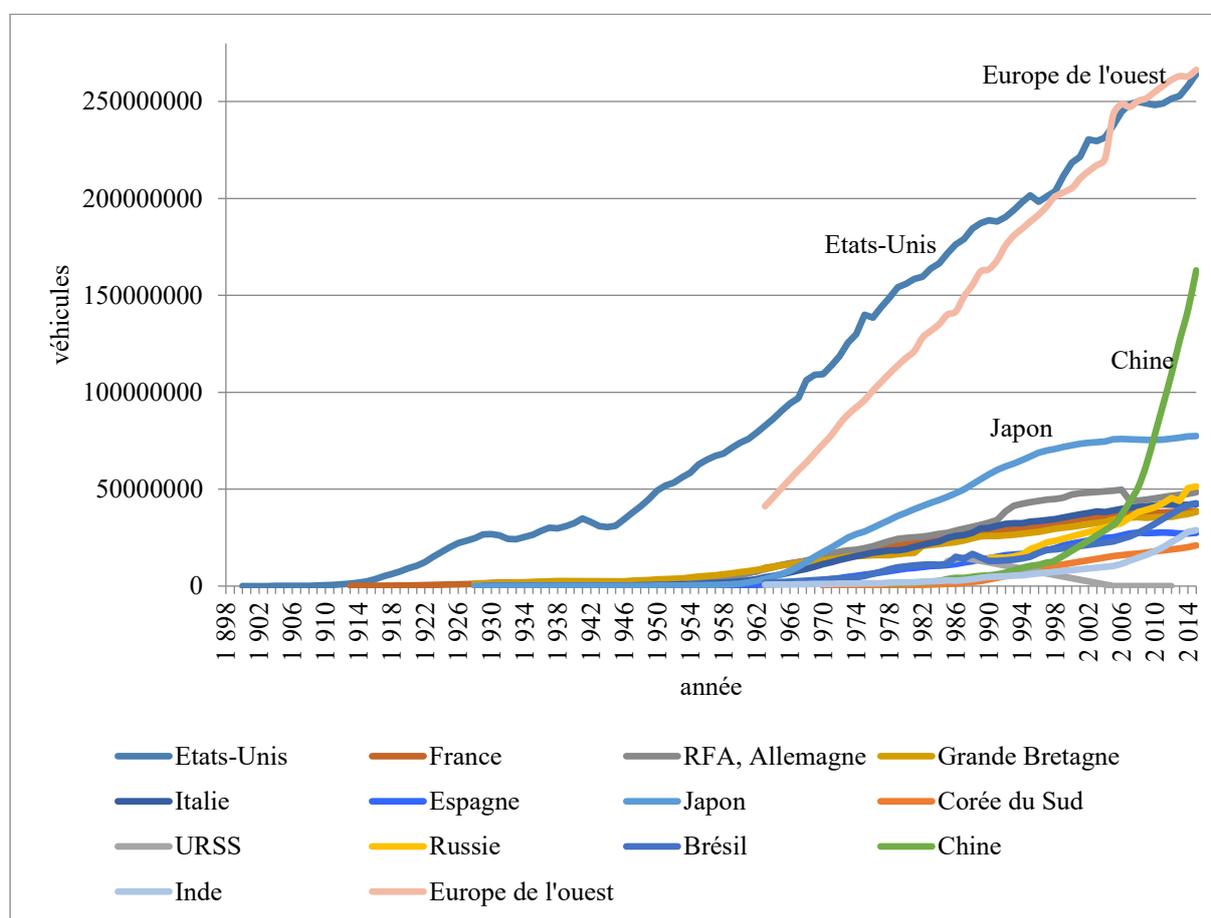
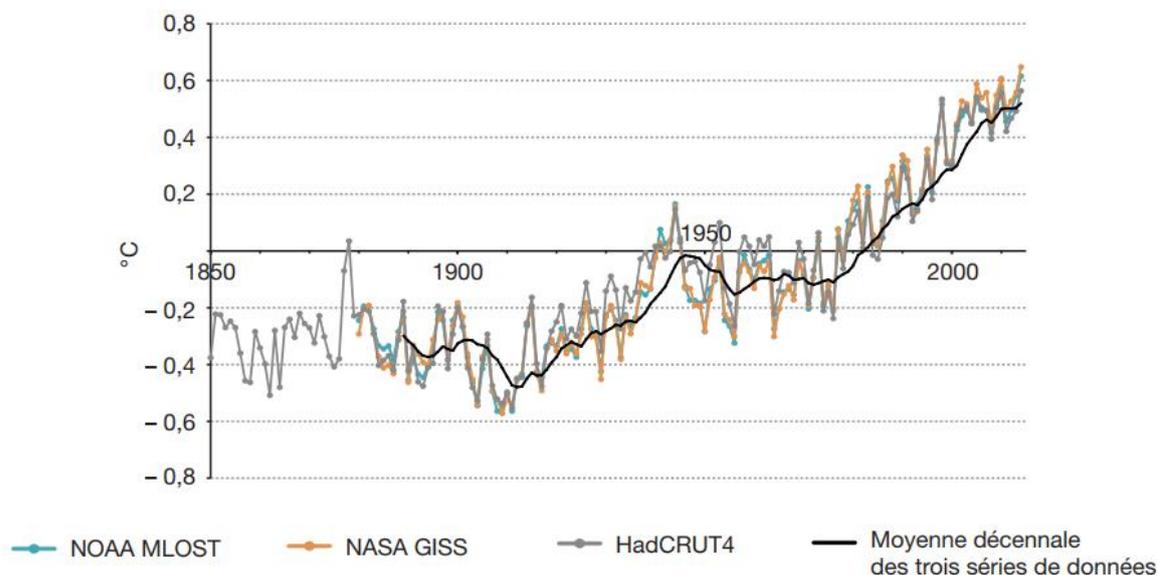


Figure 5 : Parc automobile des principaux pays, 1898-2015 [1]

Dans son rapport de 2007, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur L'Evolution du Climat (GEIC) estimait que la température de la planète pourrait s'élever de 1.8°C à 4°C d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Cette hausse des températures, Figure 6, liée à l'augmentation des

émissions de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), provoquent un accroissement de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles climatiques, la destruction de certains écosystèmes et la fonte massive des glaciers.



Source : NOAA, NASA, Hadley Center

Figure 6 : Evolution de la température moyenne annuelle mondiale [2]

Le 12 décembre 2015, l'accord de Paris sur le climat a été adopté par les 195 délégations des nations unies. C'est le premier accord universel sur le climat, ce qui témoigne d'une prise de conscience mondiale du problème écologique de notre planète et la volonté d'agir pour lui rendre sa grandeur.

Heureusement, pour pallier cette augmentation de la pollution grandissante, des normes d'émission ont été déployées depuis les années 90. L'objectif est de stabiliser les émissions puis de les diminuer. Les pays industrialisés tels que l'Union Européenne et ses états membres, les Etats-Unis et le Japon, ont donc mis en place des normes qui visent à limiter les rejets de : CO, NO_x, HC et les PM. La Figure 7 résume les limitations d'émissions des normes appliquées dans ces différents pays. Il est à noter que les limites diffèrent largement d'un pays à l'autre, hormis pour les particules fines dont le seuil des dernières normes est fixé à 5g/km. De plus, chaque norme s'appuie sur des procédures d'essais spécifiques. Les normes européennes sont, comme toutes les normes, à chaque fois revisitées et les seuils d'émissions sont revus continuellement à la baisse. Les valeurs limites des émissions des véhicules de type M (essence et diesel) fixées par la norme Euro depuis sa première application en 1992 jusqu'à la 6^{ème} version en septembre 2014 sont données dans le Tableau A-1 en annexe. Cependant, la limitation et la dépollution des gaz d'échappement restent coûteuses et complexes à mettre en œuvre et ne diminuent pas ou peu la consommation des ressources fossiles.



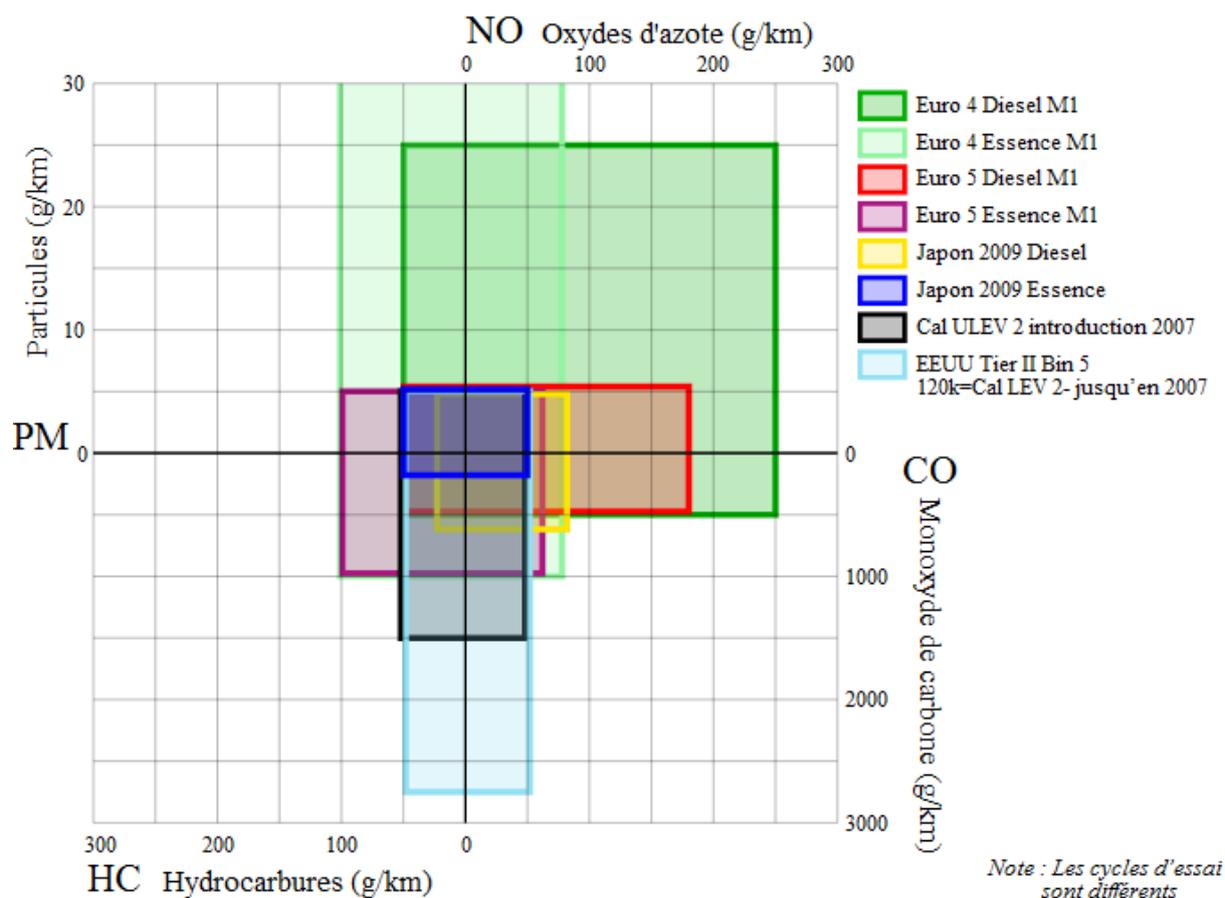


Figure 7 : Comparaison des valeurs limites des émissions pour différentes normes [3]

Ainsi, il est indispensable de trouver des solutions alternatives et durables pour le transport. Le véhicule électrique constitue une clé de la solution avec de nombreux avantages à l'utilisation. Aucun rejet polluant n'est observé à l'utilisation du véhicule électrique et le rendement d'un moteur électrique est de l'ordre de 90% ce qui est bien plus élevé que le moteur à combustion interne (avec environs 40%). Compte tenu des contraintes d'autonomie, de temps de recharge et du coût d'un véhicule électrique, ce dernier est une solution adaptée principalement au transport urbain. Ces contraintes sont particulièrement liées au stockage de l'énergie. En effet le coût des batteries représente une part majeure dans le prix d'achat d'un véhicule électrique. Le stockage d'énergie doit donc être finement adapté au besoin pour en assurer la compétitivité en termes de performances et de coût.

C'est dans ce contexte que les constructeurs automobiles orientent leurs travaux de recherche & développement vers l'électrification des chaînes de traction. Les véhicules hybrides alliant moteur électrique et moteur thermique sont une bonne alternative afin d'augmenter le rendement des chaînes de traction. En revanche, la véritable rupture technologique n'est possible qu'avec des motorisations toutes électriques utilisant des sources d'énergie renouvelable [4].

Chapitre I. CADRE GLOBAL DE LA THESE

I - 1. INTRODUCTION DU CHAPITRE I	23
I - 2. INTERET DE LA MODELISATION DU SYSTEME	25
I - 2.1 Batterie : quel modèle ?	27
I - 2.2 Les générations récentes de véhicules électriques sur le marché	28
I - 3. CAHIER DES CHARGES	31
I - 3.1 Mission	31
I - 3.1.1 Résultats d'analyse de missions	33
I - 3.1.2 Donnés techniques des résultats	35
I - 3.2 Véhicule	36
I - 3.3 Technologie de Stockage embarqué d'énergie électrique	39
I - 3.3.1 Le stockage électrochimique	39
I - 3.3.2 Les différentes technologies de batteries au lithium	41
I - 4. CONCLUSION DU CHAPITRE I	47



I - 1. Introduction du Chapitre I

Ce premier chapitre traite du cadre global de la thèse où l'intérêt de la modélisation du véhicule est présenté et le cahier des charges du produit détaillé. Le but est d'appréhender au mieux le véhicule utilitaire électrique qui sera étudié, son système de stockage ainsi que son utilisation. La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du type de modélisation souhaitée pour le véhicule ainsi que les caractéristiques du modèle de son système de stockage (architecture du modèle, temps de simulation, précision, fidélité relative aux comportements internes, ...). Une brève présentation des véhicules électriques actuels est faite afin de positionner le véhicule par rapport au marché et comprendre l'importance de son développement. La seconde partie de ce chapitre est focalisée sur le cahier des charges du véhicule et son utilisation. Avant toutes choses, une étude est réalisée sur les habitudes des professionnels ciblés sur l'utilisation du véhicule utilitaire pour déterminer des missions types qui seront notre base de travail. Ensuite, les caractéristiques du véhicule utilitaire électrique développé vont être explicitées. Finalement, le cahier des charges du système de stockage et un état de l'art des technologies de stockage seront détaillés.



I - 2. Intérêt de la modélisation du système

La Figure I-1 résume l'utilité de la modélisation pour l'optimisation du dimensionnement [13] [14] et la gestion énergétique suivant les contraintes liées à la mission, la fiabilité, les technologies existantes et les exigences écologiques et économiques.

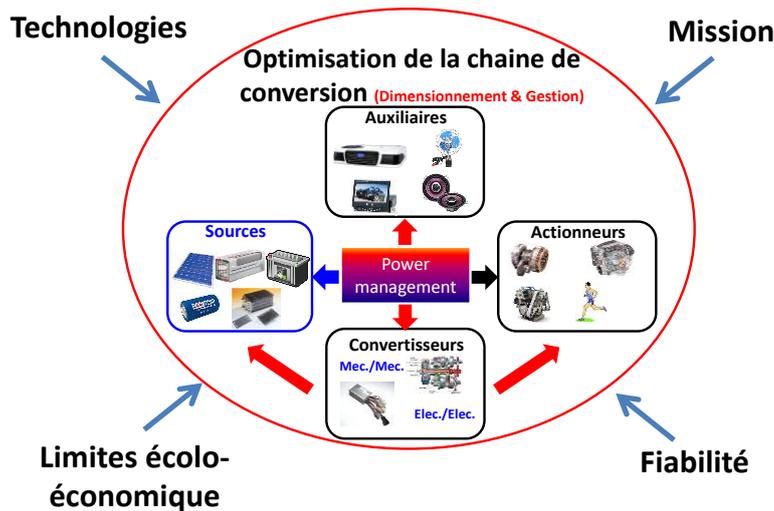


Figure I-1 : Principales contraintes pour l'optimisation de la chaîne de conversion

La gamme de véhicule 3,5t est la plus personnalisée (transport de personnes, transport de marchandises, véhicule sécurité, véhicule BTP, véhicules spécifiques, ...) parmi les véhicules utilitaires aménagés par Gruau. Le développement d'un modèle multi-physique global de la version électrifiée de ce véhicule représente un premier verrou à lever dans le cadre de ces travaux afin de réduire les coûts de développement [15] [16]. Ce modèle doit être modulaire et adaptatif assurant une interopérabilité avec les modèles des autres composants véhicules. La modélisation multi-physique à développer doit prendre en considération le couplage électrothermique et son impact sur le vieillissement du système de stockage embarqué [17]. Ce point représente un deuxième verrou dans le cadre de ces travaux de thèse.



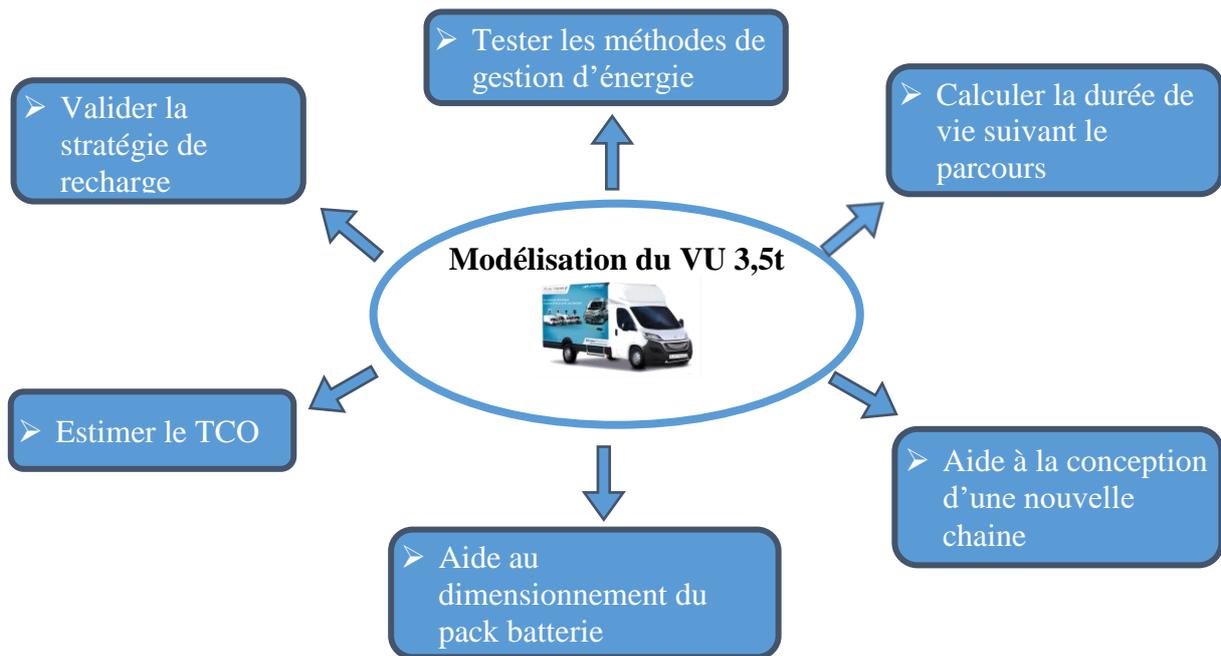


Figure I-2 : Intérêt de la modélisation du VUL électrique

La Figure I-2 présente les différents intérêts à réaliser une modélisation du véhicule utilitaire électrique. Le modèle développé sera utilisé pour évaluer les performances de la chaîne de traction en termes de consommation énergétique et de durée de vie globale en fonction des missions choisies. En connaissant le comportement du véhicule sur une mission, il sera ensuite possible de calculer son TCO. L'analyse de ces performances donnera alors des pistes pour l'optimisation du système. Il est possible de se baser sur cette modélisation pour développer des stratégies de recharge avancées, pour dimensionner le pack de batterie en fonction des contraintes ou même l'utiliser pour le développement de nouveaux composants sur la chaîne de traction. En outre, l'outil développé pourra être utilisé pour tester les stratégies de gestion d'énergie (Eco-conduite, gestion rapprochée des composants BMS (Battery Management System, ...), ce qui représente un autre verrou scientifique et technologique à résoudre.

La modélisation de la dynamique du véhicule est une étape indispensable à la réalisation du modèle global. C'est une partie du modèle qui a été largement décrite dans la littérature [18] [19]. La dynamique du véhicule provient directement de l'application de manière simplifiée du principe fondamental de la dynamique. Les paramètres utilisés doivent être adaptés au cadre d'étude choisi.

I - 2.1 Batterie : quel modèle ?

La modélisation des composants de stockage constitue aussi une partie du modèle complet. Elle est également bien abordée dans la littérature. Il existe de nombreux modèles électriques, thermiques et de vieillissement de différents niveaux de complexité, du plus générique au plus spécifique. De par la multitude des technologies d'accumulateurs, de format, d'énergie et de composition, un modèle spécifique à une application donnée est souvent nécessaire. Dans notre cas, l'objectif est de modéliser une cellule électrochimique de technologie LFP (Lithium Phosphate de Fer : choix de cette technologie principalement pour la sûreté cf. I - 3.3.2), de type haute énergie avec un modèle adapté capable de répondre aux différentes attentes en terme de modélisation du comportement dynamique, thermique, énergétique et en vieillissement. Le modèle de la batterie, doit être capable de prendre en compte les contraintes liées aux caractéristiques électriques du véhicule, à la recharge et doit également pouvoir indiquer le coût estimé de la batterie. Les attendus du modèle de la batterie sont synthétisés sur la Figure I-3.

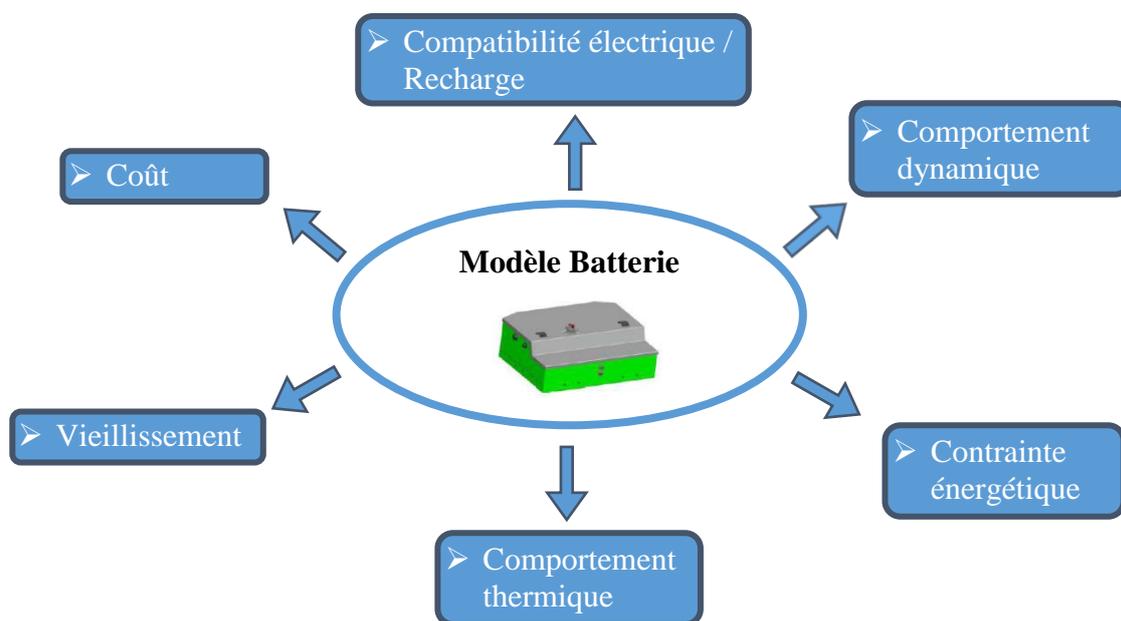


Figure I-3 : Attendus du modèle batterie



L'objectif est de déterminer le TCO du véhicule. La batterie, et donc sa modélisation, joue un rôle majeur dans ce calcul de coût de revient. En particulier, la modélisation du vieillissement de la batterie permet de déterminer si la durée de vie de la batterie sera compatible avec l'utilisation souhaitée et le temps d'étude considéré. Le prix d'un accumulateur Lithium-ion restant très élevé, s'il se révèle nécessaire de le changer avant la fin de vie du véhicule choisi pour l'étude du TCO, il est important d'en tenir compte. De plus, ce vieillissement dépend entre autre de l'état de charge de la batterie, du courant et de sa température. Dès lors un modèle du comportement électrique et thermique de la batterie est nécessaire pour appréhender le coût de revient de cette batterie. Le choix est donc de modéliser l'accumulateur électrochimique par un modèle multi-physique, comprenant la partie thermique, la partie électrique et les parties de vieillissements calendaire et en cyclage. Le modèle électrique permet de donner les variations dynamiques de la tension puis de l'état de charge de la batterie pour une sollicitation donnée par le modèle de dynamique du véhicule (profil de courant). Le modèle électrique permet également d'estimer les pertes au sein de la batterie. Le modèle thermique sert quant à lui à déterminer l'évolution de température de la batterie en fonction de la température ambiante et des pertes identifiées dans le modèle électrique. La température de la batterie influe également sur le modèle électrique puisque les paramètres changent en fonction de la température. L'énergie disponible dans la batterie change notamment en fonction de la température de la batterie. Enfin, le troisième sous-modèle composant la modélisation de la batterie est son vieillissement. Le modèle de vieillissement est fortement influencé par la température de la batterie, le niveau d'énergie mais également le profil de courant.

I - 2.2 Les générations récentes de véhicules électriques sur le marché

Afin de positionner l'intérêt du développement d'un véhicule électrique utilitaire, un comparatif sur les différents véhicules électriques les plus vendus et les plus récents du marché est présenté dans le Tableau I-1 (Sources : brochures constructeurs et fournisseurs de batteries).

Tableau I-1 : véhicules électriques actuels sur le marché

Modèle	Année	Puissance moteur	Couple	Capacité batterie	Technologie batterie	Masse batterie	Autonomie	Puissance de charge	Masse	Tarif
Renault Zoe	2017	65 kW	220 N.m	41 kWh	LMO/NMC	305 kg	280 km	43 kW	1480 kg	37.2k€
Nissan Leaf	2018	110 kW	320 N.m	40 kWh	LMO/NCA ?	300 kg ?	270 km WLTP mixte	50 kW	1765 kg	37.5k€
BMW i3	2017	125 kW	250 N.m	33.2 kWh	NMC/LMO	355 kg ?	240 km	11 kW	1365 kg	38.4k€
VW e-golf	2017	100 kW	290 N.m	35.8 kWh	NMC	318 kg	240 km	40 kW	1540 kg	39.6k€
Tesla modèle S	2013	285 kW	440 N.m	75 kWh	NCA	480 kg	480 km	120 kW	2000 kg	74k€
Tesla modèle X	2016	244 kW	525 N.m	75 kWh	NCA	480 kg	420 km	120 kW	2300 kg	86k€
Renault Kangoo ZE	2017	44 kW	225 N.m	33 kWh	LMO/NMC	255 kg	200 km	7 kW	1530 kg	22k€ (hors batterie)
Nissan E-NV200	2014 (2018)	80 kW	254 N.m	24 kWh (40kWh)	LMO/NCA	267 kg	170 km NEDC	50 kW	1570 kg	24.7k€ (hors batterie)
Renault Master ZE	A venir 2018	57 kW	225 N.m	33 kWh	LMO/NMC	255 kg	120 km théorique	7.4 kW	2400 kg	46.7k€ (hors batterie)
GRUAU Electron II	2017	90 kW	240 N.m	57.6 kWh	LFP	610 kg	155 km réel	22 kW	2700 kg	80k€

Les dernières versions des véhicules électriques ont globalement reçu une augmentation des capacités de leurs batteries, en passant de 22 kWh à 41 kWh (+50%) pour la Renault Zoé par exemple, avec une faible augmentation de masse, en passant d'un pack batterie de 290kg à 305kg (+5%). Ces évolutions sont principalement dues aux progrès sur les cellules de batteries de ces 10 dernières années. Aujourd'hui, il n'existe pas d'offre de véhicule utilitaire du segment 3,5t autre que l'Electron II de GRUAU. Il est annoncé pour 2018 le Renault Master ZE, mais les données techniques ne sont pas encore certifiées. Pour des volumes de chargement plus faibles, il existe le nouveau Renault Kangoo ZE (2017) et le Nissan E-NV200 de 2014. Une nouvelle version est à venir de l'E-NV200 avec une capacité de 40 kWh. Pour les trois véhicules utilitaires Renault-Nissan, les batteries sont uniquement proposées en location, le tarif n'est donc pas comparable au véhicule proposé par gruau avec achat des batteries. Concernant



les Puissances des différents véhicules, 3 niveaux se dégagent : Autour de 50 *kW* pour les véhicules électriques Renault, de fortes puissances autour de 260 *kW* pour les véhicules Tesla et autour de 100 *kW* pour les autres véhicules présentés. Pour les véhicules électriques particuliers de Renault, Nissan, BMW et VW, les prix sont tous proches de la barre des 40k€ pour des capacités entre 33 *kWh* et 40 *kWh*.

Les véhicules de Tesla ont un prix deux fois plus important ce qui est cohérent compte tenu des performances proposées et de la capacité de la batterie. Cependant en terme de masse du pack de batterie, il apparait que les véhicules Tesla ont des densités d'énergie bien plus élevées. Les densités massiques moyennes des autres véhicules se situaient autour de 85*Wh/kg* en 2014 et sont en 2018 autour de 125*Wh/kg*. Seul le véhicule de BMW ne semble pas avoir d'amélioration significative sur la densité du pack (90*Wh/kg*), car le constructeur a souhaité améliorer l'efficacité énergétique du véhicule en misant sur un moteur synchrone hybride aimants permanents/reluctance variable à haut rendement et un système de thermo-management de la batterie plus performant (qui pourrait justifier une plus faible densité d'énergie). Le véhicule de Gruau a également une densité d'énergie un peu plus faible (95*Wh/kg*) qui est due au choix de la technologie de batterie. En effet la chimie LFP a un niveau de sureté plus élevé mais une densité plus faible (cf. I - 3.3.2). Si presque tous les véhicules électriques sont équipés d'éléments de batterie à « haute énergie » (autour de 130*Wh* par élément), le constructeur Tesla a adopté une stratégie différente. Les cellules de batterie utilisées sont des accumulateurs de taille standard largement utilisés dans le domaine de l'ordinateur portable notamment. La capacité est bien plus faible (autour de 12*Wh*) et il est nécessaire d'utiliser environs dix fois plus d'éléments pour obtenir la même capacité de batterie finale. Si la gestion d'un plus grand nombre de cellules peut-être une contraintes, la densité d'énergie de cet accumulateur standard a une densité bien plus élevée (155*Wh/kg*) avec des coûts plus faibles et une meilleure qualité, du fait de sa production de masse.

Le véhicule GRUAU semble bien se positionner sur un segment qui n'est pas représenté à l'heure actuelle. En 2018, la concurrence semble également se positionner sur ce segment comme VW avec l'e-Crafter et Renault avec le Master avec des sorties prévues courant 2018. Cependant, ces véhicules prévoient des performances et des capacités inférieures à celles de véhicule électrique de GRUAU. Pour l'aspect économique, il est nécessaire d'attendre la sortie commerciale afin de juger du prix de vente de la batterie. Pour l'heure seul le prix du véhicule sans la batterie est communiqué par Renault.

I - 3. Cahier des charges

Dans cette partie va être présenté le cahier des charges des moyens et services étudiés dans le cadre de la mise en place de la modélisation de l'ensemble du véhicule et l'optimisation du coût de revient global. En premier lieu une étude sur les missions des clients sera développée pour comprendre dans quel contexte l'optimisation du coût global de possession doit être réalisée. Un résumé des caractéristiques du véhicule sera ensuite présenté afin d'appréhender le produit d'étude et les attendus. Enfin, le détail des différentes technologies de cellules de batteries sera exposé afin de justifier le choix de la technologie sélectionnée.

I - 3.1 Mission

Afin d'adapter le VUE aux besoins du client, il est indispensable de définir différentes missions cibles pour l'étude d'une solution permettant d'obtenir un TCO minimal.

La définition de l'ensemble des données nécessaires à la caractérisation de profils de missions représentatifs est indispensable. Les données retenues sont la vitesse, l'accélération, la pente (ou l'altitude) et la position géographique. Après post traitement via le modèle de simulation du véhicule, ces données permettront de déterminer, entre autre, la puissance nécessaire pour assurer la mission.

Pour acquérir précisément les données retenues, les véhicules des clients ciblés ont été instrumentés par un boîtier d'acquisition dont les caractéristiques et la conception sont détaillées ci-après. Compte tenu des données souhaitées, l'équipement de mesure doit à minima comporter un GPS ainsi qu'un capteur pouvant remonter à la vitesse. Aussi, pour obtenir une précision convenable des résultats la fréquence minimum des acquisitions doit être entre 1 et 10Hz. Les données remontées par les boîtiers télématiques que Gruau installe de série dans ses véhicules ne permettent pas d'obtenir des résultats suffisamment précis. En effet, les boîtiers télématiques ont une fréquence d'acquisition de l'ordre de 10mHz ce qui est beaucoup trop faible compte tenu de la dynamique du véhicule. Il est nécessaire d'avoir des acquisitions à une fréquence de l'ordre de 1 à 10Hz ce qui nous a amené à trouver une nouvelle solution d'acquisition. Le développement de notre propre boîtier d'acquisition nous a paru la meilleure solution pour obtenir facilement et rapidement les acquisitions aux fréquences voulues.



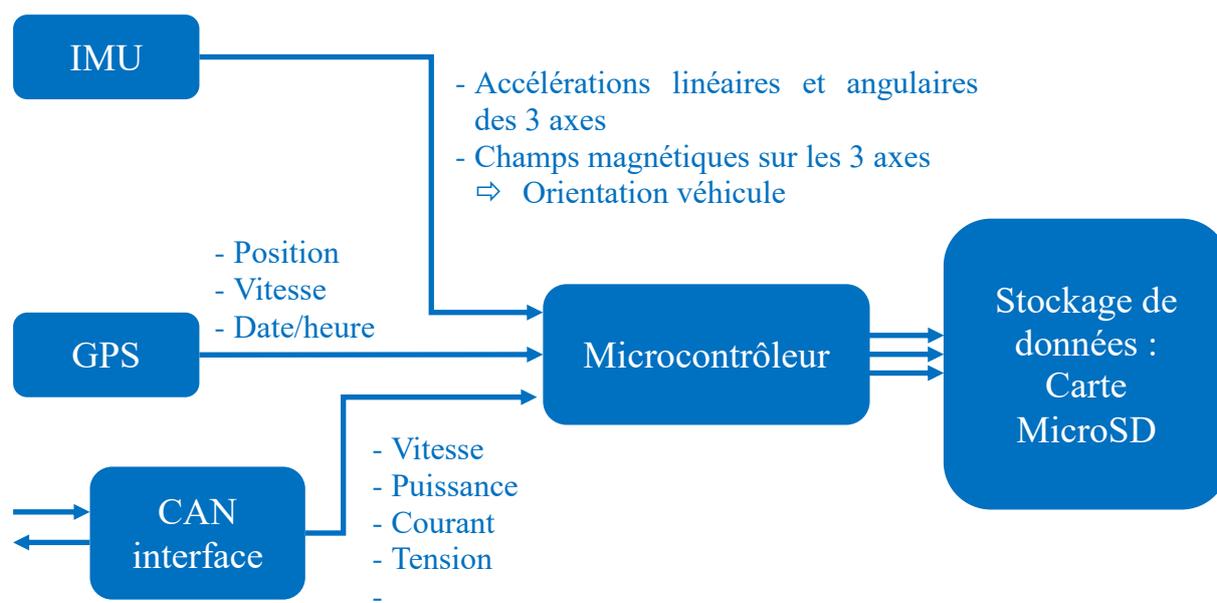


Figure I-4 : Schéma de principe d'acquisition des données du boîtier

Un boîtier d'acquisition, dont le principe est présenté Figure I-4, a été conçu en interne pour recueillir ces informations de manière autonome à l'aide d'une puce GPS ; la vitesse étant directement remontée par celle-ci. La fréquence d'acquisition est réglée à 5Hz et pourra être augmentée à 10Hz au besoin. Les données sont recueillies sur une carte microSD. Le détail du boîtier réalisé est décrit en Annexe A - 2. Afin de récupérer plus d'information et de gagner en précision sur les véhicules qui le permettent, une deuxième version du boîtier d'acquisition a été réalisée pour être placé dans le VUE et fournir des informations complémentaires provenant des systèmes embarqués du véhicule. Ce moyen a donc la possibilité de se connecter aux réseaux CAN du véhicule et d'enregistrer les informations qui y circulent, notamment la puissance, le couple et la vitesse. Il est équipé d'une centrale inertielle électronique qui donne une information précise de la pente.

Un logiciel a été conçu pour interpréter les données brutes de position GPS et en extraire les informations utiles qui serviront aux différents travaux. La caractérisation des profils se fait ensuite à travers une simulation sur un modèle dynamique du VUE qui sera présenté dans la section I du Chapitre II. La simulation retourne les données utiles comme la puissance, l'énergie consommée et les taux de décharge appliqués aux batteries. Ce modèle dynamique se base sur les données intrinsèques du véhicule, principalement la masse et le produit $S.C_x$ (cf. Tableau I-3), qui sont des valeurs estimées à partir des informations données par le client ou la connaissance de la carrosserie choisie. A partir des différentes données, un script calcule les indicateurs caractéristiques du parcours. Les indicateurs retenus sont la répartition de la puissance consommée, la distance journalière, la consommation d'énergie journalière, le nombre d'arrêts, le temps total du trajet et la répartition du temps en zone urbaine et extra urbaine.

Une seconde problématique était de trouver des clients en supplément d'Enedis, notre client partenaire. Les acquisitions ont été fortement ralenties en raison des contraintes de chacun afin d'organiser les rencontres et la mise en place du matériel d'acquisition.

Les relevés de profils de missions sont effectués sur des véhicules thermiques car nos clients n'ont pas pour l'heure de véhicules électriques de segment et performances équivalents au véhicule qui est développé dans le cadre du projet VUE-Flex. De ce fait, les mesures ne sont pas directement applicables et doivent être adaptées pour correspondre au futur véhicule électrique. Les informations qui déterminent la consommation énergétique sont liées notamment à la masse du véhicule, au produit de son coefficient de traînée aérodynamique et de sa surface de référence, de sa résistance au roulement. Les paramètres qui vont effectivement varier lors de l'électrification est la masse. Pour estimer la quantité d'énergie consommée par le véhicule, il faudra donc estimer tous ces paramètres dont la masse embarquée (qui varie au cours de la mission pour la messagerie par exemple). En effet il est compliqué voire impossible d'effectuer une pesée du véhicule. Les estimations sont faites avec des recalages sur les différents paramètres du modèle, au fur et à mesure que de nouvelles données ont été acquises.

I - 3.1.1 Résultats d'analyse de missions

Les résultats d'analyse des différentes missions laissent apparaître plusieurs familles de profils d'utilisations types suivant les métiers et la zone d'activité.

Un premier métier est celui de la messagerie qui se divise en deux zones :

- Messagerie en milieu urbain, avec un kilométrage inférieur à 50km par jour, des arrêts très fréquents et une vitesse moyenne inférieure à 30km/h
- Messagerie en milieu mixte, avec un kilométrage journalier de moins de 70km, des arrêts fréquents et une vitesse moyenne de l'ordre de 30km/h

Le métier de la messagerie a des missions relativement répétables.

Un second métier est le métier de distribution à température dirigée :

Les missions ont lieu en milieu mixte, avec des distances de l'ordre de 140km, des arrêts assez fréquents et une vitesse moyenne proche de 50km/h sur des parcours très répétables. La quantité d'énergie pour la génération de froid n'a pas encore été précisément quantifiée. La technologie qui est actuellement montée sur les véhicules thermiques ne sera probablement pas celle qui sera utilisée sur les VUE.

Un dernier métier est le cas des interventions, qui est fonction des besoins instantanés dans la limite des horaires de travail, ce qui est le cas pour Enedis notamment. Il est donc difficile de prévoir à l'avance les trajets qui seront effectués sur le long terme puisque les trajets



ne sont pas répétables. En revanche, il est souvent possible de prévoir les interventions du lendemain avec un pourcentage d'incertitude. Le kilométrage moyen annuel reste très faible.

Ce dernier parcours nécessite la prise en compte d'avantage de données et ne peut se réduire à un parcours type réellement représentatif.

Les trois parcours retenus ont été résumés dans le Tableau I-2.

Tableau I-2 : Récapitulatif des parcours retenus

	<i>Parcours 1</i>	<i>Parcours 2</i>	<i>Parcours 3</i>
<i>Distance totale :</i>	41,7 km	68,2 km	144,5 km
<i>Temps total :</i>	2h42	5h15	6h34
<i>Taux de temps d'arrêt :</i>	40% du temps	53% du temps	56% du temps
<i>Vitesse moyenne :</i>	25,4 km/h	27,6 km/h	49,9 km/h
<i>Recharge à mi-parcours :</i>	Possible	non-envisageable	Possible
<i>temps de pause total :</i>	1h05	2h49	3h43
<i>nombre total d'arrêt :</i>	97	142	123
<i>temps Urbain* :</i>	1h28	2h09	1h25
<i>soit en % :</i>	90%	88%	50%
<i>temps Extra-Urbain* :</i>	9min	17min	1h26
<i>soit en % :</i>	10%	12%	50%
<i>distance Urbain* :</i>	31,2km	46,4km	35,8km
<i>soit en % :</i>	76%	69%	25%
<i>distance Extra-Urbain* :</i>	10km	21km	105,7km
<i>soit en % :</i>	24%	31%	75%
<i>nombre de micro arrêts (<2s) :</i>	-	-	55
<i>nombre d'arrêts dus au trafic (<1min) :</i>	74	98	47
<i>temps moyen des arrêts dus au trafic :</i>	9s	10s	9s
<i>nombre d'arrêts dus aux livraisons (<30min) :</i>	22	43	20
<i>temps moyen des arrêts dus aux livraisons :</i>	1min 27s	3min 32s	8min
<i>nombre d'arrêts long ; recharge possible :</i>	1	0	1
<i>temps moyen des arrêts long :</i>	25min	-	58min
<i>accélération maximum :</i>	2,9m/s ²	3,3m/s ²	4m/s ²
<i>moyenne des accélération :</i>	0,39m/s ²	0,34m/s ²	0,42m/s ²
<i>décélération maximum :</i>	-2,8m/s ²	-3,6m/s ²	-6m/s ²
<i>moyenne des décélérations :</i>	-0,39m/s ²	-0,34m/s ²	-0,45m/s ²

*Urbain = vitesse < 50km/h et Extra-Urbain = vitesse > 50km/h

I - 3.1.2 Données techniques des résultats

Les données de vitesses et de pentes relevées avec le boîtier d'acquisition donnent les profils présentés Figure I-5.

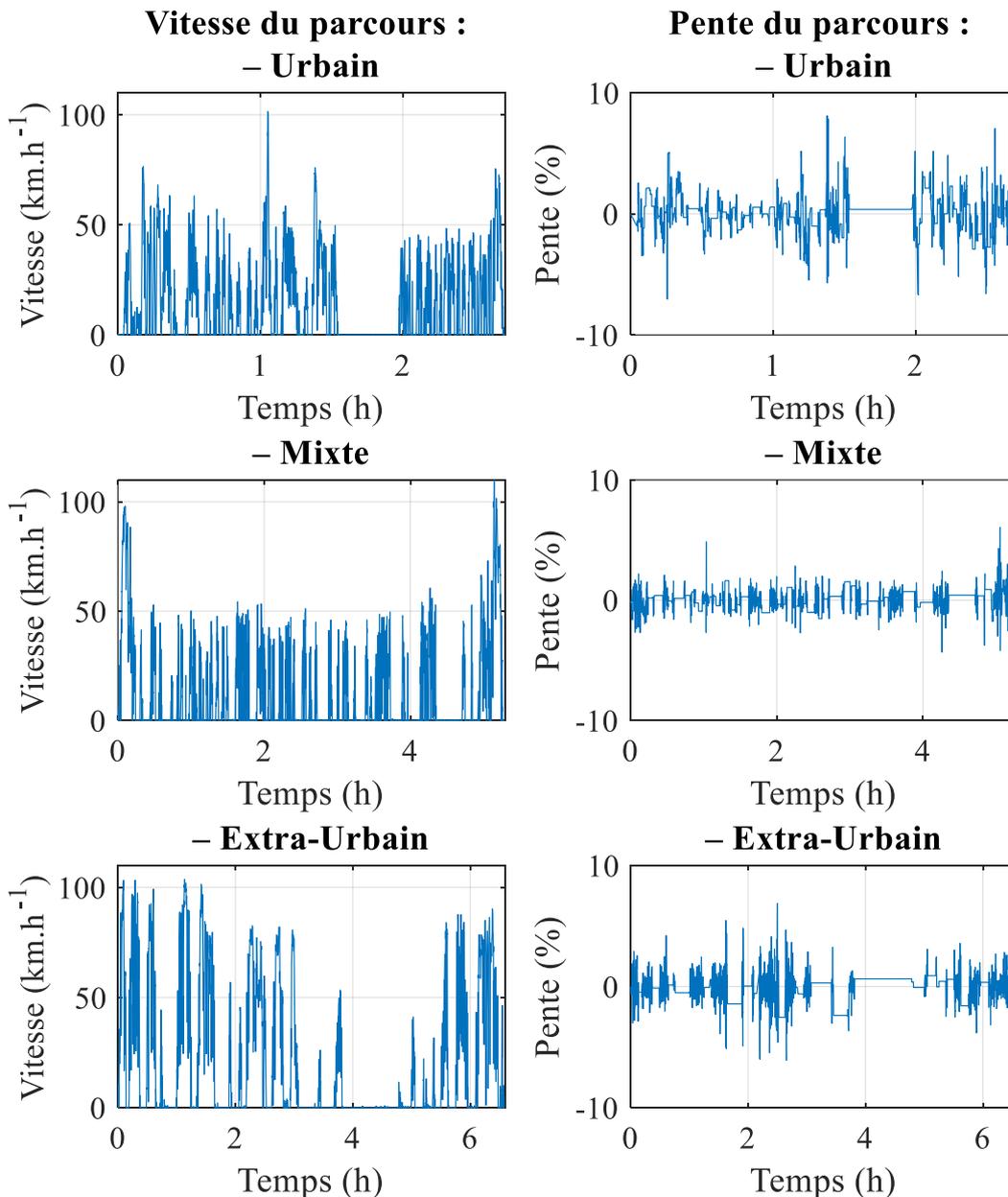


Figure I-5 : Profils de vitesse et de pente des trois parcours

Le premier parcours présenté est le parcours urbain. Ce parcours de courte distance et durée et sa vitesse moyenne relativement faible, autour de 25 km.h^{-1} , ce qui nous permet de le classer comme parcours urbain. Il est également à noter que le véhicule effectue un arrêt d'environ 30 min après 1h30 de trajet pour réaliser un ravitaillement de sa cargaison. Cette pause pourrait éventuellement être exploitée pour une recharge lors de la mission.



Le profil de vitesse relevée pour le parcours mixte se décompose en trois phases. La première est une phase de trajet depuis le point de charge du véhicule jusqu'à la zone de livraison pendant les quinze premiers kilomètres. La phase de retour se répète inversement à cette dernière sur les quinze derniers kilomètres pour le retour à la base. Sur ces deux phases la vitesse moyenne est autour de $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ avec des pointes de vitesse supérieures à $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ce qui caractérise des phases extra-urbaine. Enfin la phase intermédiaire est la phase de livraison se produit milieu urbain avec des vitesses moyennes autour de $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Pour le parcours extra-urbain, le trajet est caractérisé par une vitesse moyenne située aux alentours de $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ avec des pointes de vitesse supérieures à $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Il est également à noter que le véhicule effectue un arrêt d'environ 1h après $\frac{2}{3}$ du trajet en raison de contrainte sur l'horaire de livraison. De même que pour le parcours urbain, cette pause pourrait éventuellement être exploitée pour une recharge lors du parcours, mais aucune infrastructure n'était présente à cet instant dans les zones extra-urbaines considérées.

Sur les trois parcours choisis, les pentes sont en moyennes nulles car le véhicule revient à son point de départ à la fin de chaque parcours. Cependant, les moyennes de pente en valeurs absolues donnent un aperçu des variations de pente sur le parcours. Les pentes moyennes sont de 0.7% sur le parcours mixte et extra-urbain et de 1.4% sur le parcours urbain. De plus les valeurs de pentes maximales sont de 6% pour le parcours mixte, 7% pour le parcours extra-urbain. Sur les zones d'arrêt du véhicule, la pente reste constante ce qui justifie la présence de paliers sur les profils de pente.

Les missions d'étude sont choisies. Il reste maintenant à décrire le véhicule qui sera étudié.

I - 3.2 Véhicule

La chaîne de traction du véhicule utilitaire électrique (VUE) comprend à minima un moteur électrique, un système de transmission intégrant réducteur et différentiel, l'électronique de puissance et de commande pour piloter le moteur ainsi que les accessoires nécessaires au bon fonctionnement de l'ensemble, tel qu'un circuit de refroidissement. La chaîne de traction électrique (CTE) souhaitée doit être suffisamment flexible, pour s'adapter aux multiples configurations de différents constructeurs de véhicules utilitaires du segment $3,5\text{t}$ (Renault, Peugeot, Fiat, Mercedes, Iveco pour ne citer que les principaux en Europe) d'une part, et à la multitude des profils de missions des utilisateurs professionnels (Enedis, La Poste, DHL, UPS, etc...). Ainsi la chaîne de traction du véhicule électrique doit être compatible avec la diversité des contraintes mécaniques d'encombrement des différents constructeurs susnommés en exemple, et également d'être suffisamment performante pour correspondre aux besoins des clients utilisateurs. Cette CTE doit être capable, et ce pour tout type de VUE et quel que soit le profil de mission choisie, d'assurer une conduite souple et agréable afin de répondre aux

attentes des conducteurs. Cela passe également par la suppression de la boîte de vitesse à plusieurs rapports présente sur les modèles précédents de VUE Gruau.

Afin de répondre aux exigences souhaitées de flexibilité, la CTE doit présenter une compacité en kilowatt par litre, bien plus élevée que celle relevée dans l'état de l'art. Elle doit de surcroît être programmable pour autoriser une souplesse personnalisable aux souhaits de conduite et aux profils de mission de chaque client.

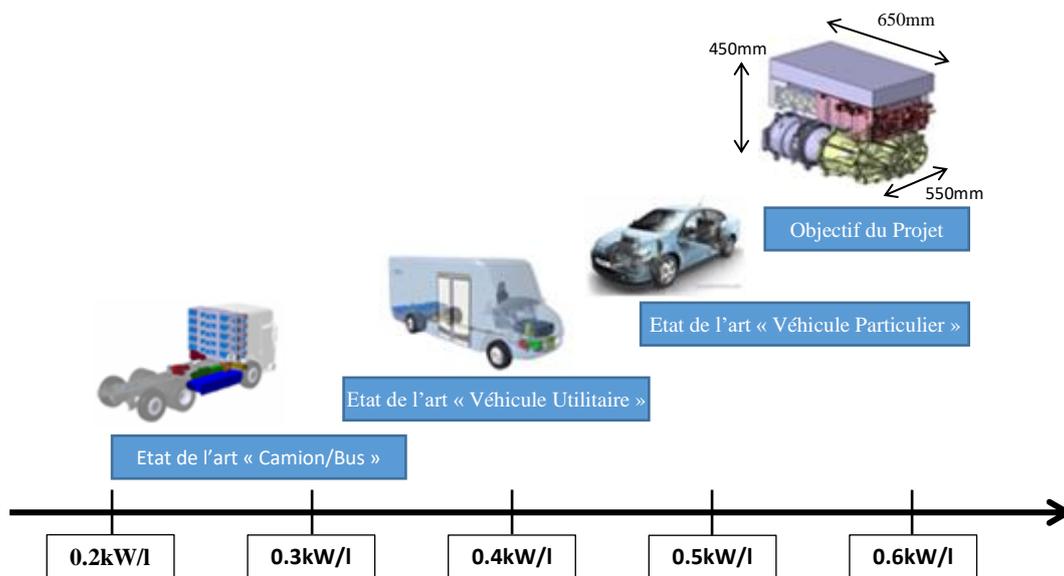


Figure I-6 : Etat de l'art de la compacité des chaînes de tractions [20]

Pour correspondre au niveau de performances des véhicules utilitaires thermiques équivalents, la CTE devra avoir une puissance d'au moins $130ch$, ce qui implique d'avoir une compacité de $0,55 kW.l^{-1}$ et correspond à une CTE d'environ 40% plus compacte que les CTE de l'état de l'art.

Afin d'obtenir cette compacité, plusieurs axes sont envisagés, dont l'augmentation de la vitesse nominale du moteur à puissance égale, ainsi que l'augmentation de la fréquence de l'électronique de puissance et l'optimisation des lois de contrôle du moteur électrique.

Outre la compacité de la motorisation et toujours afin de rendre le VUE plus accessible, le véhicule doit avoir une capacité de batterie flexible afin d'adapter l'énergie embarquée au juste nécessaire en fonction des besoins du client. L'objectif est d'offrir d'une part la possibilité de moduler la capacité des batteries, et par suite, le prix d'achat, puis d'autre part de pouvoir optimiser la capacité des batteries « au plus juste » pour obtenir un coût de revient global du véhicule le plus faible possible. Le choix de l'électrochimie des cellules composant la batterie doit être fait de manière à obtenir le meilleur compromis sécurité, performance, durée de vie, énergie spécifique, puissance spécifique et coût. Le volume et la masse de la batterie sont



limités par la volonté d'obtenir un VUE ayant les mêmes capacités de chargement en termes de volume et de masse que le véhicule thermique équivalent.

De série, le VUE embarquera un chargeur pour la batterie de traction, un chauffage électrique en substitution du chauffage fourni par le moteur à combustion thermique des véhicules utilitaires thermiques, une cloche de rue afin d'avertir de sa présence les piétons et autres usagers non coutumiers des véhicules silencieux, une calandre spécifique intégrant la prise de charge et une sortie auxiliaire (380V/2kW) qui pourra servir pour des applications métier tel que le branchement d'un groupe frigorifique ou à l'inverse pour renvoyer de l'énergie vers la batterie en ajoutant une pile à combustible et ainsi prolonger l'autonomie du véhicule.

Dans le but d'assurer la compatibilité du VUE avec la multitude de transformations de carrosserie, le véhicule sera conçu pour recevoir les accessoires et les matériels dédiés à certains métiers notamment un hayon élévateur, un marchepied escamotable ou de tout accessoire existant et rencontré dans les conversions standard sur véhicule. Le véhicule doit également être capable d'assurer un usage intelligent des énergies additionnelles requises par l'utilisation métier. Les métiers « froid » et « logistique spécialisée » nécessitent par exemple des aménagements particuliers faisant appel à des ressources énergétiques. Le métier « froid » nécessite l'ajout d'un groupe frigorifique engendrant une demande énergétique additionnelle. Le métier logistique spécialisée utilise des fonctionnalités supplémentaires telles que par exemple l'extension de la climatisation permettant de refroidir ou réguler un espace partiel ou total de l'environnement de chargement, l'extension du chauffage, un hayon élévateur ou une rampe dans le cas du TPMR. Certaines fonctionnalités d'origine du véhicule, comme l'air conditionné, sont présentes et peuvent être exploitées dans le cadre de l'aménagement. Il faudra donc identifier toute synergie possible avec la configuration VUE initiale. Le véhicule dispose de base d'un chargeur, d'un convertisseur et d'une batterie qui sont embarqués pour la chaîne de traction électrique et il sera judicieux de les utiliser pour les besoins métiers et de prévoir leurs consommations énergétiques pour éviter de dupliquer les sources d'énergies et matériels embarqués.

Le Tableau I-3 est un aperçu des caractéristiques de base du véhicule, qui varient en fonction de la configuration du véhicule pour le métier client.

Tableau I-3 : Caractéristiques nominale du véhicule utilitaire

Paramètres	Symbole	Valeur nominale	Unité
Masse	m	3500	kg
Surface	S	6,5	m^2
Coefficient de résistance à l'air	C_x	3	—
Coefficient de résistance au roulement	C_r	0,02	—

I - 3.3 Technologie de Stockage embarqué d'énergie électrique

Le stockage de l'énergie est un enjeu majeur pour les solutions de véhicules propres. Ce stockage d'énergie peut être fait sous de nombreuses formes, à savoir le stockage mécanique, le stockage chimique, le stockage électrique et le stockage thermique (Tableau I-4). Pour des besoins de mobilité, la densité du stockage d'énergie est un paramètre essentiel. Pour alimenter un véhicule électrique en énergie, deux solutions sont possibles : la production d'électricité à partir d'un combustible (chimique) tel que l'hydrogène ou le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique soit avec une batterie, soit avec un super condensateur [21].

Le cas d'étude est un véhicule à alimentation électrique, mono source de stockage, et pour des problématiques de densité de stockage d'énergie, l'étude est portée sur les batteries.

Tableau I-4 : Caractéristiques sur les moyens de stockages [22]

Caractéristique	STEP	CAES	FES	Super-condensateurs	SMES	NaS	Pb	NiCd	Li-ion	Redox flow (vanadium)
Énergie spécifique..... (Wh/kg)	0,5 à 1,5	30 à 60	10 à 30	2,5 à 15	0,5 à 5	150 à 240	30 à 50	50 à 75	75 à 200	10 à 30
Puissance spécifique..... (W/kg)	0	0	400 à 1 500	500 à 5 000	500 à 2 000	150 à 230	75 à 300	150 à 300	150 à 315	0
Rendement charge-décharge..... (%)	70 à 85	57 à 85	70 à 95	90 à 98	90 à 98	70 à 90	70 à 82	60 à 70	86 à 98	60 à 85
Nombre de cycles			20 000 à 100 000	10 000 à 100 000	100 000	2 500	100 à 2 000	800 à 3 500	500 à 1 200	12 000 à 14 000
Durée de vie (années) (estimation)	30 à 60	20 à 40	15 à 20	20	20 à 30	5 à 15	3 à 20	5 à 20	5 à 15	5 à 15
Coût énergie..... (€/kWh)	0 à 21	2 à 130	340 à 140 000	280 à 90 000	900 à 80 000	230 à 460	140 à 380	560 à 1 400	460 à 2 300	140 à 950
Coût puissance..... (€/kW)	550 à 1 900	370 à 750	230 à 370	90 à 340	190 à 330	140 à 2 800	160 à 560	140 à 1 400	160 à 3 700	160 à 1 400

I - 3.3.1 Le stockage électrochimique

Le stockage de l'énergie électrique est l'obstacle majeur au déploiement des véhicules électriques. En effet la densité d'énergie est bien plus faible (jusqu'à 200Wh/l) pour les accumulateurs électrochimiques que pour les hydrocarbures (9400 Wh/l pour l'essence) avec un rapport proche de 50 [23]. Même si le rendement d'un moteur thermique est très faible avec environs 40% contre 95% pour les machines électriques, pour embarquer la même quantité d'énergie disponible en sortie du moteur, il serait nécessaire d'équiper le véhicule électrique avec un volume équivalent à 20 fois celui du réservoir d'essence. Pour cette raison il est important de continuer les travaux de recherche sur les technologies des batteries, leurs performances, leur durée de vie, leur coût ainsi que pour rendre plus intéressant le véhicule électrique face aux véhicules à moteur thermique.



Le système de stockage électrochimique est basé sur l'intervention d'une réaction réversible mettant en jeu au moins un couple oxydant/réducteur. Il existe plusieurs familles de batteries proposées par les fabricants et elles sont définies par les couples électrochimiques utilisés, dont les principales : Plomb/acide, Ni/Cd, Ni/MH et Li-ion. Les principales technologies d'accumulateur électrochimique sont représentées dans le diagramme de Ragone Figure I-7. Du fait de leur densité d'énergie élevée et de l'absence d'effet mémoire lors des cycles de décharge, les batteries Li-ion, apparues dans les années 90, sont les batteries les plus utilisées, que ce soit pour les appareils nomades ou pour les moyens de transport électriques.

Les batterie Lithium-ion se composent de plusieurs sous-familles définies par les matériaux composant les deux électrodes et le type d'électrolyte.

Les accumulateurs Li-ion, se caractérisent par le transfert de lithium sous forme ionique (Li^+). Lors de la décharge, les ions vont migrer, via l'électrolyte, de l'électrode positive vers l'électrode négative en s'intercalant dans les structures. Le phénomène inverse se produit lors de la charge. Les accumulateurs avec une électrode négative en lithium métallique, appelés lithium métal sont considérés à part de la famille lithium ion et présentent des risques important pour la sécurité.

L'électrolyte des batteries au lithium peut être sous forme d'un polymère gélifié ce qui rend l'accumulateur plus sûr mais moins performant. Ce type de batterie est appelé lithium-polymère et n'est pas non plus considéré dans la famille des batteries lithium-ion.

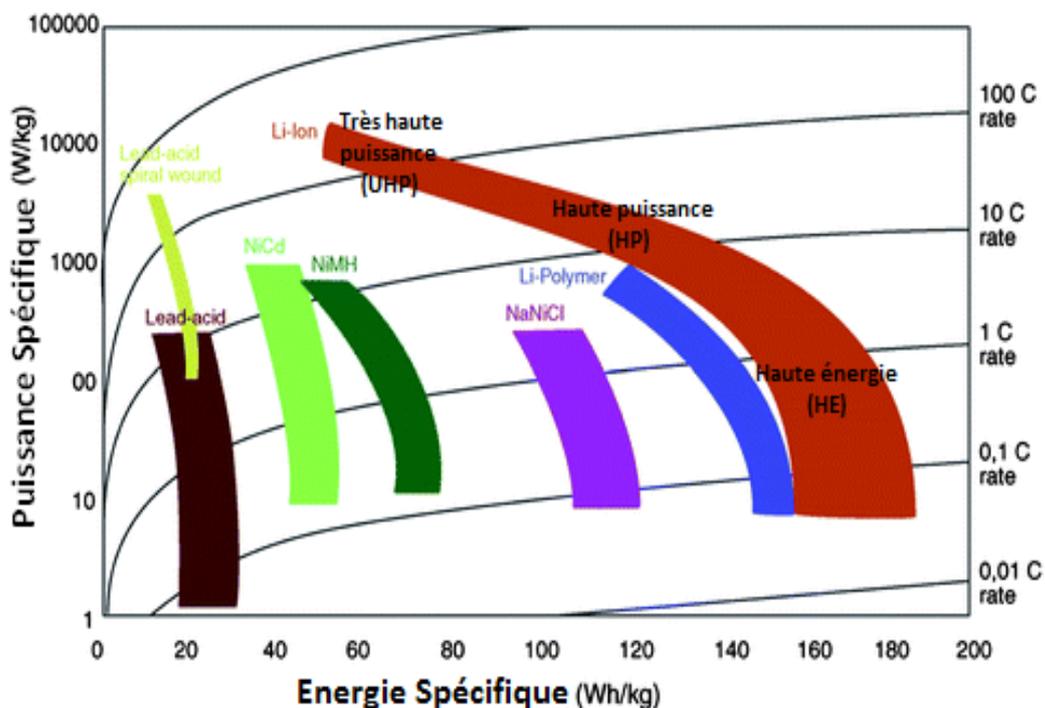


Figure I-7 : Diagramme de Ragone pour comparer les performances énergétiques et en puissance des différentes technologies de batteries [39]

I - 3.3.2 Les différentes technologies de batteries au lithium

Il existe de nombreuses technologies de batterie dont les plus utilisées sont le LCO, LMO, NMC, NCA, LFP et LTO. L'électrode négative est en carbone pour les batteries Li-ion, hormis la technologie LTO qui réside sur l'utilisation du titanate. Les technologies Li-ion se différencient principalement par la composition chimique du matériau de l'électrode positive.

La technologie LCO est la première apparue et possède une électrode positive en oxyde de cobalt de type lamellaire. Ces performances sont bien plus intéressantes que les batteries non Li-ion. Cependant, le cobalt est très réactif et va, à partir d'un seuil de température, dégager du dioxygène et rendre l'accumulateur peu sûr. De même le courant de charge est limité sous peine de détérioration ou surchauffe de la cellule. Enfin le coût élevé du cobalt en fait une solution qui est de moins en moins utilisée au profit des nouvelles technologies. Les caractéristiques de la technologie LCO sont résumées sur le diagramme araignée de la Figure I-8 (a). Le terme « performance » du diagramme araignée reflète le courant de décharge de la cellule.

La technologie LMO a également un oxyde comme électrode positive mais de type spinelle, l'oxyde de manganèse. C'est un matériau beaucoup moins coûteux comparé au LCO, mais qui a en contrepartie une énergie massique plus faible, une durée de vie calendaire très faible et un nombre de cycles d'utilisation limité. L'avantage principal de la structure en spinelle est l'insertion plus facile des ions lithium qui autorise des courants de charge et décharge plus élevés (« performance »). Les caractéristiques de la technologie LMO sont résumées sur le diagramme araignée de la Figure I-8 (b).

La technologie NMC possède une électrode positive en oxyde de nickel, manganèse et cobalt dont les proportions de chaque élément peuvent varier en fonction des caractéristiques souhaitées de la cellule. C'est l'une des technologies les plus utilisées avec le NCA présenté ci-après. Des compromis sont fait dans les pourcentages de chaque élément pour garantir au mieux les objectifs de densité massique et volumique, de sécurité, de coût, de durée de vie calendaire et de nombre de cycles à réaliser. Cette technologie bénéficie d'une maturité grandissante propulsée par l'utilisation en masse sur le marché des appareils mobiles. Les caractéristiques de la technologie NMC sont résumées sur le diagramme araignée de la Figure I-8 (c).

La technologie NCA est équivalente à la technologie NMC, où le composant aluminium vient prendre la place du manganèse à l'électrode positive. Le compromis choisi dans la proportion de ces trois éléments chimiques apporte également des performances variables en fonction des pourcentages choisis. L'oxyde de nickel, cobalt et aluminium est très réactif et permet d'obtenir de meilleures performances en terme de densité d'énergie (massique et volumique) et une durée de vie calendaire plus importante, au détriment d'une sécurité légèrement inférieure et une durée de vie en cyclage un peu plus faible sur un DOD de 100%,



comparativement à la technologie NMC. Les caractéristiques de la technologie NCA sont résumées sur le diagramme araignée de la Figure I-8 (d)

La technologie LFP a une électrode positive en phosphate de fer, qui est un matériau très stable et apporte de fait une très bonne sécurité à l'utilisation. Ses performances sont un peu plus faibles que les oxydes NMC ou NCA mais conserve un nombre de cycles d'utilisation très bon. Contrairement aux autres technologies, la technologie LFP admet un plateau de tension à 3,3V lors de son utilisation sur la plage de 10 à 90% de SOC, ce qui facilite la gestion de l'énergie par l'électronique de puissance. Cette technologie devrait être moins cher que les NMC et NCA mais a des coûts équivalents du fait de volumes de production plus faibles. Les caractéristiques de la technologie LFP sont résumées sur le diagramme araignée de la Figure I-8 (e).

La technologie LTO est quant à elle une des rares technologies Li-ion à ne pas utiliser une électrode négative en carbone mais en titanate, très souvent associée avec une électrode positive en phosphate de fer (LFP). Le titanate permet l'insertion des ions lithium de manière beaucoup plus rapide et autorise des courants de charge bien plus élevés, environs quatre à dix fois supérieurs par rapport aux électrodes en carbone. La stabilité du titanate permet également l'utilisation de l'accumulateur sur une plus grande plage de température, de -30°C à $+50^{\circ}\text{C}$ contre une plage de 0°C à $+40^{\circ}\text{C}$ pour une électrode négative en carbone. Cependant, à composition chimique identique de l'électrode positive, le LTO a une densité d'énergie divisé de moitié. De plus, la technologie LTO est bien plus couteuse. Elle peut convenir pour des applications, bus ou maritime mais moins pour les véhicules légers. Les caractéristiques de la technologie LTO sont résumées sur le diagramme araignée de la Figure I-8 (f).

De nouvelles technologies de batteries sont actuellement en cours de développement : batteries au Lithium-Soufre, au Sodium ou Lithium-Air et ont des caractéristiques qui semblent prometteuses. Des technologies à électrolyte solide sont également à l'étude et se révèlent très prometteuse : tant par l'aspect sécurité dont les composants solides seraient bien plus stables que par la densité d'énergie bien plus élevée en théorie. Cependant, il apparait que ces technologies nécessitent encore un temps considérable de développement avant d'être utilisables. Les différentes technologies d'accumulateur sont représentées suivant leurs énergie et puissance spécifiques dans la Figure I-7. Les technologies détaillées ci-dessus sont résumées dans les diagrammes araignées de la Figure I-8. Pour l'échelle de coût, une valeur haute correspond à un coût intéressant. Ainsi pour toutes les caractéristiques exprimées, une haute valeur est en faveur de la technologie. La technologie qui a la plus grande surface est donc la plus intéressante.

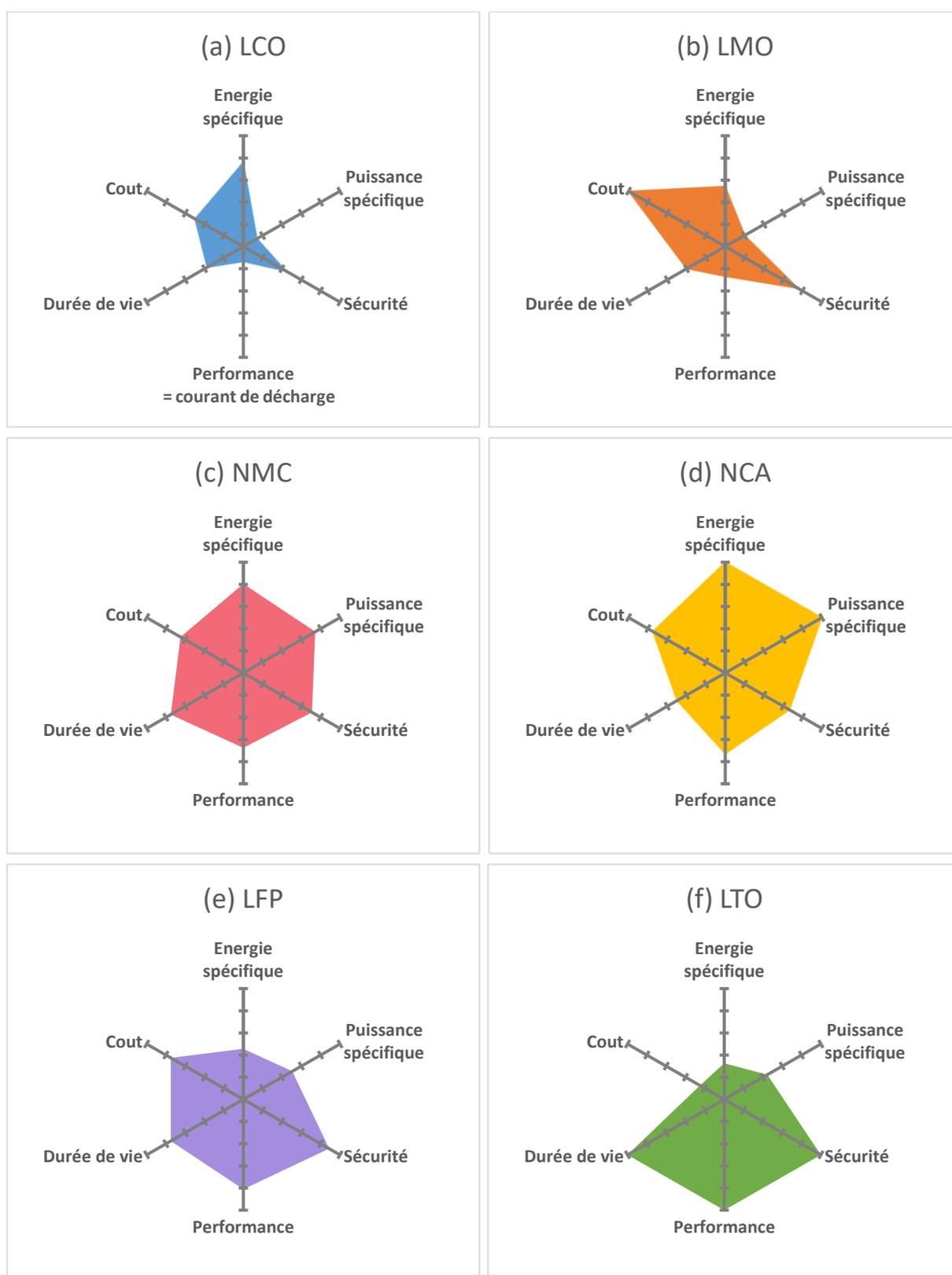


Figure I-8 : diagrammes araignée des principales technologies Li-ion



Les cellules de batterie Lithium-ion sont usuellement classées selon 3 types (Figure I-7) :

- Les cellules haute énergie (HE), qui sont caractérisées par des densités d'énergie élevées mais des courants de charge et décharge plus faibles (environ 1C).
- Les cellules haute puissance (HP), qui sont caractérisées par des densité d'énergie plus faibles que les cellules HE mais avec de forts courants admissibles de charge et décharge.
- Enfin les cellules très haute densité de puissance (UHP), qui sont quant à elles des cellules avec des faibles densités d'énergie, de très forts courants admissibles en charge et décharge, mais qui ont une durée de vie bien plus faible que les HE et HP.

Les cellules sont assemblées par modules, en série d'une part, afin d'obtenir la tension nominale souhaitée, et en parallèle d'autre part pour obtenir l'énergie et le courant nominal admissible. L'ensemble des modules forment la batterie finale. Dans le domaine des batteries de tractions pour véhicule électrique, les cellules utilisées sont usuellement les cellules de type HE ou HP afin d'avoir une densité d'énergie et une durée de vie convenable.

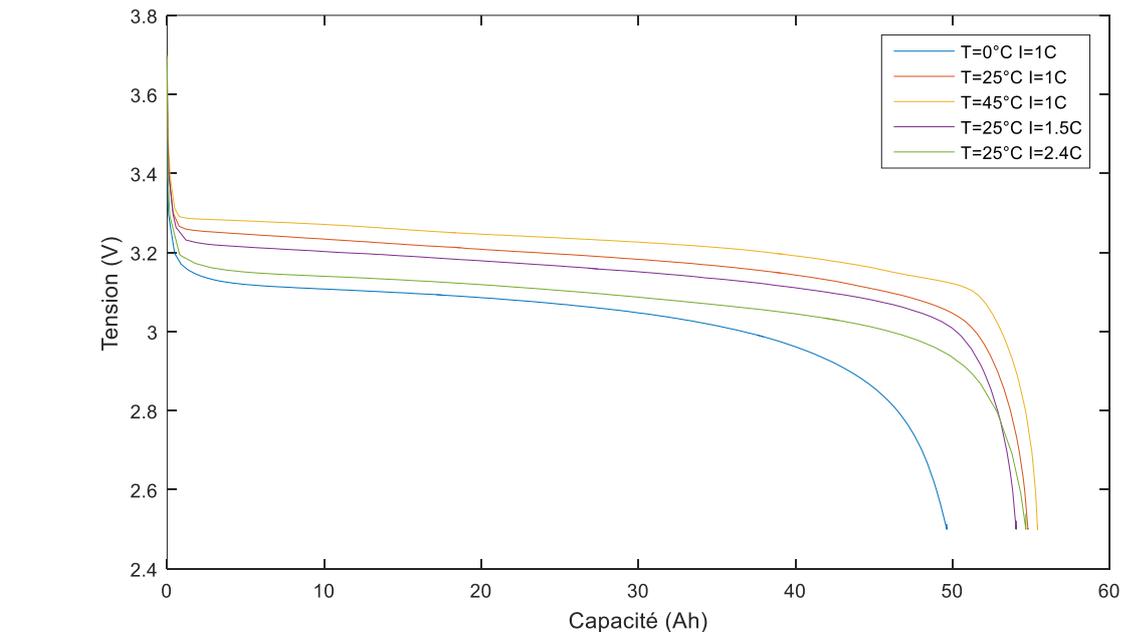
La sureté d'une batterie, relative à la technologie utilisée, est cependant à moduler. En effet, la sureté de la batterie réside d'une part dans la stabilité de la technologie et donc des composés chimiques qui entre en jeu, mais également et surtout, dans l'architecture, la gestion et la surveillance de chaque cellule au sein du pack batterie.

Pour des raisons partenariales, politiques et techniques, le choix de la technologie des batteries utilisées dans le véhicule étudié est de type LFP/LiC. Ce choix est essentiellement fait pour des raisons de stabilité de la technologie, de coût et d'expertise du fournisseur dans cette technologie. La batterie, destinée à une utilisation professionnelle doit être la plus sûre possible. La technologie LTO, certes plus sûre encore, ne permettait pas l'intégration au sein du véhicule en terme de masse et volume et représentait un coût trop important pour tenir les objectifs du cahier des charges. Les caractéristiques de la cellule utilisée dans les batteries sont résumées dans le Tableau I-5 (détail en Annexe A - 4).

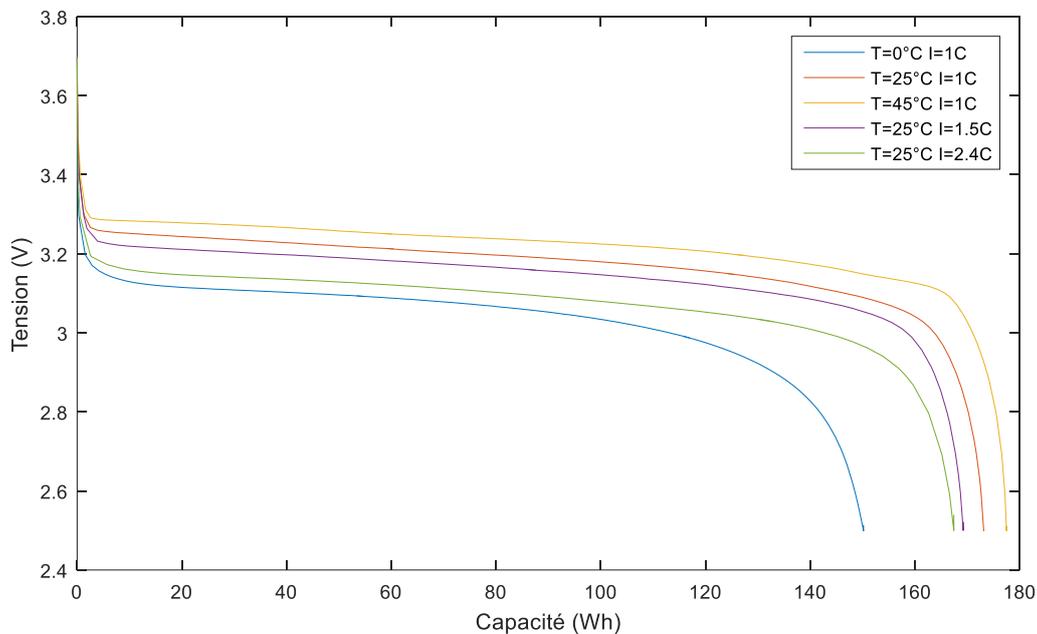
Tableau I-5 : Caractéristiques principales de la cellule électrochimique étudiée

Tension nominale	3.2 V
Capacité nominale	50 Ah
Masse	1400 g
Volume	0.718 L
Courant de charge maximum	3 C
Température de charge	0 ↔ 45°C
Température de décharge	-20 ↔ 55°C
Température de stockage	-10 ↔ 35°C

Les courbes de décharges Figure I-9 sont représentées de manière conventionnelle, à l'identique même que dans la documentation technique, en fonction de la capacité en ampèreheure sur la partie (a). Cependant sur la partie (b) de la Figure I-9, la représentation est effectuée en fonction de la capacité en wattheure ce qui permet de prendre en considération la chute de la courbe de tension. Ce qui ressort d'ores et déjà des caractéristiques est la perte de capacité avec les basses températures, 13% de perte d'énergie restituée entre 25°C et 0°C, mais également avec le taux de courant, 3.3% de perte d'énergie restituée entre 1C et 2.4C.



(a)



(b)

Figure I-9 : Courbes de en décharge de la cellule de batterie sous différentes températures et différents courants



I - 4. Conclusion du Chapitre I

Dans ce chapitre le sujet d'étude et la problématique de la thèse ont été présentés. Cette thèse s'insère dans le cadre du projet VUE-Flex financé par BPI-France. Ce projet avait pour objectif le développement d'un véhicule utilitaire électrique avec une architecture flexible, notamment en terme de capacité de batterie, afin que le véhicule puisse être adapté au mieux pour le client dans son utilisation spécifique.

Le contexte écologique actuel incite les scientifiques et industriels à trouver des solutions propres pour se déplacer. Les nouvelles normes toujours plus contraignantes pour les constructeurs incitent également au développement de véhicules électriques. La problématique du véhicule électrique est, bien sûr, son coût d'achat élevé, principalement dû aux batteries. Les batteries ont une durée de vie limitée en comparaison à un réservoir à carburant et doivent être utilisées de manière optimale pour assurer un coût de revient global compétitif. L'étude présentée porte sur un véhicule utilitaire dans un contexte d'utilisation professionnel. Cela a pour conséquence un besoin clairement défini avec un usage régulier et prédictible. Sur cette base, plusieurs missions ont été sélectionnées pour servir de cas d'étude. Le véhicule utilitaire et électrique a des performances équivalentes aux véhicules thermiques de ce même segment ce qui permettra d'effectuer des études comparatives sur le TCO. La technologie de batterie étudiée est la technologie au lithium phosphate de fer (LFP). Elle a été choisie par l'industriel essentiellement pour son bon rapport entre sa densité énergétique et son prix, tout cela sans aucun compromis sur la sécurité : la cellule LFP est une des technologies les plus stables et sûres à l'heure actuelle. Un modèle adapté spécifiquement à la cellule choisie est nécessaire pour connaître précisément le comportement de celle-ci. Dans la suite de ce mémoire, la modélisation du véhicule et de ses composants, dont la batterie, va être détaillée.



Chapitre II. MODELES MULTI-PHYSIQUES DU VEHICULE UTILITAIRE ET DE SON SYSTEME DE STOCKAGE

II - 1.	INTRODUCTION DU CHAPITRE II	51
II - 2.	MODELE DU VEHICULE : DYNAMIQUE	53
II - 2.1	Identification des paramètres du modèle dynamique	55
II - 2.2	Calcul de l'énergie consommée sur les parcours types	57
II - 2.3	Calcul des taux de courant	59
II - 3.	MODELISATION MULTI-PHYSIQUE DE LA CELLULE DE BATETRIE	61
II - 3.1	Caractérisation de la cellule à réception	63
II - 3.2	Modèle électrique	65
II - 3.2.1	Caractérisation des performances électriques	65
II - 3.2.1	Identification des paramètres du modèle électrique	67
II - 3.3	Modèle thermique	70
II - 3.3.1	Caractérisation des performances des cellules	70
II - 3.3.2	Identification des paramètres du modèle thermique	74
II - 3.4	Modèle de vieillissement	76
II - 3.4.1	Modélisation du vieillissement calendaire	77
II - 3.4.2	Vieillissement en cyclage	83
II - 4.	CONCLUSION DU CHAPITRE II	93



II - 1. Introduction du Chapitre II

La modélisation a pour objectif de prédire le comportement du système étudié. Le but est de caractériser le comportement du véhicule utilitaire électrique complet pour optimiser ses composants et son utilisation. Le composant principal du véhicule est la batterie, qui peut représenter à elle seule jusqu'à 40% du coût d'achat du véhicule. Il est donc indispensable de la caractériser en détail afin de s'assurer de son utilisation de manière optimale et la plus rentable possible.

La première étape de la modélisation est celle de la dynamique du véhicule. Cette étape permet de décrire les besoins en énergie du véhicule en fonction du profil de mission à parcourir. Cela permet également de calculer le taux de courant relatif à la capacité qui sera appliqué à la batterie. Ensuite, une campagne de test sur le composant de stockage va permettre de le caractériser pour réaliser un modèle électrique, un modèle thermique, puis un modèle de vieillissement. Ces trois modèles formeront ensemble le modèle multi-physique de la batterie. Pour chacun de ces modèles ; électrique, thermique et vieillissement ; une modélisation va être retenue, puis une identification des paramètres du modèle sera faite afin de faire correspondre la simulation aux mesures expérimentales. Le modèle de vieillissement va se constituer de deux parties : un modèle de vieillissement calendaire et un modèle de vieillissement en cyclage. Les deux natures de vieillissement viennent s'additionner pour former le modèle de vieillissement global. Les différents modèles seront enfin associés ensemble pour représenter le comportement du véhicule complet et en permettre l'étude numérique.



II - 2. Modèle du véhicule : dynamique

La première partie du modèle à être réalisée est le modèle de dynamique du véhicule. Cette modélisation numérique représente l'ensemble des besoins en énergie du véhicule pour permettre ses mouvements.

Le modèle exploite tout d'abord le principe fondamental de la dynamique où l'accélération et la masse sont des données d'entrées et les efforts liés à la résistance au roulement, à l'aérodynamique et à la pente sont calculés grâce aux caractéristiques du véhicule et du parcours souhaité.

Le principe s'énonce comme suit :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (\text{II-1})$$

\vec{F} : efforts appliqués au VUE

m : masse du VUE

\vec{a} : vecteur accélération du VUE

Quatre forces sont comptabilisées :

- le poids :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g} \quad (\text{II-2})$$

où \vec{g} est la gravité de la terre,

- la force aérodynamique (selon l'axe \vec{x}) :

$$\vec{F}_{aéro} = -\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 \vec{x} \quad (\text{II-3})$$

où ρ est la masse volumique de l'air, S le maître couple ou la section transversale maximale du véhicule, c_x le coefficient de traînée longitudinal et v la vitesse du véhicule,

- la résistance au roulement :

$$\vec{F}_{res} = -(c_0 + c_1 \cdot v^2) \cdot (\vec{P} \cdot \vec{y}) \vec{x} \quad (\text{II-4})$$

où c_0 Coefficient de résistance au roulement et c_1 le coefficient de résistance au roulement en courbe,

- la force de traction :

$$\vec{F}_{mot} = \frac{C_{roue}}{R_{roue}} \vec{x} \quad (\text{II-5})$$

où C_{roue} est le couple exercé par la chaîne de traction sur la roue et R_{roue} est le rayon d'une roue.



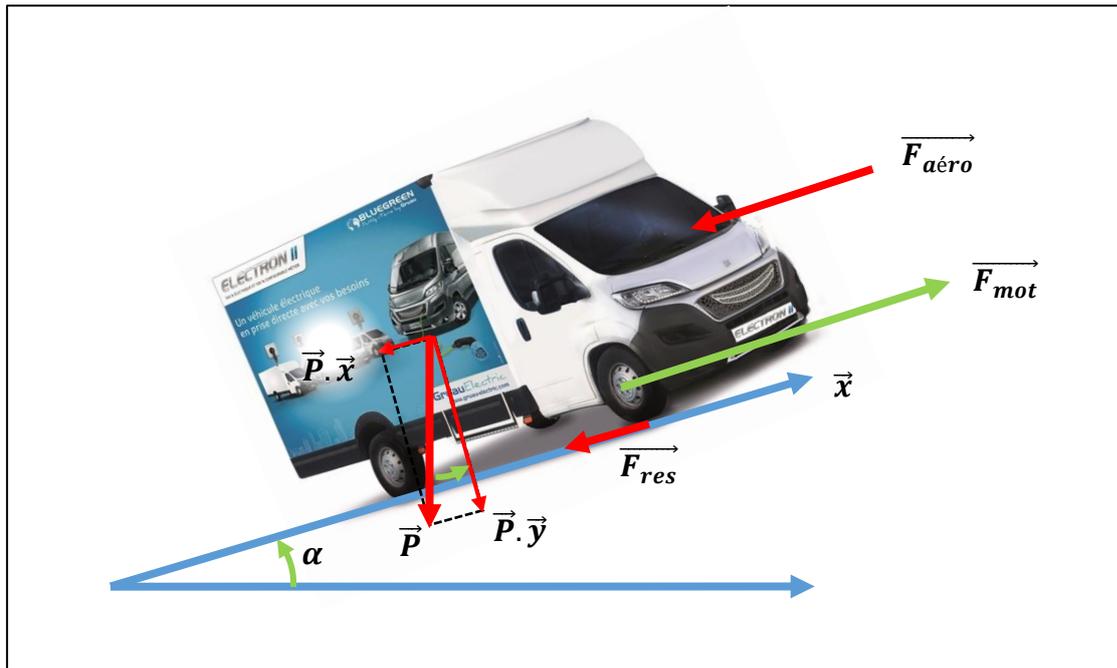


Figure II-1 : Efforts appliqués au véhicule

Les différents efforts qui entrent en considération dans le modèle sont représentés sur la Figure II-1. Les équations précédentes sont projetées suivant l'axe longitudinal, l'axe appelé \vec{x} du véhicule, qui est l'axe de déplacement du VUE, afin d'obtenir la résultante liée à la traction et donc à l'énergie dépensée. Les efforts selon l'axe transversal et l'axe perpendiculaire au sol, liés principalement à la tenue de route et au confort, ne sont pas pris en compte dans cette étude. Les efforts ainsi décrits dans les équation (II-2) à (II-5) sont modélisés sous Matlab/Simulink® sous forme de schéma-blocs représentés respectivement par les équations (II-6) à (II-9) :

$$\vec{P} \cdot \vec{x} = m \cdot g \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{\text{pente}}{100}\right)\right) \quad (\text{II-6})$$

$$\vec{F}_{aéro} \cdot \vec{x} = -\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 \quad (\text{II-7})$$

$$\vec{F}_{res} \cdot \vec{x} = -(c_0 + c_1 \cdot v^2) \cdot m \cdot g \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{\text{pente}}{100}\right)\right) \quad (\text{II-8})$$

$$\vec{F}_{mot} \cdot \vec{x} = \frac{C_{roue}}{R_{roue}} \quad (\text{II-9})$$

La pente est exprimée en pourcentage sur le parcours. Une pente de cent pourcent correspond à une pente où le parcours équivalant à 100m sur route horizontale élève l'altitude de 100m, soit une route faisant un angle de 45° avec l'horizontale. Ainsi le passage de la pente en pourcent à l'angle α entre la route et l'horizontale est obtenue par la fonction trigonométrique *arctangente*.

II - 2.1 Identification des paramètres du modèle dynamique

Pour des profils de vitesse et de pente donnés (Figure I-5), l'équation du principe fondamental de la dynamique (II-2), projeté selon l'axe \vec{x} , nous donne comme résultat le couple à la roue nécessaire. A partir de ce couple, il est ensuite possible de déduire les puissances nécessaires à la réalisation du parcours choisi et, par suite, l'énergie consommée par la chaîne de traction électrique du véhicule en tenant compte des rendements des composants de la chaîne de traction (réducteur, moteur et onduleur), du rayon de la roue R_{roue} et du rapport de réduction du réducteur R_{Red} . La Figure II-2 Schématise le calcul effectué à partir des profils de vitesse et de pente pour déterminer la puissance et l'énergie consommées par le convertisseur. Actuellement, le rendement du réducteur est donné par une valeur fixe mais des travaux futurs prévoient la caractérisation de ce composant en fonction du couple de la vitesse et de la température $T_{réducteur}$ (représenté en trait pointillé dans la Figure II-2). De même le rendement de l'ensemble moteur et onduleur a été calculé pour différents régimes et charges, mais les données en fonction de la température T_{moteur} ne sont pas encore connues (elles seront intégrées dès la transmission de l'information par le fabriquant). Enfin le courant dans la batterie peut également être estimé à l'aide d'une estimation des puissances des consommateurs accessoires $P_{accessoires}$ et de la tension de la batterie U_{batt}

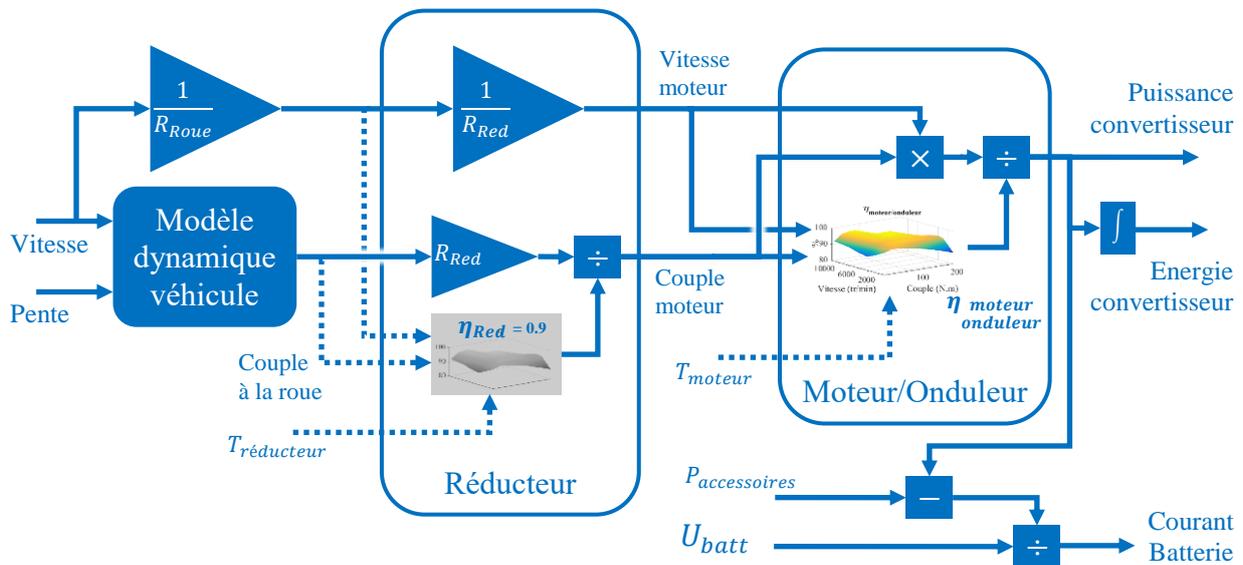


Figure II-2 : Schéma de principe du calcul de puissance, d'énergie et de courant dans le véhicule

Afin de vérifier les paramètres choisis pour le modèle de dynamique du véhicule, une comparaison entre les données mesurées sur un véhicule réel et les données du résultat de simulation correspondant ont été comparées. La Figure II-3 représente les courbes de comparaisons d'un roulage. Il est possible d'observer quelques différences car les lois de commandes d'utilisations des accessoires ne sont pas implémentées ainsi que les cartographies



de rendement des éléments de la chaîne de traction. Les résultats de puissance et de consommation en énergie restent cependant très similaires avec une consommation d'énergie estimée à 38,8 kWh pour une consommation d'énergie réelle de 39,2 kWh sur une distance parcourue de 91km.

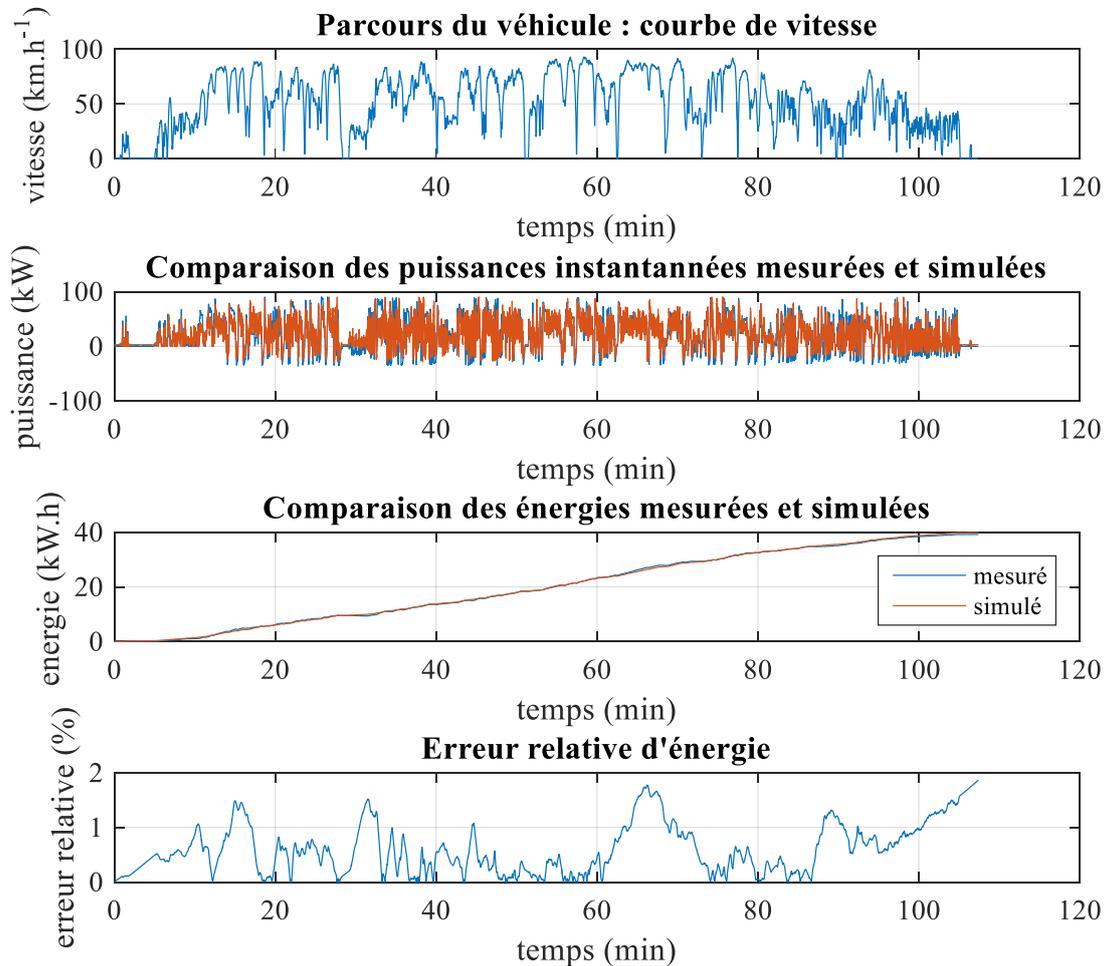


Figure II-3 : Vérification des paramètres du modèle de la dynamique du véhicule

A l'issu de ce paramétrage, les valeurs retenues (exprimées dans le Tableau II-1) sont enregistrées pour être utilisées dans les modèles. La masse et la surface sont connues mais les coefficients C_x et C_r ont été déterminés afin de minimiser l'écart entre l'énergie mesurée et simulée. L'écart relatif entre l'énergie mesurée et simulée est inférieur à 2% (Figure II-3).

Tableau II-1 : Caractéristiques recalées du véhicule utilitaire

Paramètres	Symbole	Valeur nominale	Unité
Masse	m	3900	kg
Surface	S	6,5	m^2
Coefficient de résistance à l'air	C_x	3,5	—
Coefficient de résistance au roulement	C_r	0,015	—

II - 2.2 Calcul de l'énergie consommée sur les parcours types

La Figure II-4 est un exemple, pour la mission mixte, de résultat de simulation de la puissance consommée par la chaîne de traction électrique. Le deuxième graphique de la Figure II-5, est un exemple de l'énergie consommée correspondante.

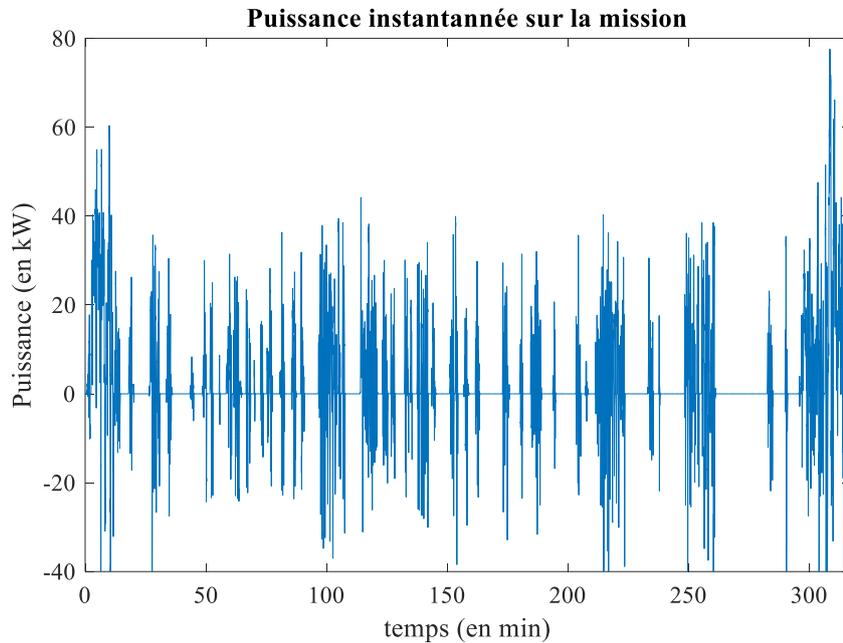


Figure II-4 : Puissance instantanée du parcours mixte en fonction du temps

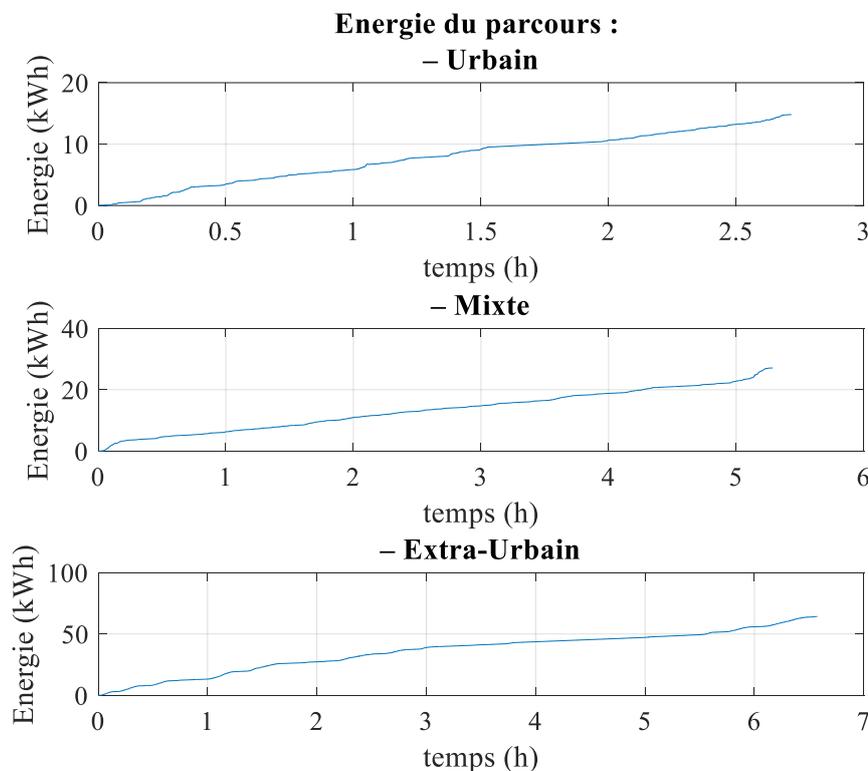


Figure II-5 : Energie consommée sur les parcours retenus en fonction du temps



L'évolution de la puissance du parcours mixte va être analysée dans la sous-partie suivante pour déterminer les essais à effectuer sur la batterie et la solliciter conformément à ce qu'elle subirait en conditions réelles.

Les relevés de parcours urbain et extra-urbain ont été également traités avec le modèle de la dynamique du véhicule pour en estimer la puissance et l'énergie consommée théoriquement par le véhicule utilitaire électrique. Les simulations révèlent des consommations de l'ordre de 15 kWh pour 42 km sur le parcours urbain (premier graphique de la Figure II-5), 27 kWh pour 68 km sur le parcours mixte (deuxième graphique de la Figure II-5) et 68 kWh pour 144 km sur le parcours extra-urbain (troisième graphique de la Figure II-5).

La consommation d'énergie du parcours extra-urbain, qui correspond à une mission de livraison en zone rurale, peut paraître élevée et difficilement réalisable avec la quantité maximale d'énergie qu'il est possible d'embarquer (58 kWh). Cependant, nous pouvons observer sur ce parcours type que des périodes de plus de trente minutes du véhicule à l'arrêt sont présentes. Dans les résultats du modèle, les portions de courbe linéaires représentent les périodes d'arrêts du véhicule (Figure II-5). La pente est induite par la consommation des accessoires type climatisation, chauffage et feux du VUE. Dans la pratique, lors d'une période longue d'arrêt du véhicule, le chauffeur éteindra le moteur du véhicule et coupera ainsi les accessoires. De plus, si la localisation géographique et les infrastructures environnantes le lui permettent, il mettra en charge la batterie. De ce fait le choix d'une batterie de capacité 58 kWh semble pouvoir satisfaire, sachant qu'une batterie de capacité supérieure poserait des problèmes d'encombrement et de masse dans le véhicule utilitaire électrique.

Les parcours urbain et mixte, qui sont des missions en zone urbaine, demandent moins d'énergie. Cependant, afin de préserver la batterie, et compte tenu des performances attendues sur le véhicule, il sera utile de spécifier une capacité supérieure au maximum de la consommation d'énergie sur la mission. La valeur de la puissance maximale attendue sur le parcours est également à prendre en compte pour le dimensionnement puisque les cellules ont également un taux de courant maximal, autour de $1C$ pour la recharge. L'ordre de grandeur de capacité minimum de batterie compte tenu de la puissance voulue peut alors être approximée par 1 kWh pour 1 kW . Les performances attendues sur le véhicule sur ce type de parcours imposeraient alors une capacité de batterie autour de 40 kWh .

II - 2.3 Calcul des taux de courant

Dans le but de réaliser des essais sur les cellules de batteries, il a été nécessaire d'identifier quels sont les courants mis en jeu lors de l'utilisation du véhicule utilitaire électrique. L'expression du courant a été définie en terme de taux de courant et pour une tension nominale. Le taux de courant correspond au rapport entre la valeur du courant (calculé comme présenté dans la Figure II-2) et la capacité nominale de la batterie en Ah . Les tests sur les cellules devaient démarrer en début de thèse afin d'avoir suffisamment de temps après ces essais, qui dureront un an, pour les exploiter. Lors de cette phase de calcul des courants de références pour les essais, seul le parcours mixte était disponible. Il a donc servi de référence pour les essais. De plus, à ce stade, le modèle électrique de la batterie n'était pas non plus identifié. Le calcul des taux de courants a été fait à partir du ratio de la puissance sur la capacité nominale de la batterie en kWh . Cela revient effectivement à calculer le taux de courant sous l'hypothèse d'une tension fixe et égale à la tension nominale. La courbe de la Figure II-6 est le résultat du calcul du taux de courant par cette méthode. Le seuil de taux de courant maximal se situe autour de $2.5C$ et est cohérent avec la puissance maximale de la chaîne de traction ($90kW$). En effet, avec la plus petite batterie actuellement proposée ($38.4 kWh$) le taux de courant correspondant serait donc de $2.4C$. C'est donc ce taux qui sera retenu comme valeur typique maximum de taux de courant pour les essais sur la cellule. Le taux de courant minimal sur la mission choisie est de $-0.8C$. Cette valeur est également en accord avec le taux de courant dû à la récupération d'énergie au freinage qui est limité par la chaîne de traction à $-1C$ pour cette capacité de batterie. Tel quel, il est difficile de définir précisément des seuils caractéristiques supplémentaires de courant. Le diagramme de la Figure II-7 indique la répartition de la durée des taux de courant. Seulement une minute sur l'ensemble du parcours est passée à plus de $1.5C$ et 15 minutes à plus de $1C$. Ces résultats sont utilisés pour définir le plan de test pour la caractérisation des cellules en vieillissement dans la partie suivante.

La modélisation de la dynamique du véhicule permet de déterminer les puissances mises en jeu lors de l'utilisation du véhicule et ainsi de déterminer la consommation énergétique sur un parcours. Pour connaître l'impact d'un parcours sur le coût de revient du véhicule ainsi que sur le vieillissement de la batterie, il est nécessaire de modéliser le composant de stockage. Pour modéliser le composant de stockage, des essais sont indispensables et permettent de paramétrer les modèles.



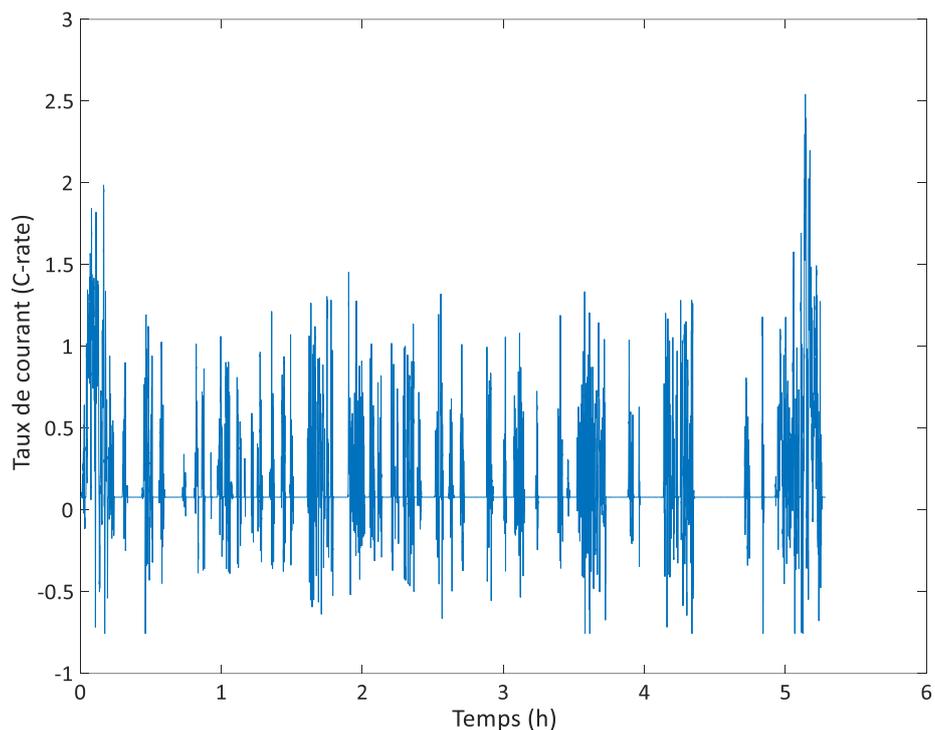


Figure II-6 : Calcul du taux de courant sur le parcours simulé

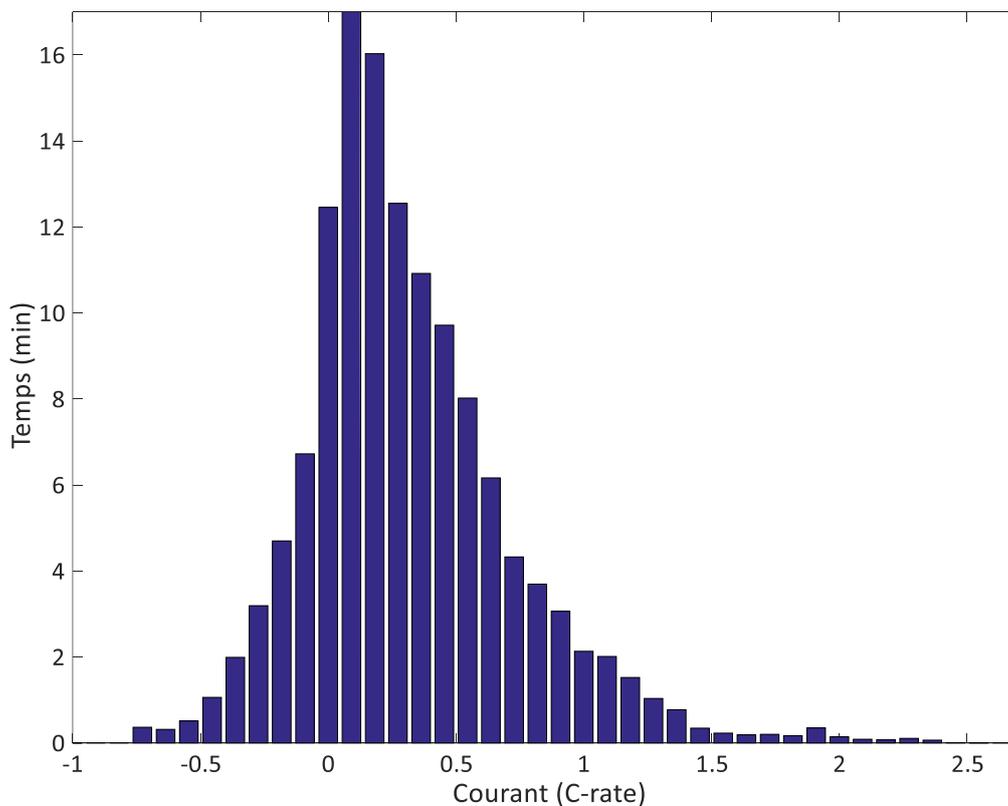


Figure II-7 : Diagramme de répartition de taux de courant

II - 3. Modélisation multi-physique de la cellule de batterie

La modélisation des composants de stockage constitue aussi une partie du modèle complet. Elle est également bien abordée dans la littérature. Il existe de nombreux modèles électriques, thermiques et de vieillissement de différents niveaux de complexité, du plus générique au plus spécifique. De par la multitude des technologies d'accumulateurs, de format, d'énergie et de composition, un modèle spécifique à une application donnée est souvent nécessaire. Dans notre cas, l'objectif est de modéliser une cellule électrochimique de technologie LFP (Lithium Phosphate de Fer : choix de cette technologie pour la sûreté cf. II.3), de type haute énergie, avec un modèle multi-physique, Figure II-8, comprenant la partie thermique, la partie électrique et les parties de vieillissements calendaire et en cyclage. Les travaux de Nicolas Damay traitent de l'étude thermique poussée d'un accumulateur identique à celui de notre cas d'étude [24] via une modélisation par la méthode des éléments finis. Outre cette méthode également utilisée dans d'autres articles [25], différentes approches pour la modélisation thermique des accumulateurs sont possibles telles que les équations aux dérivées partielles [26], les systèmes linéaires à paramètres variant [27] ou les circuits électriques équivalents [28], [29]. Les modèles très complets sont cependant difficiles à mettre en place et à paramétrer dans notre cas d'utilisation puisqu'ils nécessitent de nombreux essais que nous ne pouvons pas réaliser et l'exécution des calculs se révélerait trop longue pour simuler rapidement le comportement sur une durée de vie entière dans l'état actuel. De ce fait, un circuit électrique équivalent est une modélisation mieux adaptée à nos besoins.

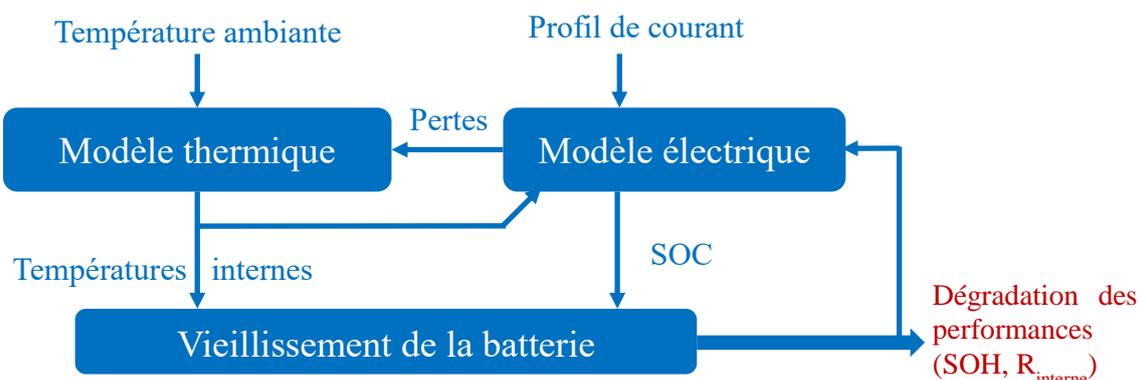


Figure II-8 : Principe de modélisation multi-physique de la batterie

Concernant le modèle électrique, il existe également plusieurs types de modèles représentant les batteries qui sont des composants électrochimiques complexes aux propriétés non linéaires et non stationnaires. Les modèles électriques ont donc différents niveaux de complexité avec différentes approches de modélisation. Une première approche, physico-chimique, est celle qui consiste à utiliser les lois électrochimiques qui entrent en jeu dans la



cellule de batterie. Ce modèle qui caractérise précisément les interactions intracellulaires permet d'obtenir des résultats précis [30] [31] mais demande une connaissance parfaite de la composition de chaque élément de la cellule (électrodes, électrolyte, ...) chimiquement et structurellement. L'approche système est une autre approche, avec cette fois une vision plutôt boîte noire de la cellule. Cette modélisation se base soit sur des résultats expérimentaux exploités dans des tables de correspondance par interpolation voire par extrapolation, soit par assimilation du système à un circuit électrique équivalent dont les paramètres seront déterminés à partir de résultats de tests [32]. L'objectif de la modélisation, souhaité dans notre cas, est de pouvoir réaliser des simulations rapides sur de longues périodes, par conséquent, la modélisation choisie pour la partie électrique de la batterie est un modèle à circuit électrique équivalent.

La littérature regorge également de nombreux travaux sur la modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion. De même, différentes approches de modélisations sont étudiées en fonction des résultats souhaités et de la complexité autorisée. La modélisation électrochimique du vieillissement est la plus complexe à mettre en œuvre et nécessite une forte expertise des mécanismes chimiques susceptibles de se produire lors de l'utilisation de la cellule. D'autres modèles, de types boîtes noires, décrivent l'évolution des caractéristiques de la cellule par des abaques ou des lois de variations des paramètres des modèles et des grandeurs caractéristiques de la cellule (capacité, résistance interne...) en fonction de différentes entrées (température, courant, temps écoulé, DOD ...). Des travaux similaires aux nôtres ont également été menés en parallèle mais sur un autre type de cellule avec technologie NMC et NCA et des capacités plus faibles [33]. L'objectif dans notre cas est d'arriver à obtenir un modèle capable de caractériser le vieillissement des cellules pour tout profil de mission d'entrée possible.

Les essais de caractérisations permettent d'identifier les paramètres et le comportement de la cellule afin de pouvoir ensuite la modéliser. La méthode choisie consiste à effectuer un premier test à réception des cellules afin de vérifier les caractéristiques des cellules en début de campagne d'essais. Ensuite des tests de caractérisations des performances sont effectués pour déterminer les caractéristiques des cellules face aux sollicitations. Enfin les cellules subissent des vieillissements accélérés suivant le protocole et les conditions de tests établis. Les vieillissements accélérés effectués sont de deux natures : vieillissement calendaire et vieillissement en cyclage. Pour chaque vieillissement, les cellules subissent des checkups périodiques dans des conditions identiques afin de caractériser l'évolutions des paramètres.

II - 3.1 Caractérisation de la cellule à réception

Les tests à réception des cellules déterminent le point de références pour les essais qui suivent et permettent de relever les caractéristiques réelles comparées à celles théoriques précisées dans les documents techniques fournis par le fabricant de cellule. Les tests à réception sont réalisés sous une température de 25°C. Le protocole de test à réception est décrit sur la Figure II-9 est une représentation d'un exemple de résultats obtenus (tension et courant) lors de la réalisation d'un de ces tests [34].

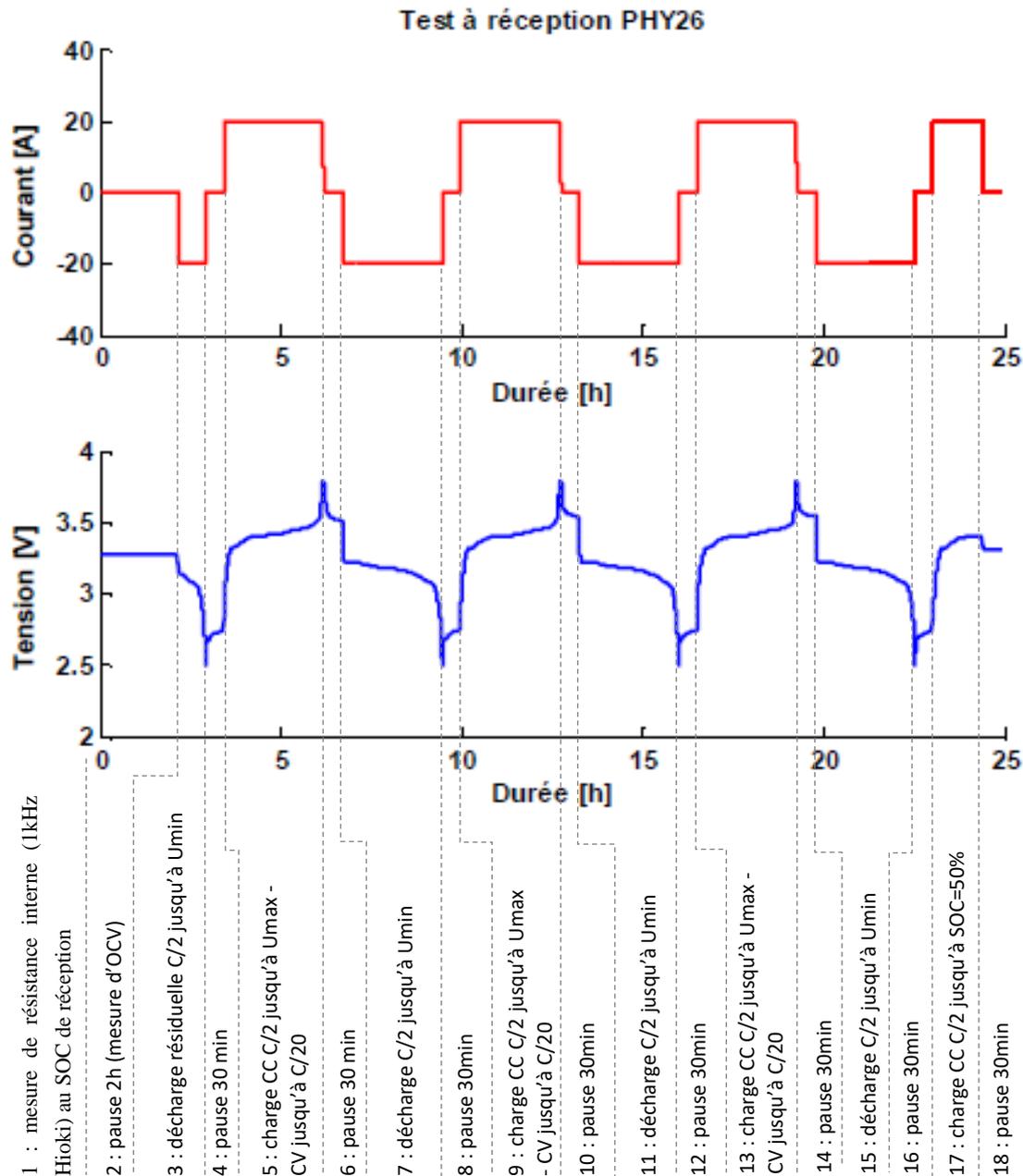


Figure II-9 : Tests à réception à 25°C



Tableau II-2 : résultats des tests à réception des cellules

Ref	SOC à réception (%)	OCV (V)	Capacité résiduelle (Ah)	Energie résiduelle (Wh)	Capacité cycle #1 (Ah)	Énergie cycle #1 (Wh)	Capacité cycle #3 (Ah) à C/2	Energie cycle #3 (Wh) à C/2	Ri à 1kHz à SOC=0,5 (mΩ)
1	27,52	3,28	14,88	47,78	53,99	173,62	54,07	174,06	0,40
2	27,39	3,28	14,86	47,02	54,17	171,66	54,23	171,96	0,38
3	27,16	3,30	14,69	47,36	54,25	174,37	54,29	174,52	0,41
4	26,71	3,30	14,43	46,65	54,31	174,66	54,35	174,79	0,41
5	27,51	3,29	14,96	48,06	54,33	174,69	54,38	174,87	0,41
6	27,32	3,30	14,73	47,90	54,44	175,34	54,47	175,45	0,43
7	27,06	3,28	14,80	46,49	54,66	171,80	54,71	172,09	0,37
8	27,00	3,29	14,78	45,65	54,66	169,08	54,74	170,40	0,43
9	27,21	3,29	14,90	47,84	54,70	175,83	54,76	176,08	0,42
10	27,27	3,29	14,94	48,07	54,72	176,26	54,77	176,47	0,36
11	27,13	3,29	14,90	47,81	54,86	176,21	54,92	176,43	0,39
12	27,04	3,29	14,87	47,71	54,92	176,45	54,99	176,71	0,38
13	26,98	3,30	14,79	47,65	55,01	176,63	55,04	176,76	0,39
14	26,97	3,28	14,86	46,85	55,05	173,70	55,10	173,92	0,42
15	27,04	3,28	14,92	47,92	55,13	177,21	55,17	177,28	0,43
16	26,92	3,28	14,87	47,20	55,19	175,35	55,24	175,55	0,39
17	26,96	3,29	14,90	47,27	55,22	175,32	55,27	175,49	0,38
18	26,73	3,29	14,78	45,80	55,24	171,34	55,30	171,81	0,44
19	26,67	3,29	14,75	45,34	55,22	170,01	55,31	171,70	0,39
20	26,86	3,29	14,86	46,98	55,25	174,92	55,32	175,25	0,39
21	26,79	3,29	14,83	46,89	55,30	175,03	55,36	175,45	0,39
22	26,71	3,28	14,79	46,29	55,30	173,29	55,36	173,57	0,39
23	26,99	3,29	14,95	48,02	55,32	177,92	55,39	178,17	0,38
24	26,96	3,29	14,94	47,97	55,37	177,94	55,43	178,14	0,39
25	26,93	3,29	14,93	47,94	55,35	178,00	55,44	178,44	0,40
26	26,89	3,29	14,92	47,98	55,44	178,44	55,47	178,48	0,42
27	26,55	3,30	14,67	47,29	55,43	178,13	55,48	178,30	0,41
28	26,76	3,28	14,85	46,89	55,44	175,22	55,50	175,55	0,41
29	26,57	3,29	14,75	45,81	55,45	172,43	55,53	173,40	0,44
30	26,88	3,29	14,93	47,91	55,44	178,24	55,54	178,76	0,41
31	26,92	3,28	14,95	48,03	55,50	178,41	55,54	178,57	0,39
32	26,88	3,29	14,94	48,01	55,53	178,60	55,59	178,83	0,41
33	26,79	3,29	14,93	47,92	55,68	178,87	55,74	179,10	0,36

II - 3.2 Modèle électrique

La modélisation électrique de la cellule a été faite à partir de d'un modèle électrique classique comprenant, une source de tension, une résistance interne et un double circuit RC parallèle. Le modèle électrique est basé sur les résultats d'essais des cellules.

Le modèle électrique choisi est basé sur un circuit électrique équivalent (Figure II-10) déjà bien décrit dans la littérature [35] [36] [37], qui est constitué d'une source de tension (U_{OCV}), d'une résistance interne variable (R_{Ω}) qui représente la chute de tension induite par le courant de charge, et deux circuit R/C parallèle en série qui représentent le comportement de l'effet double couche (R_{dl}, C_{dl}) et le comportement de diffusion des ions (R_{dif}, C_{dif}) dans la batterie.

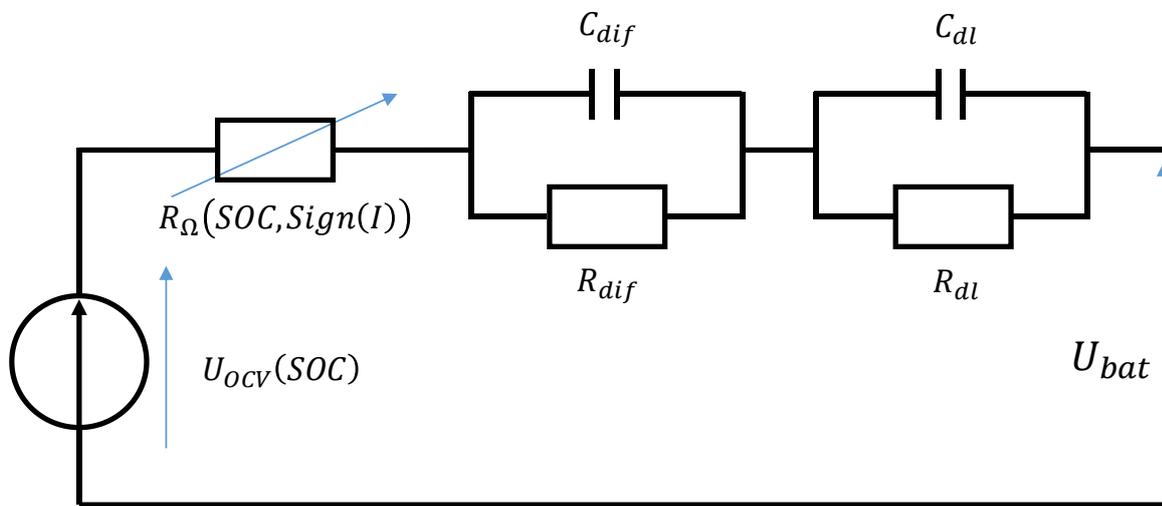


Figure II-10 : Circuit électrique équivalent de la cellule

La source de tension correspond à la tension en circuit ouvert de la cellule électrochimique et dépend du SOC comme décrit dans l'équation (II-10).

$$U_{OCV} = x_1 + x_2 \cdot e^{c_1(1-SOC)} + x_3 \cdot e^{c_2 \cdot SOC} + x_4 \cdot e^{c_3(1-SOC)^2} + x_5 \cdot e^{(c_4 \cdot SOC)^2} + x_6 \cdot e^{c_5(1-SOC)^3} + x_7 \cdot e^{(c_6 \cdot SOC)^3} \quad (II-10)$$

Le comportement de la résistance interne peut être décrit par l'équation (II-11) :

$$R_{\Omega} = \frac{x_8}{\sqrt{SOC(1+c_7 \cdot sign(I))+c_8}} \quad (II-11)$$

II - 3.2.1 Caractérisation des performances électriques

La caractérisation des cellules en performances est effectuée sur des cellules représentatives du lot d'étude et choisies à partir des essais à réception précédents. Ces essais permettent de déterminer les capacités des cellules sous différentes conditions de températures



et de courants. Des impulsions de courant à niveau de SOC et différentes températures permettent d'identifier la résistance interne. Ces essais suivent le protocole décrit dans la Figure II-11 [34].

La Figure II-11 représente la tension et le courant d'une cellule lors de la réalisation d'un essai de caractérisation des performances à 25°C, qui est également réalisé à 0°C et 25°C.

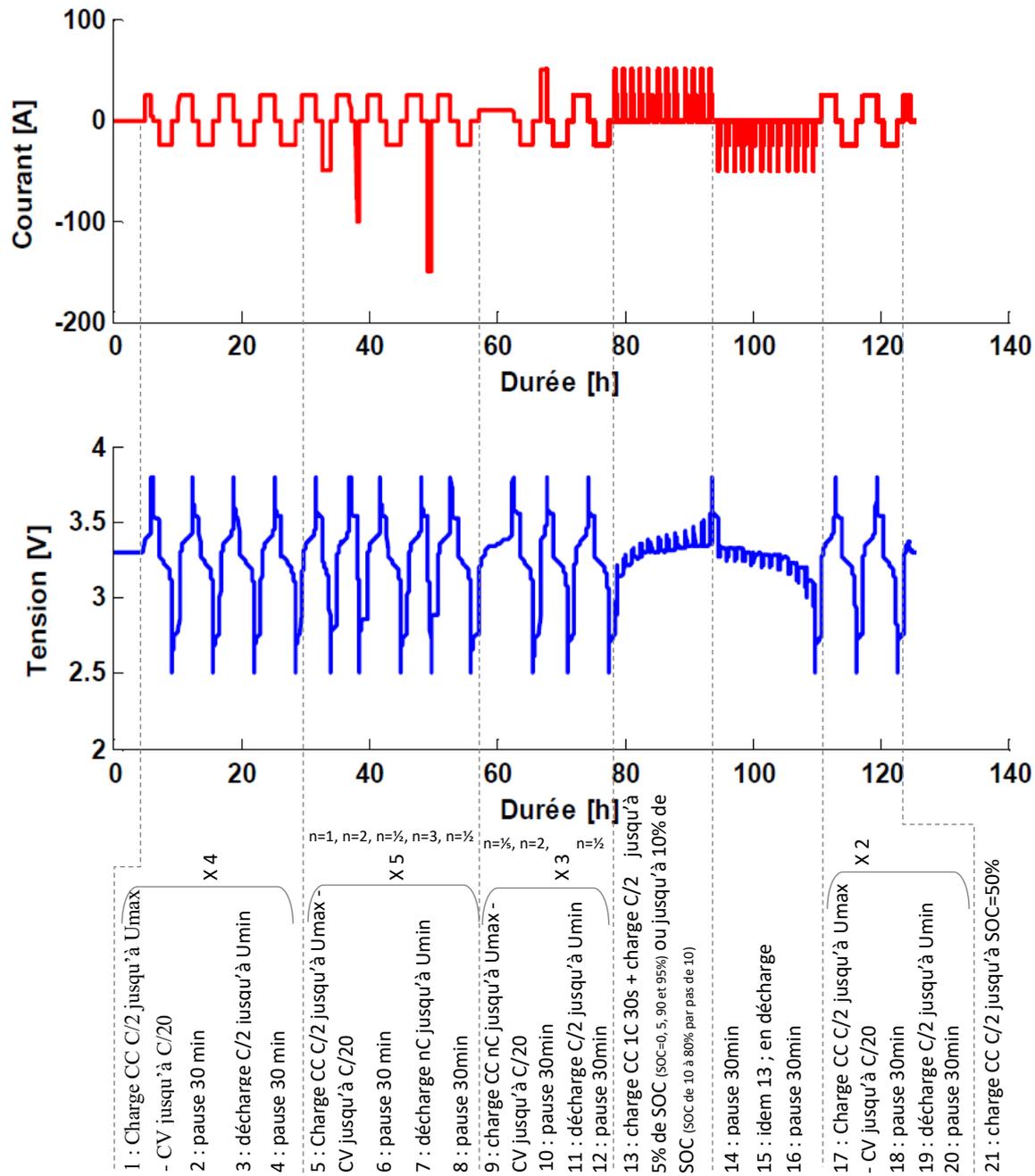


Figure II-11 : Test de caractérisation des performances électriques d'une cellule à 25°C

II - 3.2.1 Identification des paramètres du modèle électrique

Tableau II-3 : Paramètres et coefficients du modèle électrique

Paramètres /coefficients	Valeurs	(Unit)	Paramètres /coefficients	Valeurs	(Unit)
C_{dif}	<i>Confidentiel</i>	(F)	c_7	<i>Confidentiel</i>	(-)
R_{dif}		(mΩ)	c_8		(-)
C_{dl}		(F)	x_1		(-)
R_{dl}		(mΩ)	x_2		(-)
c_1		(-)	x_3		(-)
c_2		(-)	x_4		(-)
c_3		(-)	x_5		(-)
c_4		(-)	x_6		(-)
c_5		(-)	x_7		(-)
c_6		(-)	x_8		(-)

Les paramètres C_{dif} , R_{dif} , C_{dl} et R_{dl} ainsi que les coefficients d'optimisations x_i et c_j sont déterminés avec un algorithme PSO-NM (Particular Swarm Optimization/Nelder-Mead) [38] (A - 3) afin de faire correspondre le résultat numérique au plus proche du résultat expérimental de la tension de la cellule. La Figure II-12 représente la courbe de tension en circuit ouvert (OCV) de la cellule en fonction de l'état de charge. Cette courbe est caractérisée par un « plateau de tension », c'est-à-dire une plage de SOC où la tension reste relativement constante, entre SOC 30% et SOC 80%, et qui est spécifique à la technologie LFP.

La Figure II-13 permet de visualiser l'évolution de la tension au borne de la cellule en fonction du courant appliqué sur la cellule (un courant négatif correspond à une décharge de la cellule). Les paramètres obtenus permettent d'obtenir une bonne simulation de la tension cellule avec une erreur relative ne dépassant pas les 2%. En analysant les zones où l'erreur relative est la plus grande, il apparaît que les différences se situent dans les phases de relaxation de la cellule (après une charge ou une décharge) Figure II-14. Ces phases de relaxation ne sont pas totalement répétables. Il serait donc difficile d'avoir un modèle plus fiable sans prendre en compte la dispersion due aux réactions chimiques qui entrent en jeu au sein de la cellule. Aussi,



compte tenu d'une erreur relative qui reste faible, le modèle ainsi paramétré est retenu pour la suite de l'étude.

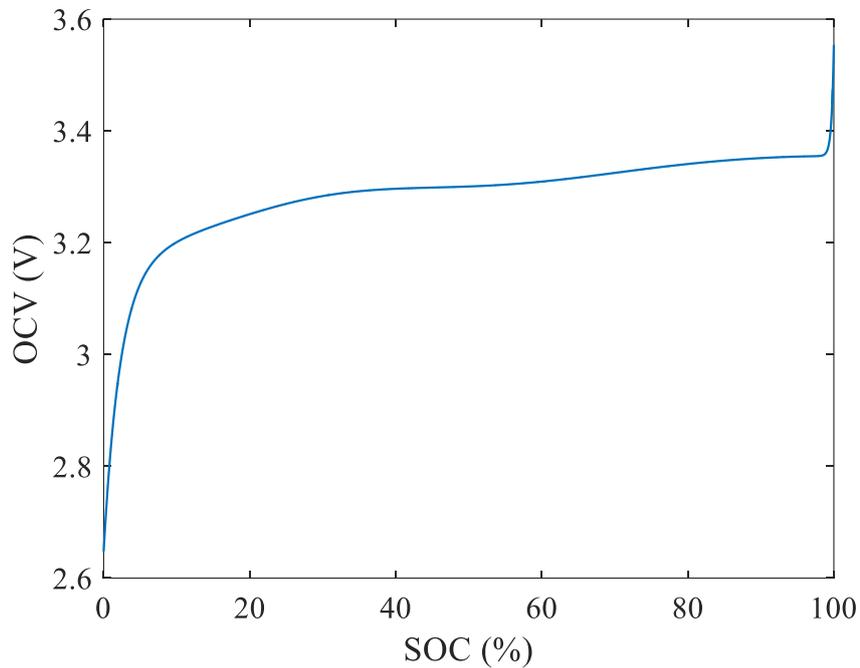


Figure II-12 : Courbe de tension OCV en fonction du SOC

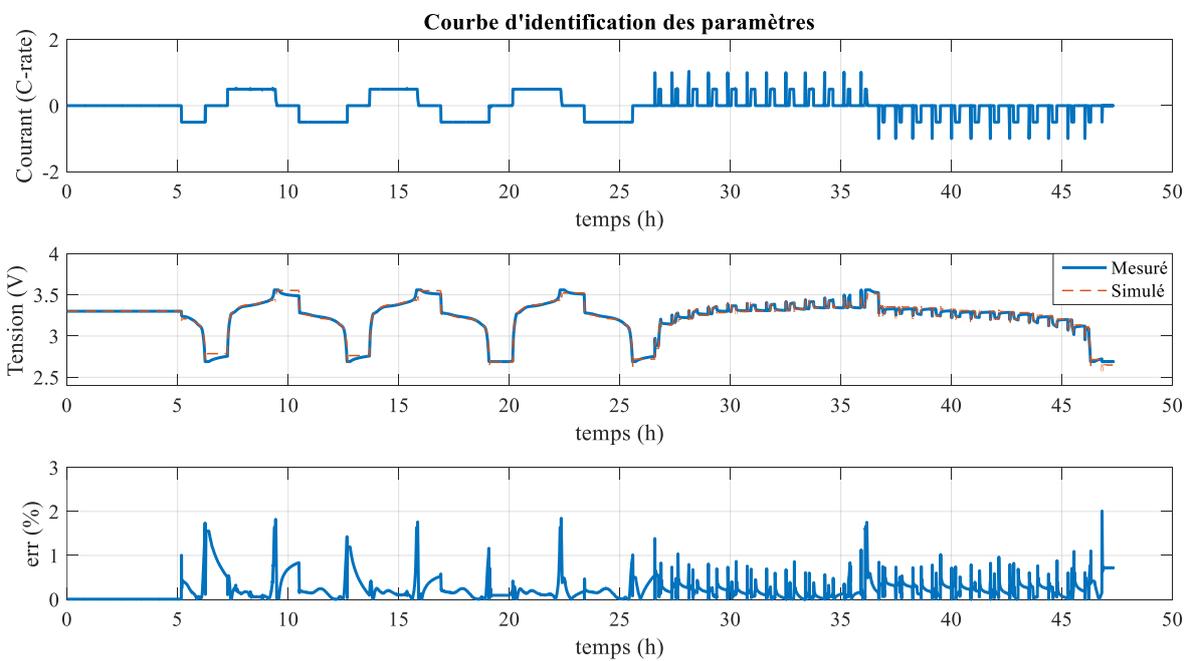


Figure II-13 : Identification des paramètres du modèle électrique

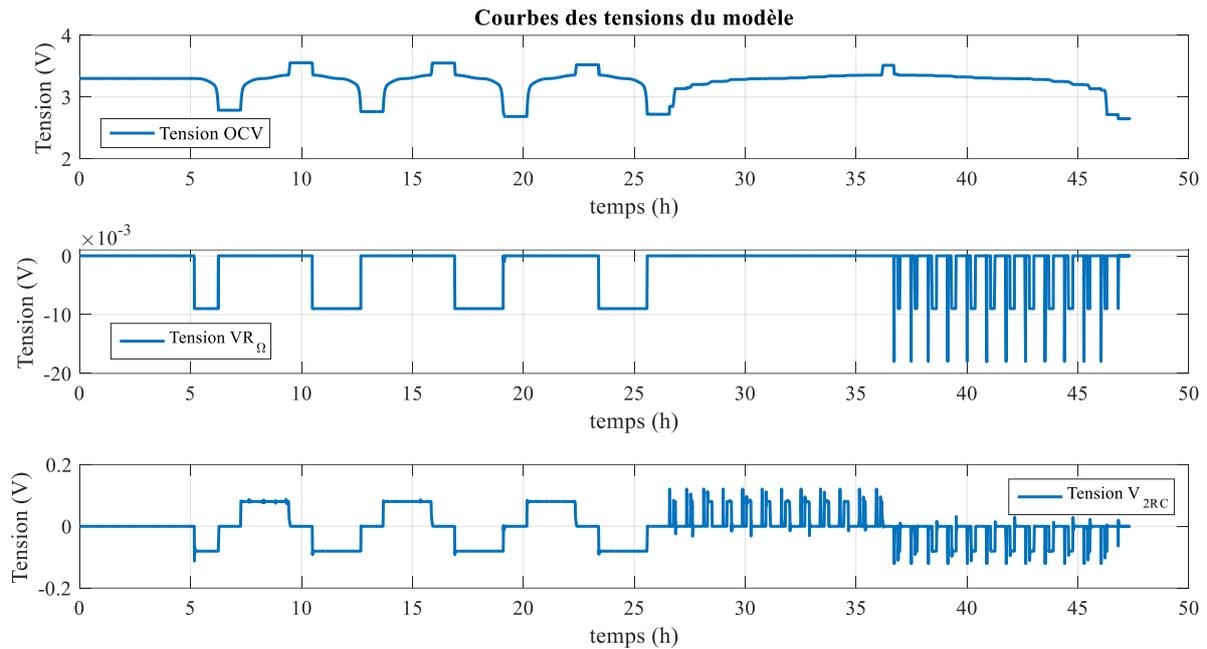


Figure II-14 : Courbes des tension du modèle électrique

Afin de valider la modélisation électrique retenue lors du vieillissement, les simulations de la tension ont été réalisés sur une cellule vieillie avec un SOH de 80% (considéré comme la fin de vie) Figure II-15. L'erreur relative observée reste faible (inférieure à 2%) et nous permet de considérer ce modèle valide lors du vieillissement de la batterie

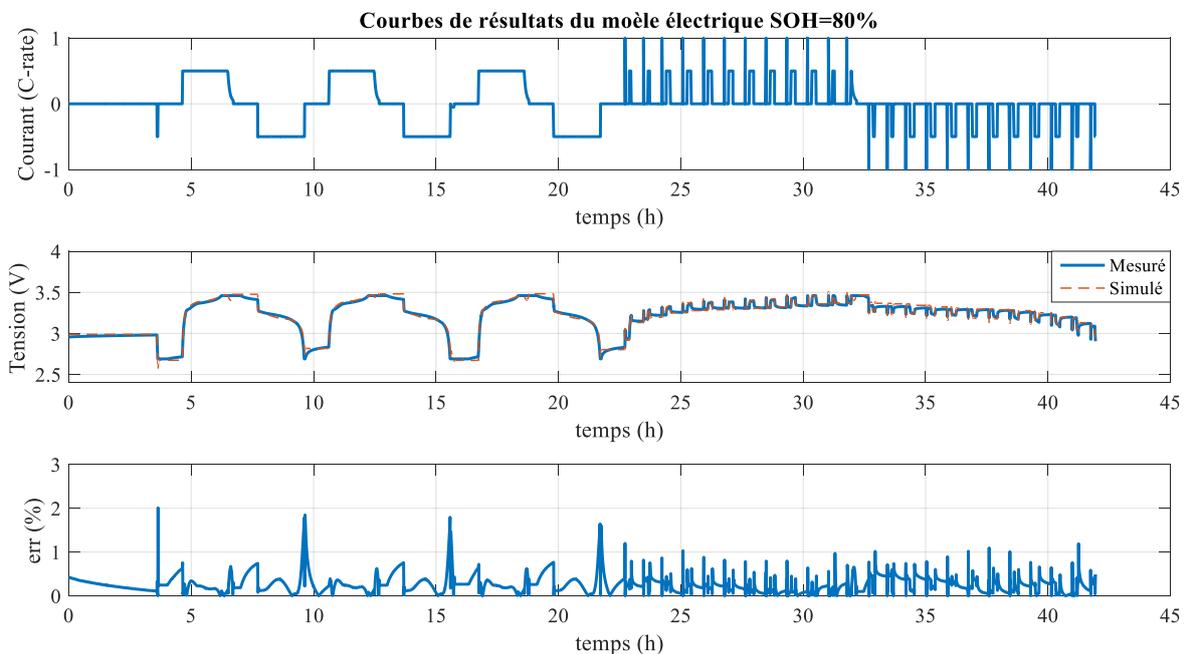


Figure II-15 : Vérification des paramètres du modèle électrique sur une cellule vieillie



II - 3.3 Modèle thermique

Un modèle thermique équivalent vient compléter le modèle électrique pour traduire la dissipation en chaleur des pertes au sein de la batterie (Figure II-16) [12]. La puissance thermique est directement induite des pertes ohmiques de la batterie (II-12). L'équation (II-13) représente le lien entre la résistance thermique et le SOC avec a_1 et a_2 les coefficients d'optimisation. Le modèle thermique est modélisé par un circuit thermique équivalent par analogie au circuit électrique équivalent et est présenté sur la Figure II-16. Ce circuit est composé d'une source de puissance thermique P_{th} , d'une capacité thermique C_{th} qui accumule la chaleur et d'une résistance thermique variable R_{th} qui va limiter le transfert de chaleur vers l'extérieur. La puissance thermique provient des pertes par effet joule dans les résistances ($R_{\Omega}, R_{dl}, R_{dif}$) de la représentation en circuit électrique équivalent Figure II-10. La résistance interne équivalente de la cellule R_{int} est estimée par la chute de potentiel ($U_{OCV} - U$) divisé par le courant I (II-12). La résistance thermique R_{th} est décrite par une fonction polynomiale d'ordre 3 du SOC (II-13) [39], où les coefficients a_1 et a_2 , sont déterminés par identification avec les résultats expérimentaux.

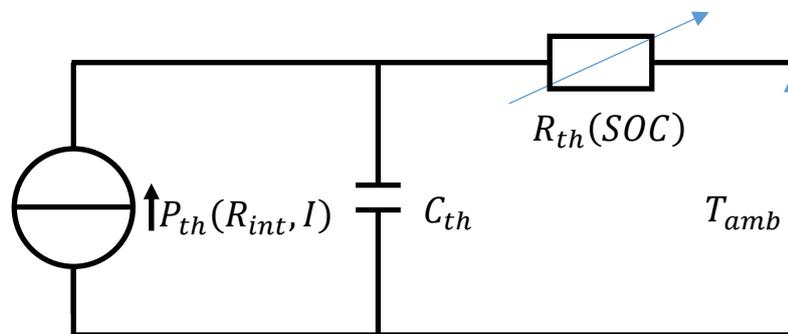


Figure II-16 : Circuit thermique équivalent simplifié d'une cellule de batterie

$$P_{th} = R_{int} I^2 = (U_{OCV} - U).I \quad (II-12)$$

$$R_{th} = a_1 + a_2 \cdot SOC^3 \quad (II-13)$$

II - 3.3.1 Caractérisation des performances des cellules

Les performances des cellules « Suzhou Phylion » ont été testées pour différents régimes de charge et de décharge à différentes températures selon le protocole indiqué dans le Tableau II-9 et le Tableau II-10. La Figure II-17 et la Figure II-18 présentent les résultats obtenus en charge pour les régimes de C/5, C/2 et 1C. La Figure II-19 et la Figure II-20 présentent les résultats obtenus en décharge pour les régimes de C/2, 1C, 2C et 3C.

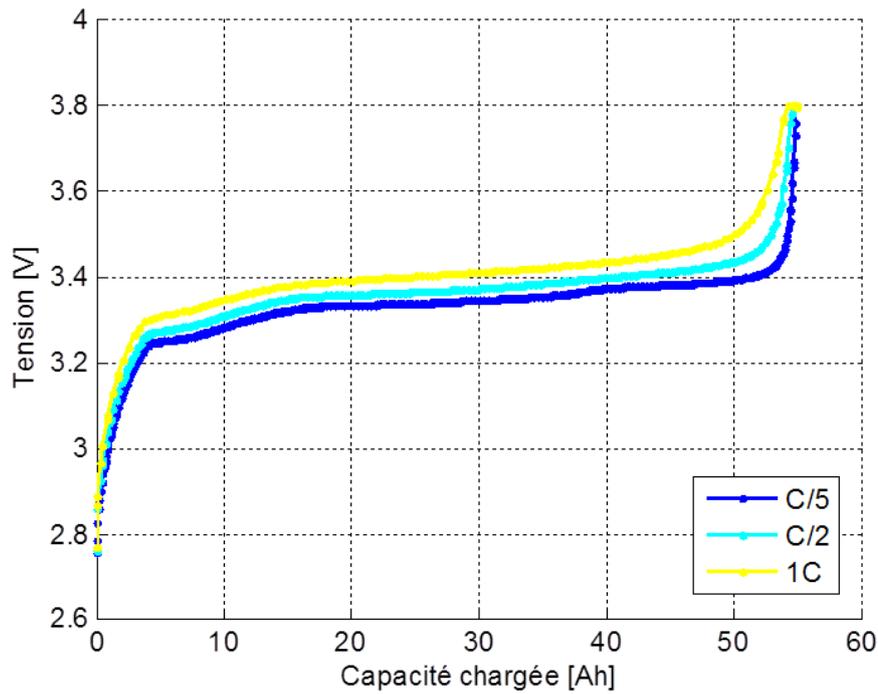


Figure II-17 : Tension de la cellule en charge pour différents régimes de courant en fonction de la capacité chargée

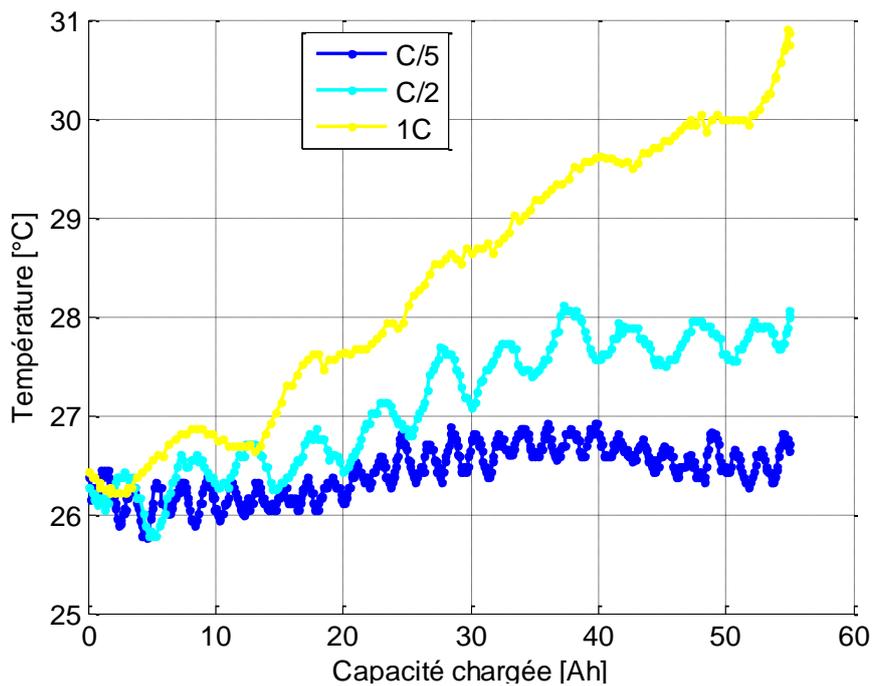


Figure II-18 : Température de la cellule en charge pour différents régimes de courant en fonction de la capacité chargée



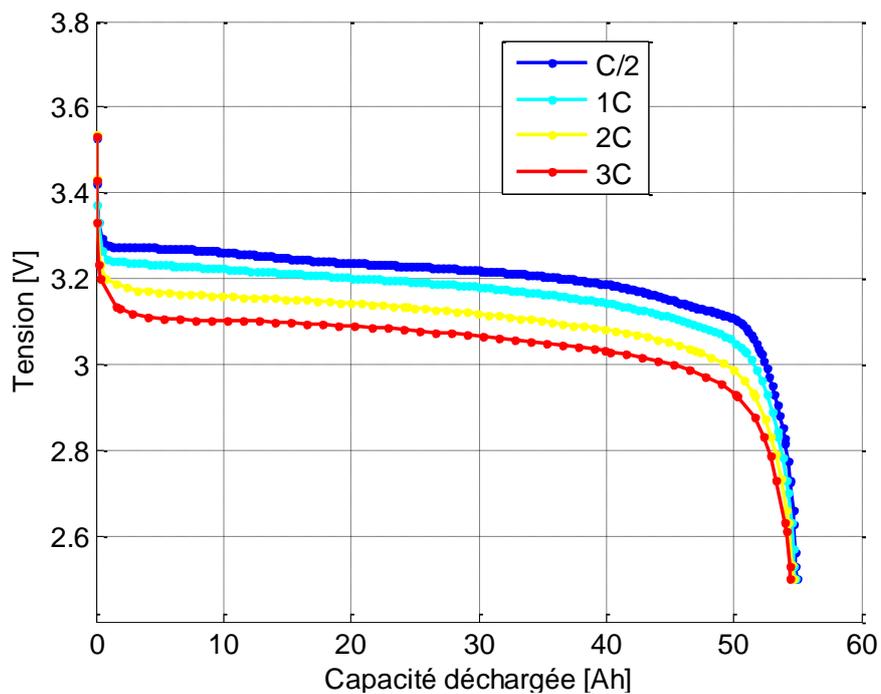


Figure II-19 : Tension de la cellule en décharge pour différents régimes de courant en fonction de la capacité déchargée

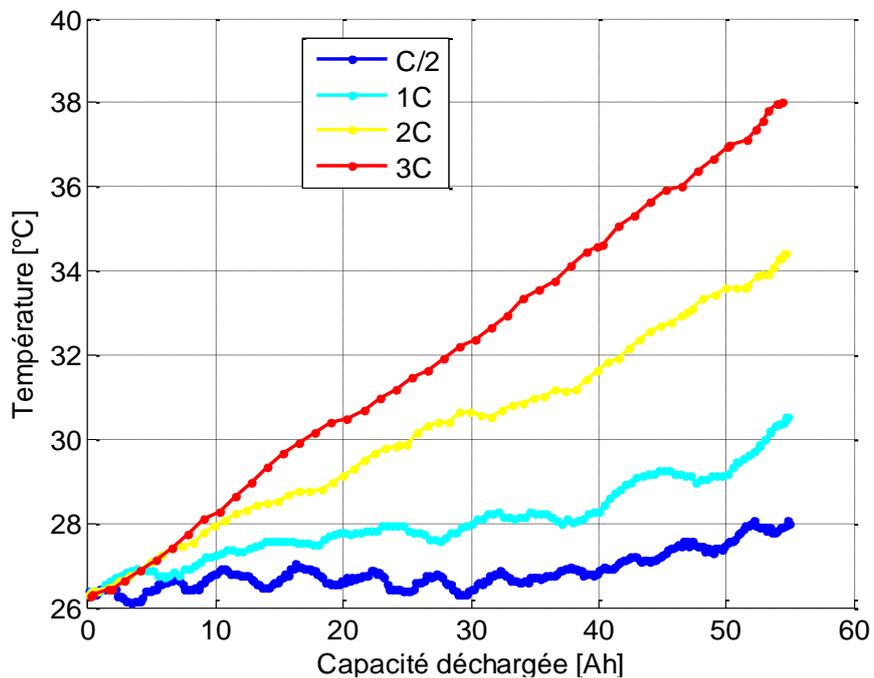


Figure II-20 : Température de la cellule en décharge pour différents régimes de courant en fonction de la capacité déchargée

Le Tableau II-4 présente les résultats obtenus sur une cellule lors des essais de caractérisation en performances à 25°C.

Tableau II-4 : Résultats de la caractérisation en performances de la cellule SUZHOU PHYLION C/LFP 50 Ah à 25°C

SUZHOU PHYLION C/LFP 50 Ah - performances à 25°C					
Charge	Régime de courant [C]	0,2	0,5	1	
	Capacité [Ah]	54,9	54,9	54,9	
	Régime de puissance [P]	0,21	0,52	1,05	
	Energie [Wh]	183	184,8	187	
	Capacité CC [Ah]	54,8	54,4	53,9	
	Energie CC [Wh]	182,5	182,9	183,1	
	T initiale [°C]	26,4	26,3	26,4	
	T finale[°C]	26,7	28,1	30,7	
	ΔT [°C]	0,3	1,8	4,3	
	T moyenne [°C]	26,4	27,1	28,4	
Décharge	Régime de courant [C]	0,5	1	2	3
	Capacité [Ah]	54,92	54,79	54,61	54,47
	Régime de puissance [P]	0,5	0,99	1,94	2,86
	Energie [Wh]	175,59	173,04	169,17	165,93
	T initiale [°C]	26,4	26,4	26,4	26,3
	T finale[°C]	28	30,5	34,4	38
	ΔT [°C]	1,6	4,2	8	11,7
	T moyenne [°C]	26,9	28,1	30,3	32,1

En charge à 25°C, on observe des performances stables pour des régimes de courant de 0.2C, 0.5C et 1C. L'élévation de température de la cellule est toutefois assez élevée à 1C, malgré la présence de plaques de compression métalliques qui favorisent la dissipation thermique.

En décharge à 25°C, les performances observées sont également stables. L'énergie restituée est décroissante avec le régime (de 0.5C à 3C) d'où un rendement énergétique décroissant. Le rendement faradique est en revanche constant quel que soit le régime de décharge.



II - 3.3.2 Identification des paramètres du modèle thermique

Tableau II-5 : Paramètres et coefficients du modèle thermique

Paramètres /coefficients	Valeurs	(Unit)	Paramètres /coefficients	Valeurs	(Unit)
C_{th}	<i>Confidentiel</i>	(J/°C)	a_1	<i>Confidentiel</i>	(°C/W)
R_{int} (sous 1C) (en moyenne)		(Ω)	a_2		(°C/W)

De même que pour les paramètres du modèle électrique, les paramètres du modèle thermique C_{th} , a_1 et a_2 sont déterminés avec un algorithme PSO-NM [38], afin de faire correspondre le résultat numérique au plus proche du résultat expérimental de la température de la cellule. Les coefficients identifiés sont résumés dans le Tableau II-3. Les courbes présentées sur la Figure II-21 représentent le résultat de l'identification des paramètres du modèle thermique. La première courbe est la puissance thermique P_{th} qui est calculée à partir de la modélisation électrique. C'est l'entrée du modèle thermique avec également la température ambiante (autour de 26°C). Le second graphique de la Figure II-21 représente la confrontation entre les températures de la cellule mesurée et simulée avec le modèle thermique identifié.

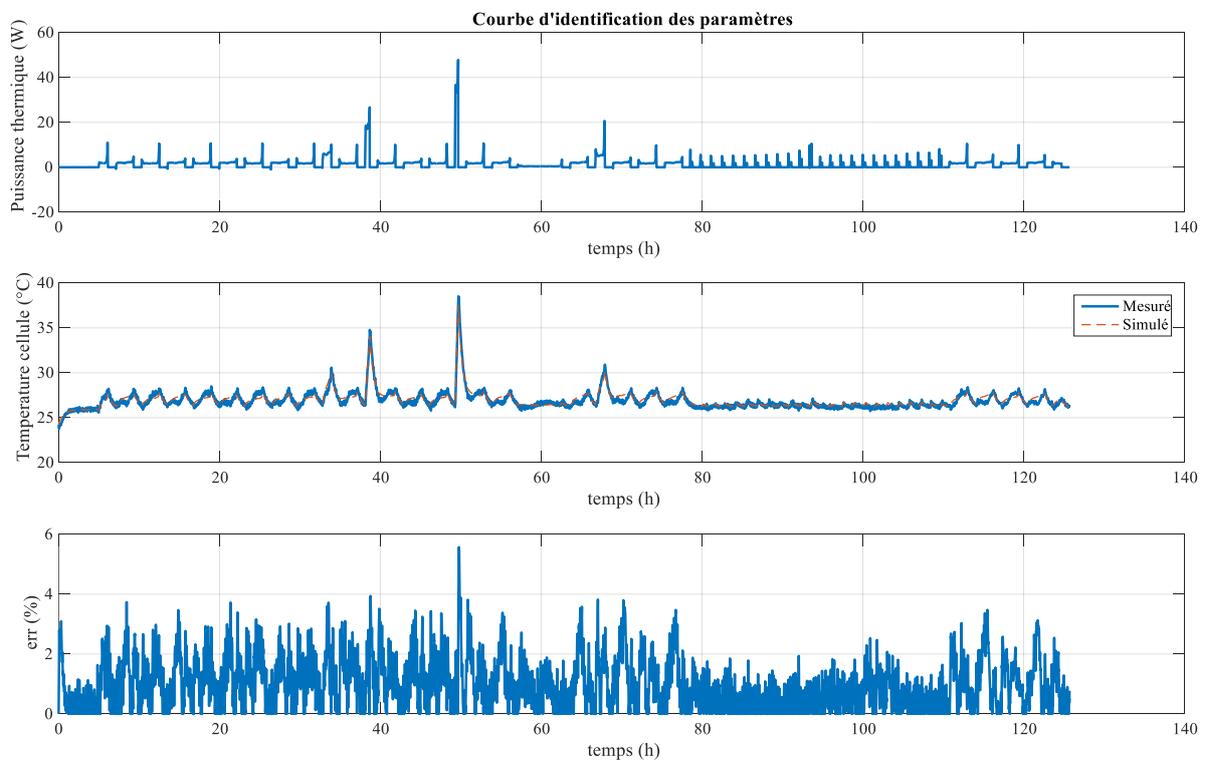


Figure II-21 : résultat d'identification des paramètres du modèle thermique

Les erreurs relatives pour cette modélisation thermique, exprimées sur le troisième graphique de la Figure II-21, sont un peu élevées, jusqu'à 5.5%. En analysant l'allure des températures mesurées, il apparaît des oscillations dans la mesure (facilement visible pour des courants de 0.5C sur la Figure II-18 et la Figure II-20) en plus du bruit lié au capteur. Ces oscillations sont dues au système de mesure et de circulation de l'air dans l'enceinte qui s'active périodiquement et a pour effet de refroidir le capteur de température. Il serait très intéressant de réaliser de nouveaux essais de caractérisation thermique plus poussés. Malheureusement, il n'y a pas eu de possibilité de réaliser des essais complémentaires au sein du laboratoire car les seules cellules disponibles pour l'étude étaient destinées au CEA pour les essais de vieillissement qui sont présentés ci-après.

A partir de l'équation (II-12), il est possible de recalculer la résistance interne équivalente R_{int} . La Figure II-22 présente les variations de la résistance interne en fonction du SOC pour différents courants de charge et la Figure II-23 pour différents courants de décharge. La résistance interne de la cellule a tendance à augmenter en charge à partir d'un niveau de SOC supérieur à 80% et pour des SOC en dessous de 10%. En revanche pour la décharge la résistance interne reste constante. En charge comme en décharge, la résistance interne moyenne de la cellule est autour de $2.5m\Omega$. La résistance interne diminue légèrement avec l'augmentation du courant, cependant les pertes en chaleur sur une charge ou décharge complète augmente avec le courant. Ces pertes représentent entre 1 et 6% de l'énergie emmagasinée dans la cellule de $\frac{C}{5}$ à $3C$.

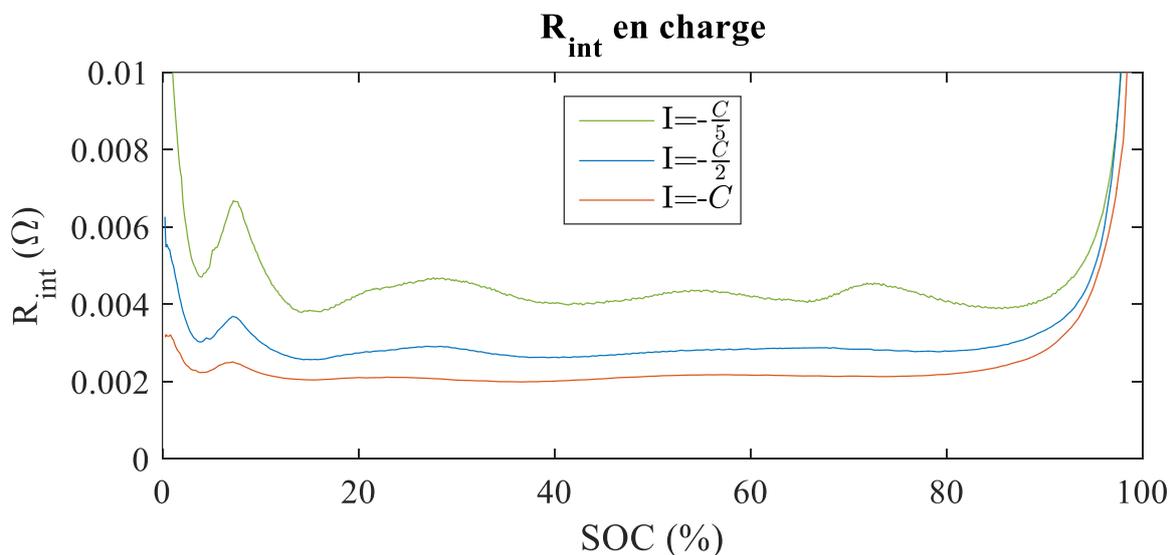


Figure II-22 : Résistance interne équivalente de la cellule en charge



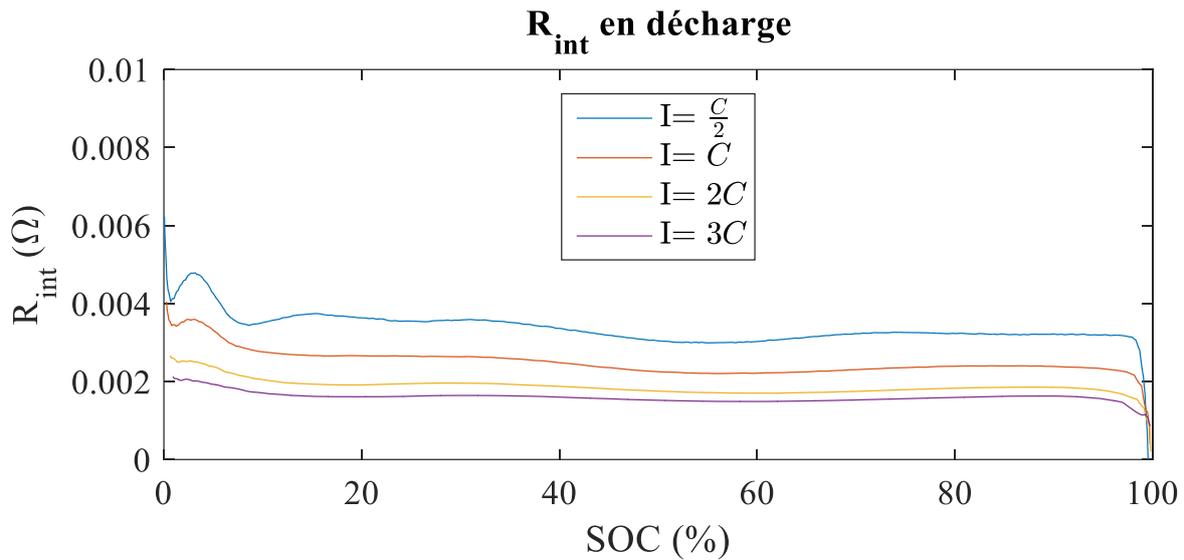


Figure II-23 : Résistance interne équivalente de la cellule en décharge

II - 3.4 Modèle de vieillissement

Après avoir modélisé le comportement électrique puis le comportement thermique de la batterie, le modèle de vieillissement est réalisé. Cette dernière partie du modèle multi-physique de la cellule de batterie est la plus conséquente et se compose de deux sous-modèles : un modèle de vieillissement calendaire et un modèle de vieillissement en cyclage. La Figure II-24 représente le principe adopté pour la modélisation du vieillissement des cellules. La dégradation totale que subit la cellule électrochimique est considérée comme la somme des dégradations de ces deux sous modèles. Le choix a été fait de séparer les vieillissements de la batterie de nature calendaire et cyclage, sans interaction complexe d'un vieillissement sur l'autre. Le vieillissement calendaire correspond au vieillissement de la cellule au repos alors que le vieillissement en cyclage à celui de l'utilisation de la cellule. Du fait de ce choix et selon l'expertise de notre partenaire, le laboratoire du CEA, [34] la dégradation calendaire affecte la batterie en permanence alors que la dégradation due au cyclage agit uniquement lorsqu'il y a un échange d'énergie. Ces deux types de dégradations sont dépendantes de la température. De plus, la dégradation calendaire dépend de l'état de charge de la batterie (SOC), et la dégradation en cyclage dépend du taux de courant, de la profondeur de décharge (DOD depth of discharge ; soit la variation de SOC) mais aussi de l'état de santé actuel de la batterie (SOH state of health).

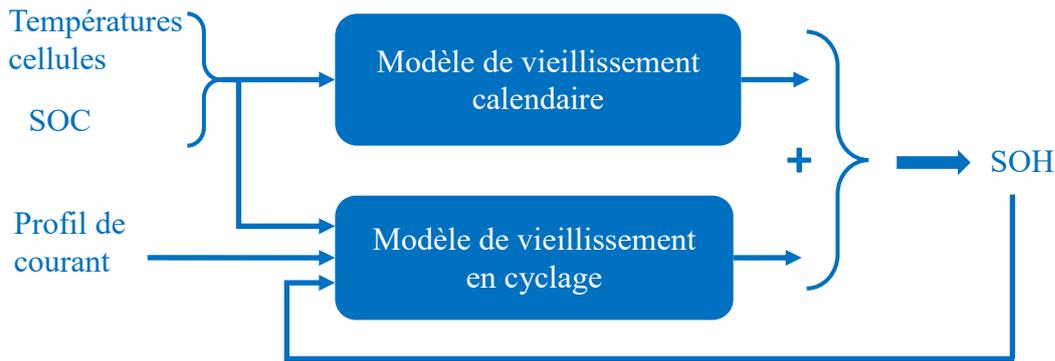


Figure II-24 : Schéma de la modélisation du vieillissement de la cellule

Ces modèles de vieillissements sont des modèles semi-empiriques et nécessitent d'être paramétrés pour correspondre aux résultats expérimentaux. A partir des missions sélectionnées, le modèle électrique et le modèle énergétique du véhicule sont utilisés pour déterminer une estimation des niveaux de courants typiques. La collaboration entre le CEA et Gruau a permis d'établir le plan d'expérience à partir des niveaux de courants typiques et des conditions d'utilisation du véhicule utilitaire électrique en température.

II - 3.4.1 Modélisation du vieillissement calendaire

Les cellules de batteries ont enduré des vieillissements en cyclage et en calendaire avec trois niveaux de SOC, trois niveaux de température et trois niveaux de courants. La Figure II-25 représente le vieillissement calendaire, c'est-à-dire l'état de santé de la cellule en fonction du temps pour les différents niveaux de SOC et de température choisis.

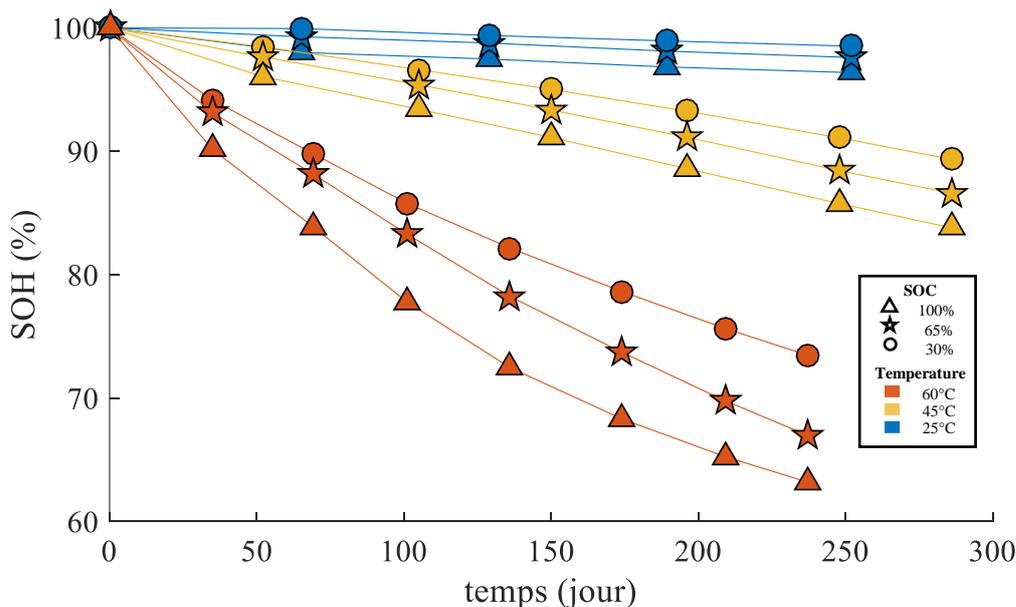


Figure II-25 : Evolution de l'état de santé (SOH) lors de vieillissements calendaires



Le vieillissement calendaire apparaît comme étant favorisé par les hautes températures et également les hauts niveaux de SOC mais avec un impact d'ordre secondaire. La modélisation calendaire utilisée (II-14) est inspirée par la littérature scientifique [12] [40] et adaptée à la technologie de batterie étudiée (LFP). Cette équation est habituellement utilisée en tension au lieu de l'état de charge (SOC). La technologie LFP a une courbe de tension relativement constante et la caractérisation par rapport au SOC s'est révélée plus représentative. De plus le coefficient α est usuellement fixé à $\frac{1}{2}$ mais a dû être adapté pour cette technologie.

$$a(t, T, SOC) = C_a \cdot t^\alpha \cdot C_T^{\frac{T-T_0}{dT}} \cdot C_{SOC}^{\frac{SOC-SOC_0}{dSOC}} \quad \text{(II-14)}$$

- a : taux de vieillissement (—),
- C_a : coefficient de vieillissement ($s^{-\alpha}$),
- t : temps (s),
- α : puissance de dépendance au temps (—),
- C_T : coefficient de température(—),
- T : température (K),
- T_0 : température de référence (K),
- dT : delta température (K),
- C_{SOC} : coefficient de SOC (—),
- SOC : State Of Charge (—),
- SOC_0 : référence de SOC (—),
- $dSOC$: delta SOC (—).

a. Caractérisation du vieillissement calendaire

L'objectif du protocole de test des cellules est d'identifier, aussi précisément que possible, les lois de vieillissement régies par les paramètres impactant. Le budget ainsi que les temps impartis pour réaliser les essais sont les facteurs principaux qui en ont imposé les conditions, à savoir 50 cellules étaient à disposition pour les tests sur un maximum de 18 voies de vieillissement calendaire en parallèle et 10 voies de cyclage en parallèle sur une période d'essai limitée à un an. En s'appuyant sur les connaissances de notre partenaire, le CEA, sur cette technologie [41], trois conditions de SOC (30%, 60% et 100%) et trois conditions de température ont été choisies pour tester les cellules en vieillissement calendaire accéléré, soit un total de neuf couples de condition (température, SOC) résumés dans le Tableau II-6. Pour plus de sûreté dans les résultats, les tests ont été doublés, chaque condition de test a été subi par deux cellules. A basse température, les réactions physicochimiques sont fortement ralenties et le vieillissement calendaire est très faible, c'est pour cette raison que la température minimale

choisie est de 25°C pour obtenir un vieillissement perceptible au bout d'un an. Les résultats Figure II-27 montrent qu'à 25°C et sur une période d'un an, le vieillissement calendaire ne dépasse pas les 3% de capacité perdue.

Tableau II-6 : Condition de test des essais calendaires

Température	SOC	Nombre de cellule
25°C	30% - 65% - 100%	6
45°C	30% - 65% - 100%	6
60°C	30% - 65% - 100%	6

Le Tableau II-7 décrit les différents mécanismes de vieillissement sur la cellule électrochimique li-ion.

Tableau II-7 : Récapitulatifs des mécanismes de vieillissement d'une cellule électrochimique li-ion [34]

Causes	Effets	Résultats	Facteurs influents
Accroissement de la SEI (Solid Electrolyte Interface) à l'électrode négative	Déséquilibre des 2 électrodes et perte de Lithium cyclable	Perte de capacité A long terme, augmentation de la résistance interne et perte de puissance admissible	Température élevée SOC élevé
Exfoliation du graphite, crackements	Perte d'espèces actives / perte de contact inter-particules	Perte de capacité Perte de puissance	DSOC
Lithium plating à l'électrode négative	Perte d'espèces actives / formation de dendrites de Lithium	Perte de capacité Risque de court-circuit à long terme	Température basse SOC élevé Régime de courant élevé

Les tests de vieillissement calendaire ainsi que ceux en cyclage suivent le même déroulement qui se compose de deux phases. La phase principale est la phase de vieillissement durant laquelle la cellule subira les conditions de tests prédéfinies. La phase secondaire est une phase de « check-up » qui consiste en un test périodique de la cellule et identique à tous les essais, afin de vérifier l'évolution des caractéristiques. Pour chaque essai, la phase de « check-



up » sera faite à intervalles de temps réguliers jusqu'à l'obtention de performances de la cellule en dessous du seuil limite, défini à 80% du SOH nominal. La Figure II-26 représente la tension et le courant d'une cellule lors d'un essai de « check-up » (à 25°C).

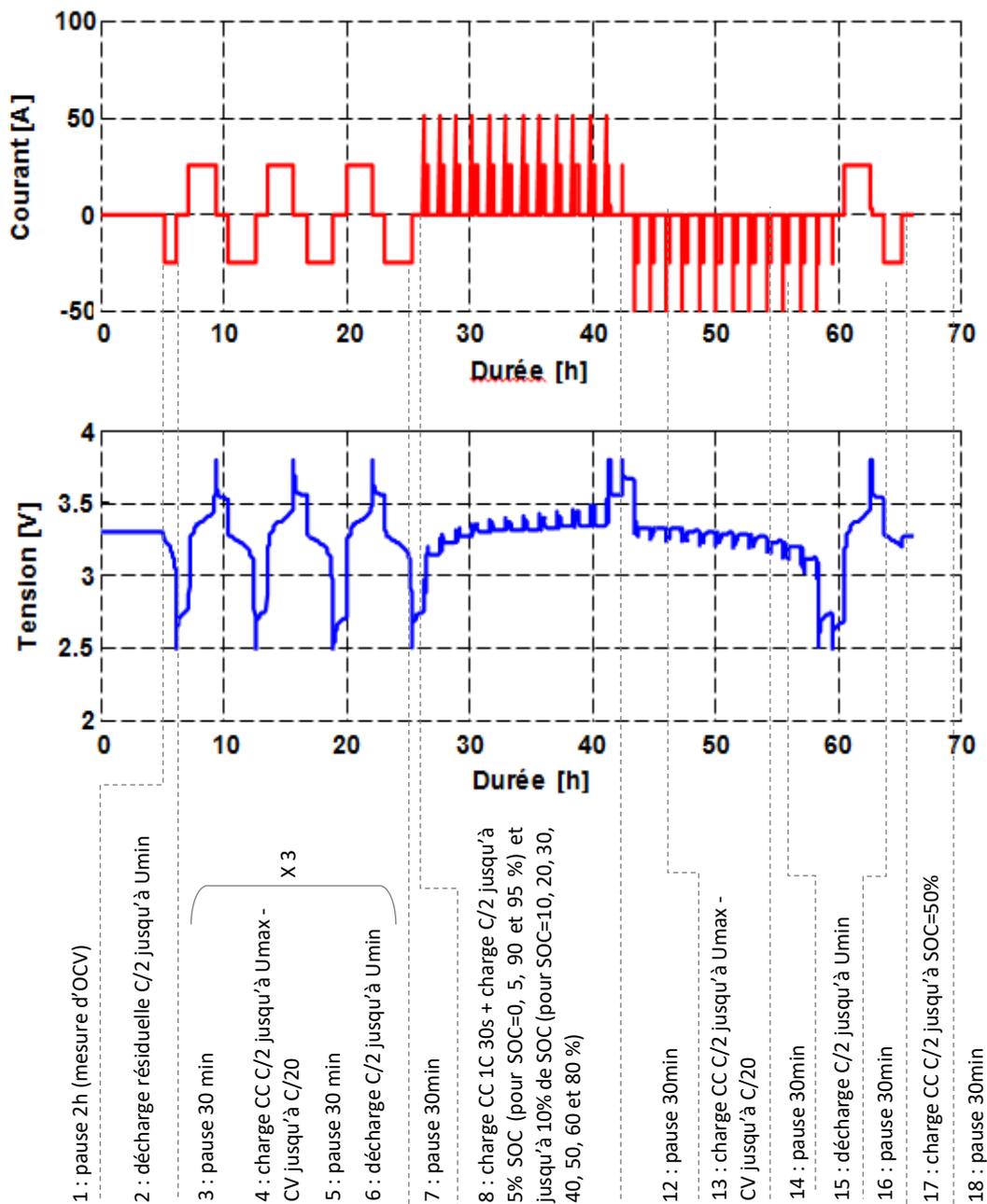


Figure II-26 : Protocole de check-up

La Figure II-27 présente les résultats obtenus sur les essais de vieillissement calendaire réalisés sur les cellules Suzhou Phylion C/LFP. Selon chaque protocole, les essais calendaires ont été réalisés sur 2 cellules afin de pouvoir vérifier la reproductibilité des résultats. Les résultats obtenus présentent peu de dispersion d'une cellule à l'autre. D'autre part, la distribution des tendances des résultats en fonction de la température et du SOC est usuelle :

plus la température et le SOC sont élevés et plus la vitesse de dégradation de la cellule est importante.

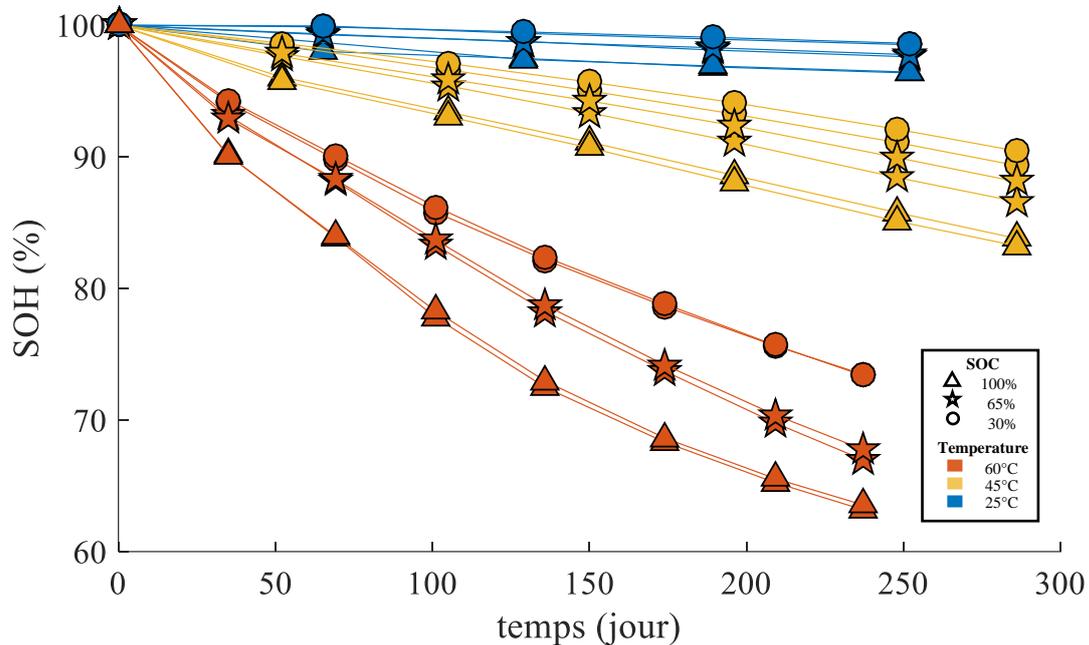


Figure II-27 : Résultats d'essais des cellules en vieillissement calendaire

b. Identification des paramètres du modèle de vieillissement calendaire

Les coefficients c_a , α , c_T , c_{SOC} , T_0 , ΔT , SOC_0 et ΔSOC sont paramétrés à l'aide de l'algorithme d'optimisation de manière à correspondre aux mesures expérimentales (Figure II-28).

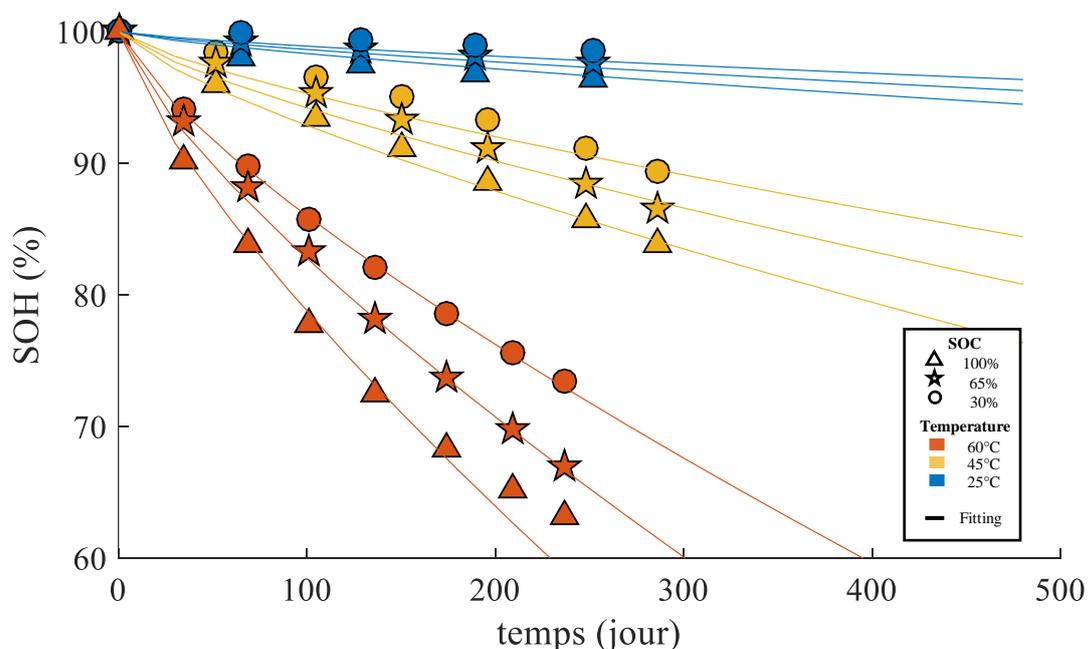


Figure II-28 : identifications des paramètres de vieillissement calendaire



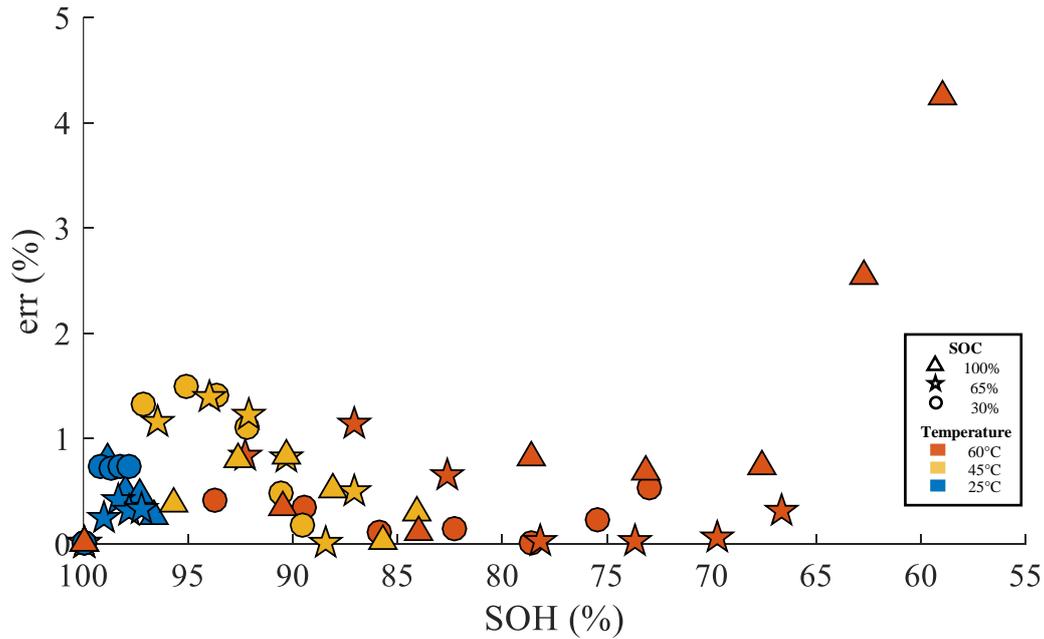


Figure II-29 : erreur relative de la modélisation du vieillissement calendaire

Les courbes de correspondance, calculées avec les paramètres optimisés, sont représentées par des lignes et tracées par calcul selon l'équation (II-14). L'erreur relative entre les résultats de simulations issues du modèle et les mesures reste toujours inférieur à 2% pour des SOH au-dessus de 70% (Figure II-29), de ce fait, le choix des paramètres (Tableau II-8) est validé. En effet le modèle sera utilisé pour des SOH au-dessus de 80% puisque la fin de vie de la batterie est considérée atteinte pour un SOH inférieur à 80%.

Tableau II-8 : Paramètres du modèle de vieillissement calendaire

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
C_a		dT	
α	<i>Confidentiel</i>	C_{soc}	<i>Confidentiel</i>
C_T		SOC_0	
T_0		$dSOC$	

II - 3.4.2 Vieillessement en cyclage

Contrairement à la modélisation du vieillissement calendaire, le modèle de vieillissement en cyclage a été réalisé de manière empirique à partir des résultats d'essais en cyclage subis par la cellule. Les résultats de vieillissements en cyclage ont fait apparaître une évolution du SOH due au cyclage pur identifiable à des sections de droite. Les évolutions des coefficients de ces portions de droites ont ensuite été identifiés en fonction des variables d'entrées influentes (température et taux de courant).

a. Caractérisation du vieillissement en cyclage

A partir des performances attendues de la chaîne de traction (une puissance de 90 kW maximum), il a été déterminé la capacité minimale admissible de la solution de la batterie à adopter pour être assuré de ne pas dépasser le courant maximal admissible de la cellule (soit 3C : Voir Annexe A - 4 sur la caractéristique de la cellule). Cette capacité minimale est donc obtenue en ajoutant l'ensemble des puissances instantanées possiblement mis en œuvre en même temps, lors de l'utilisation du véhicule, divisé par la valeur du taux de courant maximum de la cellule. Les puissances prises en compte sont liées au cahier des charges du véhicule. Il est souhaité de pouvoir délivrer la puissance maximale du moteur tout en assurant la fonction de chauffage habitacle (et éventuellement l'alimentation d'une cellule liée au métier). Le rendement théorique moyen du convertisseur de puissance est de l'ordre de 90% (données fournisseur), ce qui demande théoriquement à la batterie de fournir 105 kW (= 90/90% + 5 ; 5 kW de consommation du chauffage). Cela nous amène donc à une capacité minimale théorique de 35kWh pour assurer les performances souhaitées. Du fait des contraintes techniques de conception des packs batteries, la capacité minimale retenue est de 38 kWh. La puissance de charge maximale théorique que peut produire le chargeur embarqué du véhicule est de 22 kWh (20 kWh en pratique en sortie du chargeur vers la batterie). Cette puissance correspond à une recharge en « Mode 2 ». De plus, la puissance régénérative maximale que peut produire la chaîne de traction est limitée à 40 kWh. Ainsi, le courant maximal de charge ou de régénération de la batterie est respectivement de 0.5C ou 1C ($20/38 = 1.05C$; $40/38 = 0.53C$). Les simulations d'utilisation sur le parcours relevé, au moment de l'établissement des plans de caractérisation, ont permis d'estimer les valeurs de courant moyen et maximal appliqué à la batterie (II - 2.3). L'objectif étant de créer un modèle qui puisse simuler un grand nombre de profil de roulage différents, il a été choisi de tester les cellules en cyclage avec un courant constant de différentes valeurs afin de déterminer l'impact de cette grandeur sur le vieillissement.



Les cyclages sont effectués sur une plage de SOC complète pour différents niveaux de courant et pour différentes températures (Tableau II-9). Afin d'appréhender l'impact du cyclage partiel, deux voies de mesure ont été dédiées à des cyclages sur une plage de 30%. Contrairement au vieillissement calendaire, le vieillissement par cyclage est bien plus important à basse température. En effet, les réactions physicochimiques au sein de la cellule étant ralenties, l'application d'un courant va stresser et donc dégrader plus fortement la cellule. Les températures retenues sont donc 0°C, 25°C et 45°C. Le vieillissement à 0°C a été très rapide et a permis de libérer les voies de cyclage pour des essais sur d'autres plages de SOC, (Tableau II-10).

Tableau II-9 : Condition de test du vieillissement en cyclage

Température	Taux de courant		Plage de SOC	Nombre de cellule
	Charge	Décharge		
25°C	0.5C	1C	Full 0% ↔ 100%	2
25°C	0.5C	1.5C	Full 0% ↔ 100%	1
25°C	0.5C	2.4C	Full 0% ↔ 100%	1
45°C	0.5C	1C	Full 0% ↔ 100%	2
0°C	0.5C	1C	Full 0% ↔ 100%	2
0°C	1C	1C	40% ↔ 70%	1
0°C	1C	1C	70% ↔ 100%	1

Tableau II-10 : Conditions additionnelles de test pour le vieillissement en cyclage

Température	Taux de courant		Plage de SOC	Nombre de cellule
	Charge	Décharge		
0°C	1C	1C	70% ↔ 100%	1
0°C	1C	1C	60% ↔ 90%	1
0°C	1C	1C	50% ↔ 80%	1

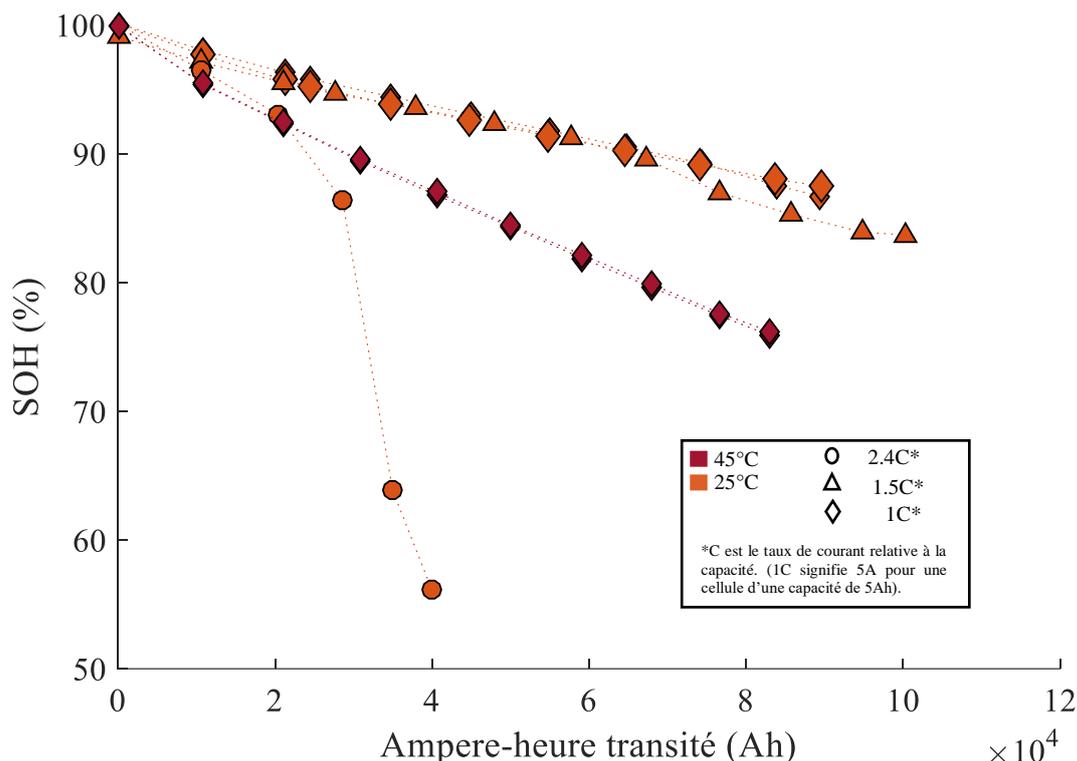


Figure II-30 : Evolution des capacités des cellules en vieillissement en cyclage à 25 et 45°C

La Figure II-30 présente les résultats obtenus sur les cellules en vieillissement en cyclage pour des températures de 25°C et 45°C. Les cellules ont effectués des cyclages sur des plages de SOC de 100%. Sur les quatre cellules effectuant un cyclage au régime 1C, une dégradation identique est observée sur les couples de cellules soumis aux mêmes conditions (bonne répétabilité des résultats).

Sur les cellules effectuant des cyclages à 25°C pour des régimes de décharge supérieur à 1C, il apparaît que le régime de décharge influence la vitesse de dégradation de la cellule. En effet, pour un régime de 2.4C en décharge, à partir d'environ 25000Ah, la vitesse de dégradation est plus importante alors que pour un régime de 1.5C en décharge la tendance de la dégradation est comparable aux cellules à des régimes de 1C. Il y a donc une dépendance non linéaire entre la dégradation de la cellule et le régime de courant.

Enfin, les cellules ayant subi les essais à 45°C admettent une dégradation plus rapide que les cellules ayant subi les mêmes essais à 25°C. Cependant, il est difficile en l'état de se prononcer sur le fait qu'un cyclage sous une température de 45°C dégrade plus rapidement la cellule qu'un cyclage sous 25°C soumis au même courant de décharge (1C pour ces essais). En effet, lors des essais de cyclage, le vieillissement calendaire agit également sur la cellule. Il a déjà été vu lors de la modélisation calendaire que l'augmentation de la température augmentait également la dégradation de cellule. Afin de mesurer l'impact de la température sur le cyclage,



la partie de dégradation calendaire sera calculée pour isoler ensuite la partie de dégradation en cyclage.

La Figure II-31 présente les résultats obtenus sur les cellules en vieillissement en cyclage à 0°C. Sur les cellules ayant subi des cyclages sur une plage de SOC complète (0 – 100%) font apparaitre une dispersion croissante de la dégradation au cours du cyclage. Les comportements internes des cellules sont difficiles à caractériser à basse température et la sensibilité semble être assez forte. Le temps imparti pour les essais n'a pas permis de réitérer le cyclage pour écarter un des deux essais ou pour confirmer la dispersion à basse température. Pour ne pas prédire un vieillissement trop optimiste dans la modélisation, le choix a été fait d'écarter la cellule ayant le moins vieilli.

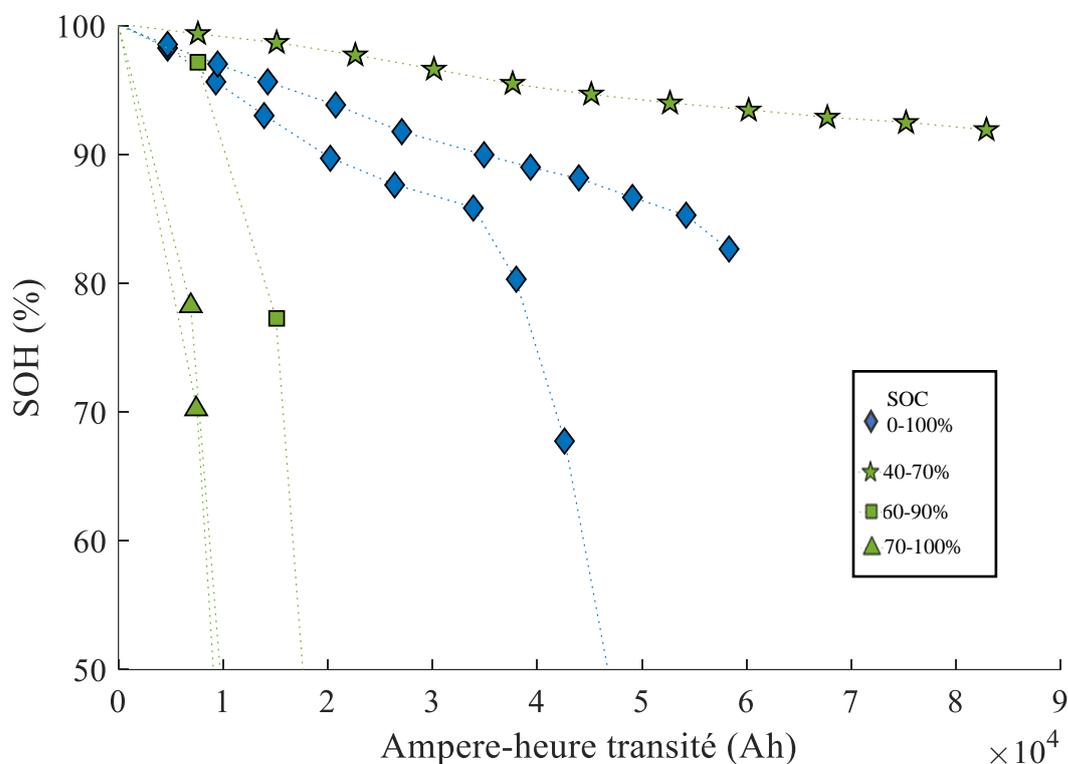


Figure II-31 : Evolution des capacités des cellules en vieillissement en cyclage à 0°C sous 1C

Un vieillissement très accéléré est observé pour les trois cellules qui ont subi un vieillissement à 0°C sur une plage de SOC de niveau élevé (70 – 100% et 60 – 90%) avec un régime de 1C. La duplication de l'essai sur la plage de SOC de 70 – 100% a permis de vérifier la répétabilité de cet essai. A l'inverse, pour une plage de SOC avec des niveaux plus faibles (40 – 70%) la dégradation est très faible et même bien plus faible que les cyclages sur la plage de SOC complète. Ces essais complémentaires sur différentes plages de SOC ont permis de mettre en avant le fait que les états de charge supérieurs à 80% ont un impact important sur la dégradation de la cellule à basse température.

b. Modélisation et identification des paramètres du vieillissement en cyclage

La Figure II-32 résume les résultats de vieillissement total lors du cyclage de la batterie en fonction des ampèreheures transités. A partir de l'estimation de la dégradation calendaire calculée avec le modèle (II-14), la part du vieillissement due au cyclage peut être isolée par soustraction des résultats de vieillissement en cyclage total obtenus. L'hypothèse d'addition des dégradations a été faite et suggérée suivant l'expertise du CEA. Les résultats de cyclage montrent que le niveau du courant accélère le vieillissement. De plus les températures basses, proche de 0°C, augmentent de manière importante le processus de vieillissement. Cependant, des essais avec plusieurs plages de SOC de même profondeur de décharge ($DOD = 30\%$) à basse température révèlent qu'en évitant les SOC élevés, il est possible de réduire considérablement la dégradation due au cyclage. Pour résumer, lors du cyclage, l'impact de la température est très fort sur la plage 80% à 100% de SOC. En revanche, il n'y a pas eu suffisamment d'essais avec différentes plages de température et différents DOD pour pouvoir modéliser l'impact de la profondeur de décharge.

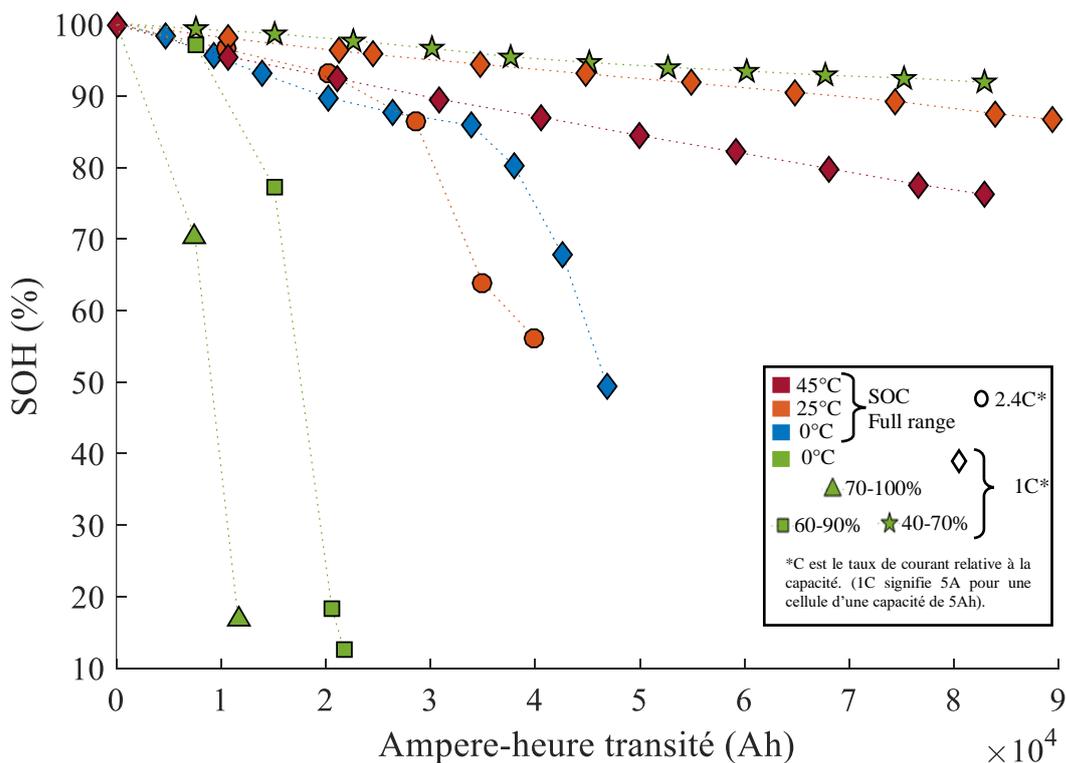


Figure II-32: Evolution de l'état de santé (SOH) lors des cyclages de la batterie



Les résultats de cyclage mettent en évidence que le cyclage est bien dépendant de la température, du taux de courant et de la profondeur de décharge. La dégradation de la cellule est amplifiée par l'augmentation du taux de courant et par le nombre d'ampère-heure transité. Les températures extrêmes, basses comme hautes, amplifient également le phénomène de vieillissement en cyclage. Il est possible de faire une interprétation physicochimique de ces mécanismes. A basse température, le phénomène d'intercalation des ions lithium (Li^+) dans le graphite est ralenti lors des phases de recharge. Il en résulte une accumulation de lithium sur la surface de l'électrode négative sous de fort taux de courant. Cela se produit plus particulièrement pour des niveaux de SOC élevés lorsque l'électrode de graphite est proche de la saturation en ion Li^+ , voire même localement saturée, où une couche d'accumulation du lithium sous forme métallique apparaît. Ce phénomène est usuellement appelé « lithium plating ». Ce phénomène entraîne une perte d'ions Li^+ actifs et se traduit par une perte de capacité. De plus après un temps plus long, la plaque de lithium peut générer une dendrite qui peut même conduire au court-circuit interne de la cellule. Les températures élevées génèrent quant à elles une augmentation de la SEI (Solid electrolyte interphase) du côté de l'électrode en carbone. En effet, les températures élevées favorisent les réactions chimiques des ions Li^+ avec l'électrolyte pour former la SEI, qui se traduit par une perte d'ions Li^+ cyclable. Cette SEI, qui a également le rôle de protéger l'électrode de graphite, va augmenter la résistance interne de la cellule. Finalement, le cyclage sous des températures élevées va donc faire chuter la capacité de la cellule.

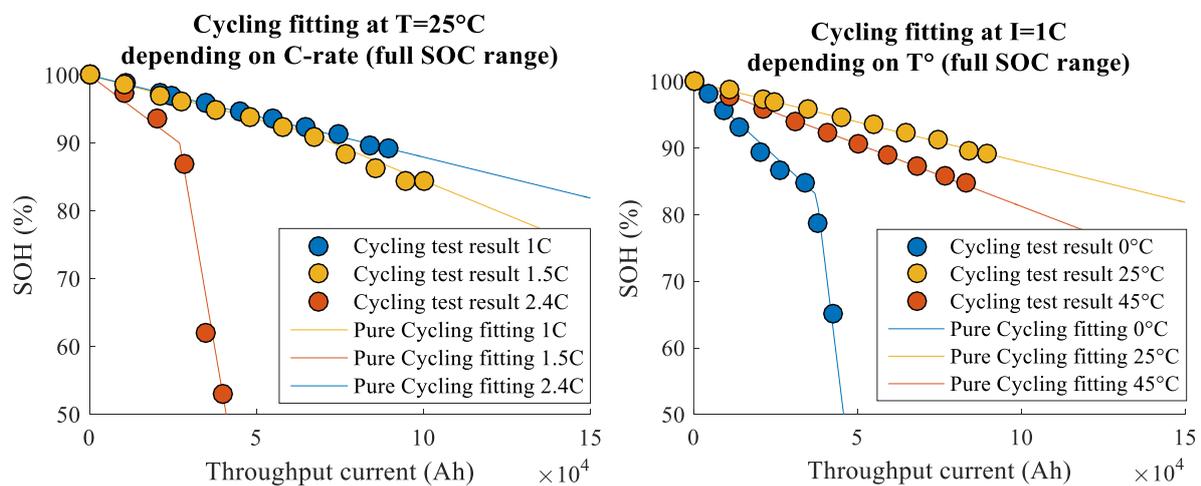


Figure II-33 : Résultats des tests de cyclage pur

La Figure II-33 présente les courbes de résultat du cyclage pur. Le vieillissement en cyclage apparaît comme étant linéaire par morceaux (deux portions de droites avec une cassure). Les paramètres des portions de droites ; coefficients de pentes et point de cassure ; sont identifiés et un modèle est créé de sorte à pouvoir simuler les cyclage. Pour chaque

condition de test, les vieillissements correspondants sont simulés et confrontés à l'expérience (visibles sur les courbes de la Figure II-33). La modélisation des portions de droite dépend de la température et du courant. Pour les essais en température, les paramètres des portions de droite (1er et 2ème coefficient directeur de droites et point de cassure) sont définis par la fonction $g(T)$ de l'équation (II-15). Pour les essais en fonction du courant, le paramètre du 1er coefficient directeur de portion de droite est approché par la fonction de la forme $\frac{f}{g}(i_{rate})$, le second coefficient directeur par $g(i_{rate})$ et le point de cassure par $f(i_{rate})$. Ces fonctions décrites dans l'équation (II-15) ont été choisies après avoir relevé les paramètres expérimentaux. A partir des points relevés, les paramètres des fonctions, A, B, C, D, E et F, ont été identifiés de sorte à correspondre au mieux aux mesures. Le Tableau II-11 détaille les valeurs choisies pour les paramètres. Les courbes obtenues pour chaque coefficient sont tracées sur le graphique de la Figure II-34 pour le courant et de la Figure II-35 pour la température. L'identification des paramètres étant faite, les courbes issues du modèle de vieillissement en cyclage sont tracées et confrontées aux résultats expérimentaux dans les graphiques de la Figure II-32. L'objectif atteint est également d'obtenir une erreur entre la simulation et l'expérimental qui soit inférieure à 2%.

$$\begin{cases} f(x) = Ax^3 + Bx^2 + Cx \\ g(x) = De^{Ex} + Fx \end{cases} \quad \text{(II-15)}$$

A ... F: paramètres (-),

f, g: fonction d'approximation (-),

x: température ou taux de courant ($^{\circ}C$ ou $C - rate$).

Pour simuler des vieillissements sur une mission dont la température et le courant varient simultanément, une extrapolation a été faite en fonction de ces variables. La Figure II-36 représente les surfaces d'état de santé de la cellule (SOH) en cyclage « pur » pour trois quantités de courant échangé par la cellule (50 000, 75 000 et 100 000 Ah) en fonction de la température et du taux de courant. Grâce à ces surfaces, il est aisé de comprendre que plus le courant est élevé et plus la dégradation en cyclage pur est importante. De plus, les températures basses vers $0^{\circ}C$ accélèrent le mécanisme de vieillissement. Une explication de ce comportement est que, soumis à des températures basses, la cinétique de la réaction chimique se produisant à l'intérieur de la cellule est naturellement ralentie. Ainsi, l'application d'un courant élevé stresse la cellule dans ces conditions en forçant la réaction à se produire plus rapidement qu'elle ne le pourrait naturellement. Cependant les températures hautes quant à elles, accélèrent également naturellement d'autres réactions parasites mais qui ont un impact un peu moins fort sur le vieillissement en cyclage. Concernant la température, les surfaces révèlent un point de température de fonctionnement optimal autour de $22^{\circ}C$ pour obtenir la dégradation en cyclage



la plus faible. Le dernier point visible sur ces surfaces de la Figure II-36 est la cassure qui apparaît entre $1.5C$ et $2C$, point à partir duquel le vieillissement en cyclage s'accélère considérablement. Bien que la documentation du constructeur autorise les courants jusqu'à $3C$, il est judicieux d'éviter de dépasser les $1.5C$ autant que possible. Afin de préserver les performances du véhicule électrique, il n'y a pas de limitation spécifique sur le courant dans ce cas d'étude mais cela est une voie à explorer. Ces surfaces permettent d'identifier une plage de température et de courant pour laquelle la dégradation est minimisée. La zone qui favorise un vieillissement minimal est un faible courant (inférieur à $1.5C$) et une température voisine de $20^{\circ}C$ à $25^{\circ}C$. Bien sûr, les résultats de vieillissement extrapolés pourraient révéler des erreurs pour les conditions d'utilisation loin des tests, mais cela donne au moins une tendance concernant le vieillissement de la batterie. La modélisation du vieillissement des batteries est faite de manière empirique. Afin d'améliorer le modèle, il serait intéressant de réaliser plus d'essais, ce qui serait également plus coûteux et n'a pas pu être mis en place pour l'instant.

Tableau II-11 : paramètres du modèle de vieillissement en cyclage

Paramètre	A	B	C
Coefficient directeur de la 1 ^{ère} droite lié au courant			
Point de cassure lié au courant			
Paramètre	D	E	F
Coefficient directeur de la 1 ^{ère} droite lié à la température			
Coefficient directeur de la 2 ^{ème} droite lié à la température			
Point de cassure de la pente lié à la température			
Coefficient directeur de la 1 ^{ère} droite lié au courant			
Coefficient directeur de la 2 ^{ème} droite lié au courant			



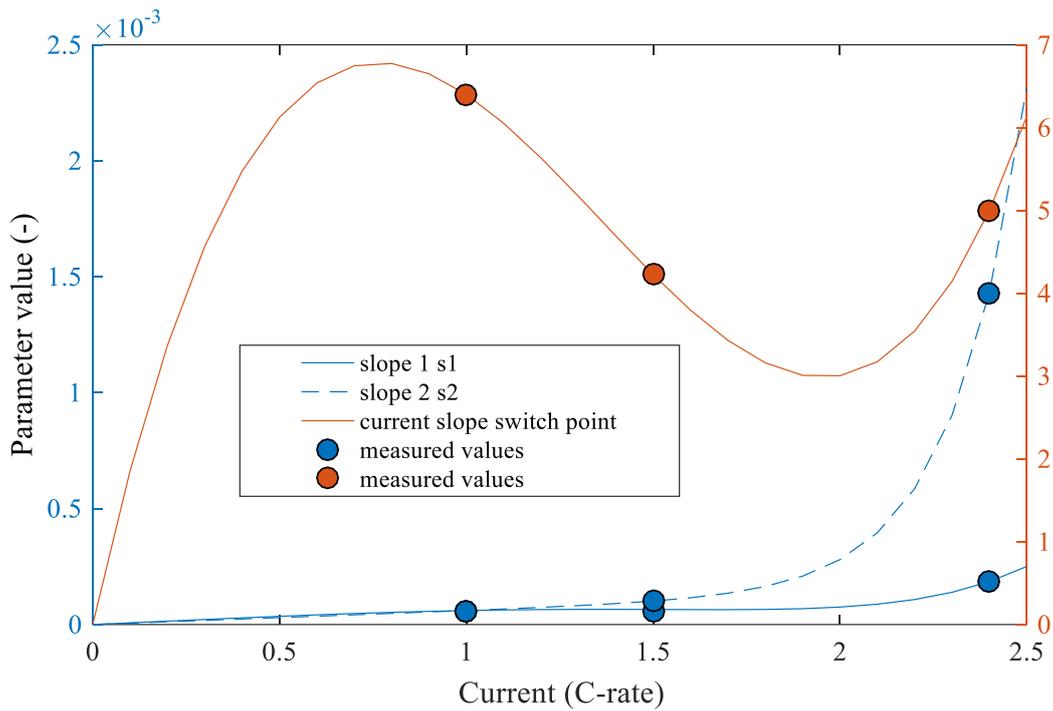


Figure II-34 : Coubes de tendance des coefficients de modélisation du cyclage en fonction du taux de courant

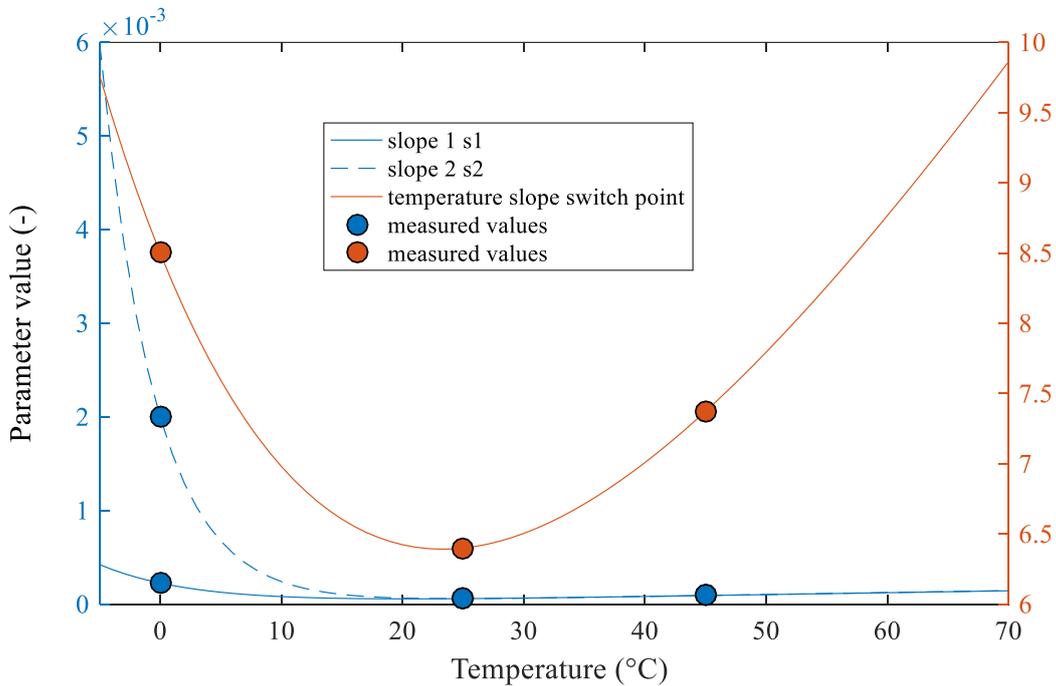


Figure II-35 : Coubes de tendance des coefficients de modélisation du cyclage en fonction de la température



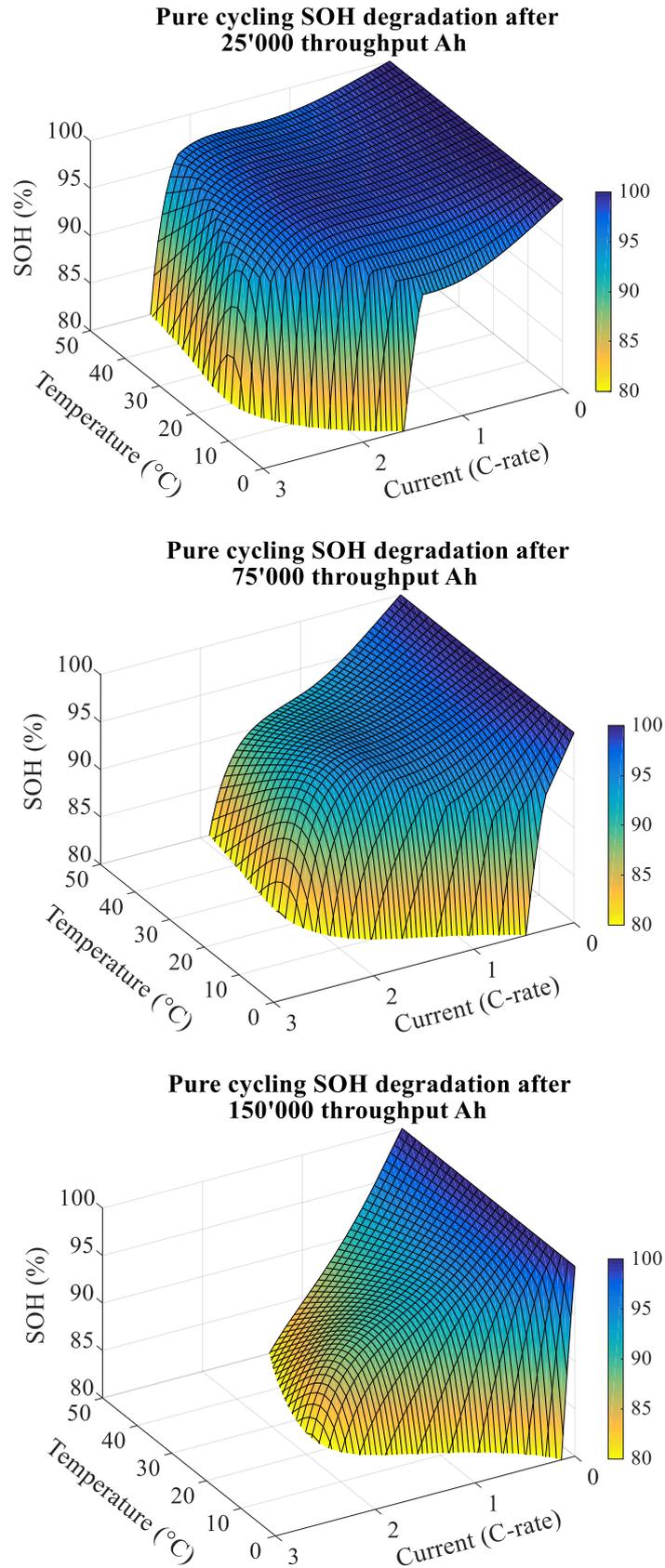


Figure II-36 : SOH de cyclage pur après 500, 1500 et 3000 cycles

II - 4. Conclusion du Chapitre II

Après une présentation du contexte, de la problématique et du produit d'étude, ce second chapitre présente la modélisation et l'identification des modèles du véhicule puis de la batterie. La modélisation de la dynamique du véhicule et la modélisation énergétique sont issus de modèles simples, largement utilisés dans la littérature, basés sur le principe fondamental de la dynamique et les lois de la physique. La modélisation de la batterie de stockage d'énergie est réalisée sous forme d'un modèle multi-physique afin de pouvoir prendre en compte les caractéristiques électriques, thermiques et en vieillissement de la cellule. Si les modèles électrique et thermique sont basés sur la théorie des circuits équivalents, le modèle de vieillissement est réalisé de manière empirique à partir de la littérature de travaux précédents et grâce à une campagne de tests de caractérisation du composant de stockage d'énergie utilisé. Dans cette étude il a été choisi de distinguer le vieillissement calendaire et le vieillissement en cyclage afin d'identifier clairement les dégradations de batterie liées au roulage et à la recharge par rapport à celles dues au calendaire. Chaque modèle a été paramétré par identification avec des résultats d'essais sur véhicule et composant batterie pour assurer la conformité du modèle à représenter le cas d'étude. Les résultats d'essais et la modélisation du vieillissement ont permis de mieux comprendre les facteurs qui entre en jeu. Le vieillissement calendaire est fortement atténué par les faibles températures et, dans un second ordre, par un niveau de charge bas. Concernant le vieillissement en cyclage, les fort courants accélèrent le vieillissement et d'autant plus lorsque le cyclage est couplé à de basses températures proches de 0°C.

L'objectif de cette modélisation est de prédire le comportement du véhicule complet pour en améliorer son utilisation et obtenir un coût de revient optimisé. La modélisation précise du composant de stockage était indispensable pour déterminer, en fonction de la mission client et des conditions d'utilisation, le vieillissement potentiel de la batterie. En effet ce vieillissement de la batterie sera pris en compte dans le calcul du TCO. Il est maintenant intéressant de déterminer la méthode de calcul du TCO afin d'effectuer les calculs nécessaires à l'optimisation et afin d'observer l'évolution de ce coût de revient en fonction des paramètres d'entrée.



Chapitre III. CALCUL DU TCO ET OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT

III - 1.	INTRODUCTION DU CHAPITRE III : PROGRAMME DE SIMULATION	97
III - 2.	CALCUL DU TCO	99
III - 2.1	Impact de la mission sur le TCO	103
III - 2.1.1	Calcul du vieillissement en fonction de la mission	104
III - 2.1.2	Calcul du TCO en fonction de la mission	105
III - 2.2	Impact de la température sur le TCO	107
III - 2.2.1	Calcul du vieillissement en fonction de la température	107
III - 2.2.2	Calcul du TCO en fonction de la température	108
III - 2.3	Impact de la capacité et dimensionnement de la batterie sur le TCO	110
III - 2.3.1	Simulations de vieillissement en fonction de la taille de la batterie	110
III - 2.3.2	Calcul du TCO en fonction de la capacité	112
III - 3.	OPTIMISATION DE LA CAPACITE	115
III - 3.1	Accélération des calculs	116
III - 3.2	Calculs d'optimisation de la capacité suivant la mission	119
III - 3.2.1	Calcul du vieillissement en fonction de la mission et de la capacité	119
III - 3.2.2	Calcul du TCO en fonction de la mission et de la capacité	121
III - 3.3	Calculs d'optimisation de la capacité suivant la température	123
III - 3.3.1	Calcul du vieillissement en fonction de la température et de la capacité	123
III - 3.3.2	Calcul du TCO en fonction de la température et de la capacité	125
III - 3.4	Calculs d'optimisation de la capacité suivant la masse du véhicule	128
III - 3.4.1	Calcul du vieillissement en fonction de la masse et de la capacité	128
III - 3.4.2	Calcul du TCO en fonction de la masse et de la capacité	129
III - 4.	CONCLUSION DU CHAPITRE III	131



III - 1. Introduction du Chapitre III : Programme de simulation

La littérature comprend de nombreux articles de caractérisations et modélisations des éléments de stockage électrochimique, y compris de cellules LFP, cependant, aucun article ne traite du lien entre le vieillissement de la batterie et le coût total de possession (TCO). La notion de TCO est définie par Ellram, en 1995 [42], comme une philosophie et un outil d'achat qui permet d'appréhender le coût réel lié à l'achat d'un produit ou d'un service. L'objectif de cette approche est de guider les choix de l'acheteur et du fabricant vers la solution la plus intéressante d'un point de vue économique en prenant en considération, autant que possible, l'ensemble des coûts directs et indirects. La notion de TCO est abordée et présentée dans de nombreux articles récents. Wu et al [43] effectue un état de l'art des calculs de TCO employés dans le domaine du véhicule et propose une méthode probabiliste pour déterminer l'évolution de la rentabilité des différentes classes de véhicules sur 10 ans. L'état de l'art montre que les études de TCO sur les véhicules électriques ne prennent pas en compte les paramètres liés à la batterie tels que le vieillissement ou l'impact des cas d'utilisation. Les études les plus récentes sont principalement axées sur l'aspect économique et le potentiel impact sur le déploiement des véhicules électriques que l'outil de TCO pourrait permettre (i.e. [44]). L'objectif de ce troisième chapitre est de concevoir une méthode de calcul du TCO qui puisse tenir compte de l'impact de la mission de l'utilisateur ainsi que du comportement des éléments de stockage de l'énergie.

Grace aux modèles du véhicule et des cellules de batterie, le vieillissement des packs de batteries peut être simulé à partir de différents types de missions et dans de multiples conditions (température, capacité batterie, masse). Le but est de comparer et identifier la meilleure solution pour assurer une durée de vie de la batterie optimale et surtout le coût de revient global le plus faible possible. Pour l'ensemble de l'étude de ce mémoire, il a été choisi comme critère de fin de vie de la batterie un SOH de 80%. Le calcul du coût de revient de la batterie est un élément qui vient compléter l'information de durée de vie de la batterie et permet une meilleure décision lors de l'achat d'un véhicule. Ce chapitre présente les travaux liés aux calculs de TCO. Dans un premier temps, la méthode de calcul du TCO va être détaillée afin de comprendre tous les paramètres qu'il permet de prendre en compte. Ensuite, ce sont les influences du type de mission, de la température, puis de la capacité de la batterie (trois capacités au catalogue) qui seront étudiés. Dans un second temps, un algorithme de calcul d'optimisation selon le dimensionnement de la capacité sera mis en place. Afin de pouvoir réaliser les calculs d'optimisation dans un temps raisonnable, une méthode d'accélération des calculs est mise en place. L'optimisation de la capacité sera alors étudiée en fonction du type de mission, de la température mais également de la masse du véhicule, afin de mettre en avant une solution optimale pour le futur acquéreur d'un véhicule électrique utilitaire.



III - 2. Calcul du TCO

Le TCO, acronyme pour « Total Cost of Ownership » correspond au coût de revient global lié à la possession d'un bien, en l'occurrence, le véhicule utilitaire électrique. Afin de calculer le TCO, il est nécessaire de connaître tous les coûts liés à ce véhicule. L'ensemble des dépenses prévisionnelles qui pourraient avoir lieu dans la vie du VUE-Flex ont été listées. Les coûts intervenant dans le TCO d'un véhicule thermique équivalent ont également été ajoutés à la liste afin de pouvoir effectuer un comparatif. Les dépenses comptabilisées sont :

- le prix d'achat (Pr_{ach}),
- les frais d'immatriculation (Fr_{imm}),
- les frais d'énergie (Fr_{ener} carburant ou électricité),
- les frais d'entretien courant qui comprennent (Fr_{ent}) :
 - o la vidange du moteur,
 - o la vidange du réducteur,
 - o la maintenance du circuit de frein,
 - o les pneumatiques,
 - o les plaquettes de frein,
 - o le filtre à pollen,
 - o la recharge de la climatisation,
 - o ...
- les éventuels avantages (Fr_{bonus} ; bonus/malus),
- la valeur résiduelle de la batterie ($V_{r_{batterie}}$),
- la valeur résiduelle du véhicule ($V_{r_{véhicule}}$, hors batterie pour le VUE-Flex).

Après avoir recueilli les informations concernant les dépenses, le TCO est calculé en sommant les dépenses totales effectuées en lien avec le véhicule électrique et en retranchant les valeurs résiduelles du véhicule et de sa batterie (III-1).

$$TCO(t) = \sum dépenses(t) - V_{r_{véhicule}}(t) - V_{r_{batterie}}(t) \quad \text{(III-1)}$$

$$\sum dépenses(t) = Pr_{ach}(t) + Fr_{imm}(t) + Fr_{ener}(t) + Fr_{ent}(t) + Fr_{bonus}(t) \quad \text{(III-2)}$$

Le calcul consiste à prendre en compte l'ensemble des dépenses (et gains) qui ont lieu durant la vie du véhicule (III-2). Ces coûts sont calculés mensuellement dans notre étude et peuvent être répartis sur le temps de possession du véhicule pour évaluer un TCO mensuel équivalent qui serait, par exemple, le montant minimum requis pour une location du véhicule. La Figure III-1 détaille la répartition des différentes dépenses et valeurs résiduelles en fonction du temps. Le prix d'investissement reprend l'ensemble des dépenses qui interviennent



initialement, lors de l'achat du véhicule. Les frais liés à l'utilisation d'énergie (Fr_{ener}) ainsi que les frais d'entretien (Fr_{ent}) sont calculés tout au long de la durée de détention du véhicule. Les dépenses cumulées liées à l'énergie vont croître progressivement (courbe bleue de la Figure III-1). Les frais d'entretien sont des frais périodiques qui laissent apparaître une courbe de dépenses en escalier (courbe jaune de la Figure III-1).

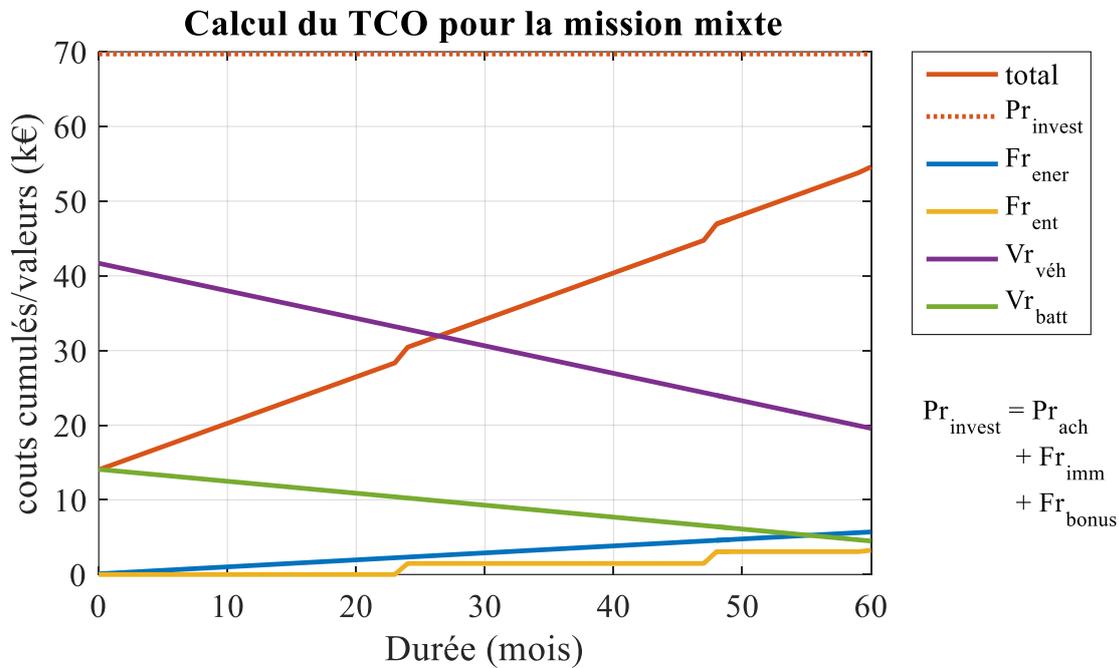


Figure III-1 : détail des dépenses comptabilisées dans le calcul du TCO

Concernant le coût résiduel de la batterie et du véhicule (courbes verte et violette de la Figure III-1), le service commercial et marketing de GRUAU a souhaité que l'étude soit réalisée sur la base de calcul de « l'Avere-France » [45]. L'hypothèse retenue est que la valeur résiduelle d'une batterie dépend de son état de santé. Ainsi une batterie qui serait vieillie de 10% au bout d'un an aura perdu deux fois plus de valeur qu'une batterie qui aurait perdu seulement 5% de sa capacité en un an. L'hypothèse retenue est qu'une batterie en fin de vie, soit à 80% de son état de santé, vaudra 30% de son prix d'achat. Cette valeur de 30% correspond à la revente d'une batterie vieillie qui sera possiblement recyclée pour d'autres applications. Cette valeur est considérée comme pessimiste par le document d'étude [45], notre calcul serait donc plus sévère. Aussi, une hypothèse de décote après achat est faite, ce qui se traduit par une revente de la batterie sans vieillissement à 80% de son coût d'achat. Le calcul du coût résiduel de la batterie se calcule ainsi, comme décrit dans l'équation (III-3).

$$V_{batterie}(t) = Pr_{batt} \cdot \left(0.8 + SOH(t) \cdot \frac{80 - 30}{100 - 80} - 2.5 \right) \quad (III-3)$$

Pr_{batt} : Prix d'achat de la batterie neuve.

Dans le cas où la durée de vie de la batterie considérée est de 5 ans, l'expression de la valeur résiduelle de la batterie peut s'exprimer par une fonction linéaire du temps, comme décrit dans l'équation (III-4).

$$V_{r_{batterie}}(t) = Pr_{batt} \cdot \left(0.8 - t \cdot \frac{0.8 - 0.3}{3600 * 24 * 5 * 365.25} \right) \quad (\text{III-4})$$

Pour l'heure, le client n'a pas un accès direct à l'état de santé du véhicule. Le client sait uniquement que sa batterie est en fin de vie lorsque le véhicule tombe en panne ou affiche une alerte de maintenance sur la batterie. De ce fait, il est difficile pour le moment d'avoir l'évolution du SOH de la batterie. Par défaut, le client considèrera la donnée de garantie pour estimer le vieillissement de la batterie. La batterie est garantie pour 5 ans. Le SOH peut alors être considéré linéaire sur la période de garantie avec un SOH de 80% atteint à 5 ans, ce qui se traduit par l'équation (III-5).

$$SOH(t) = 100 - \frac{20 \cdot t}{5 * 365.25 * 24 * 3600} \quad (\text{III-5})$$

La valeur résiduelle du véhicule est estimée de manière linéaire, avec une valeur résiduelle de 80% du prix d'achat pour un véhicule juste acquis et 45% de son prix d'achat au bout de 48 mois (III-6) [45]. Cette loi de calcul de décote du véhicule représente une approche simplifiée de la réalité qui pourra éventuellement être améliorée dans une étude complémentaire et après retour d'expérience. Cette loi déjà utilisée dans une autre étude permettra au service Commercial d'avoir un calcul comparable.

$$V_{r_{véhicule}}(t) = (Pr_{ach} - Pr_{batt}) \cdot \left(SOH(t) \cdot \frac{80 - 45}{100 - 80} - 2.5 + 0.8 \right) \quad (\text{III-6})$$

Le même calcul de TCO est réalisé avec un véhicule utilitaire thermique équivalent afin d'avoir un élément de comparaison de la rentabilité du véhicule utilitaire électrique flexible. L'idée est de connaître, pour un parcours donné, le temps au bout duquel l'électrique devient plus avantageux que le thermique. La méthode est exactement la même hormis le calcul de la valeur résiduelle du véhicule qui est considérée comme valant 35% de son prix d'achat au bout de 48 mois au lieu de 45% (III-7).

$$V_{r_{véhicule}}(t) = Pr_{ach} \cdot \left(0.8 - t \cdot \frac{0.8 - 0.35}{3600 * 24 * 4 * 365.25} \right) \quad (\text{III-7})$$

La Figure III-2 représente l'évolution du TCO calculé par le logiciel, pour un véhicule avec les paramètres de base (batterie de 38.4 kWh), effectuant la mission mixte.



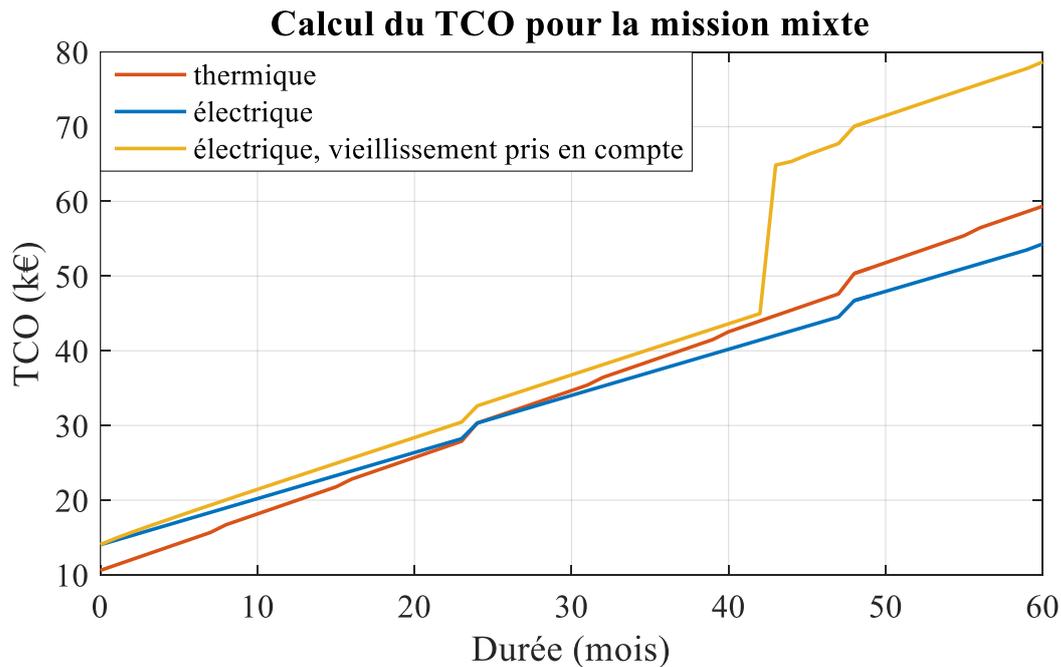


Figure III-2 : Comparaison du TCO entre électrique et thermique pour la mission mixte

Trois courbes sont représentées sur la figure et correspondent au véhicule électrique en bleu et au véhicule thermique en rouge. La courbe bleue représente le résultat du calcul de TCO pour un véhicule électrique avec comme hypothèse de durée de vie, la durée de vie constructeur, soit 5 ans. A l'inverse, la courbe en jaune représente le TCO du véhicule électrique pour une durée de vie de la batterie calculée par le modèle de vieillissement, soit 43 mois de durée de vie. La valeur initiale des courbes correspond au montant dépensé pour l'achat moins le prix de revente estimé. Les différents sauts de TCO qui se produisent à 24 et 48 mois correspondent à des révisions périodiques. Ces coûts de maintenance sont plus élevés pour le véhicule thermique équivalent dont la maintenance du moteur thermique est nécessaire. De plus des maintenances sur le véhicule thermique apparaissent aussi tous les 8 mois et correspondent à la vidange du moteur. Le résultat du TCO électrique avec la durée de vie constructeur (60 mois) devient plus rentable que le thermique au bout de deux ans d'utilisation sur le parcours mixte. Sur le calcul de TCO du véhicule électrique avec prise en compte de la durée de vie (courbe jaune), la durée de vie de la batterie (43 mois) impose que celle-ci soit changée pour continuer d'utiliser le véhicule. Il vient alors une hausse brutale du TCO due à l'achat de cette nouvelle batterie. Dans la plupart des cas, le renouvellement de la batterie de traction rend le véhicule électrique moins rentable que le thermique. C'est pour cette raison qu'il est indispensable de limiter le vieillissement de la batterie pour espérer obtenir un TCO optimal. Le calcul du TCO est directement impacté par le vieillissement de la batterie mais aussi le choix de la capacité et l'utilisation du véhicule, c'est-à-dire son parcours. La partie suivante présente les résultats de calcul de TCO pour les différentes missions retenues (urbaine, mixte et extra-urbaine) sous différentes conditions de température.

III - 2.1 Impact de la mission sur le TCO

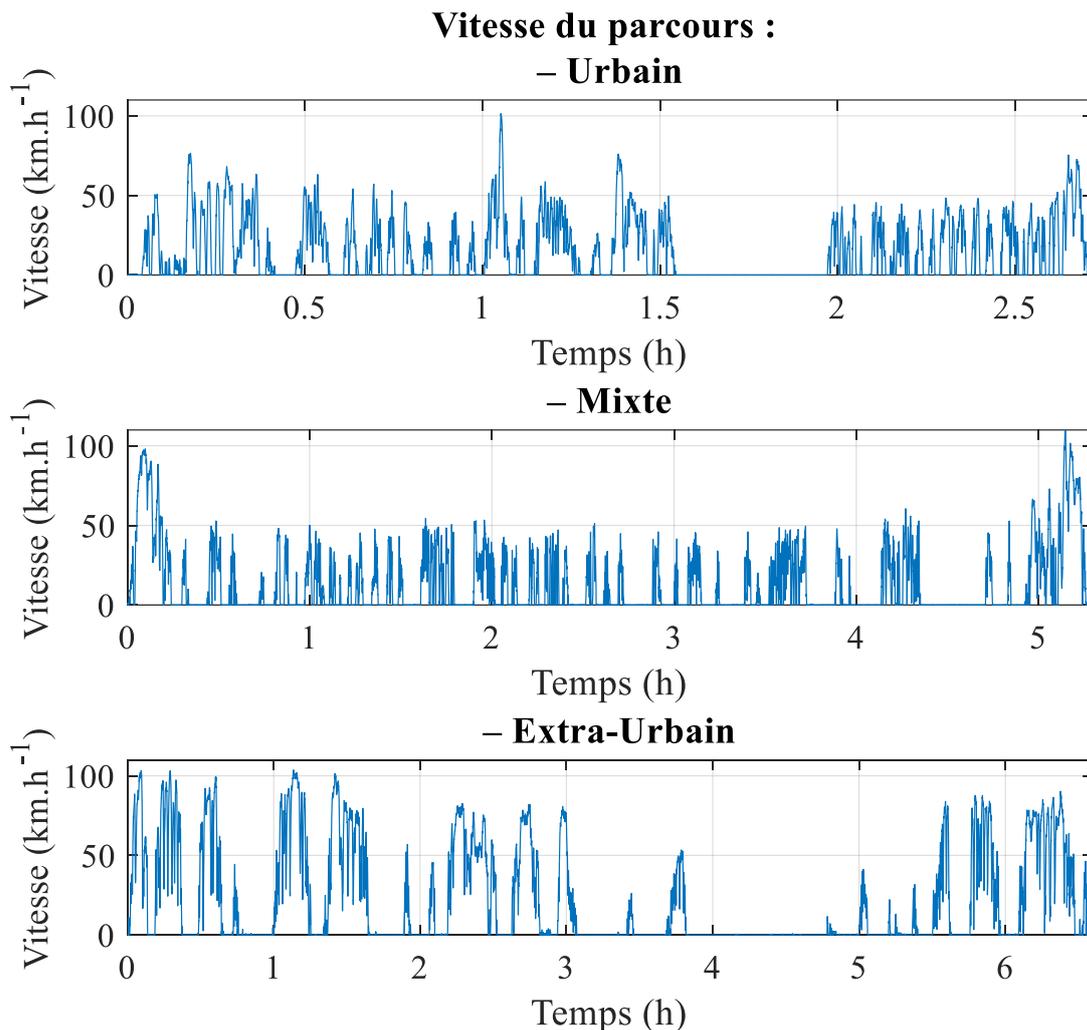


Figure III-3 : Profils de vitesse des missions

Les calculs de durée de vie et de TCO ont été réalisés sur les trois parcours types retenus lors de l'étude des clients. Les paramètres du véhicule ont été choisis identiques pour les trois missions afin de comparer l'impact du parcours sur le TCO, soit un véhicule d'une masse de $3,5t$, utilisé quotidiennement. Les caractéristiques des parcours sont présentés dans le Tableau I-2 du Chapitre I. (Parcours 1 : Parcours urbain ; Parcours 2 : Parcours mixte ; Parcours 3 : Parcours extra-urbain). Le parcours urbain a une distance de $41km$, le parcours mixte $67km$ et le parcours extra-urbain $140km$. Le parcours extra-urbain admet des niveaux de vitesses et de puissances supérieurs par rapport au parcours mixte qui admet lui-même des niveaux supérieurs au parcours urbain. Pour chaque parcours, les simulations de roulage avec calcul de durée de vie puis TCO ont été effectuées avec 3 capacités (correspondants à celles présentes au catalogue du véhicule électrique utilitaire) et 3 températures extérieures différentes ($10^{\circ}C$, $25^{\circ}C$ et $37^{\circ}C$).



III - 2.1.1 Calcul du vieillissement en fonction de la mission

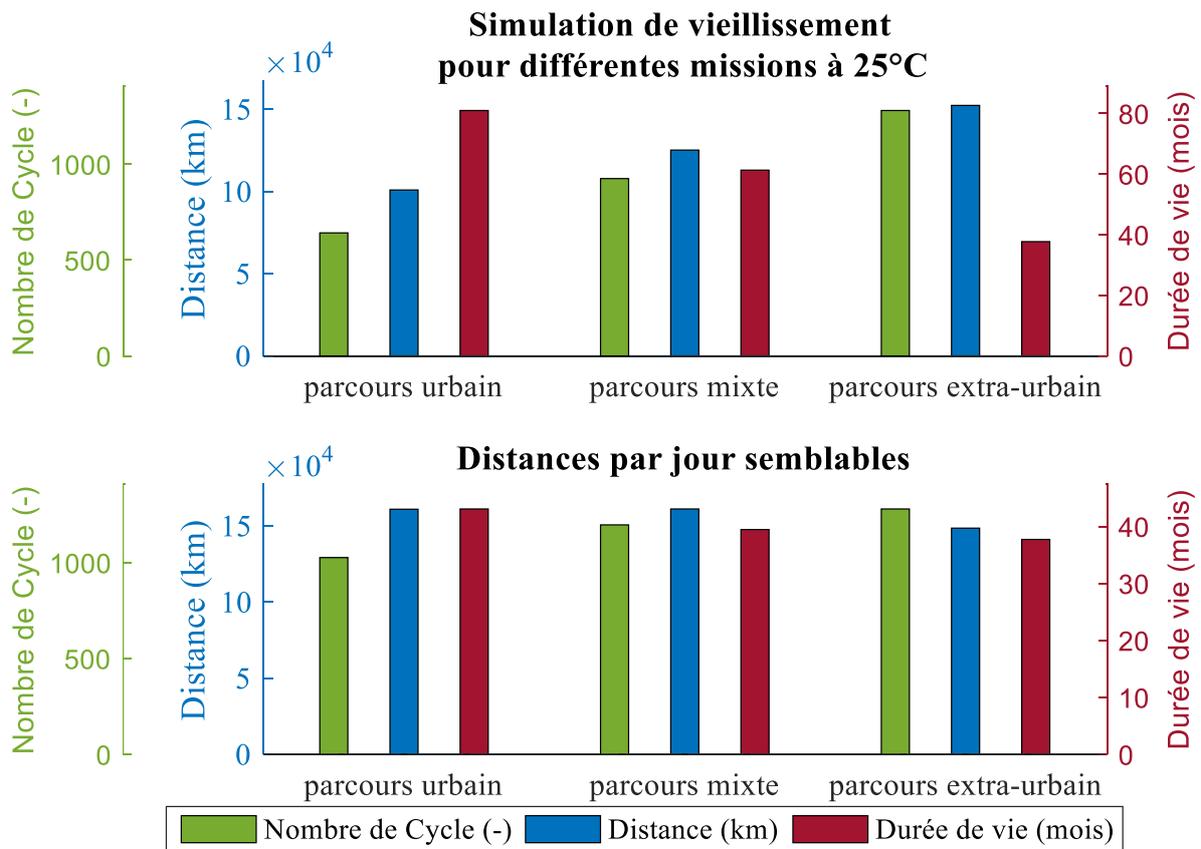


Figure III-4 : Simulations de vieillissement en fonction de la mission, à 25°C

La Figure III-4 résume l'impact de la mission sur le vieillissement des batteries. Chaque simulation est basée sur une mission correspondant à un parcours par jour. Le véhicule est considéré branché à sa borne de charge en fin de parcours et ce jusqu'au lendemain. La recharge s'effectue jusqu'à ce que la batterie soit totalement rechargée. Sur la partie supérieure de la Figure III-4, il apparaît que la durée de vie des batteries, représentée par les barres rouges du diagramme, est plus longue pour la mission urbaine que la mission extra-urbaine avec un rapport proche de deux. Cependant, la distance parcourue et le nombre de cycle sont deux fois plus faibles pour la mission urbaine que pour la mission extra-urbaine. En l'état, il est possible de conclure sur le fait que plus la distance et le nombre de cycles sont importants, plus la durée de vie diminue. Néanmoins, le ratio entre le nombre de kilomètres et le nombre de cycles est différent en fonction du type de parcours Tableau III-1. (Un cycle correspond à une charge/décharge complète. Une charge/décharge de 50% de SOC est comptée comme un demi-cycle.)

Avec le même nombre de cycles, il est possible d'effectuer plus de kilomètres sur le parcours urbain que sur le parcours extra-urbain étant donné que les niveaux de puissances sont plus faibles. Le calcul du nombre de kilomètres par cycle montre également que le parcours

extra-urbain est trop long compte tenu de la consommation et de l'autonomie induite. Cependant le parcours en question se prête à une possibilité de recharge à mi-parcours.

Tableau III-1 : Nombre de kilomètres par cycle et consommation pour les différentes missions

Type de parcours	Ratio (km/cycle)	Consommation (kWh/100km)
Parcours urbain	157	36.7
Parcours mixte	135	42.7
Parcours extra-urbain	119	48.4
Parcours mixte x2	135	42.7
Parcours urbain x3	157	36.7

Afin de vérifier l'impact de la dynamique du type de parcours sur le vieillissement, des simulations complémentaires ont été réalisées. L'idée est de réaliser trois fois le parcours urbain par jour et deux fois le parcours mixte afin d'avoir pour chaque mission des distances journalières parcourues qui soient comparables (3 fois le parcours 1 : 125km ; 2 fois le parcours 2 : 136km ; parcours 3 : 144km). Le calcul du ratio entre le nombre de kilomètres parcourus et le nombre de cycles reste bien le même en augmentant la fréquence journalière des parcours mixte et urbain. De plus, la partie inférieure de la Figure III-4 met en évidence le fait que la durée de vie du parcours urbain est toujours supérieure à celle du parcours extra-urbain, pour des distances parcourues similaires. La différence de durée de vie laisse apparaître que la batterie ayant subi la mission urbaine perd moins de capacité. En d'autres termes, ce résultat confirme bien que les puissances plus élevées vont conduire à des dégradations plus importantes de la batterie. En effet, lors de l'étude du vieillissement en cyclage de la batterie, il a été constaté que le courant a un impact direct sur la dégradation des cellules : plus le courant est important et plus la dégradation de la cellule augmente. A partir du calcul de vieillissement de la batterie et de la consommation en énergie du parcours, il est maintenant possible de calculer le TCO afin de vérifier les résultats d'un point de vue économique.

III - 2.1.2 Calcul du TCO en fonction de la mission

La Figure III-5 représente l'évolution du coût global de possession du véhicule utilitaire électrique pour chacune des 3 missions à 25°C. Les calculs sont faits sur dix années de possession du véhicule. En fin de vie de la batterie, celle-ci est remplacée et ce coût s'ajoute au TCO. Il apparaît donc un saut de TCO positionné tous les 38, 61 ou 80 mois, en fonction de la mission, soit respectivement pour le parcours urbain, mixte ou extra-urbain. Ainsi plus la vitesse et le nombre de kilomètres sont élevés, plus le TCO augmente rapidement. Cependant, sur cette courbe n'apparaît pas le taux de service rendu par la possession du véhicule. En effet, sur le parcours urbain choisi, le véhicule est moins utilisé en terme de kilomètre, donc il est normal que son coût de revient soit plus bas. Il est donc intéressant de faire intervenir le nombre de kilomètres parcourus pour mesurer si cette différence de TCO se justifie et pour déterminer quelle est la mission la plus rentable pour l'utilisation de ce VUE.



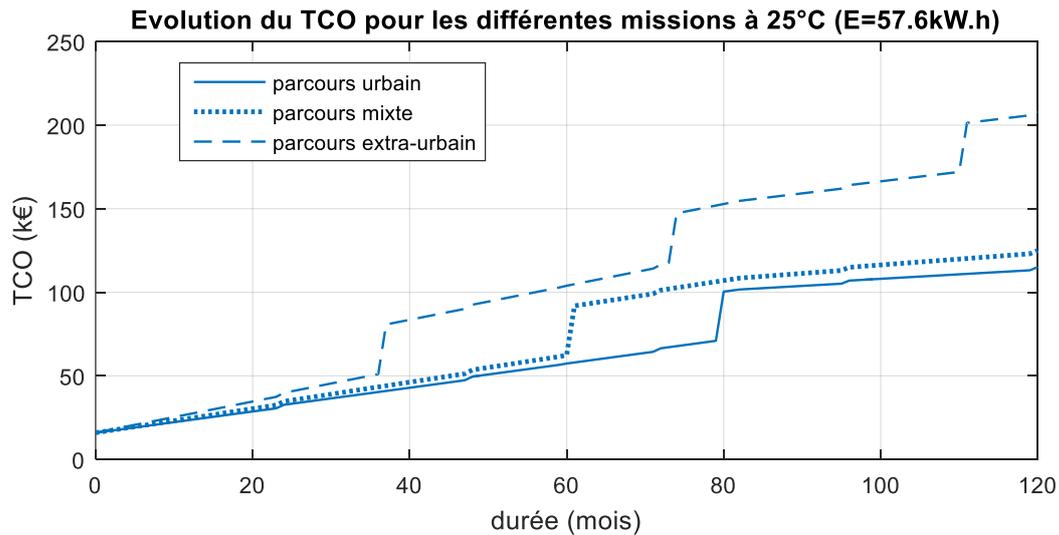


Figure III-5 : Evolutions des TCO des trois missions retenues à 25°C en fonction du temps

Pour cela, les résultats de TCO vont être exprimés par la suite en fonction du kilométrage.

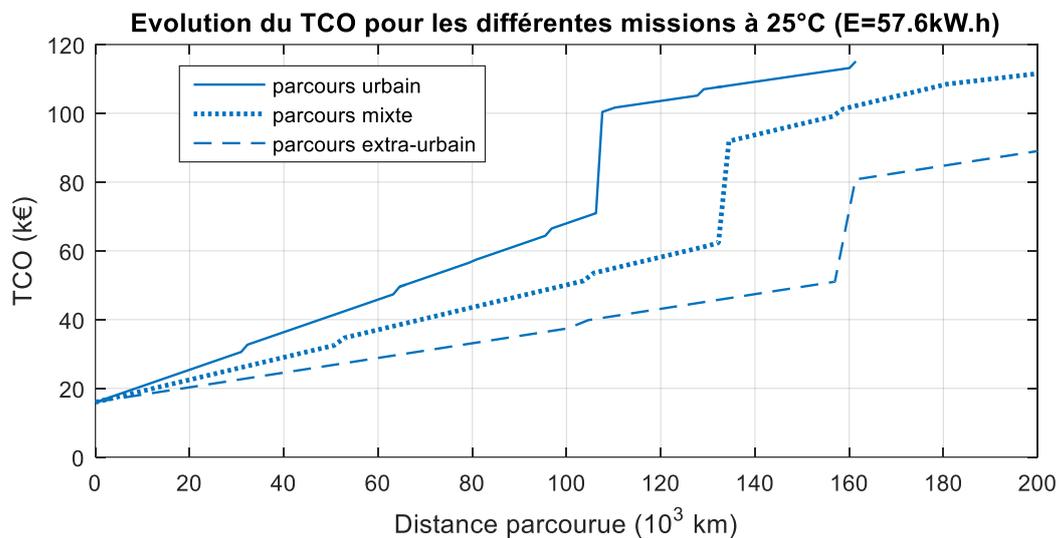


Figure III-6 : Evolutions des TCO des trois missions retenues à 25°C en fonction du kilométrage

La Figure III-6 démontre l'importance de la prise en compte du kilométrage et de la nature de la mission. Ainsi, dans notre cas, la mission la plus longue réalisée en milieu extra urbain, permet d'obtenir un niveau de TCO par kilomètre bien plus faible. L'écart est de 31k€ entre le parcours urbain et le parcours extra-urbain pour un même nombre de kilomètre parcouru (100'000km). La distance du parcours a donc une importance forte sur les résultats de rentabilité du véhicule. Il en ressort que la rentabilité du VUE dépend avant tout de son taux d'utilisation. Dans notre étude, bien que le parcours urbain soit moins énergivore, le fait qu'il soit plus court en distance journalière le rend moins rentable. Cet effet de la distance peut également être interprété comme la prépondérance du vieillissement calendaire par rapport au vieillissement en cyclage. En effet pour un kilométrage identique, l'utilisateur est en possession

de son véhicule sur une plus longue période pour le parcours urbain, entraînant naturellement une dégradation calendaire plus importante que sur le parcours extra-urbain. Le vieillissement est également sensible à la température et son effet est différents suivant qu'il soit de nature calendaire ou en cyclage. Les calculs sont maintenant réitérés pour des températures moyennes de 10°C et 37°C afin de mesurer l'impact de la température sur les résultats.

III - 2.2 Impact de la température sur le TCO

III - 2.2.1 Calcul du vieillissement en fonction de la température

La température est un facteur d'ordre principal en ce qui concerne la dégradation calendaire. Ainsi pour des températures inférieures à 12°C, le vieillissement calendaire est très faible. Pour des températures plus élevés, le vieillissement calendaire augmente rapidement. Malgré un impact moins important, le niveau de SOC est également un facteur de vieillissement calendaire non-négligeable. Concernant le vieillissement en cyclage, la dégradation de la cellule augmente avec le courant et cette augmentation est d'autant plus importante que la température est basse.

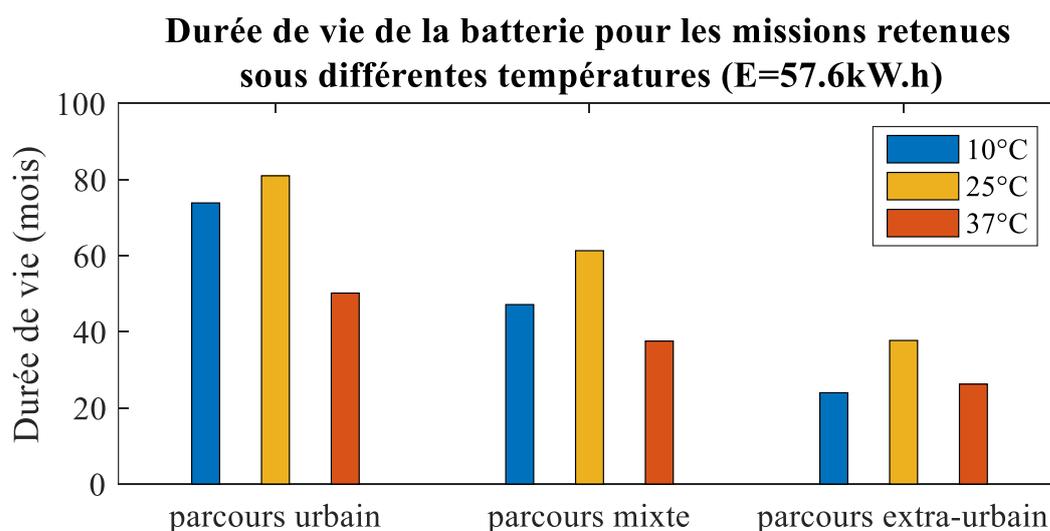


Figure III-7 : Simulations de vieillissements en fonction de la température

La Figure III-7 représente la durée de vie de la batterie en fonction du parcours et de la température. L'écart relatif entre les durées de vie à 25°C et 37°C est plus grand pour la mission urbaine que pour la mission extra-urbaine. En effet, comme la mission urbaine est trois fois plus courte en distance que la mission extra-urbaine, la proportion de la dégradation due au vieillissement calendaire est plus importante sur la mission urbaine. De plus, le niveau de SOC en fin de mission reste élevé, autour de 70%, alors que celui de la mission extra-urbaine est bas autour de 10%. Ainsi, par interprétation des résultats de vieillissement calendaire, la



dégradation est plus forte à des niveaux de SOC élevés. C'est donc un argument supplémentaire qui justifie un écart relatif plus important pour la mission urbaine.

A l'inverse, à basses températures, le vieillissement calendaire est faible mais le vieillissement dû au cyclage s'accélère, spécifiquement pour des niveaux de courants élevés. La mission extra-urbaine induit justement par sa dynamique et sa vitesse moyenne, des courants plus importants dans la batterie. C'est pourquoi, les basses températures ont un impact bien plus important sur le parcours extra-urbain que sur le parcours urbain par observation l'écart relatif de durée vie entre 25°C et 10°C.

Les résultats obtenus par simulation pour les différentes missions et températures se justifient grâce à la modélisation de la batterie. Fort de cela, il est intéressant d'observer comment se propagent ces résultats de durées de vies sur le TCO.

III - 2.2.2 Calcul du TCO en fonction de la température

La Figure III-8 représente l'évolution du TCO en fonction des différentes températures. Pour chaque mission, la température de 25°C permet d'obtenir un TCO par kilomètre minimal. De même, pour chaque mission, une température plus élevée (37°C) rend le VUE moins rentable. L'isolation du point de TCO par km minimum, Figure III-9, qui est obtenu juste avant le remplacement de la batterie, permet de mesurer l'effet de la température sur la rentabilité en fonction du parcours.

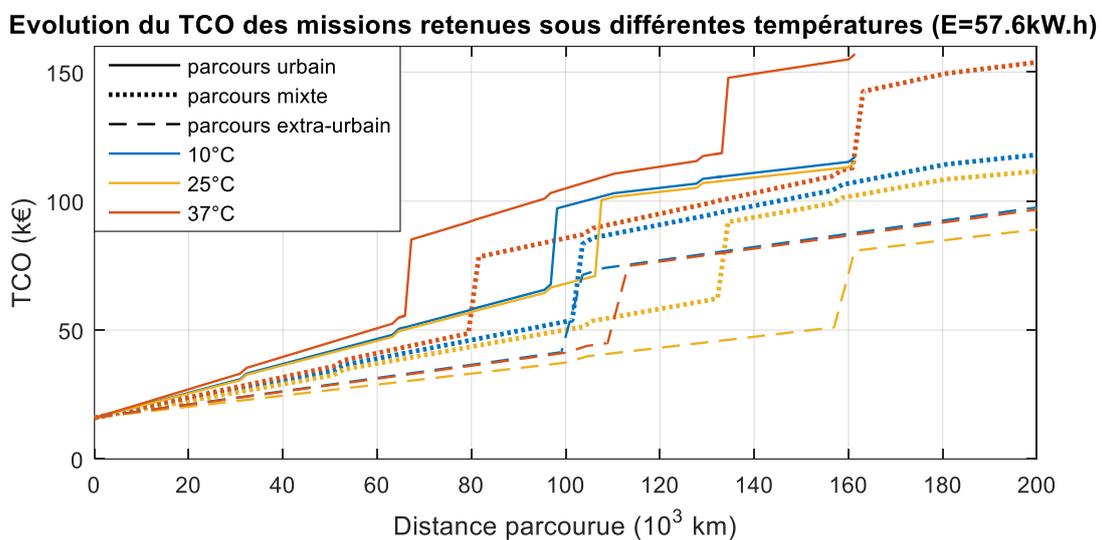


Figure III-8 : Evolutions des TCO des trois missions retenues en fonction du kilométrage pour 10°C, 25°C et 37°C

Les hautes températures ont d'autant plus d'impact sur le TCO que le parcours est faible. En effet, à haute température, l'effet du vieillissement calendaire augmente, et il augmente d'autant plus que le véhicule est à l'arrêt. Or sur un parcours urbain, le véhicule aura un taux

d'utilisation plus faible, c'est pourquoi l'écart de TCO entre la simulation à 25°C et la simulation à 37°C est plus importante que pour le parcours extra-urbain. A l'inverse, à basse température, les courants, qui sont plus élevés sur la mission extra-urbaine viennent stresser d'avantage la batterie et la faire vieillir plus rapidement que sur la mission urbaine. Ainsi, l'écart entre le TCO à 25°C et celui à 10°C est plus important pour la mission extra urbaine. Les conclusions observées sur la durée de vie se retrouvent bien sur le TCO.

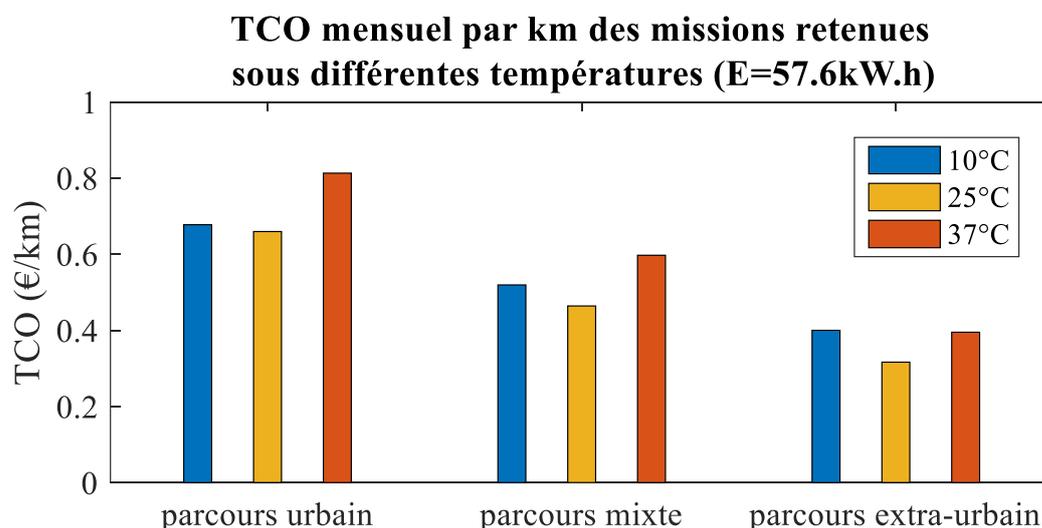


Figure III-9 : TCO par km des missions retenues pour 10°C, 25°C et 37°C

De manière plus globale, quelle que soit la température, la mission avec la plus grande distance permet d'obtenir un meilleur TCO. Il semble donc très pertinent d'adopter un VUE pour des parcours de fort kilométrage, dans la limite de la capacité de la batterie. La batterie choisie pour les calculs précédents est la plus grande des capacités disponibles au catalogue actuel du VUE et ne permet pas de satisfaire totalement les besoins en énergie de la mission extra-urbaine choisie. Cependant, cette capacité est surdimensionnée pour la mission mixte qui comprend une distance totale (68.2km) deux fois plus faible que le nombre de kilomètres par cycle qu'il est possible de parcourir (Tableau III-1 : 135km). Elle est d'autant plus surdimensionnée pour la mission urbaine qui a une distance 4 fois plus faible. Il semble intéressant d'étudier l'impact de la capacité sur ces résultats. De plus, une capacité plus faible pour un parcours faible permet d'avoir une profondeur de décharge plus importante. Ainsi, en fin de parcours, le SOC de la batterie sera plus faible, ce qui limitera le vieillissement calendaire. En revanche pour des niveaux de puissance similaires, les courants seront plus importants sur une capacité plus faible ce qui augmentera le vieillissement en cyclage. Il y aura alors une concurrence entre ces deux dégradations.



III - 2.3 Impact de la capacité et dimensionnement de la batterie sur le TCO

III - 2.3.1 Simulations de vieillissement en fonction de la taille de la batterie

Afin de limiter le vieillissement de la batterie, il est important de noter que la capacité de la batterie joue un rôle dans l'équation de dégradation du SOH. Une batterie de capacité supérieure aura une masse plus élevée. D'une part, la mise en mouvement de cette masse additionnelle générera une puissance instantanée plus élevée, soit une consommation d'énergie supplémentaire et un courant plus important pour une tension équivalente (III-8).

$$P_{batt} = U_{batt} \cdot I_{batt} \quad \text{(III-8)}$$

$$P_{batt} = Nb_{cel} \cdot P_{cel} \quad \text{(III-9)}$$

$$P_{cel} = U_{cel} \cdot I_{cel} \quad \text{(III-10)}$$

P_{batt} : puissance électrique batterie (W), U_{batt} : tension batterie (V), I_{batt} : courant batterie (A), Nb_{cel} : nombre de cellule, P_{cel} : puissance électrique de la cellule (W), U_{cel} : tension cellule (V), I_{cel} : courant cellule (A).

D'autre part, une capacité de batterie supérieure implique un plus grand nombre de cellules (Nb_{cel}) dans le pack batterie, soit une puissance par cellule (P_{cel}) plus faible (III-9). Le courant de chaque cellule (I_{cel}) sera alors plus faible (III-10), à iso-tension (U_{cel}). Sur l'exemple d'une batterie délivrant une puissance $P_{batt} = 3W$, composée d'une cellule électrochimique de tension $U_{cel} = 3V$, le courant traversant la cellule sera alors $I_{cel} = 1A$ d'après (III-9) et (III-10). Cependant si la capacité est doublée en mettant deux cellules en parallèle ($Nb_{cel} = 2$), le courant sur chaque cellule sera alors de $I_{cel} = 0.5A$ pour la même puissance totale (P_{batt}). Ainsi, le surdimensionnement de la batterie peut réduire les courants de chaque cellule en conservant les mêmes performances.

Il y a une concurrence entre les deux effets de l'augmentation de la capacité : l'augmentation de la puissance globale et la répartition du courant dans un plus grand nombre de cellule. La masse de la batterie représente jusqu'à 22% de la masse totale du véhicule.

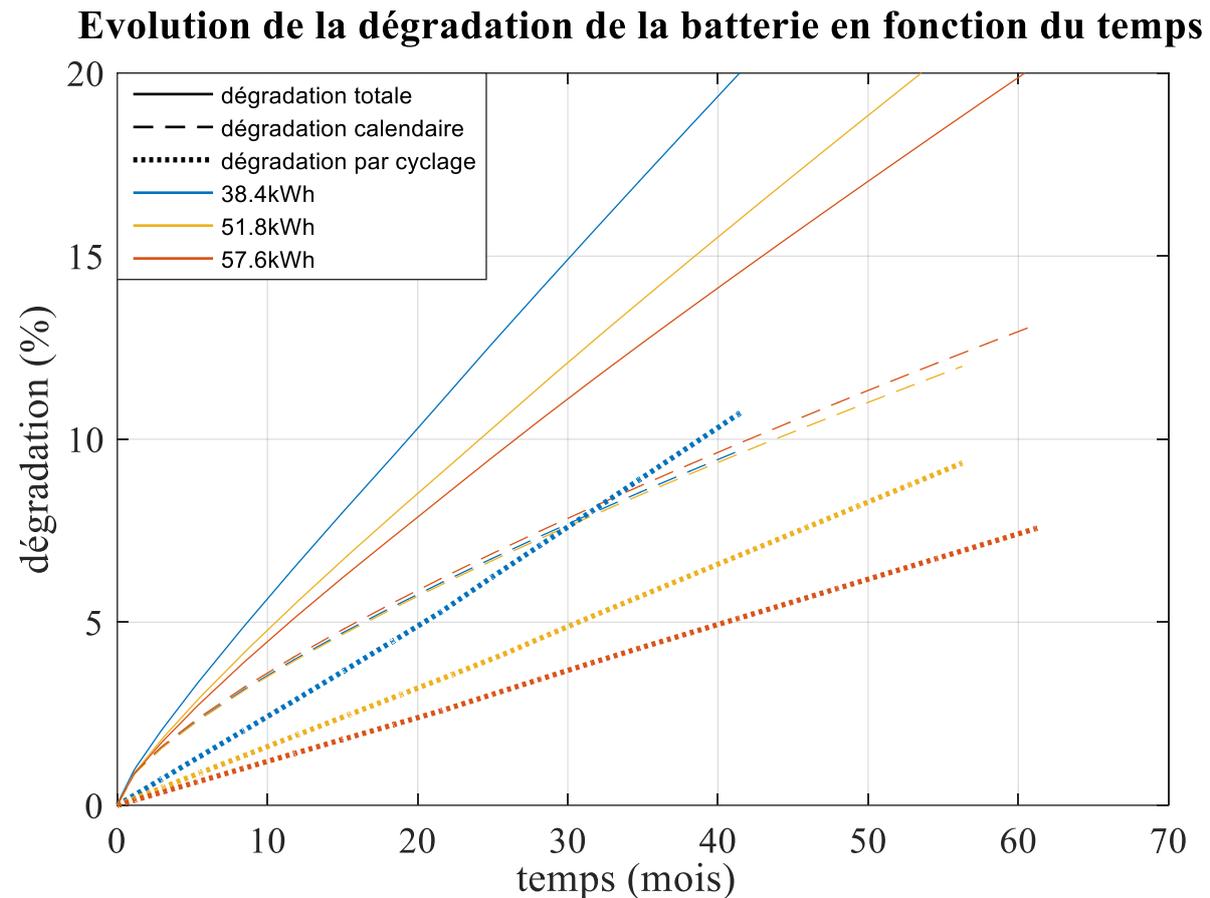


Figure III-10 : Simulation de dégradation de la batterie sur le parcours mixte à 25°C en fonction de la capacité

La Figure III-10 présente les simulations de dégradation de la batterie, avec le détail entre la partie calendaire et la partie en cyclage. L'étude est faite pour la mission mixte, à 25°C, en fonction des trois capacités proposées au catalogue du VUE. La distance parcourue est proportionnelle à la durée de vie car la distance journalière reste la même. L'analyse des évolutions des dégradations permet d'observer que pour une même mission, dans les mêmes conditions mais avec des capacités différentes, la dégradation calendaire suit une évolution identique. La température ambiante est choisie constante pour ces simulations, or c'est le facteur qui a le plus d'impact sur le vieillissement calendaire. Celui-ci étant constant, les variations de température sur les cellules sont suffisamment similaires pour que la dégradation calendaire ne soit que peu modifiée. De faibles variations de dégradation, selon la capacité, sont tout de même perceptibles et dues également à des variations de SOC différentes. Le second facteur qui impacte le vieillissement en calendaire est en effet le niveau de SOC. Pour la partie cyclage, il est fortement visible que l'augmentation de la capacité entraîne, dans ce cas, une diminution de la dégradation en cyclage. Ceci est dû à une diminution des courants sur chaque cellules.



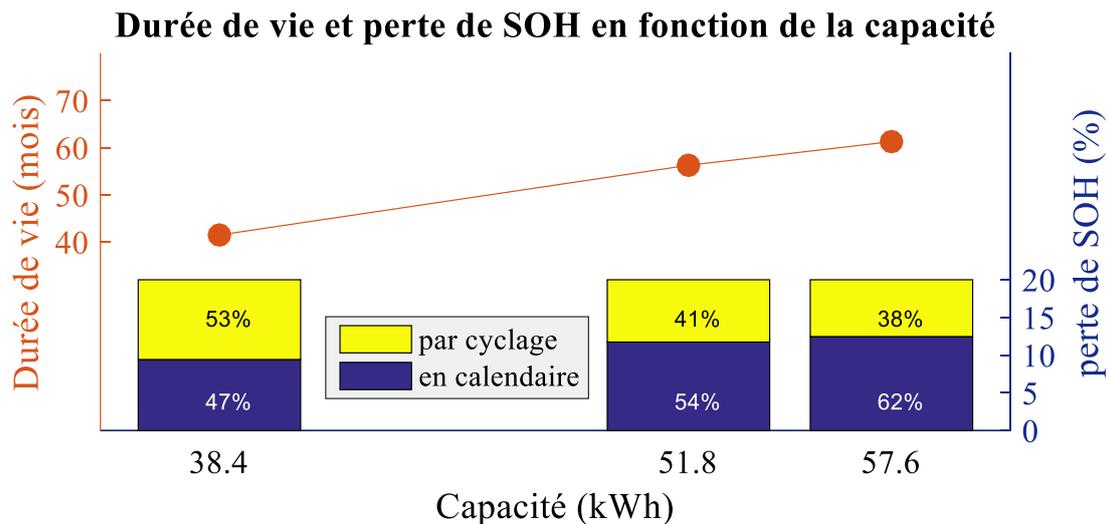


Figure III-11 : Simulation de durée de vie sur le parcours mixte à 25°C en fonction de la capacité

La Figure III-11 résume la Figure III-10 avec les simulations de durées de vie et les ratios entre le vieillissement calendaire et le vieillissement en cyclage pour la fin de vie de la batterie. Dans ce cas d'étude, il apparaît que la surconsommation due à la masse additionnelle embarquée est totalement compensée par la répartition du courant de la batterie sur un plus grand nombre de cellules. Pour une capacité de 38.4 kWh, la part de vieillissement due au cyclage correspond à plus de la moitié de la perte de SOH, contre un tiers environ pour une capacité de 57.6 kWh. La part du vieillissement en cyclage diminue avec des capacités plus grandes et la durée de vie augmente également malgré des niveaux de SOC plus haut. Le vieillissement par cycle diminue pour des capacités plus grandes. Ce qu'il faut retenir de ces résultats est qu'une capacité plus faible, bien que suffisante pour satisfaire les besoins en énergie de la mission, n'est pas la solution qui permet d'obtenir la durée de vie la plus élevée.

Pour améliorer la durée de vie des batteries, il semble intéressant de les surdimensionner. En revanche, une batterie surdimensionnée coûtera plus cher. L'intérêt de gagner en durée de vie a un sens, si et seulement si l'amortissement du véhicule sur un temps plus long permet d'avoir un coût de revient moins cher, et ce malgré l'investissement plus important sur la batterie.

III - 2.3.2 Calcul du TCO en fonction de la capacité

Afin de juger de l'intérêt économique du surdimensionnement, les calculs de TCO sont effectués pour les différentes capacités au catalogue (38.4 kWh, 51.84 kWh et 57.6 kWh), pour chaque mission retenue et sous trois températures.

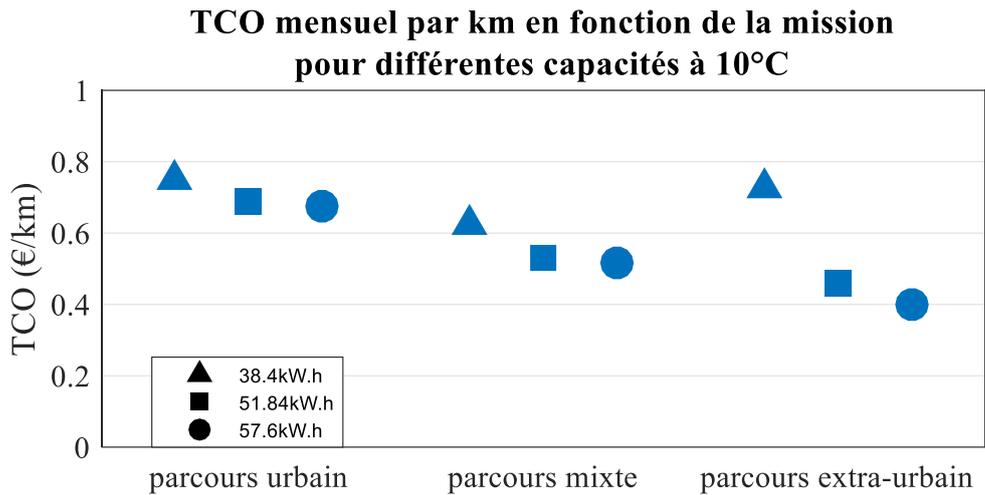


Figure III-12 : TCO par km des missions retenues pour différentes capacités à 10°C

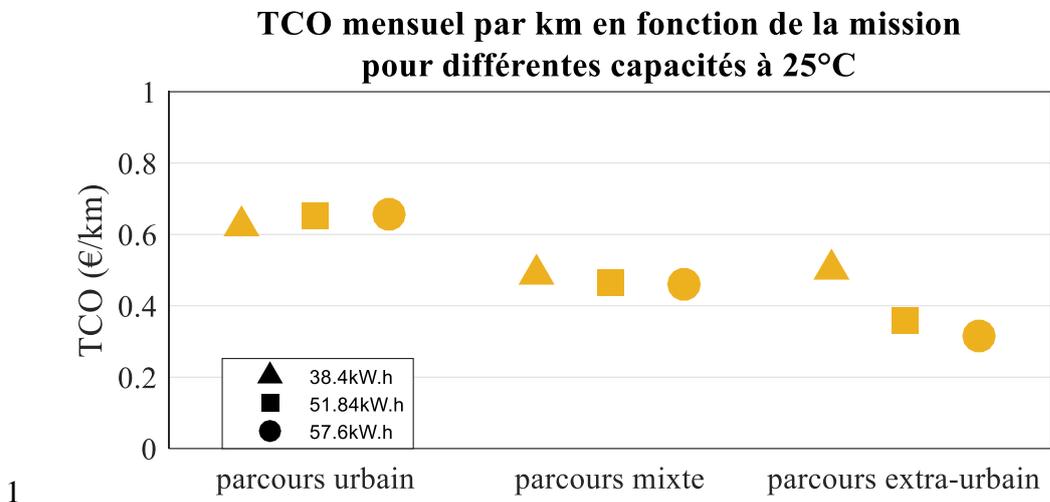


Figure III-13 : TCO par km des missions retenues pour différentes capacités à 25°C

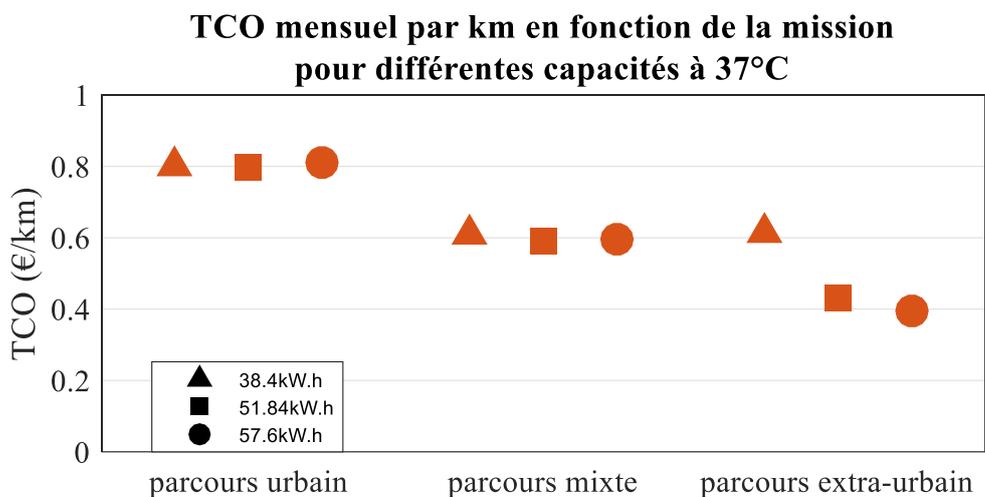


Figure III-14 : TCO par km des missions retenues pour différentes capacités à 37°C



La Figure III-12, la Figure III-13 et la Figure III-14 permettent de comprendre l'impact de la capacité de la batterie. Intuitivement, il est facile de penser qu'une capacité plus faible permettrait d'obtenir un TCO plus bas du fait de la diminution du coût d'investissement sur la batterie. Cependant, cette interprétation ne peut se faire sans prendre en compte l'effet de la capacité de la batterie sur le vieillissement et donc sur le coût résiduel du pack batterie. En effet, à basse température Figure III-12, une capacité plus faible entraîne des courants plus forts dans les cellules de batterie ce qui se traduit instantanément par une accélération du vieillissement et, par conséquent, un TCO plus élevé. Autour de 25°C, Figure III-13, une capacité plus faible a tendance à faire diminuer légèrement le TCO sur le parcours urbain car la profondeur de décharge de la batterie est plus élevée et entraîne une durée de vie plus longue. Pour les différents calculs présentés, il y a concurrence entre les différents phénomènes. En effet, une capacité plus faible permet de diminuer le coût d'investissement, d'augmenter la profondeur de décharge soit diminuer le vieillissement calendaire, mais implique également une augmentation des courants dans les cellules se traduisant par une baisse de la durée de vie. Concernant le parcours extra-urbain, une capacité inférieure à 57.6 kWh ne permet pas la réalisation du parcours complet. Les résultats permettent de comparer l'impact de la capacité de la batterie pour un taux d'utilisation élevé. Pour la capacité la plus faible (38.4 kWh), il apparaît clairement que le parcours mixte, qui a une vitesse moyenne plus faible que le parcours extra-urbain, est plus adapté à cette taille de batterie. Toutefois, en se focalisant sur le parcours mixte, la batterie la plus rentable est celle de capacité intermédiaire suivi de très près par la plus grande capacité. Suivant les températures extérieures d'utilisations du véhicule dans son cycle de vie, la capacité la plus faible peut être plus intéressante d'un point de vue économique pour le parcours urbain.

Ces résultats permettent d'aboutir à la conclusion que, pour le scénario d'utilisation choisi, le choix de la capacité doit se faire en fonction des performances souhaitées pour le parcours. Pour limiter le TCO, plus les accélérations et la vitesse moyenne du parcours sont élevés et plus la capacité de la batterie devra être importante. Aussi, Le taux d'utilisation du véhicule électrique influe fortement sur le TCO. Pour obtenir le meilleur TCO il est préférable d'utiliser le véhicule le plus souvent possible.

III - 3. Optimisation de la capacité

Les calculs sur les trois capacités retenues (correspondantes aux capacités actuellement disponibles sur le véhicule), ne permettent pas d'obtenir le point optimal pour chaque température et mission. Le calcul de la capacité optimale théorique pour chaque parcours et température renseignerait le constructeur du véhicule sur les capacités de batterie qu'il serait utile d'ajouter au catalogue pour avoir une meilleure rentabilité sur le VUE. La Figure III-15 représente l'organigramme de la structure de l'algorithme de calcul du TCO. En fonction de la mission choisie pour les simulations, l'énergie et la puissance nécessaires pour réaliser le parcours sont calculées afin de choisir une capacité initiale de la batterie (suffisamment élevée pour réaliser le parcours). Ensuite le modèle multi-physique de la batterie est utilisé avec le modèle du VUE afin de déterminer le vieillissement de la batterie. La puissance de charge est une donnée d'entrée du modèle de batterie car cette puissance conditionne la vitesse de charge et le courant qui traversera la batterie. En fonction du vieillissement de la batterie calculé (SOH) le calcul du TCO est effectué à partir de la méthode précédemment explicité. L'algorithme d'optimisation de la capacité de la batterie va ensuite agir sur la capacité de la batterie avec comme objectif la minimisation du TCO. L'algorithme d'optimisation utilisé est l'algorithme PSO-NM développé au sein du laboratoire (Annexes A - 3. Algorithme d'optimisation hybride (PSO/NM) [39]).

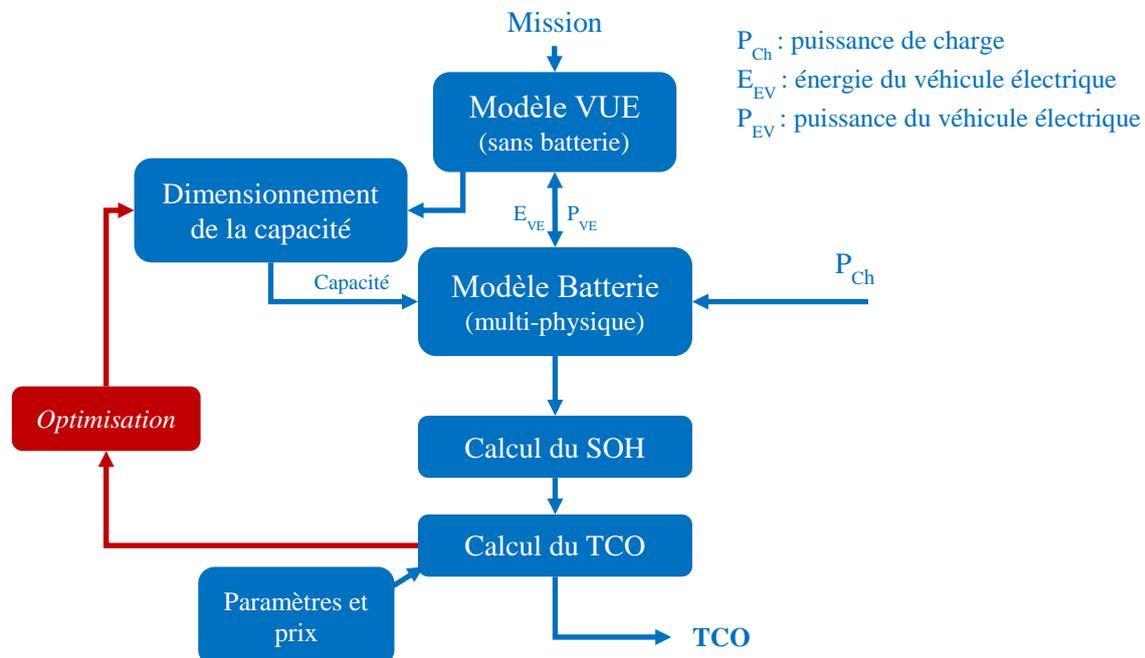


Figure III-15 : Principe de calcul d'optimisation du TCO



Le calcul d'optimisation sur la capacité de la batterie nécessite donc d'effectuer des calculs itératifs sur le TCO. Le temps de calcul de cette optimisation dépend alors du temps de calcul pour une valeur de capacité. Actuellement le temps de calcul est de l'ordre de 15h pour une valeur de capacité. Après plusieurs essais d'optimisation avec l'algorithme choisi (PSO-NM), il apparaît que le logiciel d'optimisation a besoin d'au moins 50 points de calcul pour converger. Dans ces conditions, le temps d'un calcul d'optimisation est alors estimé à plus de 10 jours et n'est pas compatible avec le cahier des charges du logiciel d'aide au dimensionnement du pack batterie souhaité par le service commercial (moins d'un jour). Dans un premier temps, il est possible de s'approcher d'une capacité optimale en utilisant une dizaine de points de calcul répartis uniformément sur la plage de capacité étudiée. Le temps serait réduit à 2 jours ce qui resterait un temps trop élevé.

III - 3.1 Accélération des calculs

Afin d'automatiser les calculs et de pouvoir exécuter des boucles de calculs d'optimisation, il a été nécessaire de minimiser le temps de calcul. En effet, l'objectif est de pouvoir effectuer une étude de la solution qui correspond le mieux à chaque client. Pour se faire, les calculs doivent être faits dans des délais raisonnables, c'est-à-dire quelques minutes pour un calcul, jusqu'à quelques heures au maximum pour une optimisation. Dans l'état actuel des choses, la simulation d'un vieillissement dure environ 15 heures. Une méthode a dû être mise en place pour rendre ces calculs plus rapides, sans compromettre la pertinence des résultats.

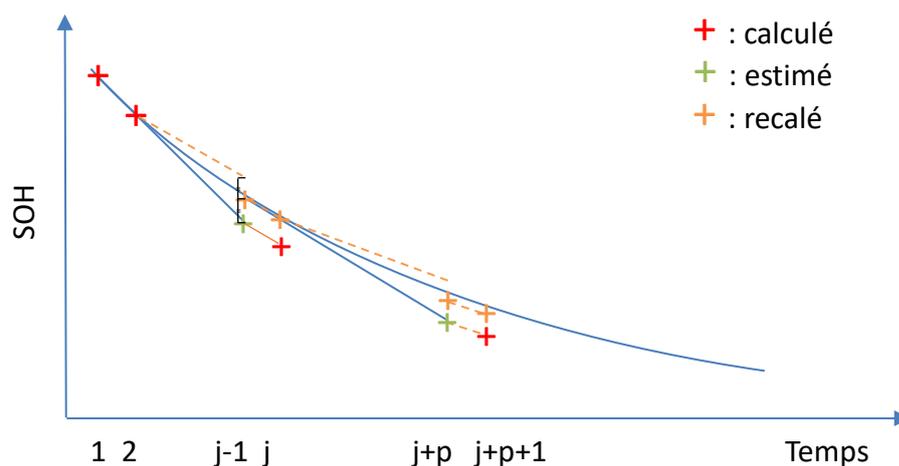


Figure III-16 : schéma de principe de l'accélération des calculs

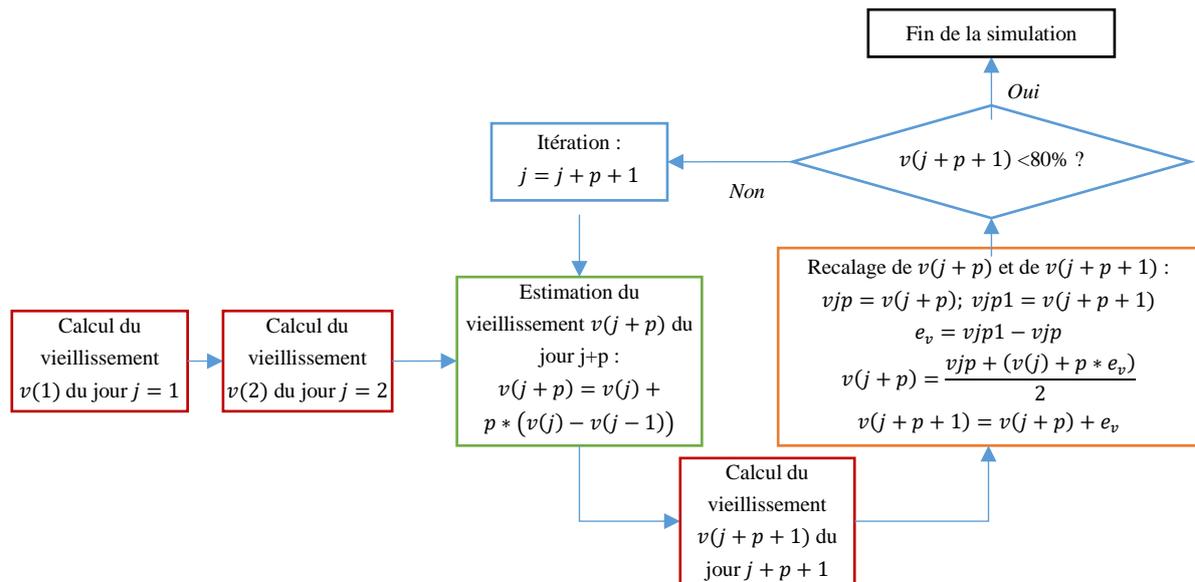


Figure III-17 : Méthode d'accélération des calculs de vieillissement

Un long travail d'accélération des calculs de vieillissement a été mené afin de réduire le temps de calcul à moins de 20 minutes (Figure III-16). Le diagramme de la Figure III-17 présente la méthode utilisée. L'idée retenue est d'estimer linéairement un état futur ($v(j + p)$; croix verte sur la Figure III-16 et étape verte du diagramme Figure III-17) à l'aide de la dégradation calculée entre deux instants ($v(j - 1)$ et $v(j)$; croix rouges sur la Figure III-16 et étape rouge en bas du diagramme Figure III-17). Le vieillissement au temps « $j + p$ » est calculé en ajoutant « p » fois la différence entre les vieillissements $v(j - 1)$ et $v(j)$ au vieillissement du temps « j » ($v(j)$). En considérant ce vieillissement estimé au temps « $j + p$ », l'état de vieillissement du temps suivant ($v(j + p + 1)$) est calculé. Les vieillissements $v(j + p)$ et $v(j + p + 1)$ sont ensuite réajustés (croix orange sur la Figure III-16 et étape orange du diagramme Figure III-17) en fonction de l'écart $e_v = v(j + p + 1) - v(j + p)$. Le réajustement consiste à estimer à nouveau $v(j + p)$ en ajoutant « p » fois la différence e_v à $v(j)$, puis à faire la moyenne des deux valeurs de $v(j + p)$. Cela revient à calculer $v(j + p)$ de manière linéaire à partir de $v(j)$ en utilisant la pente moyenne constatée entre les instants ($j - 1, j$) et ($j + p, j + p + 1$). Enfin, l'état de vieillissement suivant $v(j + p + 1)$ est réajusté en ajoutant l'écart e_v à la nouvelle valeur de $v(j + p)$. Le calcul est ensuite réitéré de la même manière pour les pas suivants jusqu'à l'obtention d'un SOH inférieur à 80%.

Avec cette méthode il est possible d'obtenir une approximation du vieillissement avec un temps de calcul bien plus faible. La Figure III-18 montre l'évolution du temps de calcul par cette méthode d'accélération. Il apparaît que les calculs sont 52 fois plus rapide pour un pas de 100. Les calculs seraient encore plus rapides, jusqu'à 16 fois, pour un pas de 250, cependant, il est important de vérifier l'erreur relative à un calcul effectué avec un pas de 1 (soit sans accélération).



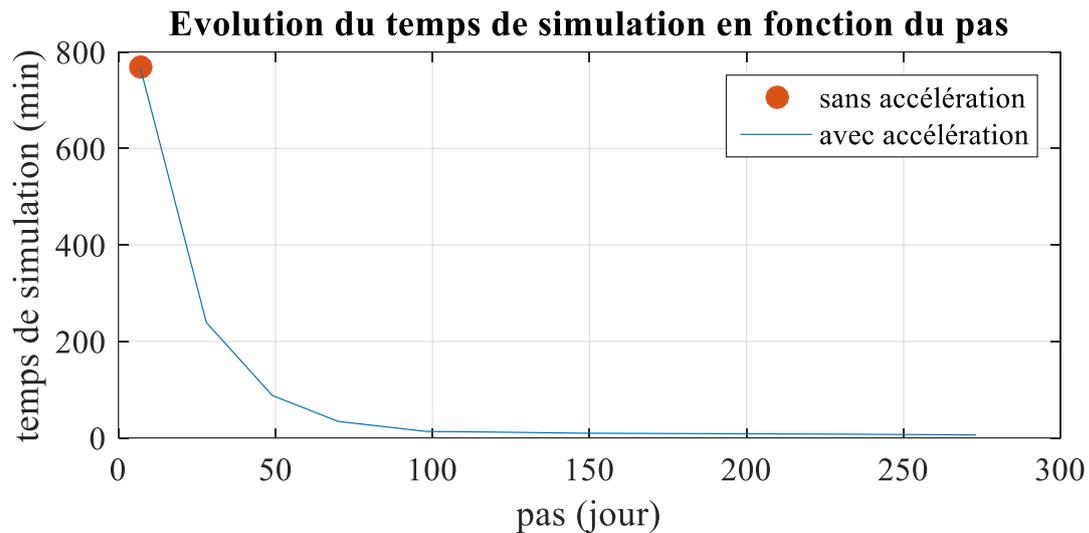


Figure III-18 : Temps de simulation du vieillissement en fonction du pas d'accélération des calculs

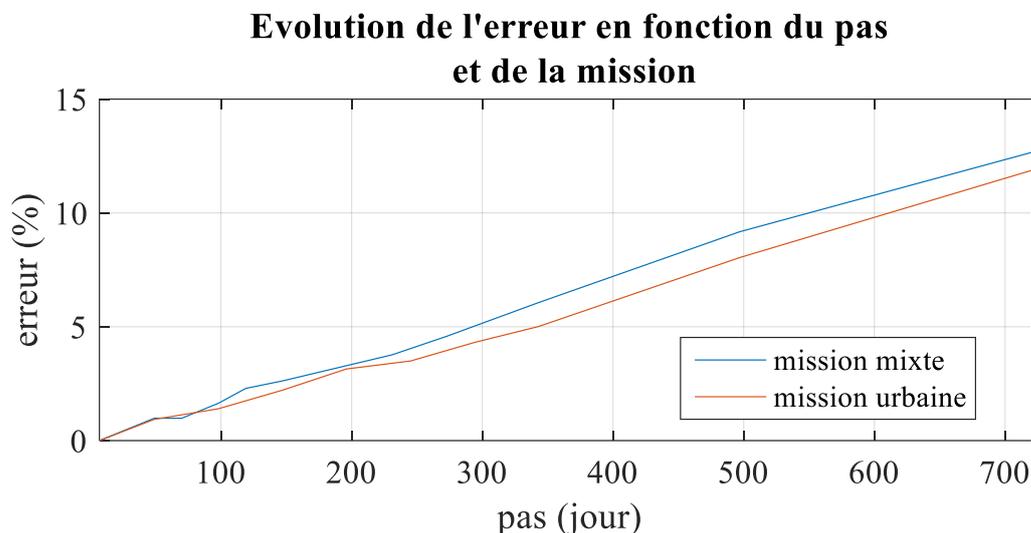


Figure III-19 : Evolution de l'erreur relative du calcul de vieillissement en fonction du pas en jour

Cette méthode donne un résultat ayant une erreur relative inférieure à 2% par rapport au calcul donné, pour une valeur de pas $p \leq 110$, et est considérée satisfaisante pour établir un optimal. La Figure III-19 présente l'évolution de l'erreur relative en fonction du pas d'accélération choisi. Les calculs d'erreur relative ont été effectués pour deux missions afin de vérifier la répétabilité de l'erreur en fonction de la mission. Cette erreur de calcul reste proche pour les deux missions et l'est d'autant plus pour un pas inférieur à 110. Le pas de calcul retenu est de 98. D'une part, il permet d'avoir un temps de calcul pour une simulation proche de 15min (objectif pour effectuer l'optimisation dans un temps raisonnable). D'autre part, c'est un multiple de 7 ce qui permettrait d'effectuer des simulations des missions durant certains jours de la semaines par exemple (notamment la possibilité de ne pas programmer d'activité le samedi et le dimanche).

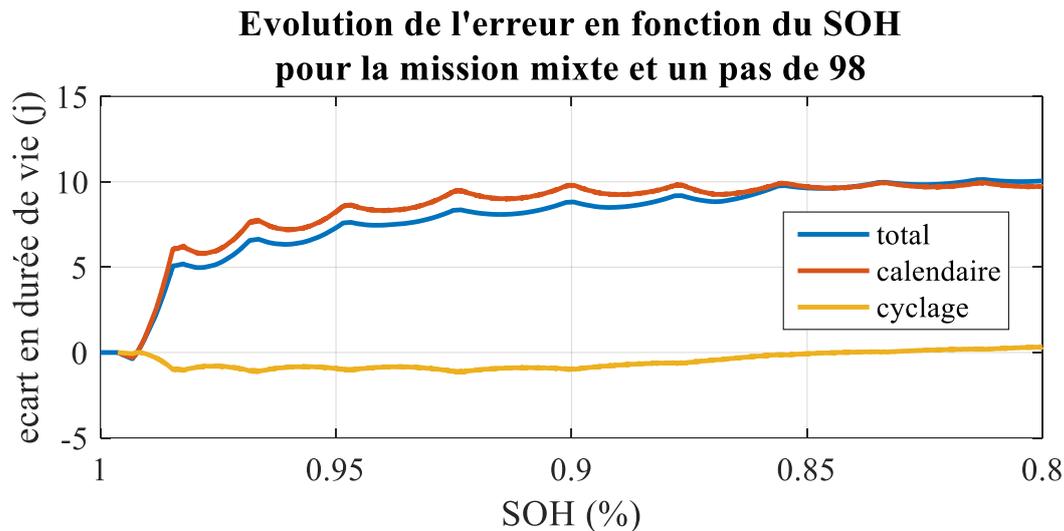


Figure III-20 : Evolution de l'erreur du calcul de vieillissement en fonction du SOH pour un pas de 98

La Figure III-20 détaille, sur un vieillissement de batterie, l'évolution de l'erreur en durée de vie, en fonction de son origine : cyclage ou calendaire. Il apparaît clairement que l'erreur provient essentiellement du vieillissement calendaire. En effet le vieillissement calendaire est la part du vieillissement qui présente le plus de non linéarité. Il est visible sur la Figure III-10 que la partie calendaire présente une variation de pente importante sur le début puis tend à devenir de plus en plus linéaire. Cela s'explique par la formulation du modèle calendaire qui est fonction de la puissance $\frac{1}{4}$ du temps. Le temps de calcul ainsi que l'erreur obtenu par le choix d'un pas de 98 sont satisfaisant pour pouvoir réaliser l'optimisation souhaitée. Néanmoins, dans une perspective d'amélioration du pas de calcul sur cette application précise, il semblerait intéressant de se focaliser sur l'amélioration des calculs sur le début des simulations sur la partie calendaire en introduisant par exemple un pas variable.

III - 3.2 Calculs d'optimisation de la capacité suivant la mission

Fort de cette méthode de calcul, il a été possible d'effectuer dans un temps raisonnable les calculs de dimensionnements optimaux suivant les missions.

III - 3.2.1 Calcul du vieillissement en fonction de la mission et de la capacité

La Figure III-21 représentent l'évolution de la durée de vie des batteries en fonction de la capacité, et ce pour chacune des trois missions. Les calculs d'optimisation ont été réalisés pour une température ambiante de 25°C. L'optimisation de la capacité de la batterie a été bornée



à des capacités comprise entre 30 et 130 kWh. En pratique une capacité inférieure à 30 kWh ne permettrait pas d'obtenir les performances annoncées du véhicule électrique utilitaire, et une capacité supérieure à 80 kWh ne pourrait pas être embarquée sous le véhicule et devrait être placée dans l'espace dédié au chargement du véhicule. Le fait d'augmenter la limite de capacité à 130 kWh permet d'avoir une vision plus large du point optimal théorique de la capacité de la batterie. Les trois courbes de la Figure III-21 de dimensionnement prolongent les résultats trouvés avec les calculs sur les trois capacités disponibles au catalogue. Les résultats montrent que, sur l'ensemble des missions retenues, l'augmentation de la capacité conduit à un prolongement de la durée de vie. Cependant cette augmentation n'est pas linéaire et le taux d'accroissement diminue en fonction de l'augmentation de la capacité. Quelle que soit la capacité, la mission urbaine permet toujours d'obtenir la durée de vie la plus importante. A l'inverse la mission extra-urbaine admet une durée de vie plus faible quelle que soit la capacité. L'allure de l'évolution de la durée de vie en fonction de la capacité est la même pour les trois missions retenues.

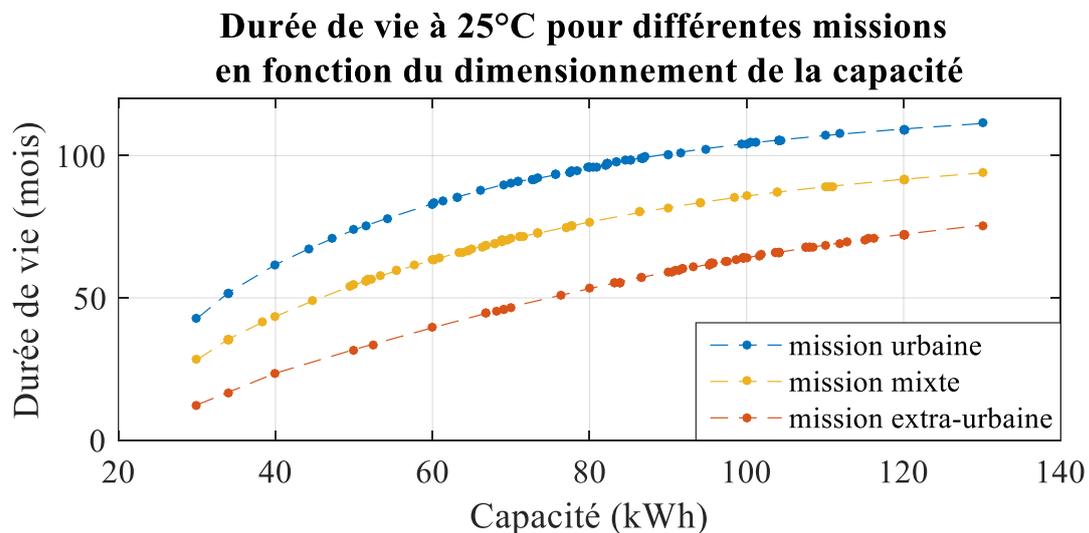


Figure III-21 : Impact du dimensionnement sur le vieillissement à 25°C suivant la mission

Afin de vérifier que les temps de simulation suivent bien les prévisions, les temps de calcul pour chaque point de capacité simulé ont été relevés. La Figure III-22 présente ces temps de simulation pour la mission mixte à 25°C. Par rapport au temps estimé, l'écart aléatoire constaté est assez conséquent pour le point de calcul avec une capacité de 70 kWh : doublement du temps de calcul par rapport au temps estimé. Le temps de simulation est théoriquement proportionnel à la durée de vie : chaque jour simulé correspond à une itération de calcul supplémentaire. Les écarts de temps de calcul observés sont dus au calculateur en lui-même. En effet le calculateur utilisé peut être amené à traiter d'autres tâches en parallèle (telles que des mises à jour logiciel par exemple) ce qui explique un ralentissement du calcul. A l'inverse, des calculs plus rapides sont parfois observés. En effet, le temps de calcul pris pour référence

théorique contient également des tâches en parallèle qui peuvent être potentiellement en veille à certains moments.

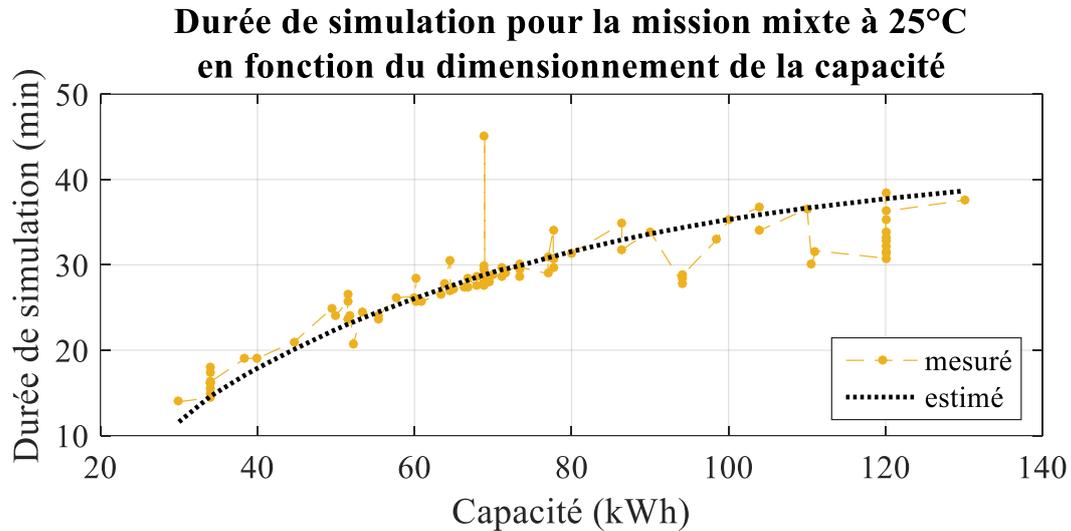


Figure III-22 : Impact du dimensionnement sur le temps de simulation et lien avec la durée de vie

Afin de juger de l'impact de la capacité sur le coût de revient global, et compte tenu du prix croissant de la batterie avec l'augmentation de la capacité, il est maintenant intéressant de calculer le TCO pour vérifier si celui-ci a bien tendance à diminuer avec l'augmentation de la durée de vie.

III - 3.2.2 Calcul du TCO en fonction de la mission et de la capacité

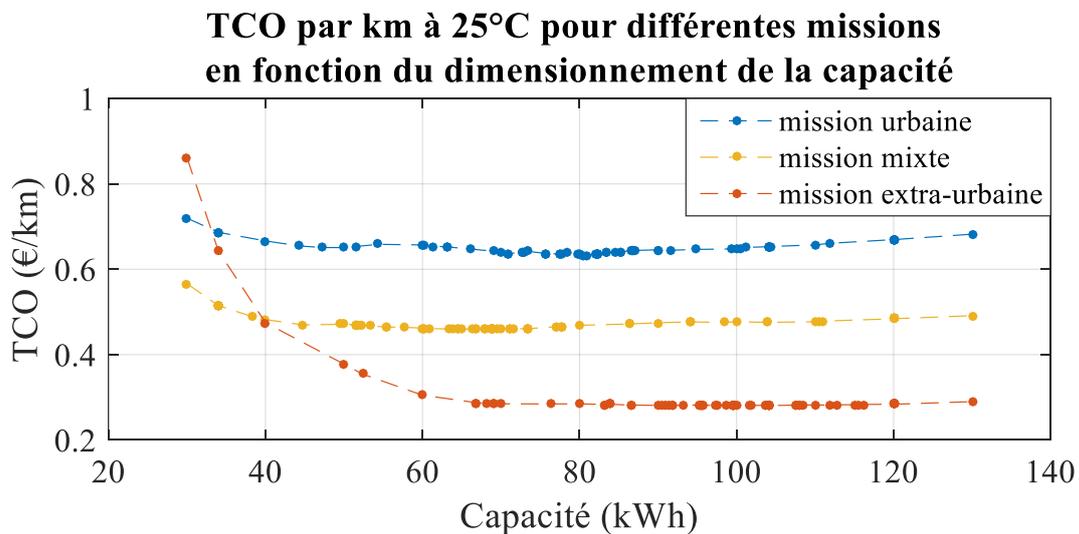


Figure III-23 : Impact du dimensionnement sur le TCO en fonction de la mission sous 25°C

La Figure III-23 relate les résultats de calculs d'optimisation du TCO pour les différentes missions sous une température de 25°C. Ces résultats permettent d'identifier la



capacité optimale théorique de la batterie en fonction de la mission. Il a été vu sur la Figure III-21 que les durées de vie augmentent en fonction de la capacité. Cependant, le taux d'accroissement de la durée de vie baisse en fonction de la capacité et, à partir d'un certain point, le surcout à l'achat de la batterie qui est plus grande n'est plus compensé par ce gain de durée de vie. Le point optimal pour la mission urbaine est atteint pour une capacité de 80,5 *kWh* et vaut 0,63 €/km. Il est possible d'identifier une zone de TCO minimum dont la variation est inférieure à 1% entre des capacités de 75 *kWh* à 85 *kWh*. La mission mixte admet un point optimal de TCO pour une capacité de 68,9 *kWh* et vaut 0,46 €/km et la zone de TCO minimal à 1% s'étend de 63 *kWh* à 73 *kWh*. Enfin pour la mission extra urbaine, le TCO minimal est obtenu pour une capacité de 99,7 *kWh* avec une valeur bien plus basse, qui vaut 0,28 €/km, et une zone à 1% comprise entre 87 *kWh* à 108 *kWh*. La mission urbaine comprend finalement le TCO le moins intéressant avec plus de deux fois le coût de la mission extra-urbaine et 1,4 fois la mission mixte. Un autre aspect non intuitif des résultats est le fait que la capacité optimale pour la mission urbaine soit plus importante que pour la mission mixte alors que le besoin en énergie est moindre. Cet effet peut être expliqué par la non-monotonie de la courbe de TCO avant ou après le point optimal. Avant d'atteindre le minimum, le TCO passe par des minimums locaux qui sont notamment induits par des coûts ponctuels tels que les coûts de maintenance. En effet, en prenant le cas de la mission urbaine, l'augmentation de la durée de vie engendre un coût de maintenance additionnel à partir de 72 mois de durée de vie soit à partir d'une capacité de 52 *kWh* (Figure III-21). Ainsi le minimum du TCO se trouve décalé vers une capacité plus importante avec un minimum local autour de 50 *kWh*. L'identification de la zone à 1% du minimum de TCO trouvé permet d'identifier pour chaque mission la variation de TCO au voisinage de l'optimum. Il en résulte que pour les trois missions étudiées, ces zones ont une étendue de 10 *kWh* autour du point optimal. Cela permet de juger de la dynamique de l'évolution du TCO en fonction de la capacité de la batterie. Lors du choix de nouvelles capacités de batteries proposées au catalogue, il serait judicieux de sélectionner des valeurs espacées de 10 *kWh* afin de garantir en un minimum de capacités proposées, un TCO proche à 1% de l'optimal pour un maximum de client. La mission extra-urbaine admet une forte hausse du TCO pour des faibles capacités car l'énergie embarquée n'est plus suffisante pour assurer la mission. Une capacité inférieure à 60 *kWh* ne serait pas envisagée pour ce type de mission extra-urbaine si aucune recharge n'est prévue au milieu du parcours.

Afin d'aller plus loin dans l'étude du dimensionnement de la batterie, les calculs d'optimisation vont être réalisés pour différentes températures pour observer l'impact de celles-ci sur le TCO optimal.

III - 3.3 Calculs d'optimisation de la capacité suivant la température

L'étude du vieillissement des cellules a révélé que la température avait un impact majeur. Il est donc intéressant de renouveler les calculs d'optimisation du dimensionnement avec différentes températures d'études afin de comprendre l'impact sur la capacité permettant un TCO optimal.

III - 3.3.1 Calcul du vieillissement en fonction de la température et de la capacité

Pour cette étude, les températures utilisées lors de la modélisation du vieillissement des cellules ont été reprises (10°C, 25°C et 37°C). La Figure III-24, la Figure III-25 et la Figure III-26 représentent les résultats de calculs de vieillissement sous les trois températures, respectivement pour la mission urbaine, mixte et extra-urbain. Pour chaque mission étudiée, la courbe jaune représente les résultats de calculs de vieillissement à 25°C effectués dans la partie précédente et représente par défaut la référence pour la suite de l'étude.

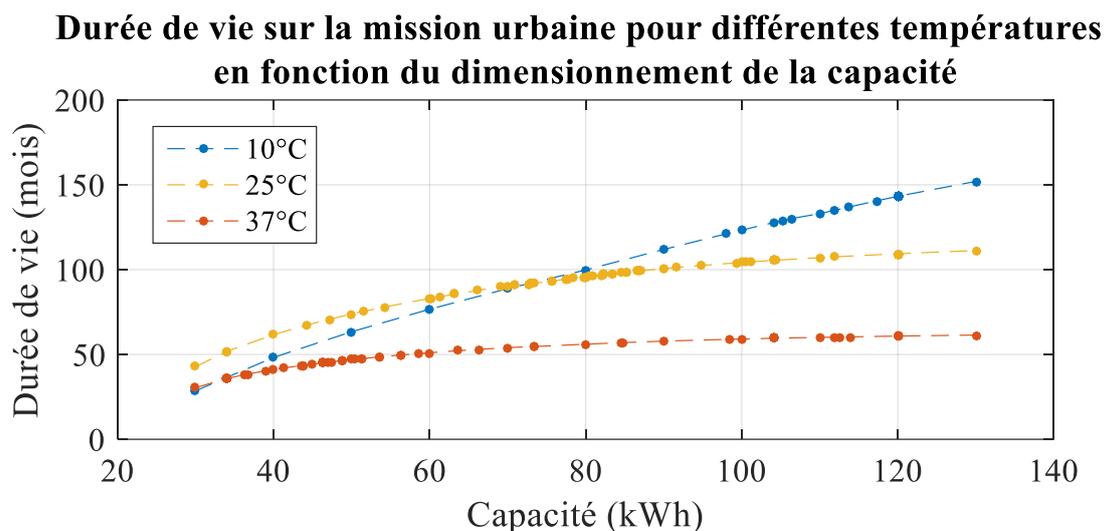


Figure III-24 : Impact du dimensionnement sur le vieillissement en fonction de la température pour la mission urbaine

Pour chaque mission, une température plus élevée implique systématiquement une durée de vie plus faible, conséquence de l'augmentation de la dégradation calendaire en fonction de la température. En revanche, si pour des températures plus basses la dégradation calendaire devient de plus en plus faible, la dégradation en cyclage quant à elle est bien plus sensible à la puissance transitée. Ainsi, pour une mission donnée, plus la capacité sera faible et plus le courant qui traversera la cellule de batterie sera important. La conséquence d'une diminution de la capacité se traduit alors par une augmentation de la dégradation en cyclage, soit une baisse



de la durée de vie. L'impact du courant à basse température est suffisamment prédominant pour que la tendance des courbes de durée de vie en fonction de la capacité ait une allure linéaire. Les durées de vie sont les plus courtes pour des faibles capacités et sont les plus longues pour des capacités élevées. Seul le cas de la mission extra-urbaine, admet une durée de vie plus faible pour une température de 10°C par rapport à la référence à 25°C).

Durée de vie sur la mission mixte pour différentes températures en fonction du dimensionnement de la capacité

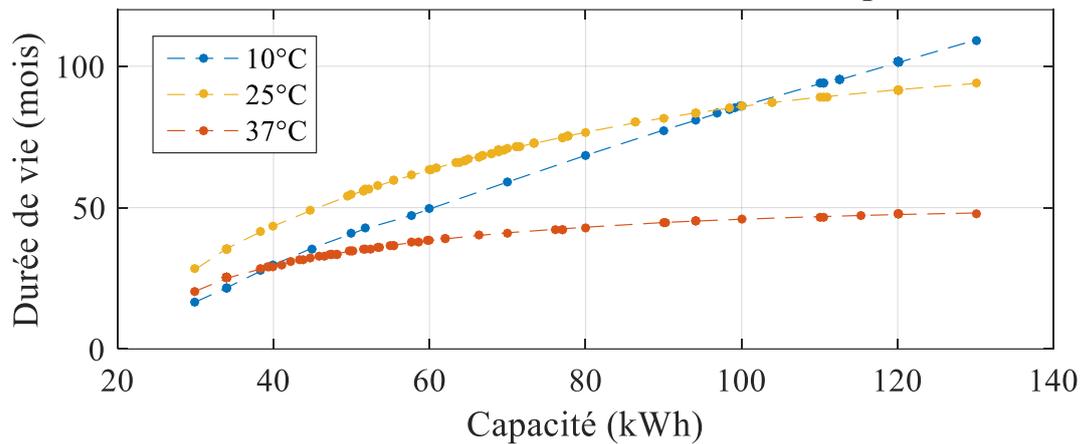


Figure III-25 : Impact du dimensionnement sur le vieillissement en fonction de la température pour la mission mixte

Durée de vie sur la mission extra-urbaine pour différentes températures en fonction du dimensionnement de la capacité

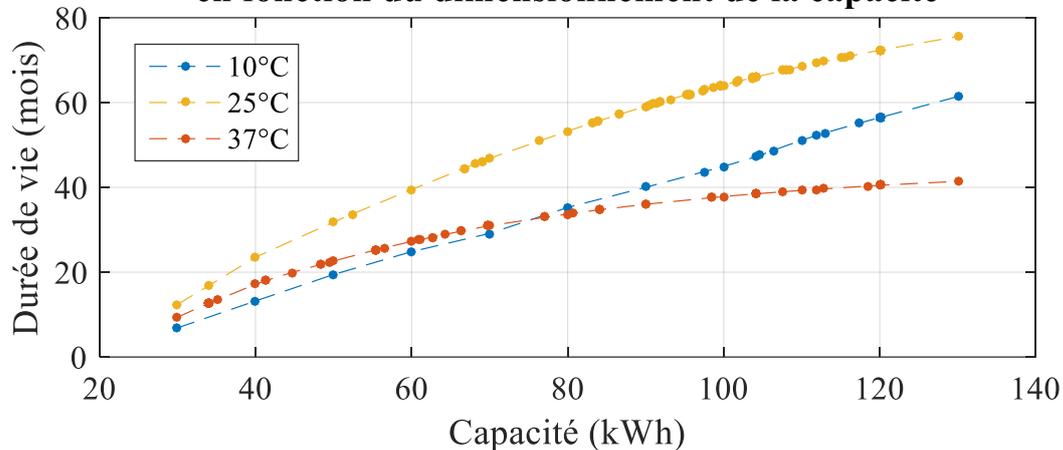


Figure III-26 : Impact du dimensionnement sur le vieillissement en fonction de la température pour la mission extra-urbaine

Connaissant l'impact de la température sur la durée vie en fonction de la température, il est maintenant intéressant de vérifier son impact sur le TCO.

III - 3.3.2 Calcul du TCO en fonction de la température et de la capacité

La Figure III-27, la Figure III-28 et la Figure III-29 représentent l'évolution du TCO par kilomètre en fonction de la capacité sous différentes températures pour les missions respectivement urbaines, mixtes et extra-urbaines. La différence notable sur les calculs pour différentes températures se trouve sur l'allure des courbes de TCO à 10°C. En effet, sur la plage de capacité choisie, le TCO baisse continuellement lors de l'augmentation de la capacité. Cette diminution ralentit peu à peu et peut être interprétée comme la conséquence de la baisse du régime de courant sur les cellules. Comme expliqué précédemment lors du calcul de la durée de vie, à basses températures, le vieillissement calendaire est très faible, c'est donc le vieillissement en cyclage qui est prépondérant. Or, sur les courbes de résultats de vieillissement en cyclage de la cellule (Figure II-36), il apparaît que les basses températures ont un impact fort sur la dégradation de la cellule pour des courants importants. En revanche, ce taux de dégradation s'atténue rapidement pour des courants plus faibles. Lorsque la capacité augmente, les courants dans chaque cellule diminuent, ainsi la durée de vie augmente suffisamment pour compenser le surcôt du surdimensionnement. Avec l'exemple de la capacité de 130 kWh, sous 10°C, le TCO obtenu est de 0.53€/km pour le parcours urbain (Figure III-27), 0.43€/km pour le parcours mixte (Figure III-28) et 0.32€/km pour le parcours extra-urbain (Figure III-29). Afin de faciliter l'interprétation des résultats, le diagramme de la Figure III-30 résume les points de TCO minimums pour chaque mission et chaque température. Les différences de taux d'utilisation du véhicule amènent ici à des écarts de 22 centimes par kilomètre entre les différentes missions, ce qui représente également 51% du TCO de la mission mixte. Cela permet entre autre d'avoir une quantification économique du taux d'utilisation du véhicule ; suivant le taux d'utilisation du véhicule, le TCO peut être doublé.

L'augmentation de la température a des impacts opposés sur les deux natures de vieillissement. En cyclage, l'augmentation de la température a pour effet de limiter le vieillissement. Cet effet est particulièrement visible sur les faibles capacités, où les courants cellulaires sont les plus élevés, et entre 10°C et 25°C lorsque le vieillissement calendaire reste modéré. L'augmentation de la température apporte ici une baisse du coût de revient par kilomètre de plus de dix centimes (pour une capacité de 40 kWh). Pour des capacités plus élevées, la température de 25°C apporte un vieillissement calendaire légèrement plus important qui n'est plus suffisant pour contrer le surcôt de la batterie. A 25°C, il existe une capacité optimale qui est autour de 80 kWh pour le parcours urbain, 70 kWh pour le parcours mixte et 100 kWh pour le parcours extra-urbain avec un TCO par kilomètre minimum qui est respectivement 0.63€/km, 0.46€/km et 0.28€/km.



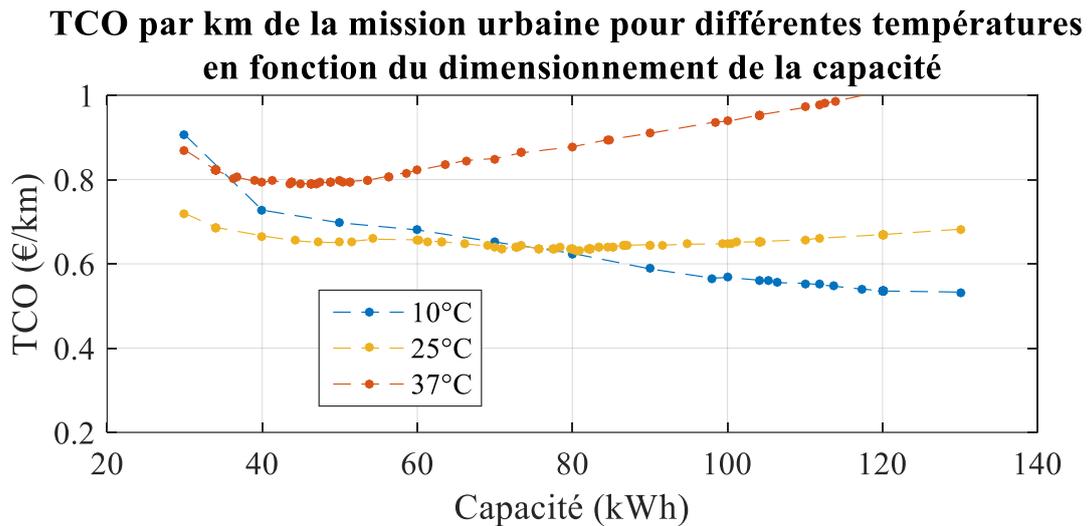


Figure III-27 : Impact du dimensionnement sur le TCO pour la mission urbaine

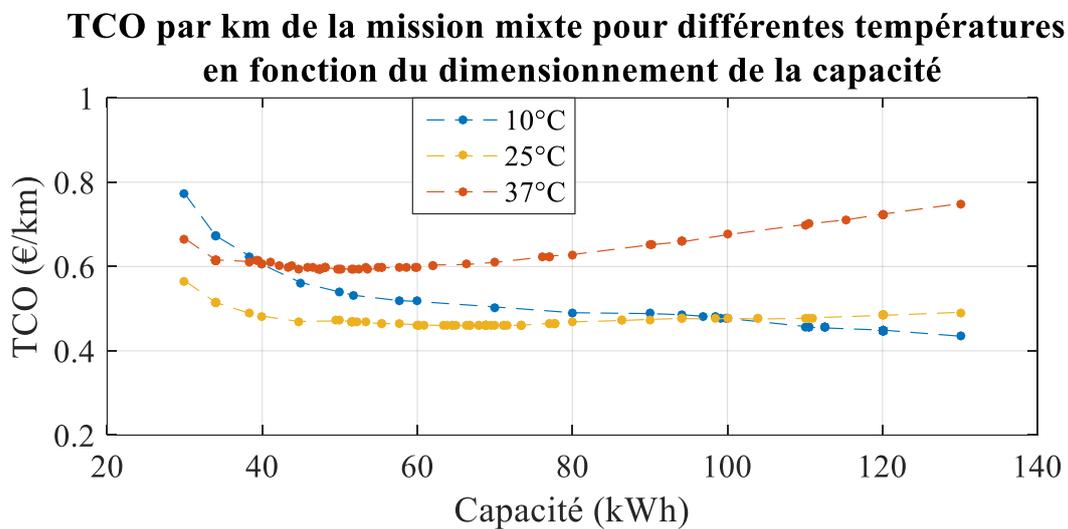


Figure III-28 : Impact du dimensionnement sur le TCO pour la mission mixte

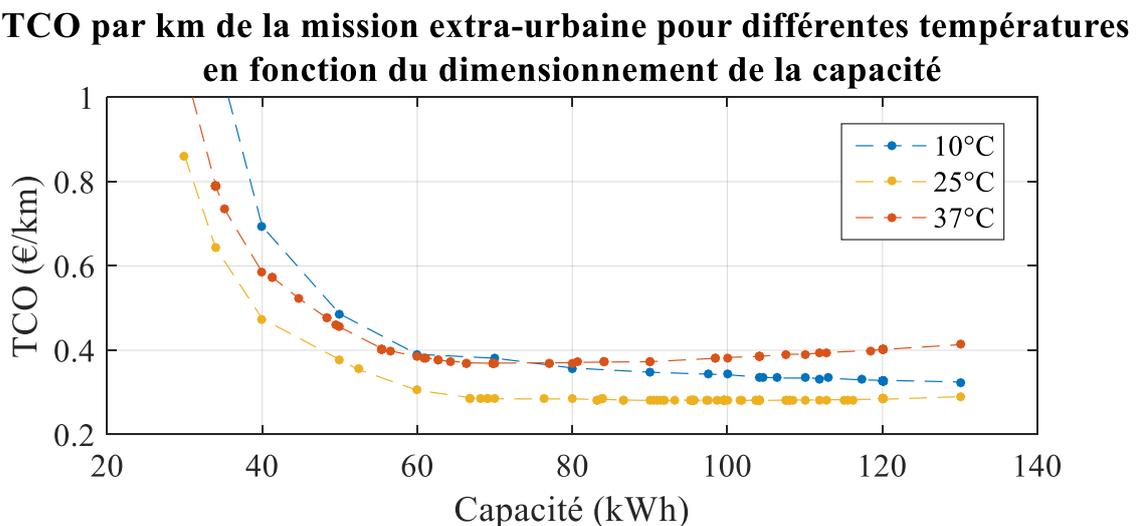


Figure III-29 : Impact du dimensionnement sur le TCO pour la mission extra-urbaine

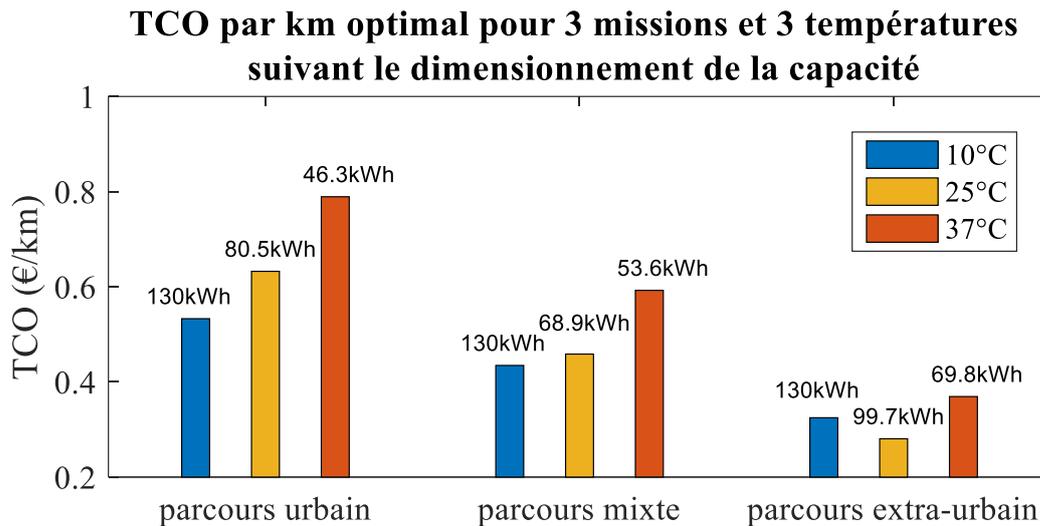


Figure III-30 : Résumé des points de dimensionnement optimum du TCO en fonction de la mission et de la température

De même que pour les basses températures, la différence de TCO entre les parcours va dans le même sens, la mission avec le taux d'utilisation le plus important admet un meilleur TCO. Le TCO optimal est atteint pour une capacité plus faible pour le parcours mixte que pour le parcours urbain, car une maintenance périodique apparaît sur le parcours mixte entre les capacités 70 kWh et 80 kWh.

Lorsque la température est plus élevée, par exemple pour 37°C, le vieillissement calendaire est plus important, pendant que le vieillissement en cyclage est lui faible. Ainsi, lorsque la capacité de la batterie augmente, les courants qui diminuent dans les cellules permettent, encore une fois, d'obtenir un vieillissement un peu plus faible. Le vieillissement diminue mais avec une proportion bien plus faible que pour des températures basses. Ainsi l'augmentation de la durée de vie se trouve moins importante pour les températures hautes et ne suffit plus à compenser le surcout lié au surdimensionnement. Le point de capacité optimal à 37°C est atteint pour une valeur de 45 kWh pour le parcours urbain, 50 kWh pour le parcours mixte et 70 kWh pour le parcours extra-urbain avec des TCO par kilomètre minimum qui sont respectivement 0.79€/km, 0.59€/km et 0.37€/km.

Entre les trois parcours retenus, il apparaît nettement qu'un taux d'utilisation élevé rend la solution VUE plus rentable. Ainsi, le parcours extra-urbain a en moyenne un TCO par kilomètre 10 centimes inférieur à celui du parcours mixte, qui est lui-même 10 centimes plus faible que le parcours urbain. Outre le taux d'utilisation, la température de fonctionnement du VUE est un facteur important pour obtenir une rentabilité optimale. Pour des capacités qui peuvent être embarquées dans le véhicule, c'est-à-dire moins de 60kWh compte tenu des caractéristiques de la batterie vis-à-vis des contraintes de masse et d'encombrement, la



température de 25°C permet d'obtenir le meilleur TCO quel que soit le parcours. En revanche, au-delà de cette capacité, il y a concurrence avec les basses températures qui permettent d'obtenir un TCO plus faible lorsque la capacité est suffisamment élevée. Au vu de l'impact de la température sur le TCO, il semblerait intéressant de mettre en place un système de thermo-management de la batterie. Pour des capacités faibles, un système de chauffage de la batterie pourrait être intéressant, et à l'inverse, pour des fortes capacités, un système de refroidissement de la batterie pourrait être approprié. Le gain potentiel en TCO que peut apporter ce système nous renseigne sur le coût, la masse et la consommation d'énergie maximum qu'il devra avoir pour garantir une meilleure rentabilité.

III - 3.4 Calculs d'optimisation de la capacité suivant la masse du véhicule

Afin de compléter l'étude des paramètres qui influent sur le TCO, la masse est un paramètre d'étude intéressant qui permet de déterminer l'impact du chargement d'un véhicule sur son parcours et l'impact d'un allègement potentiel du VUE.

III - 3.4.1 Calcul du vieillissement en fonction de la masse et de la capacité

La Figure III-31 représente l'évolution de la durée de vie des batteries en fonction de la capacité et pour différentes masses du VUE. La masse choisie initialement pour l'étude du TCO était 3,5t. Les nouvelles masses d'étude choisies sont 3t, ce qui correspond à un VUE à moitié chargé, 2,5t correspondant à un VUE peu chargé et 1,35t ce qui correspond à l'équivalent d'un véhicule particulier. L'idée est d'avoir un point de calcul comparable à un véhicule léger pour juger de l'évolution potentielle du TCO de cette chaîne de traction. L'étude du paramètre de masse a été faite sur la mission mixte. Ainsi en diminuant la masse il apparaît que la durée de vie augmente de manière proportionnelle à la diminution de la masse. Pour une capacité de 60 kWh, un gain de durée de vie de 6 mois est observé par diminution d'une tonne de la masse. Cette diminution correspond à une augmentation de 9,5% de la durée de vie. L'allure des courbes de durée de vie en fonction de la capacité reste similaire pour les différentes masses. Les résultats d'essais pour différentes masses et pour des températures de 10°C et 37°C sont présentés en Annexe A - 5. Les conclusions sont identiques pour ces deux autres températures. De même que pour chaque paramètre étudié, l'étude de la durée de vie n'est pas suffisante et nécessite d'être complétée par l'étude du TCO.

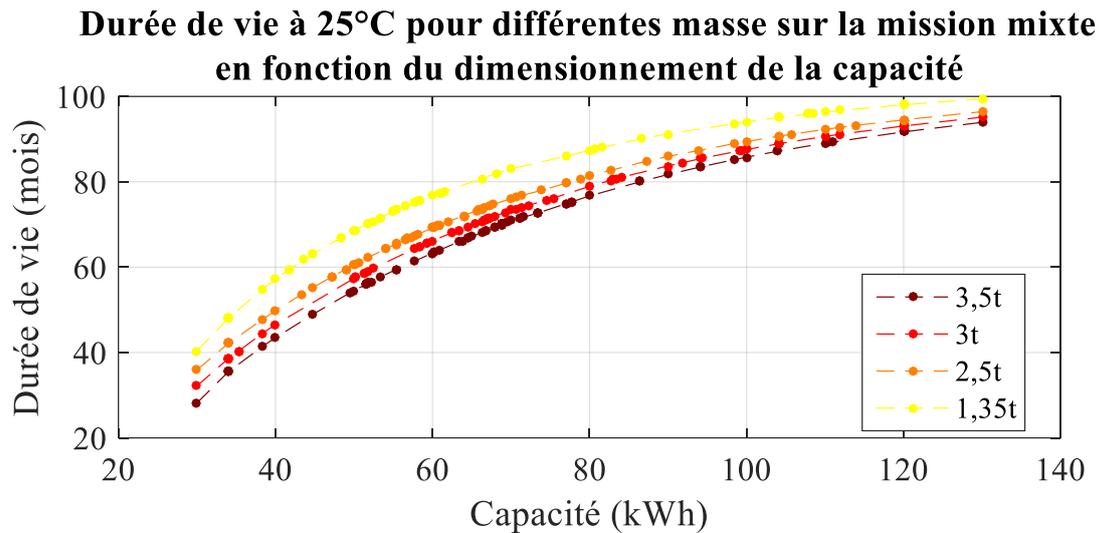


Figure III-31 : Impact du dimensionnement sur le vieillissement en fonction de la masse pour la mission mixte sous 25°C

III - 3.4.2 Calcul du TCO en fonction de la masse et de la capacité

La Figure III-32 représente l'évolution du TCO en fonction de la capacité pour différentes masse et sous 25°C. Les courbes pour les températures de 10°C et 37°C sont présentées en Annexe A - 5. De la même manière que pour les courbes de durées de vie, les allures des courbes de TCO sont semblables. Cependant, une diminution de la masse entraîne non seulement une réduction du TCO mais également un décalage du point optimal vers une capacité plus faible.

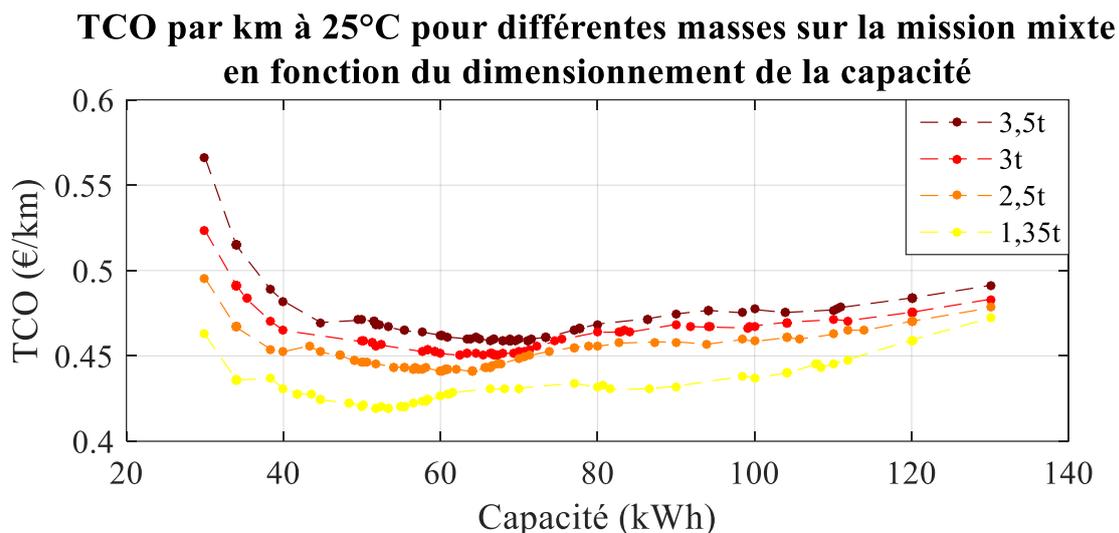


Figure III-32 : Impact du dimensionnement sur le TCO en fonction de la masse pour la mission mixte sous 25°C



La Figure III-33 résume pour chaque masse et chaque température le point de TCO minimum. Les points optimaux ont des valeurs de TCO plus faibles pour des masses plus faibles. Ce résultat est tout à fait cohérent avec le modèle énergétique ; la mise en mouvement d'une masse additionnelle consommera plus d'énergie, augmentera par conséquent les courants et la puissance dans la batterie ce qui se traduira par une hausse du TCO. De plus les points optimaux sont obtenus pour des capacités plus faibles lorsque que la masse du véhicule est réduite. Seuls les résultats sous une température de 10°C conservent un point de TCO optimal à 130 kWh qui est la limite maximale choisie pour le calcul. Ce résultat ne donne pas d'information sur l'évolution de la capacité optimale en fonction de la masse pour une température de 10°C si ce n'est que celle-ci est au-delà de 130 kWh. Les résultats obtenus permettent de conclure qu'une masse embarquée plus faible dans le VUE permettra un TCO plus faible et autorisera le client à choisir un pack de batteries moins surdimensionné pour obtenir le meilleur TCO.

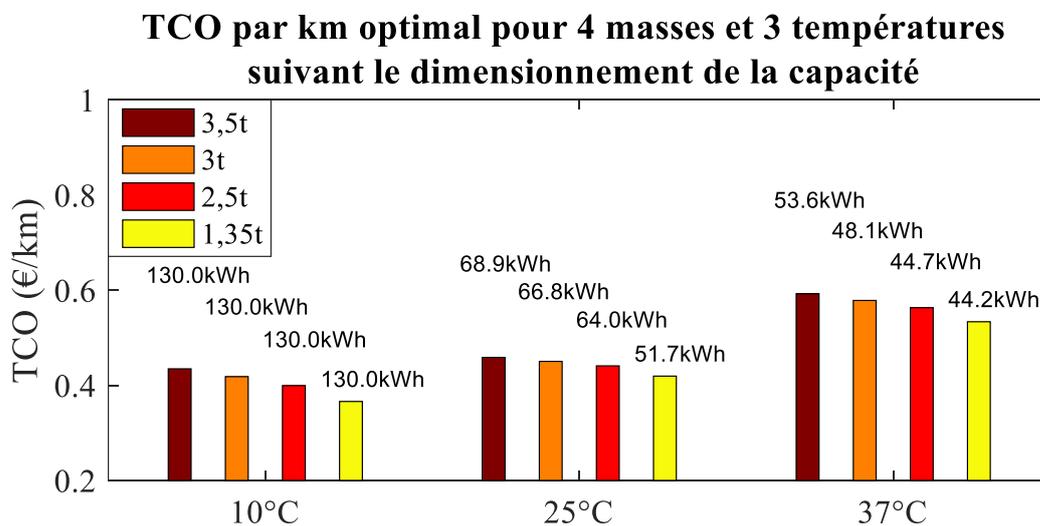


Figure III-33 : Résumé des points de dimensionnement optimum du TCO en fonction de la mission et de la température

Finalement, il est maintenant clair que pour une mission client donnée, la capacité la plus rentable en terme de TCO, n'est pas nécessairement celle de plus faible capacité (le juste nécessaire pour parcourir les kilomètres du parcours). En effet, selon la mission, plusieurs facteurs rentrent en jeu et font varier le coût et la durée de vie, dont la température, le courant traversant la cellule et le niveau de SOC. Concernant le niveau de charge, si la taille de la batterie augmente pour un même parcours, l'utilisation de la capacité n'est pas totale et la profondeur de décharge moins grande. Cela entraîne alors un vieillissement prématuré puisque qu'une profondeur de décharge plus faible centrée sur des états de charge plus hauts a tendance à faire accélérer le vieillissement. Une piste pour améliorer de nouveau le TCO pourrait être d'agir sur le SOC de la batterie.

III - 4. Conclusion du Chapitre III

Suite à la modélisation du véhicule et de sa batterie, ce troisième chapitre s'affaire à l'étude du coût total de possession (TCO) et à son optimisation. La première partie du chapitre permet d'appréhender la notion de TCO avec le détail de la méthode de calcul retenue. Différents calculs sont ensuite faits pour mettre en avant l'impact de la température, de la mission et de la capacité de la batterie sur le vieillissement et le TCO. Dans une seconde partie, une méthode de calculs accélérés est mise en place avec l'algorithme d'optimisation du TCO afin d'obtenir des résultats représentatifs en un temps réduit (temps de simulation divisé par 52). L'algorithme d'optimisation retenu est un algorithme méta-heuristique de type PSO-NM (Annexe A - 3. Algorithme d'optimisation hybride (PSO/NM) [39]) développé au sein du laboratoire. Des calculs d'optimisations ont été lancés afin de déterminer pour chaque mission client et pour chaque température quelle serait la capacité optimale pour garantir un TCO minimal pour le client. Les résultats des optimisations montrent que le TCO minimal est atteint pour une capacité de batterie surdimensionnée par rapport au besoin en énergie du client pour assurer sa mission : pour une mission urbaine, le besoin en énergie est de l'ordre de 15 *kWh*, cependant, la batterie qui assure la meilleure rentabilité est une batterie de capacité surdimensionnée à 80,5 *kWh*. En effet, il y a concurrence entre le prix d'achat de la batterie, plus chère pour une capacité plus élevée, et les courants traversant chaque cellule qui sont plus répartis si la capacité est plus grande. Ce résultat est donc différent de l'intuition de départ qui serait de dimensionner le système de stockage uniquement au juste nécessaire des besoins de la mission pour réduire le prix d'achat. Le TCO est un coût de revient global et permet une économie plus large en ne se limitant pas simplement au coût d'achat. De plus, l'étude des missions montre également que le taux d'utilisation du véhicule a une importance forte sur le TCO. En effet, le vieillissement calendaire agit en permanence, y compris lorsque le véhicule n'est pas utilisé. Ainsi, les résultats montrent que le véhicule pourra parcourir moins de distance pendant la durée de vie de la batterie si celui-ci est peu utilisé. Contrairement à l'idée reçue que le véhicule électrique est intéressant surtout pour les faibles distances, il ressort de l'étude qu'il est plus rentable lorsque son utilisation est intensive. Les résultats montrent que le TCO du véhicule par kilomètre peut être réduit de moitié (entre les parcours urbains et extra-urbains).

Une piste pour améliorer de nouveau le TCO pourrait être d'agir sur le SOC de la batterie. Ce chapitre nous montre qu'une capacité surdimensionnée par rapport aux besoins en énergie pure pour la mission est souvent en faveur d'un TCO plus faible. Dans ce cas, la question se pose de savoir s'il est judicieux de charger le véhicule à un niveau de charge total ou, si une recharge partielle et suffisante pour assurer les besoins de la mission serait plus intéressante. Dans le but d'améliorer de nouveau le TCO, le prochain chapitre sera axé sur la recherche de stratégies de recharge intelligentes des batteries.



Chapitre IV. STRATEGIE DE RECHARGE INTELLIGENTE

IV - 1.	INTRODUCTION DU CHAPITRE IV	135
IV - 2.	LA STRATEGIE DEVELOPEE	137
IV - 2.1	Interprétation des essais de vieillissement cellule	137
IV - 2.2	Résultats de vieillissement avec la stratégie de recharge intelligente	142
IV - 2.3	Résultats de coût de revient avec la stratégie de recharge intelligente	144
IV - 2.4	Interaction de la recharge intelligente sur le dimensionnement	147
IV - 3.	LOGICIEL DE CALCUL DU TCO	151
IV - 4.	CONCLUSION DU CHAPITRE IV	155



IV - 1. Introduction du Chapitre IV

La modélisation du véhicule et l'algorithme d'optimisation du TCO ont permis de trouver les meilleures configurations de véhicule pour assurer la mission du client avec une rentabilité optimale. Les résultats d'essais de vieillissement calendaire sur la cellule ont montré que la cellule de batterie se dégradait plus rapidement suivant la température et le niveau de charge. Dans le but d'améliorer à nouveau le TCO, une nouvelle piste d'étude est envisagée pour ce quatrième chapitre : l'étude de l'influence de la stratégie de recharge. L'objectif est de regarder l'impact de la manière de charger la batterie du VUE en fonction de la mission, de la température et de la capacité du pack batterie. Dans un premier temps les essais de vieillissement de la batterie vont être analysés afin d'élaborer une stratégie de recharge dont le but sera de limiter le vieillissement. Ensuite, le vieillissement, puis le TCO, en fonction de la méthode de recharge, seront calculés et analysés. Enfin une dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation d'un outil de calcul du TCO et de conseil marketing pour le choix du dimensionnement du pack batterie du client.



IV - 2. La stratégie développée

IV - 2.1 Interprétation des essais de vieillissement cellule

Lors d'une utilisation typique sur une journée, le véhicule est mis en charge (branché) juste après l'exécution de sa mission. Il va donc se mettre en charge dès la fin de la mission jusqu'à atteindre 100% de SOC. Une fois la recharge terminée, le véhicule va donc se trouver dans une phase de stockage (Figure IV-1). Compte tenu de l'analyse du vieillissement des cellules de batterie, cette habitude de recharge conduit à un vieillissement prématuré et ne favorise pas une durée de vie optimale. Le stockage est fait à un seuil de charge maximum ce qui engendre un vieillissement maximal. De plus la recharge est faite juste à la suite de la phase de roulage, la température de la batterie continuera d'augmenter, ce qui est défavorable au vieillissement.

Afin de limiter le vieillissement, la stratégie choisie est de différer la recharge du véhicule électrique. Connaissant la mission du lendemain, il est possible de calculer le besoin en énergie et de différer la charge afin de recharger le véhicule dans la période précédant son départ pour le jour suivant. De cette manière, la batterie conserve le niveau de SOC bas de la fin de la mission précédente autant de temps que possible et le stockage se fait alors sur une phase de SOC faible (Figure IV-1). De plus connaissant l'énergie nécessaire à la prochaine mission, la stratégie consiste également à recharger seulement cette quantité d'énergie. Sauf nécessité d'équilibrage batterie, le fait de recharger partiellement la batterie évite d'aller dans les plages de SOC élevé qui dégrade la batterie que ce soit en calendrier ou en cyclage. Une marge de sécurité de SOC et une marge de sécurité de temps de charge sont intégrées à la stratégie afin d'assurer la disponibilité du véhicule et de tenir compte des erreurs de calculs possibles.

Des travaux sur la recharge existent déjà dans la littérature, Liu et al. [46] ont étudié une stratégie de recharge optimale basée sur une modélisation électrique et thermique d'un système de stockage électrochimique de même technologie (LFP). Si la modélisation électrique est identique dans cette étude, le vieillissement n'est pas pris en compte. L'objectif de l'optimisation qu'ils réalisent est d'obtenir un temps de charge minimal, des pertes d'énergie minimale et une augmentation de température limitée. Dans notre cas l'objectif est de minimiser le TCO et le vieillissement. Les travaux tels que ceux de Zhang et al. [47] et [48] proposent une méthode pour obtenir une charge optimale en terme de temps de charge et de perte d'énergie. Un algorithme de programmation dynamique couplé à une base de donnée de résultats est mise en place afin d'obtenir une optimisation plus rapide en fonction des objectifs. D'autres articles utilisent des modèles de vieillissement et une estimation simplifiée des coûts afin d'optimiser



les lois de recharge selon le coût de l'énergie et du coût de la dégradation de la batterie [49]. Contrairement à notre étude l'hypothèse faite est que le vieillissement en cyclage ne dépend pas du SOH actuel de la batterie. En première approche, il a été choisi de mettre en place une stratégie de recharge simplifiée et sans optimisation afin de pouvoir implémenter facilement la stratégie dans les calculateurs du VUE et la proposer rapidement aux clients.

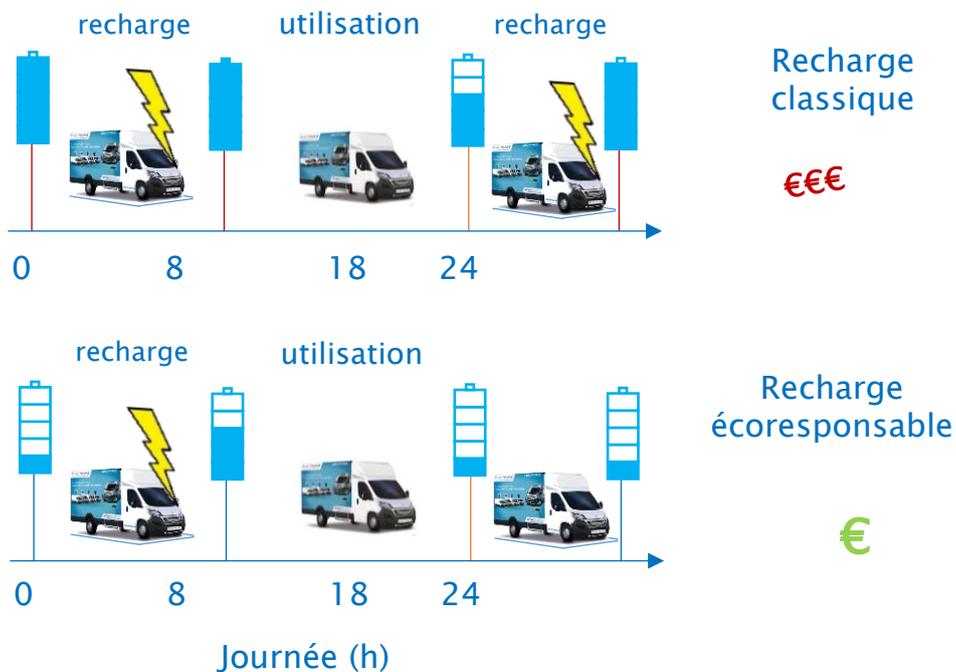
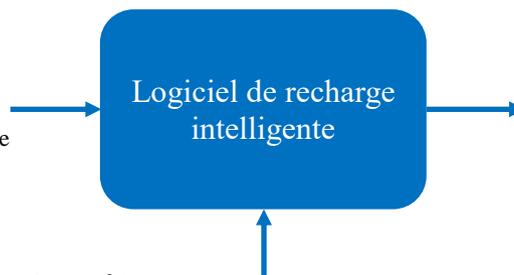


Figure IV-1 : Description de la recharge classique par rapport à la recharge intelligente

Entrées

- Energie nécessaire pour la mission
- SOC
- Date et Heure de départ
- Courant Max
- Température Ext
- Température
- Profils de courant disponible
- Profil de coût de l'énergie
- SOH
- Point de recharge
- Profil de température



Output

- Profil de courant de charge
- Solution OK
- Coût
- Vieillessement

Paramètres

- Marge de SOC (SOH inclus)
- Marge de temps
- Capacité nominale
- Seuil courant min/rendement
- (Contraintes garantie)

Figure IV-2 : principe d'un logiciel de recharge intelligente

Le schéma de la Figure IV-2 est une proposition de principe d'un logiciel de recharge intelligente. L'objectif est de générer un profil de courant de recharge de la batterie en fonction du temps qui permette d'assurer un coût de revient global minimal. Le profil généré devra tenir compte éventuellement de différentes contraintes tel que, par exemple, l'heure de départ, le courant maximal de charge, le courant disponible sur le réseau et le profil de coût de l'énergie. Le logiciel permettrait en outre de connaître le coût global de la recharge, le vieillissement engendré, de vérifier que la recharge de l'énergie nécessaire à la mission du lendemain soit compatible avec la capacité de la batterie et que le temps de charge soit compatible avec l'heure de départ.

Le schéma de l'algorithme Figure IV-3 est une proposition de méthode de calcul pour générer le profil de charge en fonction de la mission du lendemain et également de contraintes tarifaires et de disponibilité du réseau. En amont de cet algorithme, le modèle du véhicule permet de déterminer l'énergie nécessaire pour assurer la mission. L'énergie à charger ($E_{à\ charger}$) est alors calculée à partir de l'énergie nécessaire ($E_{nécessaire}$), le SOC, la marge de sécurité de SOC ($marge_{SOC}$) et la capacité de la batterie (C_{nom}) comme décrit dans l'équation (IV-1) ci-dessous.

$$E_{à\ charger} = E_{nécessaire} - (SOC - marge_{SOC}) \cdot C_{nom} \quad (IV-1)$$

A partir de l'énergie à charger du rendement de charge et du courant maximal disponible, le temps de charge est estimé. Le temps de charge sera comparé au temps disponible jusqu'à l'heure de départ et l'énergie totale ($E_{nécessaire} + marge_{SOC} \cdot C_{nom}$) sera comparée avec l'énergie maximale de la batterie (C_{nom}) pour vérifier si le véhicule est en mesure d'assurer la mission choisie. A partir de l'énergie à charger, de l'heure de départ, de la marge de temps choisie, du profil de coût et du profil de courant disponible, le logiciel générera un profil de courant optimisé par rapport au coût de la charge et au coût engendré par le vieillissement de la batterie.



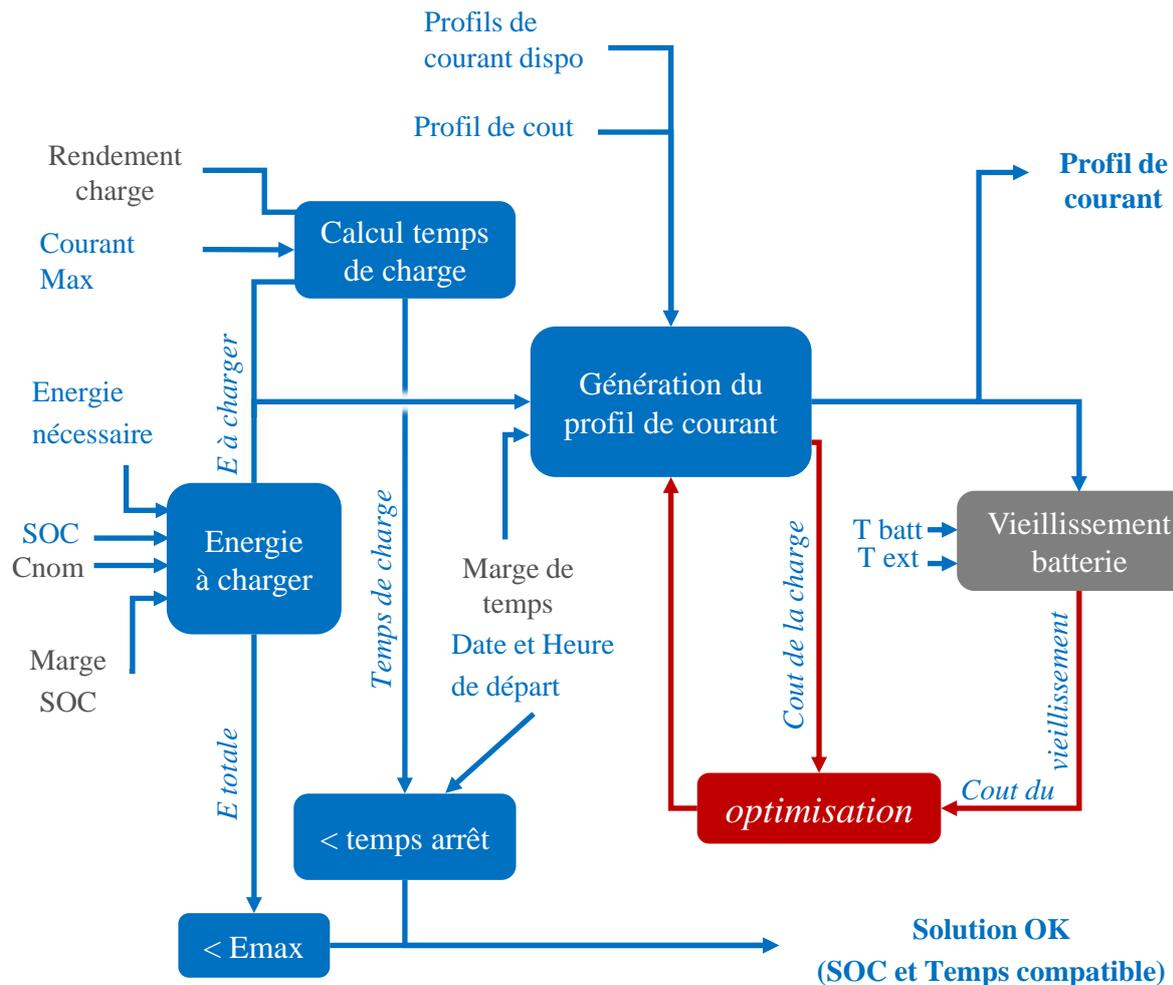
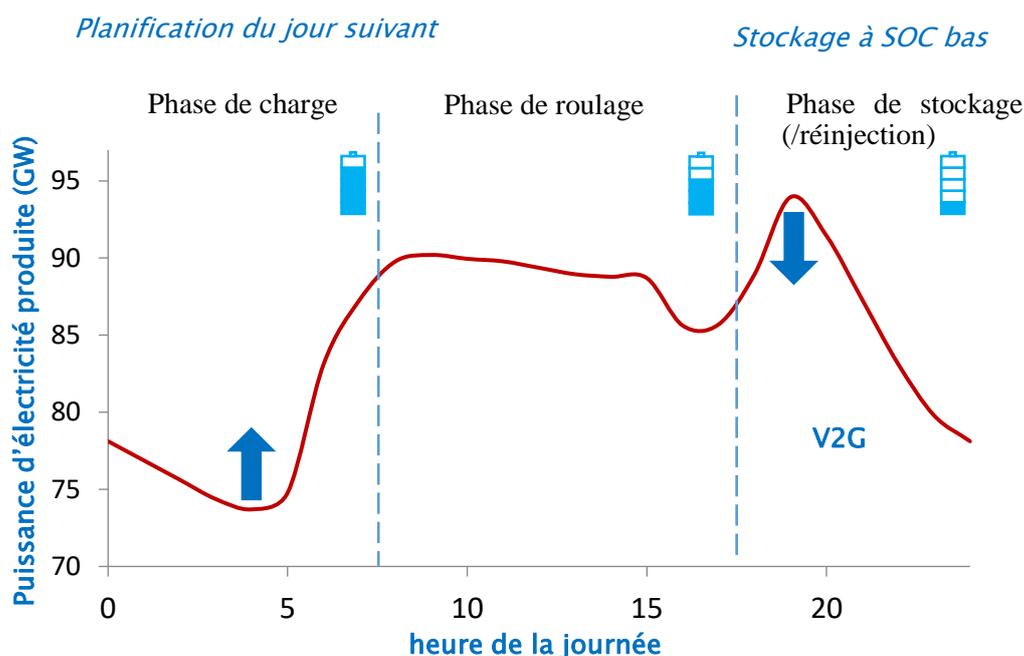


Figure IV-3 : Schéma de l'algorithme de recharge intelligente

Les contraintes tarifaires et de disponibilité du réseau n'étant pas connues à l'heure actuelle, ces paramètres ne sont pas implémentés dans le logiciel final pour l'instant. Des travaux sont toujours en cours pour rendre le réseau communicant avec les bornes, puis la borne communicante avec le véhicule, mais le système de gestion n'est pas encore en place chez le gestionnaire de réseau. L'idée est de pouvoir recueillir les informations nécessaires, afin de planifier les consommations prévisionnelles et de les organiser pour en limiter l'impact sur le réseau, pouvoir bénéficier de tarifs avantageux et éviter les coupures de courants. Pour le gestionnaire de réseau cela permettrait de répondre en partie à la problématique de lissage de la charge qui sera de plus en plus présente avec la démocratisation des véhicules électriques (Figure IV-4). De nombreux travaux sont axés sur l'optimisation de la charge en fonction de contraintes sur le réseau et plus particulièrement en fonction de l'évolution temporelle des prix de l'électricité [50-54]. La Figure IV-4 présente la consommation journalière moyenne en France suivant l'heure de la journée .



Source: ministère du développement durable

Figure IV-4 : Intérêt de la recharge intelligente d'un point de vue réseau électrique

Il y a actuellement une phase de creux de consommation pendant la nuit entre 22h et 6h, puis un plateau pendant la journée jusqu'à 16h, pour finir avec un pic de consommation vers 19h lorsque les ménages rentrent à leur domicile. L'ajustement de puissance est, pour l'heure, principalement fait en aillant recours à des énergies non renouvelables et potentiellement polluantes pour assurer la production lors des pics de consommation. L'objectif du gestionnaire de réseau, garant de la stabilité du réseau est de lisser au maximum la consommation pour avoir une meilleure stabilité du réseau, éviter les pics de consommation, et par suite les risques de coupures électriques. Dans une optique de démocratisation du véhicule électrique dans le milieu professionnel, il est envisageable que les VUE soient mis en charge en fin de journée de travail et pendant la nuit. Sans stratégie de recharge particulière, les véhicules électriques débiteront tous leur charge en même temps probablement à partir de 18h ce qui entrainerait une augmentation de la consommation sur une période où il existe déjà un pic de consommation. Afin de limiter cet effet et dans l'attente de mise en place de réseau de communication entre le réseau électrique et le véhicule électrique ou la borne, il est possible de définir une stratégie qui consisterait à décaler la recharge à partir de 22h pour que celle-ci se fasse pendant la période de creux de consommation. De plus, il serait possible de mettre à disposition, pour le réseau, le reste d'énergie de la batterie en fin de journée (V2G). Cela permettrait de réduire le pic de consommation vers 19h et pourrait-être intéressant pour le possesseur du VUE sous réserve que la rémunération de la part du gestionnaire de réseau couvre le coût de l'énergie redonnée et le coût du vieillissement de la batterie. Cette mise à disposition, est étudiée dans la gestion de



réseau électrique intelligent (Smart Grid). Le flux d'énergie du véhicule vers le réseau est nommé V2G (Vehicule to Grid) et est déjà bien décrit dans la littérature [55-58].

Afin de quantifier l'impact sur le TCO et le vieillissement que pourrait avoir la mise en place d'une stratégie de recharge intelligente, des simulations vont être réalisées. Les simulations seront faites sur différentes missions, pour différentes températures et capacités.

IV - 2.2 Résultats de vieillissement avec la stratégie de recharge intelligente

Les simulations de recharge intelligente ont permis de quantifier et de valider les potentiels bénéfiques qu'il serait possible d'obtenir. Dans un premier temps, les simulations de charge ont été réalisées sur la mission mixte, pour un métier de livraison à domicile. Le trajet a une distance de 67km et est parcouru en 5h20. Nous avons fait l'hypothèse d'une utilisation quotidienne du véhicule sur cette mission pour calculer la durée de vie de la batterie. La batterie est considérée comme étant en fin de vie lorsque son SOH est descendu à 80%.

Le parcours choisi admet une consommation d'énergie d'environ 25kWh pour une capacité de batterie de 57.8 kWh. Avec cet exemple, une recharge classique induirait une profondeur de décharge d'environ 50% centré autour d'un SOC de 75%. La stratégie dans ce cas est donc de décaler le centre vers 25%. Afin de s'assurer que le conducteur ne subira pas une panne d'électricité et que celui-ci ne sera pas inquiet d'une jauge d'énergie trop basse, une marge de SOC de 20% a été intégrée à la stratégie. Effectivement, la partie de la stratégie qui consiste à recharger uniquement l'énergie nécessaire pour la mission n'a pas d'influence si la mission nécessite l'intégralité de l'énergie de la batterie. Cependant le maintien du SOC à un seuil bas, quant à lui se fait par le décalage du début de la recharge, et aura un intérêt dans tous les cas de figure, dans la mesure où le temps de pause entre deux mission est supérieur à la durée de la charge de la batterie. Afin d'assurer la fin de la recharge avant l'heure de départ, une marge de sécurité de 20 min sur le décalage est également implémentée.

La Figure IV-5 présente les résultats de simulations de durée de vie avec et sans recharge intelligent, et confirme que la recharge intelligente permet d'allonger la durée de vie des batteries. Le gain moyen de durée de vie grâce à cette méthode est de 17 mois, soit environ 1 an et demi. Selon la température le gain en durée de vie est plus ou moins important. Le vieillissement calendaire est accéléré par la température, ainsi, le gain en durée de vie est plus important pour des températures plus élevées. Aussi, la modélisation effectuée ne prend actuellement pas en compte l'effet du cyclage partiel sur des plages de SOC. Compte tenu des quelques résultats observés sur le cyclage de la cellule sur des plages de SOC partielles (Figure

II-32), il y a une forte probabilité pour que le résultat réel présente un écart de durée de vie plus important, en faveur de la stratégie intelligente.

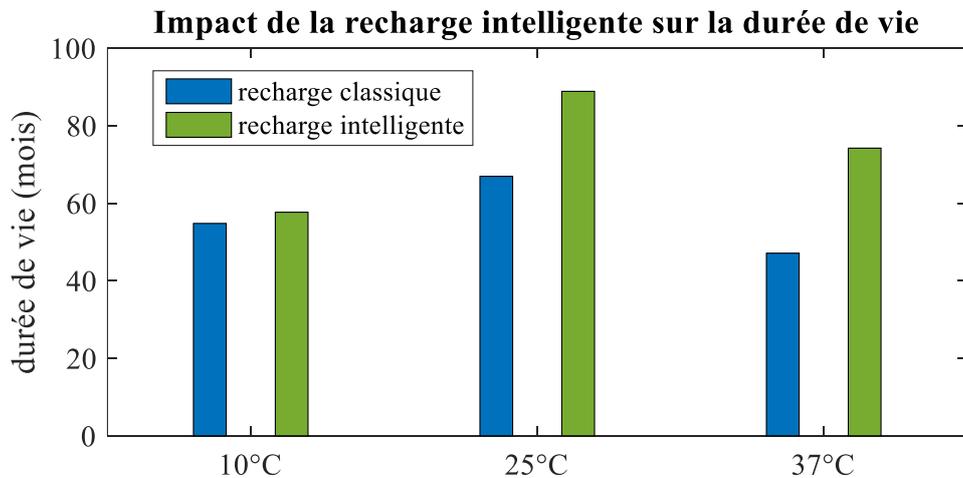


Figure IV-5 : Impact de la recharge intelligente sur la durée de vie

Dans certains cas, le client peut souhaiter désactiver une partie de la stratégie. Cela peut être pour assurer une disponibilité rapide du véhicule, en rechargeant le véhicule dès que sa mission est terminée mais uniquement la quantité d'énergie nécessaire à la mission future (recharge au juste nécessaire Figure IV-6) ; ou bien pour assurer une autonomie maximale tout en ayant une date prévisionnelle de départ (recharge décalée Figure IV-6). Les résultats présentés sur la Figure IV-6 montrent que les stratégies de recharge intelligentes partielles permettent d'ores et déjà d'améliorer la durée de vie. Le gain est d'environ 10 mois pour chacune d'elles contre 22 mois gagnés avec la stratégie de recharge intelligente associant les deux principes, soit 32% d'augmentation. Ces résultats montrent que les différents principes de la stratégie complète permettent d'obtenir des gains considérables. Il sera alors possible de proposer aux clients ces stratégies partielles pour satisfaire leurs contraintes.

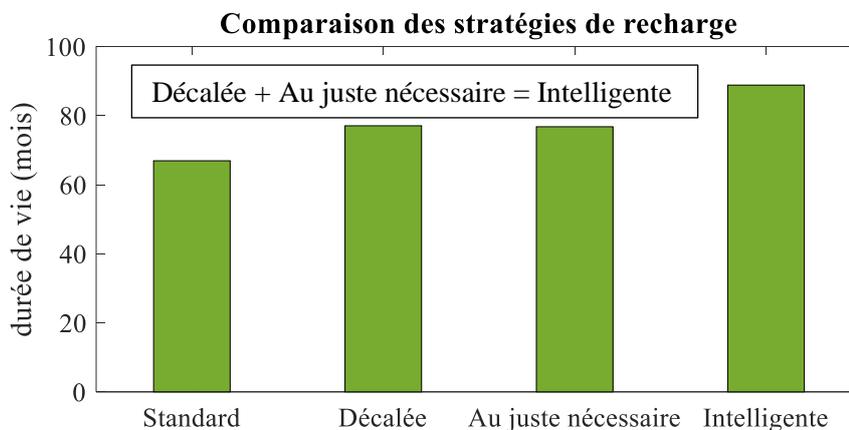


Figure IV-6 : Comparaison de l'efficacité des stratégies de recharge à 25°C



Outre le gain en durée de vie, ce décalage de la recharge peut également permettre un « délestage » de la consommation sur des périodes nocturnes pendant lesquelles les consommations locales ou nationales sont plus faibles. L'impact des stratégies choisies sur le vieillissement est maintenant clair. Cependant, il reste ensuite à mesurer l'impact sur le TCO pour juger du gain économique potentiel d'une stratégie de recharge intelligente.

IV - 2.3 Résultats de coût de revient avec la stratégie de recharge intelligente

La limitation du vieillissement permet a priori de faire diminuer le TCO. L'état de charge de la batterie peut être contrôlé afin de limiter ce vieillissement. C'est exactement ce qui est fait lors du développement des stratégies de recharge intelligente. Ces stratégies ont été développées dans le but de limiter la durée de vie de la batterie. Il est maintenant intéressant d'observer l'impact de celles-ci sur le TCO. Ces stratégies apportent un gain de durée de vie non négligeable et ne nécessitent aucune dépense supplémentaire lors de leur mise en œuvre. Il est donc certain que le TCO se verra amélioré. La Figure IV-7, la Figure IV-8 et la Figure IV-9 représentent l'impact de la recharge intelligente sur le TCO par kilomètre sous différentes températures, pour les trois parcours choisis et pour les trois capacités au catalogue.

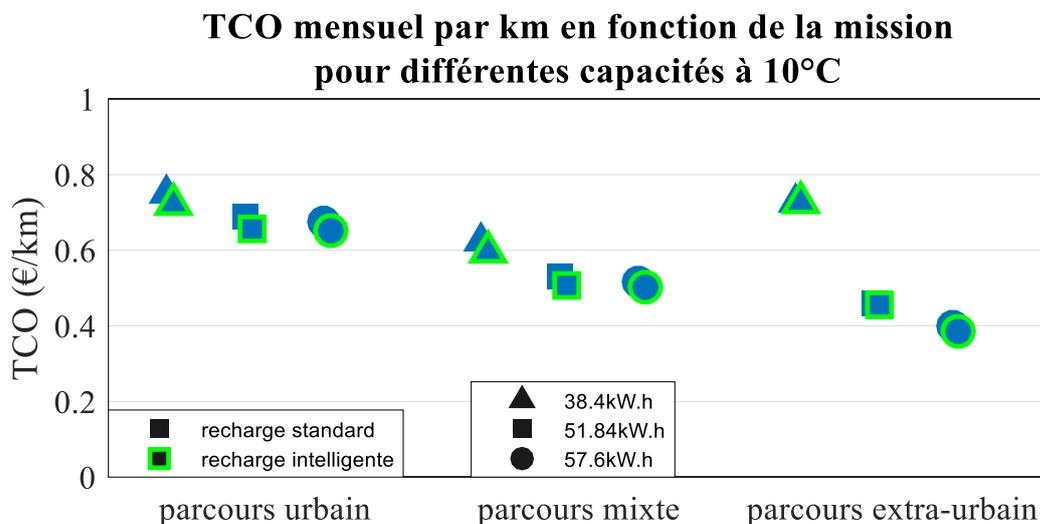


Figure IV-7 : Impact de la recharge intelligente sur le TCO à 10°C

En fonction du parcours, la recharge intelligente apporte plus ou moins d'économie mais permet toujours d'obtenir une amélioration. Pour le parcours extra-urbain, l'amélioration est la plus faible puisque la recharge se fait toujours jusqu'à 100%. En effet, ce parcours nécessite l'intégralité de l'autonomie du véhicule donc la stratégie est fortement inhibée. Les calculs ont ici été faits pour les capacités disponibles au catalogue du VUE mais il serait envisageable de

faire les calculs pour des valeurs plus importantes de capacité, afin de mesurer les améliorations potentielles.

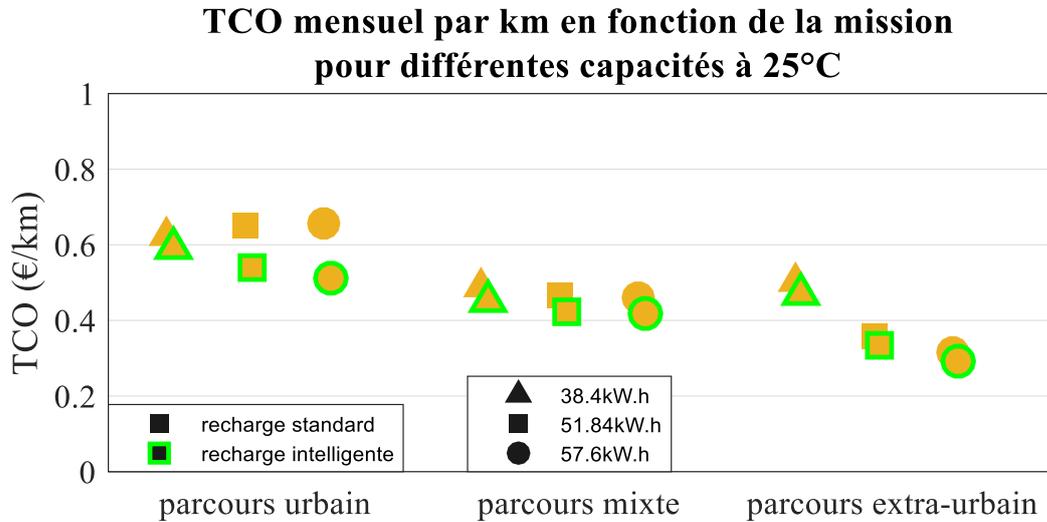


Figure IV-8 : Impact de la recharge intelligente sur le TCO à 25°C

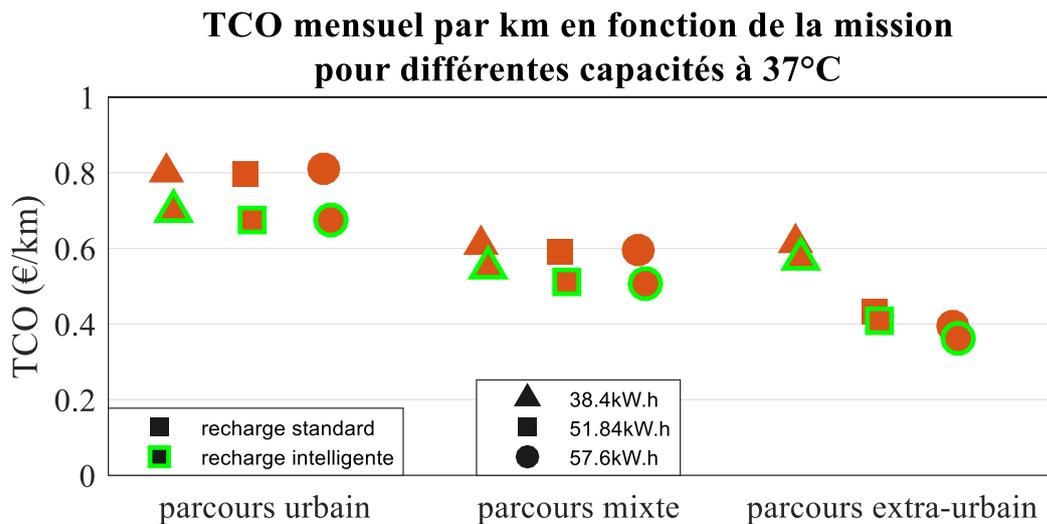


Figure IV-9 : Impact de la recharge intelligente sur le TCO à 37°C

Pour le parcours mixte et le parcours urbain, les gains sont également faibles à basse température pour les différentes capacités. Effectivement, la stratégie de recharge permet de ralentir principalement le vieillissement calendaire. Or, c'est justement à basse température que ce vieillissement calendaire est le plus faible. Ainsi l'amélioration du vieillissement est faible et la réduction de TCO également. Le baisse de TCO est cependant de l'ordre de 3% à 4% soit une économie mensuelle d'environ 35€ en moyenne. Sur le parcours mixte et pour les températures de 25°C et 37°C, les économies sont un peu plus importantes, et croissent avec l'augmentation de la capacité. Cela s'explique par la possibilité de conserver des états de charge plus bas pour gagner en durée de vie lorsque la capacité est plus importante. De même pour le



parcours urbain, pour les températures de 25°C et 37°C, l'économie de TCO augmente en fonction de la capacité. De plus, à 25°C, la stratégie de recharge intelligente modifie la tendance de l'impact de la capacité sur le TCO (Figure IV-8). En effet, avec une recharge standard, le surdimensionnement de la capacité entraîne un TCO plus élevé, alors que c'est l'inverse avec la recharge intelligente.

Les économies obtenues avec la stratégie de recharge intelligente vont jusqu'à 16% de TCO ce qui représente jusqu'à 200€ d'économie net par mois sur le coût global de possession du VUE.

Afin de vérifier l'impact de chaque partie de la stratégie de recharge intelligente, le TCO a été calculé pour les stratégies partielles de décalage de la charge et de recharge de la quantité nécessaire à la mission du lendemain. La Figure IV-10 reprend les stratégies étudiées dans la partie précédente sur la Figure IV-6, et présente les résultats de calcul du TCO. Les calculs avec une recharge standard et une recharge intelligente correspondent aux résultats pour le parcours mixte avec une capacité de 57.6 kWh sur la Figure IV-8. Dans ces conditions, la stratégie de recharge intelligente choisie permet une économie de TCO kilométrique de plus de 13%. Si pour des contraintes professionnelles, le client souhaite inhiber une partie de la stratégie (ne pas décalée le début de la recharge ou ne pas limiter la quantité d'énergie rechargée en fonction des besoins), l'amélioration du TCO par la partie de la stratégie restante ne sera que de 4.8%. Le lien entre le gain en durée de vie et l'économie sur le TCO n'étant pas linéaire, l'amélioration en TCO de la stratégie complète apporte une économie bien plus importante que la somme des deux économies.

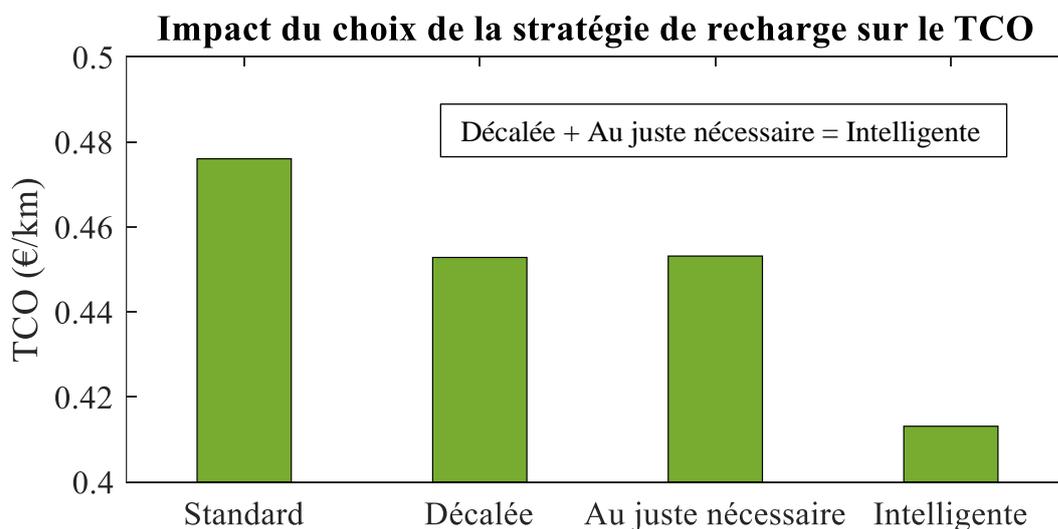


Figure IV-10 : Comparaison des stratégies de recharge sur le TCO à 25°C

Afin de vérifier l'impact de la stratégie de recharge intelligente sur le TCO optimisé en fonction du dimensionnement, les calculs d'optimisation du TCO en fonction de la capacité de la batterie ont été réitérés avec la stratégie de recharge intelligente.

IV - 2.4 Interaction de la recharge intelligente sur le dimensionnement

Le dimensionnement de la batterie a été recalculé dans les mêmes conditions que dans le chapitre précédent (III - 3.Optimisation de la capacité) précédemment avec la stratégie de recharge intelligente. La Figure IV-11, la Figure IV-12, et la Figure IV-13 représentent l'évolution du TCO par kilomètre en fonction de la capacité sous différentes températures pour les missions respectivement urbaines, mixtes et extra-urbaines. La Figure IV-14 résume les points de dimensionnement optimum vis-à-vis du TCO avec et sans la stratégie de recharge intelligente.

Les courbes des trois figures de dimensionnement prolongent les résultats trouvés avec les calculs sur les trois capacités disponibles au catalogue (Figure IV-7, Figure IV-8 et Figure IV-9) . Pour chaque mission et chaque condition, avec ou sans la stratégie de recharge intelligente, les durées de vie augmentent au fur et à mesure que la capacité augmente. Cependant, avec la stratégie de recharge intelligente, l'augmentation de la durée de vie est plus importante. En revanche, pour que l'augmentation de la durée de vie se traduise en une amélioration du TCO, il faut que cette augmentation soit suffisante pour compenser les coûts supplémentaires liés à une capacité plus élevée (prix d'achat, impact de la masse supplémentaire sur la consommation...).

TCO par km de la mission urbaine pour différentes températures en fonction du dimensionnement de la capacité

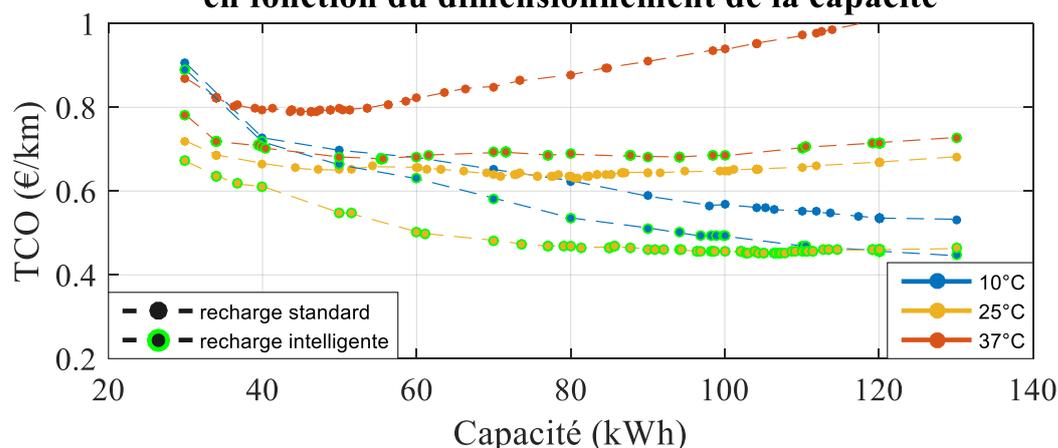


Figure IV-11 : Impact de la recharge intelligente et du dimensionnement sur le TCO pour la mission urbaine



TCO par km de la mission mixte pour différentes températures en fonction du dimensionnement de la capacité

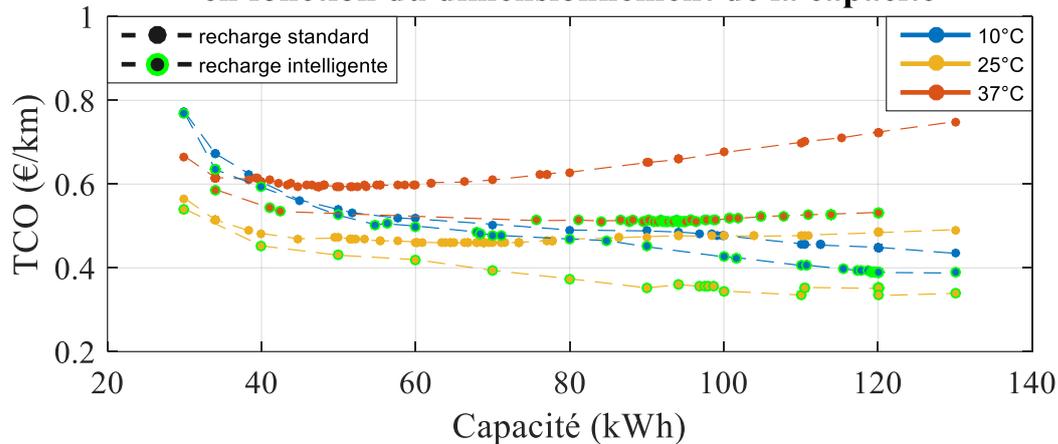


Figure IV-12 : Impact de la recharge intelligente et du dimensionnement sur le TCO pour la mission mixte

TCO par km de la mission extra-urbaine pour différentes températures en fonction du dimensionnement de la capacité

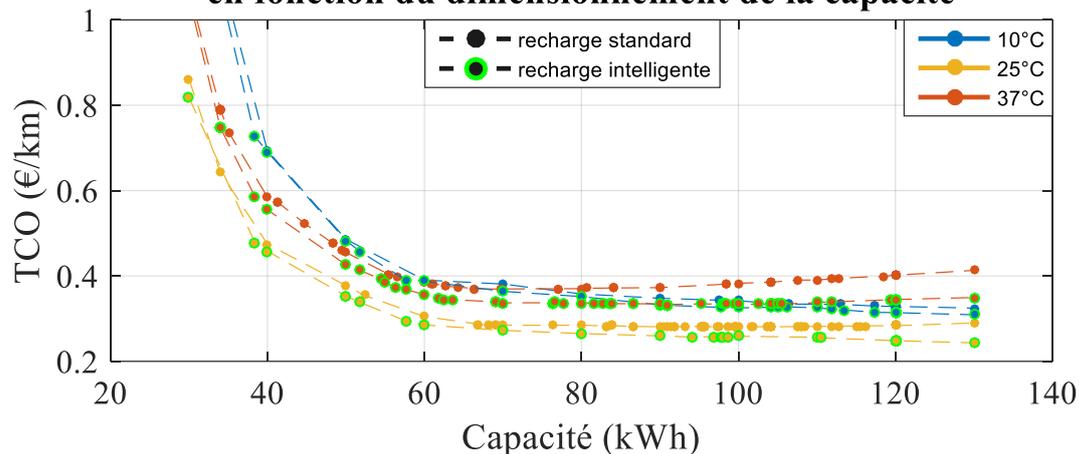


Figure IV-13 : Impact de la recharge intelligente et du dimensionnement sur le TCO pour la mission extra-urbaine

La recharge intelligente permet une baisse du TCO dans toutes les configurations étudiées. Cette baisse provient du gain en durée de vie qui est généré par la baisse du niveau de SOC dans la stratégie de recharge. Le niveau de SOC impacte le vieillissement calendaire et est d'autant plus important que la part du vieillissement calendaire est importante, que la température est élevée et que la capacité est surdimensionnée. En effet, si la part du calendaire est plus importante, le gain potentiel en durée de vie se faisant sur la partie calendaire est augmenté. De plus, si la capacité est plus élevée que l'énergie minimale nécessaire pour réaliser la mission, la stratégie de recharge permet de diminuer le niveau de SOC. Cette baisse du niveau de SOC moyen sera d'autant plus importante que la capacité est surdimensionnée. Par interprétation des résultats de vieillissement calendaire, plus le SOC est bas et plus le

vieillesse est faible. Cette diminution du vieillissement est d'autant plus importante que la température est élevée. Effectivement, les températures élevées favorisent le vieillissement calendaire. Le gain potentiel lié à la diminution du SOC peut alors être plus important. Ainsi, plus la température et la capacité sont élevées, plus le TCO est réduit par la stratégie de recharge intelligente.

Impact de la recharge intelligente sur le TCO par km avec dimensionnement optimal

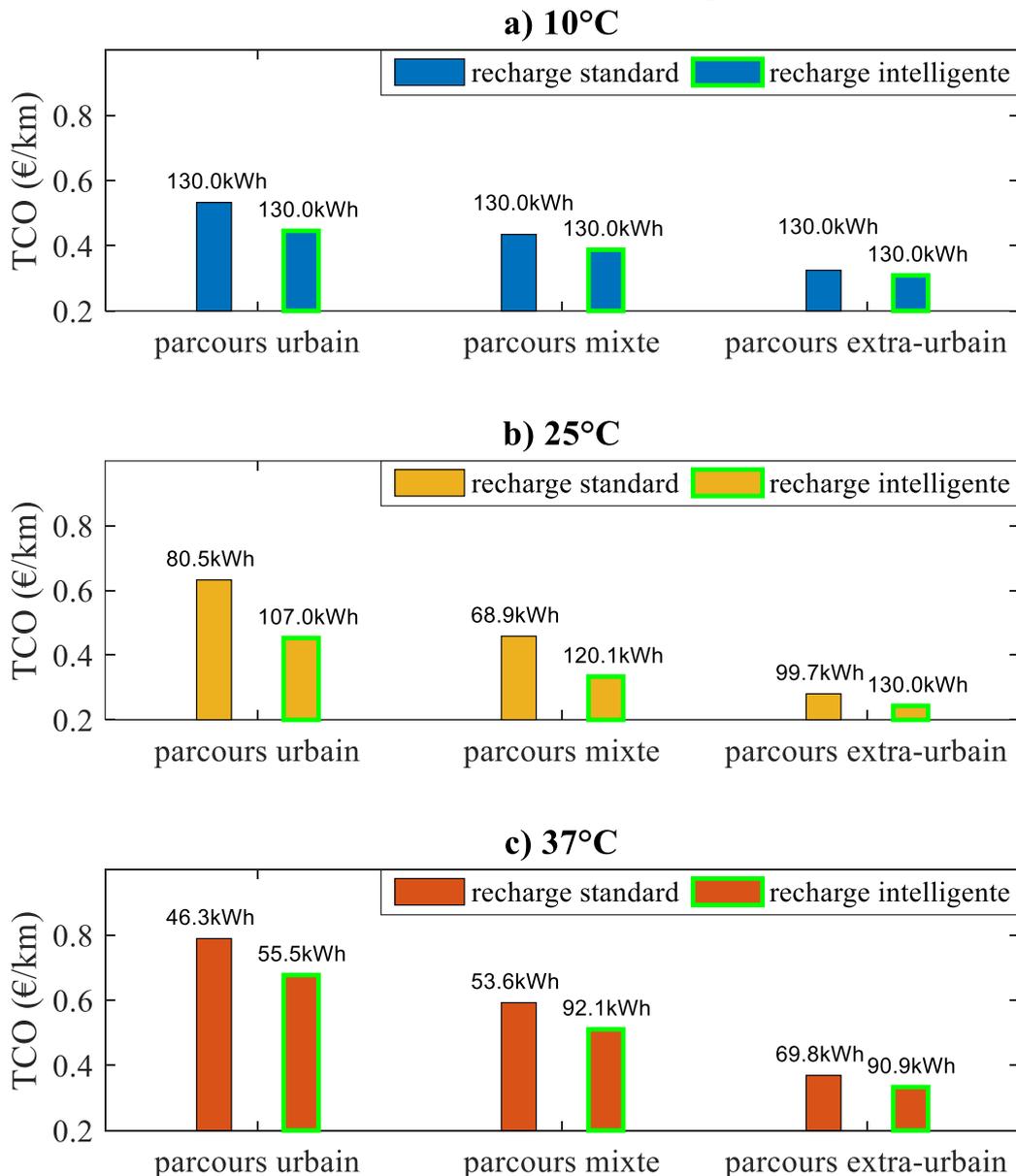


Figure IV-14 : résumé des points de dimensionnement optimum vis à vis du TCO et de la recharge intelligente

L'ajout de la stratégie de recharge intelligente dans le calcul du dimensionnement optimal de la batterie vis-à-vis du TCO translate le point de capacité optimale vers une capacité



plus élevée. Sous 25°C (Figure IV-14 b)), le point de capacité optimale passe de 80.5 kWh à 107 kWh pour le parcours urbain, de 68.9 kWh à 120.1 kWh pour le parcours mixte et de 99.7 kWh à plus de 130 kWh pour le parcours extra-urbain, avec des TCO par kilomètre minimum réduit respectivement à 0.45€/km, 0.34€/km et 0.24€/km soit une différence de -0.18€/km, -0.12€/km et -0.04€/km. Compte tenu des missions choisies les gains mensuels sur ces points optimaux seraient de l'ordre de 228€ pour le parcours urbain, 249€ pour le parcours mixte et 176€ pour le parcours extra-urbain. Ces résultats sont obtenus en multipliant le TCO kilométrique par la distance mensuelle parcourues. En plus du décalage du point de dimensionnement optimal, il est visible sur les figures de résultats de dimensionnement (Figure IV-11, Figure IV-12, et Figure IV-13) que les variations de TCO autour du point optimal sont diminués. En d'autres termes, les courbes d'évolution du TCO en fonction de la capacité sont aplaties autour du point de TCO minimal. La sensibilité du choix de la capacité par rapport au TCO, au voisinage du point optimal, est alors réduite avec la mise en œuvre de la stratégie de recharge intelligente. La stratégie de recharge intelligente apporte ainsi une flexibilité dans le choix d'une capacité proche du point optimal.

Sous 37°C, le point de capacité optimal passe de 46.3 kWh à 55.5 kWh pour le parcours urbain, de 53.6 kWh à 92.1 kWh pour le parcours mixte et 69.8 kWh à 90.9 kWh pour le parcours extra-urbain, avec des TCO par kilomètre minimum réduit respectivement à 0.68€/km, 0.51€/km et 0.33€/km soit une différence de -0.11€/km, -0.08€/km et -0.04€/km. Compte tenu des missions choisies les gains mensuels sur ces points optimaux seraient de l'ordre de 139€ pour le parcours urbain, 165€ pour le parcours mixte et 176€ pour le parcours extra-urbain. Enfin, à basse température, l'impact de la stratégie de recharge est moins important, mais pour une capacité de 130 kWh et sous 10°C, le TCO obtenu passe de 0.53€/km à 0.44€/km pour le parcours urbain, de 0.43€/km à 0.39€/km pour le parcours mixte et de 0.32€/km à 0.31€/km pour le parcours extra-urbain, soit respectivement des écarts de -0.09€/km, -0.04€/km et -0.01€/km. Les gains potentiels sous 10°C sont bien plus faibles mais représentent tout de même mensuellement près de 114€ pour le parcours urbain, 83€ pour le parcours mixte et 44€ pour le parcours extra-urbain.

La recharge intelligente permet ainsi une meilleure rentabilité dans toutes les conditions et apporte un intérêt plus important au surdimensionnement de la batterie. Le gain potentiel de cette stratégie de recharge intelligente sur le TCO va jusqu'à 249€ par mois. De plus, les essais sur le cyclage ont révélés que la baisse du niveau moyen de SOC couplé à des profondeurs de décharge plus faibles, diminue également le vieillissement en cyclage. Avec l'utilisation de la stratégie de recharge couplée au surdimensionnement de la capacité, la profondeur de décharge est justement plus faible et sur des niveaux moyens de SOC plus bas. Bien que l'impact de la profondeur de décharge n'a pas été modélisé par manque d'essais, le gain potentiel de la stratégie de recharge et du surdimensionnement ne pourrait être que meilleur.

IV - 3. Logiciel de calcul du TCO

Afin de permettre au service commercial d'avoir un aperçu de l'effet du choix de la capacité et de la stratégie de recharge pour chaque mission client, un logiciel a été développé. Ce logiciel intègre notamment les lois de vieillissement des batteries, les lois de dynamique du véhicule pour connaître la puissance utile sur chaque parcours, ainsi que la stratégie de recharge pour en évaluer l'impact sur la mission (Figure IV-15). Les caractéristiques de chaque composants (moteur, onduleur, chargeur, réducteur...) sont modifiables dans les paramètres du logiciel. Le principe de fonctionnement du logiciel de dimensionnement en fonction du TCO et de la mission client, présenté sur la Figure IV-15, reprend les caractéristiques de l'algorithme d'optimisation déjà décrit sur la Figure III-15 auquel a été ajouté la stratégie de recharge intelligente. Une optimisation de la recharge intelligente pourra également être mise en place dans le futur (représenté en pointillé rouge sur la figure de principe).

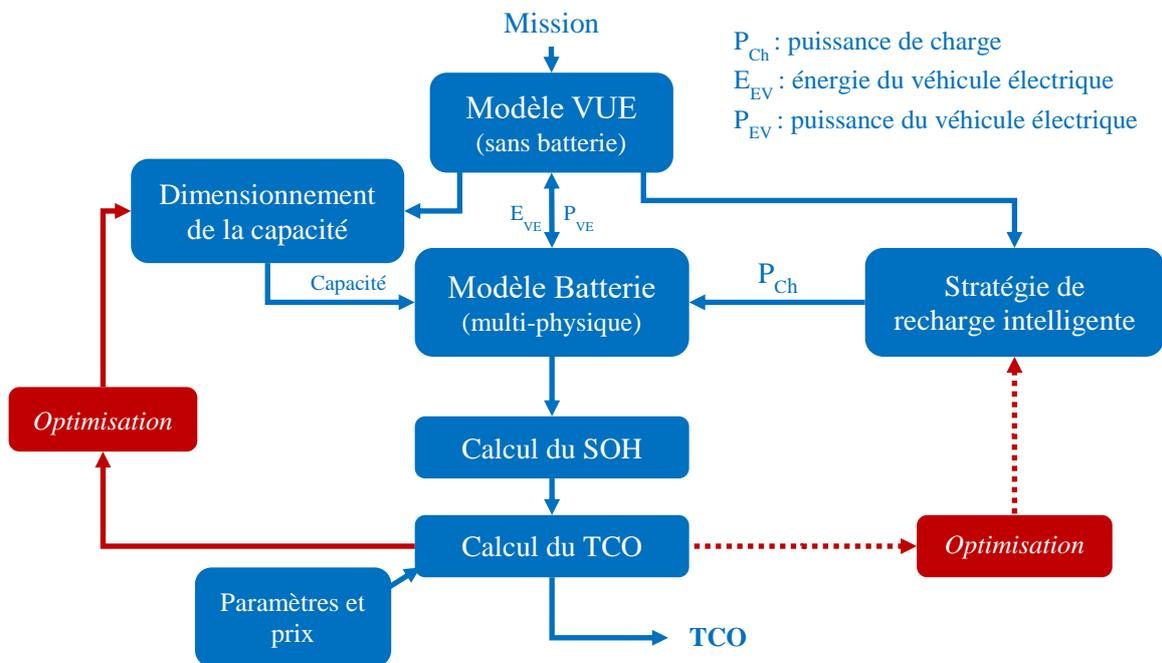


Figure IV-15 : Principe de fonctionnement du logiciel de calcul du TCO avec prise en charge du dimensionnement et de la stratégie de recharge intelligente

Dans la version actuelle du logiciel, un écran d'accueil apparaît au lancement, Figure IV-16, permettant de créer une nouvelle étude ou de repartir d'une étude existante. Il est possible également de supprimer une étude à partir de cette page. Le logiciel gère une base de données avec l'ensemble des informations des parcours ainsi que les résultats de calculs.



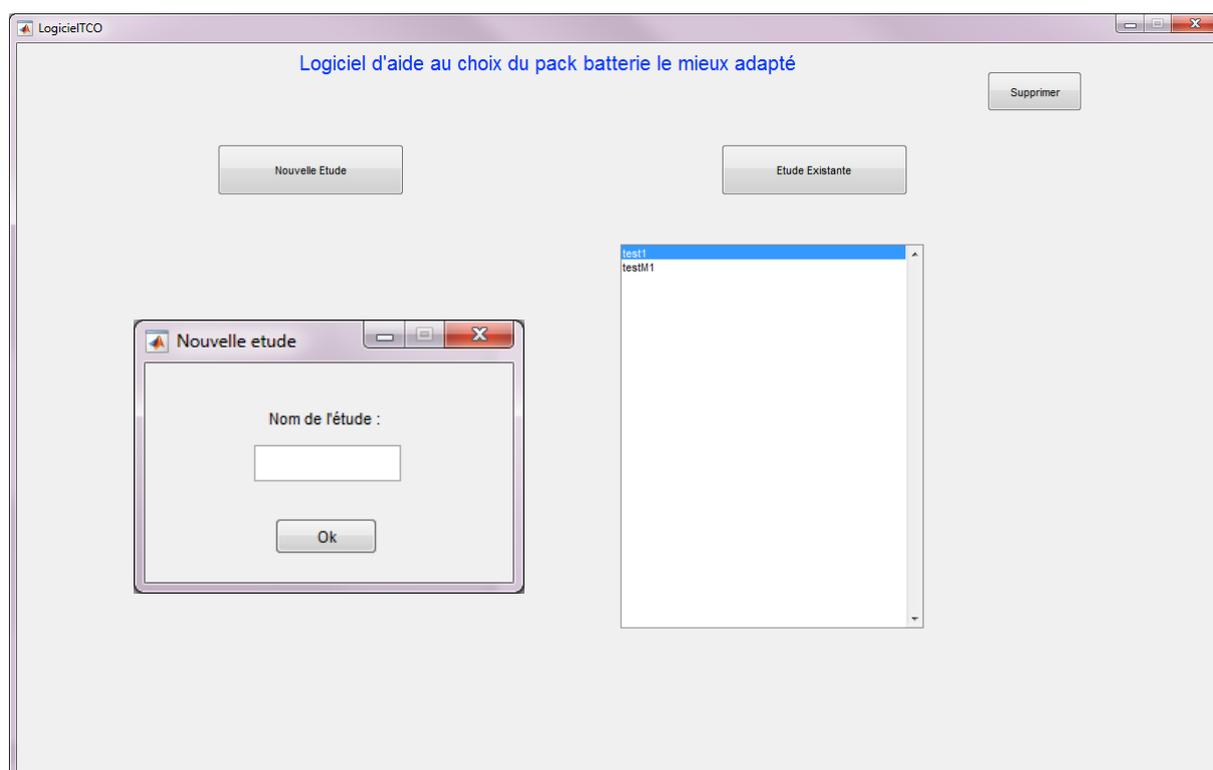


Figure IV-16 : Visuel de la page d'accueil du Logiciel d'aide au choix de la batterie en fonction de la mission client

Après avoir ouvert une étude, trois onglets apparaissent « Parcours », « Configuration Véhicule » et « Résultats ». L'onglet « Parcours », Figure IV-17, permet de choisir quel est le parcours souhaité pour l'étude. De nouveaux parcours peuvent être intégrés à l'aide du boîtier d'acquisition qui a été réalisé pour la première étape clé. C'est également dans cet onglet que le nombre de jours de roulage par semaine est défini. Il y a également un tableau où peut être modifiée la température heure par heure afin de configurer les variations de température ambiante lors du parcours. Dans les versions suivantes du logiciel il pourra être intégré au besoin, une zone de période de vacances, ou une planification plus raffinée de l'utilisation et de la température.

Chapitre IV Stratégie de recharge intelligente

IV - 3 Logiciel de calcul du TCO

LogicielTCO

Logiciel d'aide au choix du pack batterie le mieux adapté

Accueil Supprimer

Parcours Configuration Véhicule Résultats

Choix du parcours : Jours de roulage par semaine :

Température journalière (°C par h) :

1	2
15	15

Figure IV-17 : Visuel de l'onglet "parcours" du Logiciel d'aide au choix de la batterie en fonction de la mission client

LogicielTCO

Logiciel d'aide au choix du pack batterie le mieux adapté

Accueil Supprimer

Parcours Configuration Véhicule Résultats

Masse Véhicule (kg) : Masse Batterie (kg/kWh) :

Type de carrosserie : ou S.Cx :

Coût électricité (€/kWh) : Prix du véhicule : Prix des batteries (€/kWh) :

Figure IV-18 : Visuel de l'onglet "Configuration Véhicule" du Logiciel d'aide au choix de la batterie en fonction de la mission client



L'onglet de « Configuration du Véhicule », Figure IV-18, permet de définir les informations relatives au véhicule tels que la masse du véhicule, le type de carrosserie (rattaché à un coefficient du produit S.Cx), le coût de l'électricité ainsi que le prix du véhicule. Cet onglet permet également de définir un prix et une masse de batterie en fonction de la capacité. C'est le coefficient qui servira lors du dimensionnement de la batterie à déterminer le coût et la masse prévisionnel de la solution. D'autres paramètres de coûts (frais d'immatriculation, périodicité de maintenance ...), des paramètres de configuration de la stratégie de recharge intelligente, des paramètres sur les lois de vieillissement des batteries ne sont pas accessibles directement via l'interface graphique du logiciel. Ces paramètres pourront bien évidemment être ajoutés à l'interface dans une prochaine version du logiciel suivant les besoins.

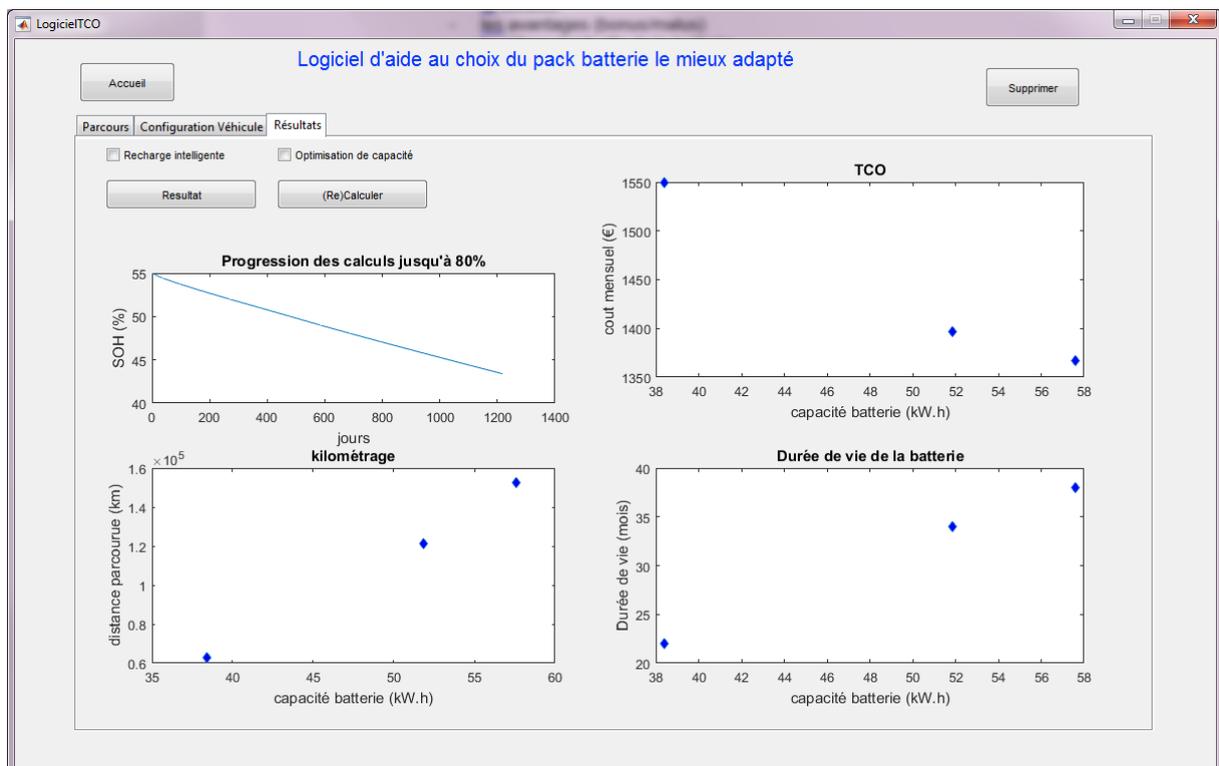


Figure IV-19 : Visuel de l'onglet "Résultats" du Logiciel d'aide au choix de la batterie en fonction de la mission client

Le dernier onglet, « Résultat », Figure IV-19, permet de lancer les calculs de TCO et d'afficher les résultats. Les cases à cocher permettent de sélectionner ou non la recharge intelligente et l'optimisation de la capacité. Par défaut, les calculs sont effectués pour les trois capacités disponibles au catalogue du VUE. Dans cette version du logiciel les informations de TCO, de durée de vie et de distance sont affichées afin de pouvoir comparer les différents choix de capacité.

IV - 4. Conclusion du Chapitre IV

Ce quatrième et dernier chapitre a permis d'étudier la mise en œuvre d'une stratégie de recharge intelligente afin d'améliorer le TCO.

La première partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude des résultats d'essais de vieillissement qui ont été faits sur la cellule pour en extraire des pistes d'amélioration du vieillissement. De plus la stratégie de recharge actuelle a également été étudiée, ainsi que son impact sur le réseau électrique. Les résultats d'essais montrent que pour la partie de vieillissement calendaire, le niveau de charge (SOC) accélère le vieillissement de la cellule lorsqu'il est élevé. Une première idée pour limiter le vieillissement a été de ne recharger que l'énergie nécessaire pour assurer la mission prévue le lendemain et éviter si possible de charger totalement la batterie. De plus l'analyse de la disponibilité de l'énergie sur le réseau électrique montre qu'il est préférable d'éviter de charger en fin de journée, après la journée de travail car c'est à ce moment précis que le pic de consommation électrique se produit. Il est donc préférable pour l'équilibre du réseau de recharger pendant la nuit, en période creuse. Le décalage de la charge est la seconde piste étudiée pour la création d'une stratégie de recharge intelligente. En effet, ce décalage permet de conserver la batterie du VUE à un SOC faible, obtenu en fin de mission, pendant un temps plus long ce qui permet de gagner en durée de vie. Une fois la stratégie de recharge intelligente identifiée, des calculs de vieillissement de la batterie ont été réalisés. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de la stratégie développée qui nous permet d'obtenir une augmentation de 32% sur la durée de vie de la batterie. Dans la suite du chapitre, le TCO a été calculé avec la stratégie de recharge intelligente choisie afin de vérifier que le gain en durée de vie se traduit bien par une amélioration du TCO et dans quelle mesure. Dans tous les cas de figure étudiés, la stratégie de recharge apporte une amélioration du TCO, allant jusqu'à une diminution du coût mensuel global de près de 16% soit un montant équivalent à 200€ par mois.

Dans le chapitre précédent l'amélioration du TCO était réalisée à partir de l'optimisation du dimensionnement de la capacité. L'interaction entre la stratégie de recharge intelligente et le dimensionnement de la capacité a également été étudiée dans cette partie. Les résultats montrent que pour tous les cas de figure étudiés, le couplage entre la stratégie de recharge et l'optimisation de la capacité apporte une amélioration du TCO. En effet la stratégie de recharge permet d'accentuer l'intérêt du surdimensionnement de la batterie, avec un gain de TCO allant jusqu'à 249€ par mois. De plus, la stratégie de recharge intelligente permet d'aplatir la courbe de TCO autour du dimensionnement du point optimal ce qui apporte une flexibilité dans le choix d'une capacité intéressante pour l'utilisateur.



Enfin, la dernière partie de ce chapitre présente l'outil de calcul du TCO et de conseil marketing pour le choix du dimensionnement du pack batterie du client. L'intérêt est de synthétiser les études faites précédemment dans un outil qui permet d'appréhender l'impact de chaque élément sur le TCO du VUE (la mission, la stratégie de recharge, la capacité de la batterie...). Ce logiciel a été conçu pour le constructeur et le vendeur, afin de conseiller le client et promouvoir l'intérêt économique de la solution qu'il propose. Cet outil permet d'adapter le calcul en fonction du client et d'estimer une durée de vie et un coût de revient global en fonction d'une mission spécifique.

CONCLUSION GENERALE

Le véhicule électrique est une solution de transport qui permet de ne pas rejeter de polluant lors de son utilisation. La démocratisation du véhicule électrique augmente peu à peu mais des freins à son déploiement sont toujours présents. Le coût de l'électrification d'un véhicule, l'autonomie, la durée de vie des batteries et l'adaptation des infrastructures électriques pour la recharge sont les principaux freins au développement des ventes de véhicules électriques. Pour ces raisons, la rentabilisation du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique peut inciter les utilisateurs à adopter la solution électrique dans le domaine du transport. Dans cette thèse, nous avons étudié quelques solutions pour rendre le véhicule électrique plus attractif, en étudiant des voies d'amélioration du coût de revient global du véhicule électrique utilitaire. Nous avons mis l'accent sur l'amélioration du coût du système de stockage de l'énergie qui peut représenter jusqu'à 50% du prix d'achat du véhicule.

Le premier chapitre de cette thèse permet de poser le contexte écologique et économique afin de comprendre la problématique liée au cas d'étude du véhicule utilitaire électrique qui peut être résumée à l'optimisation du coût total de possession (TCO). Afin de résoudre la problématique, l'intérêt de réaliser une modélisation du véhicule a été étudiée et justifiée. Les batteries ont une durée de vie limitée, en comparaison à un réservoir à carburant hydrocarbure, et doivent être utilisées de manière optimale pour assurer un coût de revient global compétitif. Afin de s'assurer d'une utilisation optimale, il a été choisi de modéliser les batteries à travers un modèle multi-physique comprenant un modèle électrique, un modèle thermique et un modèle de vieillissement. L'étude présentée porte sur un véhicule utilitaire dans un contexte d'utilisation professionnel. Ainsi le besoin client est clairement défini avec un usage régulier et prédictible. Un cahier des charges a ensuite été explicité pour décrire les caractéristiques des missions d'étude retenues, du véhicule et de la technologie de stockage d'énergie électrique



Conclusion générale

choisie. Un état de l'art des accumulateurs électriques actuels a été réalisé afin de comprendre le choix de la technologie retenue et de le positionner par rapport aux autres. La technologie de batterie retenue est la technologie au lithium phosphate de fer (LFP), choisie par l'industriel essentiellement pour son bon rapport entre sa densité énergétique et son prix, tout cela sans aucun compromis sur la sécurité.

La modélisation et l'identification des modèles du véhicule puis de la batterie ont ensuite été réalisées. Le premier modèle étudié est celui de la dynamique du véhicule, issu de modèles simples, largement utilisés dans la littérature, basés sur le principe fondamental de la dynamique et les lois de la physique. La modélisation de la batterie de stockage d'énergie est réalisée sous forme d'un modèle multi-physique afin de pouvoir prendre en compte les caractéristiques électriques, thermiques et en vieillissement de la cellule. Afin de modéliser la batterie, des campagnes d'essais sur les cellules de batterie ont été menées en collaboration avec le CEA. La définition du plan de test a été faite de sorte à caractériser au mieux l'ensemble du comportement de la cellule compte tenu des contraintes de nombre de voies, de temps et de coût d'essais. Les modèles électrique et thermique sont basés sur la théorie des circuits équivalents et représentent bien le comportement de la cellule. La modélisation du vieillissement est celle qui a demandé le plus d'essais car le modèle choisi est un modèle empirique, basé sur des modèles déjà utilisés dans la littérature de travaux précédents. Le choix a été fait de distinguer le vieillissement calendaire et en cyclage. L'idée a été d'avoir un modèle qui soit capable de s'adapter à n'importe quelle mission, et qui ne soit pas spécifique à un cycle d'utilisation unique. Chaque modèle a été paramétré par identification avec des résultats d'essais sur véhicule et le composant batterie. Les résultats d'essais et la modélisation du vieillissement ont permis de mieux comprendre les facteurs qui entrent en jeu. Ainsi, le vieillissement calendaire est fortement atténué par les faibles températures et par un niveau de charge bas, dans un second ordre. Concernant le vieillissement en cyclage, les forts courants accélèrent ce vieillissement. Il est également amplifié par les basses températures proches de 0°C.

Après avoir modélisé le véhicule et sa batterie, la méthode de calcul du TCO a été étudiée. La méthode de calcul du TCO retenue a tout d'abord été détaillée afin de réaliser par la suite des simulations en fonction de différentes missions, températures, capacités et masses. Ces premières simulations permettent de comprendre les facteurs qui impactent le TCO. Ensuite le dimensionnement de la capacité de la batterie a été optimisé pour minimiser le TCO. Afin d'améliorer notre outil informatique en terme de temps de simulation, nous avons développé un algorithme pour accélérer les calculs. La méthode de calculs accélérés ainsi qu'un algorithme d'optimisation du TCO sont mis en place afin d'obtenir des résultats représentatifs de TCO optimal en un temps réduit. L'algorithme d'optimisation retenu est un algorithme méta-heuristique de type PSO-NM (Annexe A - 3. Algorithme d'optimisation hybride (PSO/NM))

Conclusion générale

[39]) développé au sein du laboratoire. Les résultats des optimisations montrent que le TCO minimal est atteint pour une capacité de batterie surdimensionnée par rapport au besoin en énergie du client pour assurer sa mission. En effet, il y a concurrence entre le prix d'achat de la batterie, plus chère pour une capacité plus élevée, et les courants traversant chaque cellule qui sont alors plus faibles, ce qui réduit le vieillissement et entraîne un coût de fonctionnement plus faible. Ce résultat est donc différent de l'intuition de départ qui serait de dimensionner le système de stockage uniquement au juste nécessaire des besoins de la mission pour réduire le prix d'achat. Le TCO permet, par définition, une comparaison plus large en ne se limitant pas simplement au coût d'achat mais en prenant en considération tous les facteurs qui agissent sur le coût global de possession. L'étude des missions montre également que le taux d'utilisation du véhicule a une importance forte sur le TCO. En effet, le vieillissement calendaire se produit en permanence, y compris lorsque le véhicule n'est pas utilisé. Ainsi, Le véhicule parcourra moins de distance pendant la durée de vie de la batterie si celui-ci est peu utilisé. Du fait de la faible autonomie que peut disposer un véhicule électrique par rapport à son homologue thermique, l'idée reçue est que le véhicule électrique est plus intéressant à être utilisé pour les faibles distances. Or, il s'avère qu'il est d'autant plus rentable que son utilisation est intensive. Les résultats montrent que le coût de revient du véhicule par kilomètre peut être réduit de moitié (entre les parcours étudiés urbain et extra-urbain). L'étude avec une vision globale par le TCO permet de prendre des décisions économiques justifiées et de s'affranchir de préjugés ou d'idées reçues.

Toujours dans le but d'améliorer le TCO, une dernière partie de la thèse traite de la génération d'une stratégie de recharge intelligente basée sur les résultats précédents afin de limiter le vieillissement. La stratégie de recharge intelligente développée est basée sur la diminution du niveau de charge pour assurer un vieillissement plus faible sans surcoût et de fait réduire le TCO. La stratégie finale est composée de deux principes. Le premier principe est de recharger seulement l'énergie nécessaire pour assurer la mission prévue le lendemain. Sans stratégie de recharge particulière, le véhicule est généralement branché sur le réseau électrique en fin de journée après sa mission, va débiter sa charge dès ce moment-là et se charger jusqu'à 100%. Le second principe est de décaler le début de la recharge afin de finir la charge juste à temps pour la prochaine mission et de conserver le véhicule plus longtemps avec un SOC bas (« déchargé ») au lieu de le maintenir en charge totale jusqu'à l'heure de départ pour la mission. Ce deuxième principe est également bénéfique à la gestion du réseau électrique puisque la recharge se produirait plus tard soit idéalement dans la nuit pendant la période creuse et ne se produirait plus après la journée de travail où un pic de consommation nationale est déjà observé. Après avoir identifié la stratégie de recharge intelligente, des calculs de vieillissement de la batterie ont été réalisés. La stratégie permet l'augmentation de 32% de la durée de vie de la batterie pour la mission mixte à 25°C. Le TCO a été calculé avec cette nouvelle stratégie, et



Conclusion générale

dans tous les cas de figure étudiés, cette stratégie de recharge intelligente apporte une amélioration du TCO, allant jusqu'à une diminution du coût mensuel global de près de 16% soit un montant équivalent à 200€ par mois. La stratégie de recharge a également été couplée à l'optimisation du dimensionnement de la capacité. Les résultats montrent que pour tous les cas de figure étudiés, le couplage entre la stratégie de recharge et l'optimisation de la capacité apporte une amélioration du TCO. En effet la stratégie de recharge permet l'amélioration du TCO pour des capacités de batterie encore plus élevées avec un gain allant jusqu'à 249€ par mois. La stratégie de recharge rend le surdimensionnement de la capacité encore plus avantageux. De plus, la stratégie de recharge intelligente permet d'avoir un choix de capacité quasi optimale plus flexible puisque les variations de TCO autour du point optimal de capacité sont dans ce cas bien plus faibles. Enfin, la dernière partie du mémoire présente un premier exemple d'utilisation de ces travaux dans une première version d'un outil de calcul du TCO et de conseil marketing pour optimiser le dimensionnement du pack batterie suivant les contraintes des clients. L'intérêt est de synthétiser les études faites précédemment dans un outil qui permet d'appréhender l'impact de chaque élément sur le TCO du VUE (la mission, la stratégie de recharge, la capacité de la batterie...). Ce logiciel a été conçu pour le constructeur et le vendeur, afin de conseiller le client et promouvoir l'intérêt économique de la solution qu'il propose. Enfin, il permet d'adapter le calcul en fonction du client et d'estimer une durée de vie et un coût de revient global en fonction d'une mission spécifique.

L'étude du TCO du véhicule utilitaire électrique montre qu'il est possible d'améliorer considérablement son attractivité en effectuant les bons choix, adaptés au client. De plus la solution la plus intéressante n'est pas nécessairement celle qui est la moins chère à l'achat.

Toutefois afin de pouvoir proposer une garantie au client en fonction de son utilisation, il serait intéressant d'approfondir les essais de vieillissement de la batterie ainsi que de raffiner le modèle multi-physique. Il serait également intéressant de reproduire les études réalisées avec plusieurs missions pour un même client afin de juger de l'impact d'un changement d'affectation de mission durant la vie du véhicule. Pour aller plus loin dans la gestion de la charge ou du TCO, la prise en compte d'une flotte de véhicule pourrait être programmée ce qui permettrait de mettre en place des stratégies de gestion et d'affectation de mission en fonction de la capacité et du vieillissement pour tenter de minimiser à nouveau le TCO global.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : REPARTITION DES COUTS DU VEHICULE.....	11
FIGURE 2: SECTEUR D'ACTIVITE GRUAU.....	15
FIGURE 3 : DIVERSITE DES PRODUITS GRUAU	15
FIGURE 4 : CHIFFRES CLES GRUAU	17
FIGURE 5 : PARC AUTOMOBILE DES PRINCIPAUX PAYS, 1898-2015 [1].....	18
FIGURE 6 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE MONDIALE [2].....	19
FIGURE 7 : COMPARAISON DES VALEURS LIMITES DES EMISSIONS POUR DIFFERENTES NORMES [3]	20
FIGURE I-1 : PRINCIPALES CONTRAINTES POUR L'OPTIMISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION	25
FIGURE I-2 : INTERET DE LA MODELISATION DU VUL ELECTRIQUE	26
FIGURE I-3 : ATTENDUS DU MODELE BATTERIE.....	27
FIGURE I-4 : SCHEMA DE PRINCIPE D'ACQUISITION DES DONNEES DU BOITIER.....	32
FIGURE I-5 : PROFILS DE VITESSE ET DE PENTE DES TROIS PARCOURS	35
FIGURE I-6 : ETAT DE L'ART DE LA COMPACTE DES CHAINES DE TRACTION [20]	37
FIGURE I-7 : DIAGRAMME DE RAGONE POUR COMPARER LES PERFORMANCES ENERGETIQUES ET EN PUISSANCE DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE BATTERIES [39].....	40
FIGURE I-8 : DIAGRAMMES ARAIGNEE DES PRINCIPALES TECHNOLOGIES LI-ION	43
FIGURE I-9 : COURBES DE EN DECHARGE DE LA CELLULE DE BATTERIE SOUS DIFFERENTES TEMPERATURES ET DIFFERENTS COURANTS	45
FIGURE II-1 : EFFORTS APPLIQUES AU VEHICULE	54
FIGURE II-2 : SCHEMA DE PRINCIPE DU CALCUL DE PUISSANCE, D'ENERGIE ET DE COURANT DANS LE VEHICULE ..	55
FIGURE II-3 : VERIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE DE LA DYNAMIQUE DU VEHICULE.....	56
FIGURE II-4 : PUISSANCE INSTANTANEE DU PARCOURS MIXTE EN FONCTION DU TEMPS	57
FIGURE II-5 : ENERGIE CONSOMMEE SUR LES PARCOURS RETENUS EN FONCTION DU TEMPS.....	57
FIGURE II-6 : CALCUL DU TAUX DE COURANT SUR LE PARCOURS SIMULE.....	60
FIGURE II-7 : DIAGRAMME DE REPARTITION DE TAUX DE COURANT	60
FIGURE II-8 : PRINCIPE DE MODELISATION MULTI-PHYSIQUE DE LA BATTERIE.....	61
FIGURE II-9 : TESTS A RECEPTION A 25°C.....	63
FIGURE II-10 : CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT DE LA CELLULE	65
FIGURE II-11 : TEST DE CARACTERISATION DES PERFORMANCES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE A 25°C.....	66
FIGURE II-12 : COURBE DE TENSION OCV EN FONCTION DU SOC	68
FIGURE II-13 : IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE ELECTRIQUE	68
FIGURE II-14 : COURBES DES TENSION DU MODELE ELECTRIQUE.....	69
FIGURE II-15 : VERIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE ELECTRIQUE SUR UNE CELLULE VIEILLIE.....	69
FIGURE II-16 : CIRCUIT THERMIQUE EQUIVALENT SIMPLIFIE D'UNE CELLULE DE BATTERIE	70
FIGURE II-17 : TENSION DE LA CELLULE EN CHARGE POUR DIFFERENTS REGIMES DE COURANT EN FONCTION DE LA CAPACITE CHARGEE	71
FIGURE II-18 : TEMPERATURE DE LA CELLULE EN CHARGE POUR DIFFERENTS REGIMES DE COURANT EN FONCTION DE LA CAPACITE CHARGEE	71
FIGURE II-19 : TENSION DE LA CELLULE EN DECHARGE POUR DIFFERENTS REGIMES DE COURANT EN FONCTION DE LA CAPACITE DECHARGEE	72



Annexes

A - 1 Normes européennes sur les émissions des véhicules

FIGURE II-20 : TEMPERATURE DE LA CELLULE EN DECHARGE POUR DIFFERENTS REGIMES DE COURANT EN FONCTION DE LA CAPACITE DECHARGEE	72
FIGURE II-21 : RESULTAT D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU MODELE THERMIQUE.....	74
FIGURE II-22 : RESISTANCE INTERNE EQUIVALENTE DE LA CELLULE EN CHARGE	75
FIGURE II-23 : RESISTANCE INTERNE EQUIVALENTE DE LA CELLULE EN DECHARGE.....	76
FIGURE II-24 : SCHEMA DE LA MODELISATION DU VIEILLISSEMENT DE LA CELLULE.....	77
FIGURE II-25 : EVOLUTION DE L'ETAT DE SANTE (SOH) LORS DE VIEILLISSEMENTS CALENDAIRES.....	77
FIGURE II-26 : PROTOCOLE DE CHECK-UP	80
FIGURE II-27 : RESULTATS D'ESSAIS DES CELLULES EN VIEILLISSEMENT CALENDRAIRE	81
FIGURE II-28 : IDENTIFICATIONS DES PARAMETRES DE VIEILLISSEMENT CALENDRAIRE.....	81
FIGURE II-29 : ERREUR RELATIVE DE LA MODELISATION DU VIEILLISSEMENT CALENDRAIRE	82
FIGURE II-30 : EVOLUTION DES CAPACITES DES CELLULES EN VIEILLISSEMENT EN CYCLAGE A 25 ET 45°C.....	85
FIGURE II-31 : EVOLUTION DES CAPACITES DES CELLULES EN VIEILLISSEMENT EN CYCLAGE A 0°C SOUS 1C.....	86
FIGURE II-32 : EVOLUTION DE L'ETAT DE SANTE (SOH) LORS DES CYCLAGES DE LA BATTERIE.....	87
FIGURE II-33 : RESULTATS DES TESTS DE CYCLAGE PUR.....	88
FIGURE II-34 : COUBES DE TENDANCE DES COEFFICIENTS DE MODELISATION DU CYCLAGE EN FONCTION DU TAUX DE COURANT	91
FIGURE II-35 : COUBES DE TENDANCE DES COEFFICIENTS DE MODELISATION DU CYCLAGE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	91
FIGURE II-36 : SOH DE CYCLAGE PUR APRES 500, 1500 ET 3000 CYCLES.....	92
FIGURE III-1 : DETAIL DES DEPENSES COMPTABILISEES DANS LE CALCUL DU TCO.....	100
FIGURE III-2 : COMPARAISON DU TCO ENTRE ELECTRIQUE ET THERMIQUE POUR LA MISSION MIXTE	102
FIGURE III-3 : PROFILS DE VITESSE DES MISSIONS.....	103
FIGURE III-4 : SIMULATIONS DE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DE LA MISSION, A 25°C	104
FIGURE III-5 : EVOLUTIONS DES TCO DES TROIS MISSIONS RETENUES A 25°C EN FONCTION DU TEMPS.....	106
FIGURE III-6 : EVOLUTIONS DES TCO DES TROIS MISSIONS RETENUES A 25°C EN FONCTION DU KILOMETRAGE .	106
FIGURE III-7 : SIMULATIONS DE VIEILLISSEMENTS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	107
FIGURE III-8 : EVOLUTIONS DES TCO DES TROIS MISSIONS RETENUES EN FONCTION DU KILOMETRAGE POUR 10°C, 25°C ET 37°C.....	108
FIGURE III-9 : TCO PAR KM DES MISSIONS RETENUES POUR 10°C, 25°C ET 37°C.....	109
FIGURE III-10 : SIMULATION DE DEGRADATION DE LA BATTERIE SUR LE PARCOURS MIXTE A 25°C EN FONCTION DE LA CAPACITE	111
FIGURE III-11 : SIMULATION DE DUREE DE VIE SUR LE PARCOURS MIXTE A 25°C EN FONCTION DE LA CAPACITE	112
FIGURE III-12 : TCO PAR KM DES MISSIONS RETENUES POUR DIFFERENTES CAPACITES A 10°C	113
FIGURE III-13 : TCO PAR KM DES MISSIONS RETENUES POUR DIFFERENTES CAPACITES A 25°C	113
FIGURE III-14 : TCO PAR KM DES MISSIONS RETENUES POUR DIFFERENTES CAPACITES A 37°C	113
FIGURE III-15 : PRINCIPE DE CALCUL D'OPTIMISATION DU TCO	115
FIGURE III-16 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ACCELERATION DES CALCULS.....	116
FIGURE III-17 : METHODE D'ACCELERATION DES CALCULS DE VIEILLISSEMENT.....	117
FIGURE III-18 : TEMPS DE SIMULATION DU VIEILLISSEMENT EN FONCTION DU PAS D'ACCELERATION DES CALCULS	118
FIGURE III-19 : EVOLUTION DE L'ERREUR RELATIVE DU CALCUL DE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DU PAS EN JOUR	118
FIGURE III-20 : EVOLUTION DE L'ERREUR DU CALCUL DE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DU SOH POUR UN PAS DE 98.....	119
FIGURE III-21 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE VIEILLISSEMENT A 25°C SUIVANT LA MISSION	120

Liste des figures

FIGURE III-22 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TEMPS DE SIMULATION ET LIEN AVEC LA DUREE DE VIE	121
FIGURE III-23 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO EN FONCTION DE LA MISSION SOUS 25°C	121
FIGURE III-24 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LA MISSION URBAINE	123
FIGURE III-25 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LA MISSION MIXTE	124
FIGURE III-26 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LA MISSION EXTRA-URBAINE	124
FIGURE III-27 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO POUR LA MISSION URBAINE	126
FIGURE III-28 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO POUR LA MISSION MIXTE	126
FIGURE III-29 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO POUR LA MISSION EXTRA-URBAINE	126
FIGURE III-30 : RESUME DES POINTS DE DIMENSIONNEMENT OPTIMUM DU TCO EN FONCTION DE LA MISSION ET DE LA TEMPERATURE	127
FIGURE III-31 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DE LA MASSE POUR LA MISSION MIXTE SOUS 25°C	129
FIGURE III-32 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO EN FONCTION DE LA MASSE POUR LA MISSION MIXTE SOUS 25°C	129
FIGURE III-33 : RESUME DES POINTS DE DIMENSIONNEMENT OPTIMUM DU TCO EN FONCTION DE LA MISSION ET DE LA TEMPERATURE	130
FIGURE IV-1 : DESCRIPTION DE LA RECHARGE CLASSIQUE PAR RAPPORT A LA RECHARGE INTELLIGENTE	138
FIGURE IV-2 : PRINCIPE D'UN LOGICIEL DE RECHARGE INTELLIGENTE	138
FIGURE IV-3 : SCHEMA DE L'ALGORITHME DE RECHARGE INTELLIGENTE	140
FIGURE IV-4 : INTERET DE LA RECHARGE INTELLIGENTE D'UN POINT DE VUE RESEAU ELECTRIQUE	141
FIGURE IV-5 : IMPACT DE LA RECHARGE INTELLIGENTE SUR LA DUREE DE VIE	143
FIGURE IV-6 : COMPARAISON DE L'EFFICACITE DES STRATEGIES DE RECHARGE A 25°C	143
FIGURE IV-7 : IMPACT DE LA RECHARGE INTELLIGENTE SUR LE TCO A 10°C	144
FIGURE IV-8 : IMPACT DE LA RECHARGE INTELLIGENTE SUR LE TCO A 25°C	145
FIGURE IV-9 : IMPACT DE LA RECHARGE INTELLIGENTE SUR LE TCO A 37°C	145
FIGURE IV-10 : COMPARAISON DES STRATEGIES DE RECHARGE SUR LE TCO A 25°C	146
FIGURE IV-11 : IMPACT DE LA RECHARGE INTELLIGENTE ET DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO POUR LA MISSION URBAINE	147
FIGURE IV-12 : IMPACT DE LA RECHARGE INTELLIGENTE ET DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO POUR LA MISSION MIXTE	148
FIGURE IV-13 : IMPACT DE LA RECHARGE INTELLIGENTE ET DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO POUR LA MISSION EXTRA-URBAINE	148
FIGURE IV-14 : RESUME DES POINTS DE DIMENSIONNEMENT OPTIMUM VIS A VIS DU TCO ET DE LA RECHARGE INTELLIGENTE	149
FIGURE IV-15 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL DE CALCUL DU TCO AVEC PRISE EN CHARGE DU DIMENSIONNEMENT ET DE LA STRATEGIE DE RECHARGE INTELLIGENTE	151
FIGURE IV-16 : VISUEL DE LA PAGE D'ACCUEIL DU LOGICIEL D'AIDE AU CHOIX DE LA BATTERIE EN FONCTION DE LA MISSION CLIENT	152
FIGURE IV-17 : VISUEL DE L'ONGLET "PARCOURS" DU LOGICIEL D'AIDE AU CHOIX DE LA BATTERIE EN FONCTION DE LA MISSION CLIENT	153
FIGURE IV-18 : VISUEL DE L'ONGLET "CONFIGURATION VEHICULE" DU LOGICIEL D'AIDE AU CHOIX DE LA BATTERIE EN FONCTION DE LA MISSION CLIENT	153



Annexes

A - 1 Normes européennes sur les émissions des véhicules

FIGURE IV-19 : VISUEL DE L'ONGLET "RESULTATS" DU LOGICIEL D'AIDE AU CHOIX DE LA BATTERIE EN FONCTION DE LA MISSION CLIENT	154
FIGURE A-1 : COMPOSITION DU BOITIER D'ACQUISITION.....	179
FIGURE A-2 : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME D'OPTIMISATION HYBRIDE (PSO / NM) [38]	182
FIGURE A-3 : SCHEMA VECTORIEL DU DEPLACEMENT D'UNE PARTICULE.....	184
FIGURE A-4 : SCHEMA DU PRINCIPE D'OPTIMISATION DES PARAMETRES DU MODELE [38].....	185
FIGURE A-5 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DE LA MASSE POUR LA MISSION MIXTE SOUS 10°C.....	189
FIGURE A-6 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE VIEILLISSEMENT EN FONCTION DE LA MASSE POUR LA MISSION MIXTE SOUS 37°C.....	189
FIGURE A-7 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO EN FONCTION DE LA MASSE POUR LA MISSION MIXTE SOUS 10°C	190
FIGURE A-8 : IMPACT DU DIMENSIONNEMENT SUR LE TCO EN FONCTION DE LA MASSE POUR LA MISSION MIXTE SOUS 37°C	190

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I-1 : VEHICULES ELECTRIQUES ACTUELS SUR LE MARCHÉ	29
TABLEAU I-2 : RECAPITULATIF DES PARCOURS RETENUS	34
TABLEAU I-3 : CARACTERISTIQUES NOMINALE DU VEHICULE UTILITAIRE	38
TABLEAU I-4 : CARACTERISTIQUES SUR LES MOYENS DE STOCKAGES [22]	39
TABLEAU I-5 : CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE LA CELLULE ELECTROCHIMIQUE ETUDIEE	44
TABLEAU II-1 : CARACTERISTIQUES RECALEES DU VEHICULE UTILITAIRE	56
TABLEAU II-2 : RESULTATS DES TESTS A RECEPTION DES CELLULES	64
TABLEAU II-3 : PARAMETRES ET COEFFICIENTS DU MODELE ELECTRIQUE	67
TABLEAU II-4 : RESULTATS DE LA CARACTERISATION EN PERFORMANCES DE LA CELLULE SUZHOU PHYLION C/LFP 50 AH A 25°C	73
TABLEAU II-5 : PARAMETRES ET COEFFICIENTS DU MODELE ELECTRIQUE	74
TABLEAU II-6 : CONDITION DE TEST DES ESSAIS CALENDAIRES	79
TABLEAU II-7 : RECAPITULATIFS DES MECANISMES DE VIEILLISSEMENT D'UNE CELLULE ELECTROCHIMIQUE LI-ION [34]	79
TABLEAU II-8 : PARAMETRES DU MODELE DE VIEILLISSEMENT CALENDRAIRE	82
TABLEAU II-9 : CONDITION DE TEST DU VIEILLISSEMENT EN CYCLAGE	84
TABLEAU II-10 : CONDITIONS ADDITIONNELLES DE TEST POUR LE VIEILLISSEMENT EN CYCLAGE	84
TABLEAU II-11 : PARAMETRES DU MODELE DE VIEILLISSEMENT EN CYCLAGE	90
TABLEAU III-1 : NOMBRE DE KILOMETRES PAR CYCLE ET CONSOMMATION POUR LES DIFFERENTES MISSIONS ...	105
TABLEAU A-1 : EVOLUTION DE LA NORME EURO POUR L'HOMOLOGATION DES EMISSIONS DES VEHICULES PARTICULIERS DE L'UNION EUROPEENNE DE 1992 A 2014	177



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Freyssenet M., Parc automobile mondial, par continent et par pays, 1898-2015. Document d'enquête : 15 tableaux et 14 graphiques, Édition numérique, freyssenet.com, 2013 et mises à jour. ISSN 7116 0941
- [2] Gouvernement Français, chiffres clés du climat http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/DataLab/2016/chiffres-clés-du-climat-edition2017-2016-12-05-fr.pdf, 2017
- [3] Redha Sadoun. Intérêt d'une Source d'Énergie Électrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2013
- [4] Chuan-sheng Si, "Development research about the power battery management system of pure electric vehicle," Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on , vol., no., pp.276,279, 16-18 April 2011
- [5] Al Jed, H.; Mize, A.; Vinassa, J. -M; Simon, R., "Mathematical modeling of aging factors for Li-ion battery cells," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1,4, 1-3 Sept. 2010
- [6] Greenleaf, M.; Hui Li; Zheng, J.P., "Modeling of Li FePO Cathode Li-Ion Batteries Using Linear Electrical Circuit Model," Sustainable Energy, IEEE Transactions on , vol.4, no.4, pp.1065,1070, Oct. 2013
- [7] Tan, Y.K.; Mao, J. C.; Tseng, K. J., "Modelling of battery temperature effect on electrical characteristics of Li-ion battery in hybrid electric vehicle," Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on , vol., no., pp.637,642, 5-8 Dec. 2011
- [8] A. Hammani, R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Bertrand and P. Lemoigne, "Influence Of The Management Strategies On The Sizing Of Hybrid Supply Composed With Battery And Supercapacitor", IEEE REVET 2012, Tunis
- [9] Mesbahi T., Rizoug N., Bartholomeüs P., Le Moigne P., A new energy management strategy of a battery / supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicular applications, 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 08-10/04/2014, Manchester, Royaume-Uni.



- [10] Hsieh, Y.-C.; Huang, C.-S., "Li-ion battery charger based on digitally controlled phase-shifted full-bridge converter," *Power Electronics, IET* , vol.4, no.2, pp.242,247, February 2011
- [11] Chia-Hsiang Lin; Chi-Lin Chen; Yu-Huei Lee; Shih-Jung Wang; Chun-Yu Hsieh; Hong-Wei Huang; Ke-Horng Chen, "Fast charging technique for Li-Ion battery charger," *Electronics, Circuits and Systems, 2008. ICECS 2008. 15th IEEE International Conference on* , vol., no., pp.618,621, Aug. 31 2008-Sept. 3 2008
- [12] Mesbahi T., Rizoug N., Bartholomeüs P., Le Moigne P., Improved model of battery / supercapacitor hybrid energy storage system based on thermo-electrical and aging behaviors, 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 08-10/04/2014, Manchester, Royaume-Uni.
- [13] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus and P. Le moigne, "Optimal Sizing of Hybrid Supply for Electric Vehicle Using Li-ion Battery and Supercapacitor," *International Review of Electrical Engineering*, vol 9, no.2, pp.332-340, 2014
- [14] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Bertrand and P. Lemoigne, "Sizing Of Hybrid Supply (Battery-Supercapacitor) For Electric Vehicle Taking Into Account The Weight Of The Additional Buck-Boost Chopper", *IEEE REVET 2012*, Tunis
- [15] O. Bouhali, N. Rizoug, A. Talhad, "Modelling and Control of Five-Level Three-Phase Flying Capacitors Inverter," *International Review on Modelling and Simulation (IREMOS)*. October 2011, ISSN 1975-9821, Vol. 4 N° 5. Pages 2066-2073.
- [16] N. Rizoug, P. Bartholomeüs and P. Le Moigne "Modeling and Characterizing Supercapacitors Using an On-Line Method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, Pages 3980-3990, 2010.
- [17] N. Rizoug, P. Bartholomeüs and P. Le Moigne , "Study of the Ageing Process of a Supercapacitor Module Using Direct Method of Characterization," *IEEE Transactions Energy Conversion*, Vol. 27, Pages 220-228, 2012
- [18] Noëlle Janiaud. Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l'optimisation de l'autonomie, des performances et des coûts associés. *Energie électrique. Supélec*, 2011
- [19] Pierre Caillard. Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique. *Ecole Centrale de Lille*, 2015
- [20] Gruau, « VUE-Flex-annexe-technique-30-10-2014.pdf », document technique du projet VUE-Flex, 2014
-

- [21] MULTON (B.), AUBRY (J.), HAESSIG (P.) et BEN AHMED (H.). – Systèmes de stockage d'énergie électrique, Techniques de l'Ingénieur - BE8100, 2013.
- [22] C. NGÔ, « Stockage de l'énergie », Techniques de l'Ingénieur – BE8090, 2016.
- [23] A. Burke, B. Jungers, C. Yang, and J. Ogden, "Battery Electric Vehicles: An Assessment of the Technology and Factors Influencing Market Readiness," Rapport d'étude, Institute of Transportation Studies (ITS-Davis), California Energy Commission, 2007.
- [24] Damay, N., Forgez, C., Bichat, M., & Friedrich, G. (2015). Thermal modeling of large prismatic LiFePO₄ / graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation. *Journal of Power Sources*, 283, 37–45.
- [25] A. Pruteanu, B.V. Florean, G.M. Moraru, R.C. Ciobanu, Development of a thermal simulation and testing model for a superior lithium-ion-polymer battery, *Optim. Electr. Electron. Equip. Optim. IEEE* (2012)
- [26] A. Smyshlyaev, M. Krstic, N. Chaturvedi, J. Ahmed and A. Kojic, "PDE model for thermal dynamics of a large Li-ion battery pack," *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, San Francisco, CA, 2011, pp. 959-964
- [27] X. Hu, S. Asgari, S. Lin, S. Stanton and W. Lian, "A linear parameter-varying model for HEV/EV battery thermal modeling," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, 2012, pp. 1643-1649
- [28] C. Forgez, D. Vinh Do, G. Friedrich, M. Morcrette, C. Delacourt, Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery, *J. Power Sources* 195 (9) (2010)
- [29] C. Alaoui, Solid-state thermal management for lithium-ion EV batteries, *IEEE Trans. Veh. Technol.* 62 (1) (2013)
- [30] M. Doyle, Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 6, p. 1526, Jun. 1993.
- [31] Eric Prada, D. Di Domenico, Yann Creff, J. Bernard, Val´erie Sauvant-Moynot, et al.. Simplified Electrochemical and Thermal Model of LiFePO₄-Graphite Li-Ion Batteries for Fast Charge Applications. *Journal of The Electrochemical Society*, Electrochemical Society, 2012
- [32] Li, J., Mazzola, M., Gafford, J., & Younan, N. (2012). A new parameter estimation algorithm for an electrical analogue battery model. *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 427–433
- [33] Gyan, P., Baghdadi, I., Briat, O., & Del, J. (2016). Lithium battery aging model based on Dakin ' s degradation approach. *Journal of Power Sources*, 325, 273–285.



- [34] Vinit L., Montaru M., Jammet B., « Rapport technique DTS/RT/2016/098 GRU-FLEX : Modélisation du vieillissement de cellules Li-ion », CEA tech, 2016
- [35] H. Dai, X. Zhang, X. Wei, Z. Sun, J. Wang, F. Hu, “Cell-BMS validation with a hardware-in-the-loop simulation of lithium-ion battery cells for electric vehicles,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013
- [36] A. Hentunen, T. Lehmuspelto, J. Suomela, “Electrical battery model for dynamic simulations of hybrid electric vehicles,” in 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1–6.
- [37] R. Xiong, H. He, H. Guo, Y. Ding, “Modeling for Lithium-Ion Battery used in Electric Vehicles,” *Procedia Engineering*, 2011
- [38] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, P. Bartholomeus, P. Lemoigne, “Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid particle Swarm-Nelder-Mead (PSO-NM) optimization algorithm,” *Electric power systems research*, 2015
- [39] Tedjani Mesbahi. Influence des stratégies de gestion d’une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d’un modèle multi-physique. Energie électrique. Ecole Centrale de Lille, 2016
- [40] M. Ecker, J. B. Gerschler, J. Vogel, S. Käbitz, F. Hust, P. Dechent, D. U. Sauer, “Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data,” *Journal of Power Sources*, Volume 215, 2012
- [41] Delaille, Arnaud et al. (2013). SIMCAL Project: calendar aging results obtained on a panel of 6 commercial Li-ion cells.
- [42] Lisa M. Ellram, (1995) "Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 25 Issue: 8, pp.4-23.
- [43] Geng Wu, Alessandro Inderbitzin, Catharina Bening, « Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments », *Energy Policy*, Volume 80, 2015, Pages 196-214
- [44] Jens Hagman, Sofia Ritzén, Jenny Janhager Stier, Yusak Susilo, « Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion », *Research in Transportation Business & Management*, Volume 18, 2016, Pages 11-17
- [45] Axel Villareal, « Le TCO : Comparatif du coût de possession entre voiture particulière thermique et électrique pour les entreprises », AVERE-France, 2011
-

- [46] Liu, K, Li, K, Yang, Z et al. (2017) "An advanced Lithium-ion battery optimal charging strategy based on a coupled thermoelectric model," *Electrochimica Acta*, 225. pp. 330-344. ISSN 0013-4686
- [47] ZHANG, Shuo, ZHANG, Chengning, XIONG, Rui, et al. Study on the optimal charging strategy for lithium-ion batteries used in electric vehicles. *Energies*, 2014, vol. 7, no 10, p. 6783-6797.
- [48] Caiping Zhang, Jiuchun Jiang, Yang Gao, Weige Zhang, Qiujiang Liu, Xiaosong Hu, "Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time," *Applied Energy*, Volume 194, 2017, Pages 569-577
- [49] HOKE, Anderson, BRISSETTE, Alexander, SMITH, Kandler, et al. Accounting for lithium-ion battery degradation in electric vehicle charging optimization. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, vol. 2, no 3, p. 691-700.
- [50] P. Denholm and W. Short, "An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-In Hybrid Electric Vehicles," NREL Technical Report NREL/TP-620-40293, 2006.
- [51] S. Shao, T. Zhang, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, 2010*, pp. 1–6.
- [52] Y. Cao, S. Tang, C. Li, P. Zhang, Y. Tan, Z. Zhang, and J. Li, "An Optimized EV Charging Model Considering TOU Price and SOC Curve," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 388–393, 2012.
- [53] S. Bashash and H. K. Fathy, "Optimizing demand response of plug-in hybrid electric vehicles using quadratic programming," in *American Control Conference (ACC), 2013, 2013*, pp. 716–721.
- [54] C. Jin, J. Tang, and P. Ghosh, "Optimizing Electric Vehicle Charging: A Customer's Perspective," *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 62, no. 7, Sep. 2013
- [55] Benjamin K. Sovacool, Richard F. Hirsh, "Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition", *Energy Policy*, Volume 37, Issue 3, 2009, Pages 1095-1103.
- [56] George R. Parsons, Michael K. Hidrue, Willett Kempton, Meryl P. Gardner, "Willingness to pay for vehicle-to-grid (V2G) electric vehicles and their contract terms", *Energy Economics*, Volume 42, 2014, Pages 313-324.



- [57] Jasna Tomić, Willett Kempton, "Using fleets of electric-drive vehicles for grid support", *Journal of Power Sources*, Volume 168, Issue 2, 2007, Pages 459-468.
- [58] Y. Ota, H. Taniguchi, T. Nakajima, K. M. Liyanage, J. Baba and A. Yokoyama, "Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 559-564, March 2012.
- [59] O. Hadji, "Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs électrotechniques," Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2003.
- [60] B. Leroy-beaulieu, "Etude et illustration de méthodes itératives d'optimisation non linéaire," Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- [61] E. Zahara and Y.-T. Kao, "Hybrid Nelder–Mead simplex search and particle swarm optimization for constrained engineering design problems," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2, pp. 3880–3886, Mar. 2009.
- [62] Z. Chenghui, S. Qingsheng, and C. Naxin, "Particle Swarm Optimization for energy management fuzzy controller design in dual-source electric vehicle," 2007 *IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1405–1410, 2007.
- [63] M. T. Vakil Baghmisheh, M. Peimani, M. H. Sadeghi, M. M. Etefagh, and A. F. Tabrizi, "A hybrid particle swarm–Nelder–Mead optimization method for crack detection in cantilever beams," *Appl. Soft Comput.*, vol. 12, no. 8, pp. 2217–2226, Aug. 2012.
- [64] K.-H. Chang, "Stochastic Nelder–Mead simplex method – A new globally convergent direct search method for simulation optimization," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 220, no. 3, pp. 684–694, Aug. 2012.
- [65] C.-C. Hsu and C.-H. Gao, "Particle swarm optimization incorporating simplex search and center particle for global optimization," in 2008 *IEEE Conference on Soft Computing in Industrial Applications*, 2008, pp. 26–31.
- [66] S. Caux, D. Wanderley-Honda, D. Hissel, and M. Fadel, "On-line energy management for HEV based on Particle Swarm Optimization," 2010 *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–7, Sep. 2010.
- [67] D. Ilea, "Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers," Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2011.
-

Bibliographie

- [68] S. Dusmez and A. Khaligh, “A Supervisory Power Splitting Approach for a New Ultracapacitor-Battery Vehicle Deploying Two Propulsion Machines,” IEEE Trans. Ind. Informatics, vol. 10, no. 3, pp. 1960–1971, 2014.
- [69] S.-K. S. Fan and E. Zahara, “A hybrid simplex search and particle swarm optimization for unconstrained optimization,” Eur. J. Oper. Res., vol. 181, no. 2, pp. 527–548, Sep. 2007.
- [70] M.-C. Portmann and O. Ammar, “Optimisation discrète,” 2006. Available: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-automatiqueth13/automatique-sequentielle-42395210/optimisation-discrete-s7211/>



ANNEXES

A - 1.	NORMES EUROPEENNES SUR LES EMISSIONS DES VEHICULES	177
A - 2.	OUTIL D'ACQUISITION	179
A - 3.	ALGORITHME D'OPTIMISATION HYBRIDE (PSO/NM) [39]	181
A - 4.	DONNEES TECHNIQUES DE LA CELLULE CHOISIE	187
A - 5.	RESULTATS DE SIMULATION EN FONCTION DE LA MASSE A 10°C ET 37°C	189
A - 6.	EXEMPLE DE LA RECHARGE INTELLIGENTE PAR ENEDIS	191



A - 1. Normes européennes sur les émissions des véhicules

Tableau A-1 : Evolution de la norme Euro pour l'homologation des émissions des véhicules particuliers de l'Union Européenne de 1992 à 2014

Classe	Normes	Année d'entrée en vigueur		Limites d'émissions UE pour les véhicules de particuliers (en g/km)					
		Nouveaux modèles seulement	Tous les véhicules neufs	CO	HC	HCNM	HC + NOx	NOx	Particules
Diesel	Euro 1	1992		2.720	-	-	0.970		0.140
	Euro 2 Injection indirecte	1996		1.000	-	-	0.700		0.080
	Euro 2 Injection directe	1999		1.000	-	-	0.900		0.100
	Euro 3	2000	2001	0.640	-	-	0.560	0.500	0.050
	Euro 4	2005	2006	0.500	-	-	0.300	0.250	0.025
	Euro 5	2009	2011	0.500	-	-	0.230	0.180	0.005
	Euro 6	2014	2015	0.500	-	-	0.170	0.080	0.005
Essence	Euro 1	1992		2.720			0.97		
	Euro 2	1996		2.200			0.5		
	Euro 3	2000	2001	2.300	0.200			0.150	
	Euro 4	2005	2006	1.000	0.100			0.080	
	Euro 5	2009	2011	1.000	0.100	0.068		0.060	
	Euro 6	2014	2015	1.000	0.100	0.068		0.060	



A - 2. Outil d'acquisition

Le boîtier d'acquisition est constitué :

- d'une carte programmable,
- d'une puce GPS pour connaître la localisation,
- d'une centrale inertielle pour le dénivelé et l'accélération,
- d'un émetteur-récepteur CAN afin de récupérer les informations circulant sur ce bus de communication (vitesse véhicule, distance...)
- d'un lecteur de carte microSD pour stocker les informations relevées,
- d'un afficheur,
- d'un chargeur et sa batterie qui rend le boîtier autonome et lui permet de fonctionner lors d'un arrêt du véhicule.

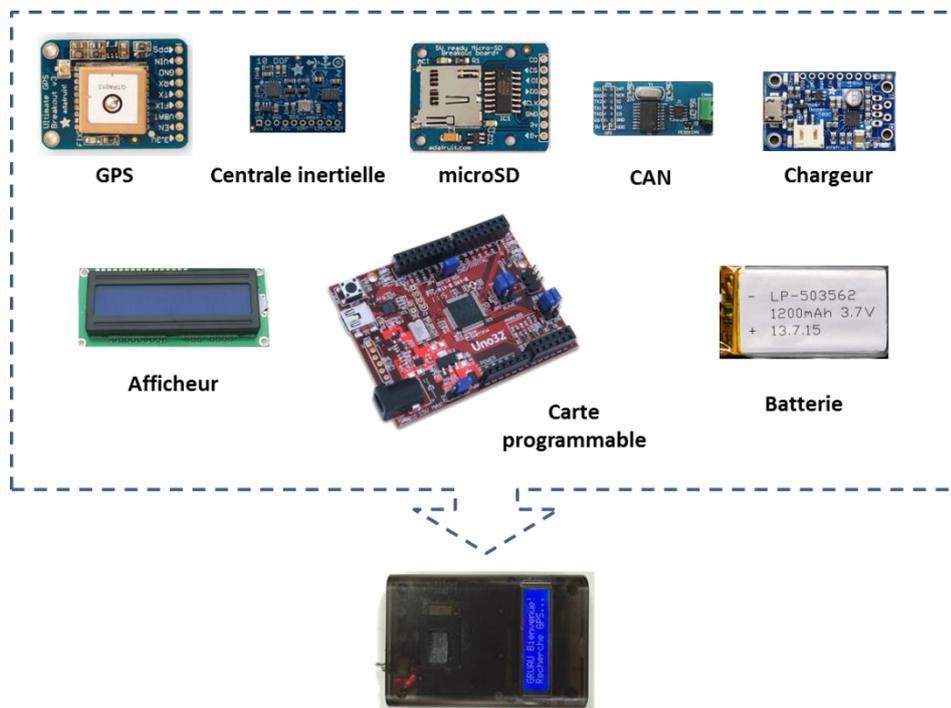


Figure A-1 : Composition du boîtier d'acquisition

Les données sont recueillies de manières brutes au format texte sur la carte microSD. Le programme de la carte a été adapté pour acquérir les données voulues à une fréquence minimum de 5 Hz, notre besoin.

A - 3. Algorithme d'optimisation hybride (PSO/NM) [39]

Les problèmes d'optimisation en électrotechnique présentent plusieurs difficultés liées aux besoins de l'utilisateur (recherche d'une solution globale, fiabilité et précision de la solution, diversité des problèmes traités, temps de calculs raisonnable, ...), aux caractéristiques du problème d'optimisation (non linéarité, dérivées difficilement accessibles, ...) et aux temps de calculs importants [59] [60]. Afin d'analyser ou de résoudre de manière efficace ces problèmes d'optimisation, plusieurs méthodes d'optimisation sont proposées. Dans ce contexte, les méthodes déterministes (e.g. descente de gradient, newton ou Nelder-Mead **NM**) qui se basent sur la valeur de la fonction objectif et des contraintes, ainsi que sur la valeur de leurs dérivées premières et parfois leurs dérivées secondes [61]. Ce sont des méthodes itératives convergeant vers un minimum local et la convergence vers un optimum global n'est pas toujours assurée. Les méthodes déterministes sont généralement efficaces quand l'évaluation de la fonction objective est très rapide, ou quand sa forme est connue a priori. Néanmoins, dans les problèmes d'optimisation en électrotechnique, on ne possède pas suffisamment d'information sur la fonction objectif ni sur ses dérivées. Pour cela, l'utilisation des méthodes stochastiques (également nommées métaheuristiques), en général, évitent ce problème et ayant une grande capacité de trouver l'optimum global du problème. Les méthodes stochastiques les plus prometteuses sont les algorithmes basés sur l'intelligence collective, inspirées de la nature, les plus répandus sont à savoir : les algorithmes génétiques (AGs) et l'optimisation par essaims particuliers (Particle Swarm Optimization (**PSO**)) [61] [62].

Pour notre étude, nous avons choisi une technique d'optimisation hybride basée sur méthode stochastique **PSO** pour effectuer la recherche globale et un algorithme simplexe de Nelder-Mead **NM** pour la recherche locale. Cet algorithme hybride est développé dans notre pôle **S2ET** du laboratoire **ESTACA'LAB -Laval** par l'équipe de **système embarqué SE**. Nous l'avons utilisé pour identifier les paramètres des modèles (électriques, thermiques et vieillissement) de batteries Li-ion testées.

1) Principe de fonctionnement

Cet algorithme est basé sur la théorie du déplacement des criquets d'une place à une autre déclenché par la pénurie de nourriture. L'idée de cette approche repose sur l'optimisation par essaims particuliers **PSO** qui assure le déplacement des criquets migrateurs [63][64]. Celui-ci offre un espace de recherche pour un autre algorithme d'optimisation locale comme le Nelder-Mead **NM** qui peut donner une meilleure exploitation de cette espace [38]. Par la suite, les criquets font un autre déplacement avec l'algorithme **PSO** pour trouver un autre espace de recherche jusqu'à trouver un optimum global pour tous les criquets. La Figure A-2 montre l'organigramme de l'algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM) :



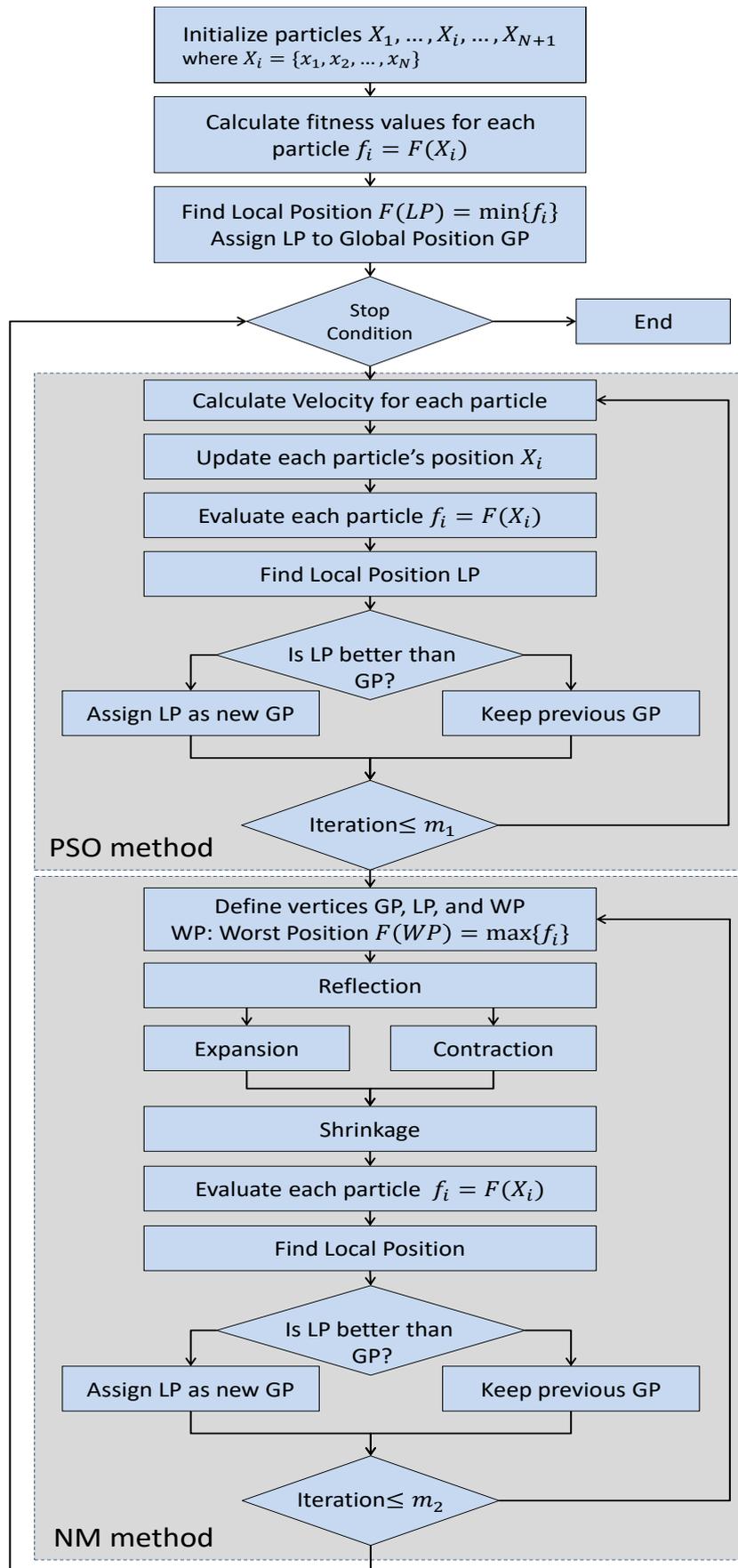


Figure A-2 : Organigramme de l'algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM) [38]

Il est possible de résumer les étapes principales de l'algorithme hybride (PSO / NM) par :

1. Créer une population initiale avec distribution aléatoire des particules ;
2. Exécuter le PSO avec n itération;
3. Exécuter l'algorithme de Nelder-Mead avec m itération;
4. Retourne à l'étape 2 (exécuter le PSO avec n itération)

Cette procédure est exécutée jusqu'à ce que le nombre d'itération prédéfini soit atteint.

Dans cet algorithme le nombre de criquets (particules) dépend au nombre de variable et la dimension de problème d'optimisation.

a) Sous-algorithme d'optimisation par essais particulaires PSO

L'utilisation du sous-algorithme par essaim de particules permet de définir l'espace de recherche dans l'algorithme hybride (PSO / NM) afin de trouver l'optimum local avec la méthode Nelder-Mead [65]. Cet algorithme d'optimisation **PSO** apparu pour la première fois au début des années 90 est inspiré des actions des groupes d'animaux (essaims) dans leur recherche des meilleures régions de subsistance. Ainsi, chaque individu de la population a la mémoire de son expérience antérieure et l'information fourni par l'ensemble du groupe sur les régions les plus prometteuses [66] [67]. Cette contribution de l'expérience globale, en plus de l'expérience personnelle est une des particularités de PSO ce qui lui assurent le succès dans les recherches globales. En général, l'algorithme d'optimisation par essais particulaires PSO est constitué des étapes suivantes :

1. Créer une population initiale avec distribution aléatoire de particules et de leurs vitesses ;
2. Calculer le vecteur de vitesse pour chaque particule, en utilisant l'expérience de chaque particule et l'acquisition de vitesse de la population ;
3. Mise à jour de la position de chaque particule en utilisant le vecteur de vitesse et la position précédente ;
4. Evaluer la convergence.

Les équations formalisant le mouvement des particules sont données par :

$$v_i(t + 1) = wv_i(t) + c_1r_1(P_i - x_i(t)) + c_2r_2(P_g(t) - x_i(t)) \quad (A-1)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (A-2)$$

La position des particules est mis à jour selon l'équation (A-1), où $x_i(t + 1)$ représente la position de la particule i à l'instant $t + 1$, $v_i(t + 1)$ représente le vecteur de vitesse, il est donnée par l'équation (A-2), où r_1 et r_2 sont des variables aléatoires générés d'une distribution uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$ afin de fournir un poids stochastique aux différentes composantes participant dans la définition de la vitesse de la particule, P_i est la meilleure position trouvée par la particule et $P_g(t)$ est la meilleure position de la population à l'instant t .



La Figure A-3 présente un schéma de principe de l'algorithme d'optimisation par essais particuliers PSO :

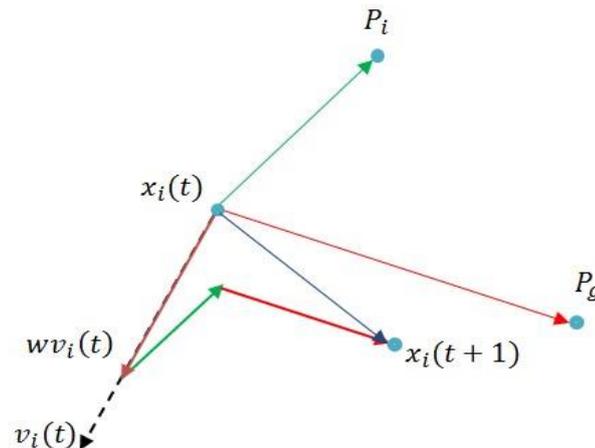


Figure A-3 : Schéma vectoriel du déplacement d'une particule

b) Sous-algorithme d'optimisation Nelder Mead NM

Ce sous-algorithme a été utilisé pour trouver l'optimum local dans un espace de recherche définie par l'algorithme PSO. La méthode est très efficace pour la recherche locale avec l'avantage du fait que ne demande pas au dérivé [68][69]. En partant de dimension du problème N , un simplexe de la même taille est construit, puis certaines transformations conditionnées par l'ordonnancement des points selon leurs valeurs sont appliquées à ce simplexe. A chaque itération, la résultant d'une transformation dépende des coordonnées du centroïde du simplexe (réflexion (coefficient ρ), expansion(γ), contraction (χ) et raccourcissement (δ)). Les coefficients suivent typiquement les conditions ci-dessous :

$$\rho > 0, \chi > 1, \chi > \rho, 0 < \gamma < 1, 0 < \delta < 1 \quad (\text{A-3})$$

Et sont généralement fixés avec les valeurs :

$$\rho = 1, \chi = 2, \gamma = \frac{1}{2}, \delta = \frac{1}{2} \quad (\text{A-4})$$

Le simplexe de Nelder & Mead peut être défini de la façon suivante. Soit f la fonction objectif que l'on cherche à optimiser (dans ce cas, trouver le minimum). Soit un simplexe S défini par $N + 1$ sommets, dans un espace de dimension N . Soit $x_j, j = 1, N + 1$ ces derniers sommets, tels que $f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{N+1})$, donc x_{N+1} est le plus mauvais point et x_1 est le meilleur point. x_1 est modifié à chaque itération.

2) Fonction d'évaluation (objectif)

Résoudre un problème d'optimisation, c'est rechercher, parmi un ensemble de solutions qui vérifient des contraintes données, la (ou les) solution(s) qui rend(ent) minimale (ou maximale) une fonction mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction appelée fonction objectif ou fonction évaluation permet de mesurer l'efficacité de la solution [70]. La pertinence des solutions potentielles dépend essentiellement de la formulation de cette fonction. Dans notre cas, la fonction objectif est définie par formulation mixte de l'erreur carrée *sum of squares error* (*SSE*) et l'erreur absolue entre les réponses réelles et calculées pour l'identification des paramètres de modèles développées [38]:

$$\begin{cases} \min_x \{F(X)\} \\ X_{min} \leq X \leq X_{max} \end{cases} \quad (A-5)$$

$$F(X) = \sum_{i=1}^n (\hat{R}_{bat} - R_{bat})^2 + \sum_{i=1}^n |\hat{R}_{bat} - R_{bat}| \quad (A-6)$$

Où $F(X)$ est la fonction objectif, X_{min} et X_{max} sont les limites inférieure et supérieure de la recherche de l'espace. \hat{R}_{bat} représente la réponse calculée du modèle et R_{bat} est la réponse réelle de la batterie.

La Figure A-4 illustre le schéma du principe d'optimisation des paramètres de modèles de batteries.

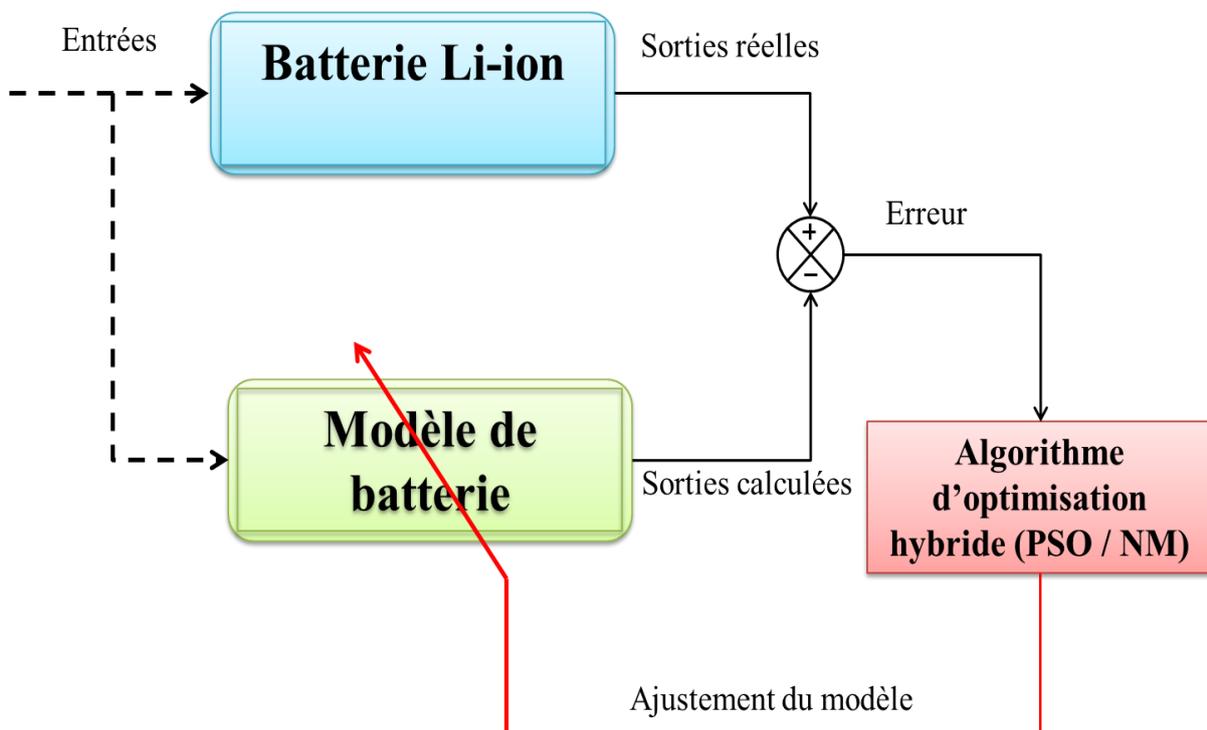
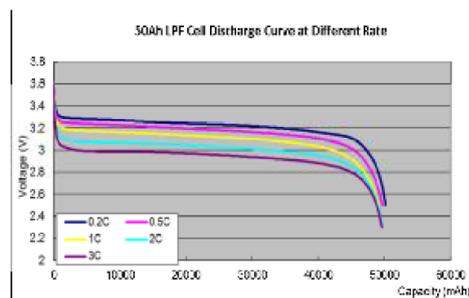
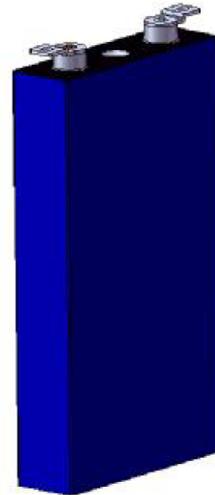


Figure A-4 : Schéma du principe d'optimisation des paramètres du modèle [38]

A - 4. Données techniques de la cellule choisie

	SUZHOU PHYLION BATTERY CO., LTD		No.:	GG3792-50HA
	3792-50Ah LFP Cell Specification		Version:	A1
			Data:	Oct 15,2012
1. Basic parameter				
Type	IFP37/101/192 (50) HA			
T x W x H (max)	37mm x 101mm x 192mm			
Nominal Voltage	3.2V			
Nominal Capacity	50Ah			
Internal Resistance	≤2mΩ			
Discharge Voltage Limit	2.5V			
Charge Voltage Limit	3.8V			
Max. Discharge Current	3C			
Charge Method	CC/CV			
Weight	<1400g			
Operate Temp.	Charge	0~45℃		
	Discharge	-20~55℃		
Storage Temp.	-10~35℃			
2. Technical performance				
Capacity@1C rate	≥50Ah			
High Power Output	3C	>90%C ₁		
Cycle Life	3000 times (Cycle @RT, 1C rate to 80%, 100%DOD)			
3. Safety				
Short Circuit	No fire, no explosion			
Overcharge				
Impact				
Nail Penetration				
Crush				
High Temperature Box (130℃)				



Data in this document is subject to change without notice.

 Suzhou Phylion Battery Co., Ltd

Add: No.181,Jinshajiang Road, Suzhou New District,Suzhou, Jiangsu, China
<http://www.phylion.com>

A - 5. Resultats de simulation en fonction de la masse à 10°C et 37°C

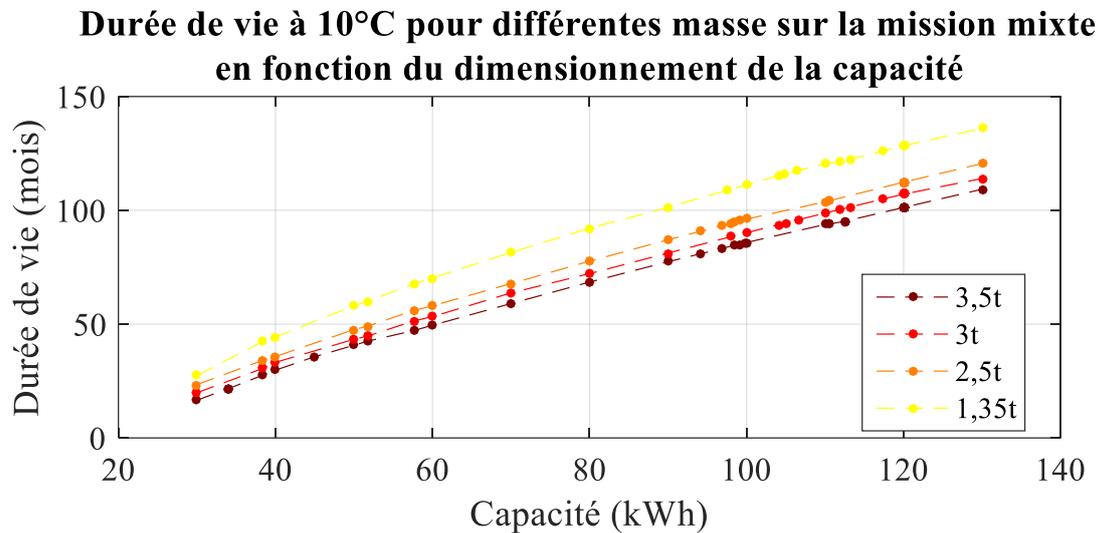


Figure A-5 : Impact du dimensionnement sur le vieillissement en fonction de la masse pour la mission mixte sous 10°C

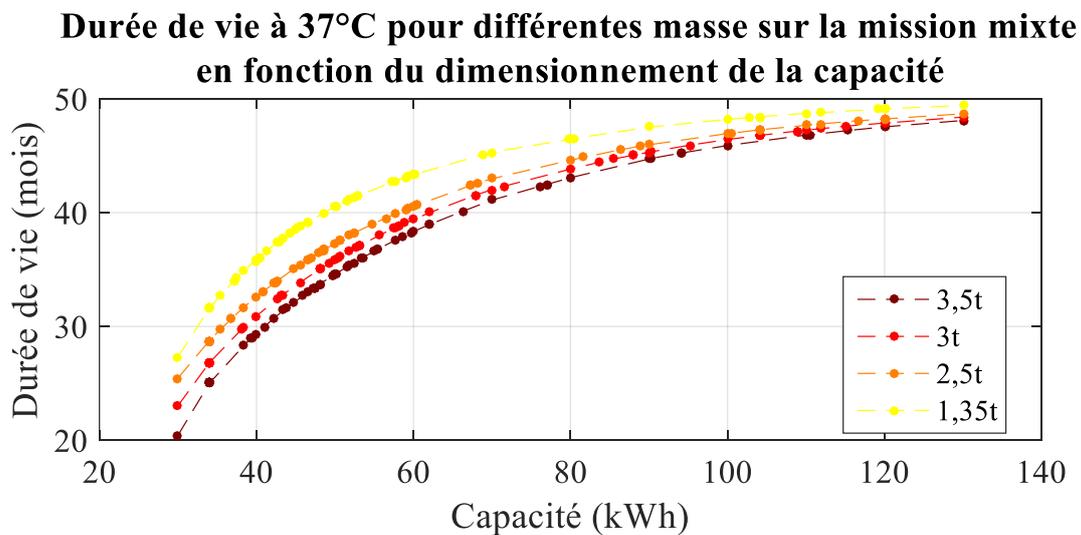


Figure A-6 : Impact du dimensionnement sur le vieillissement en fonction de la masse pour la mission mixte sous 37°C



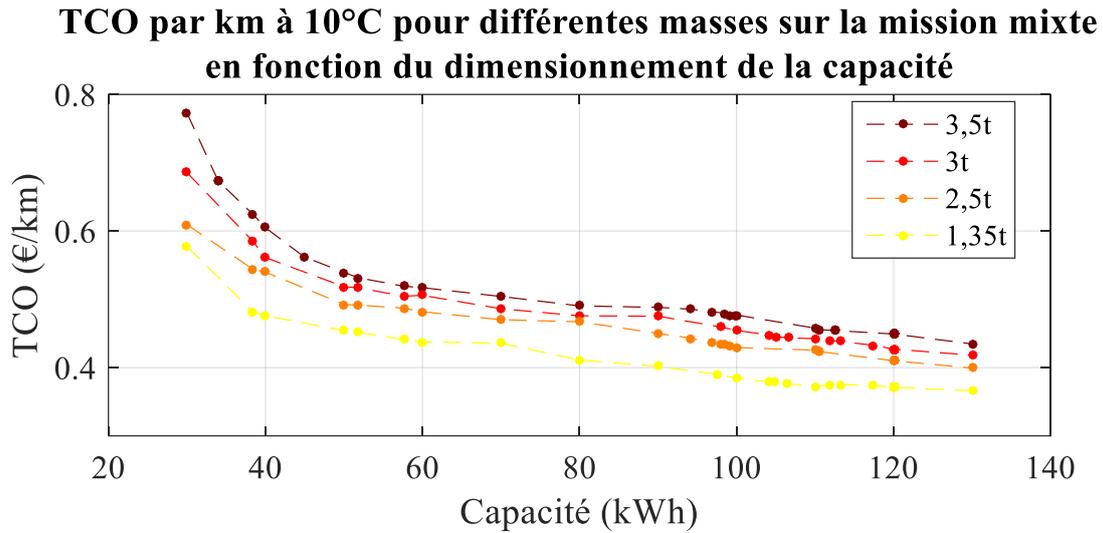


Figure A-7 : Impact du dimensionnement sur le TCO en fonction de la masse pour la mission mixte sous 10°C

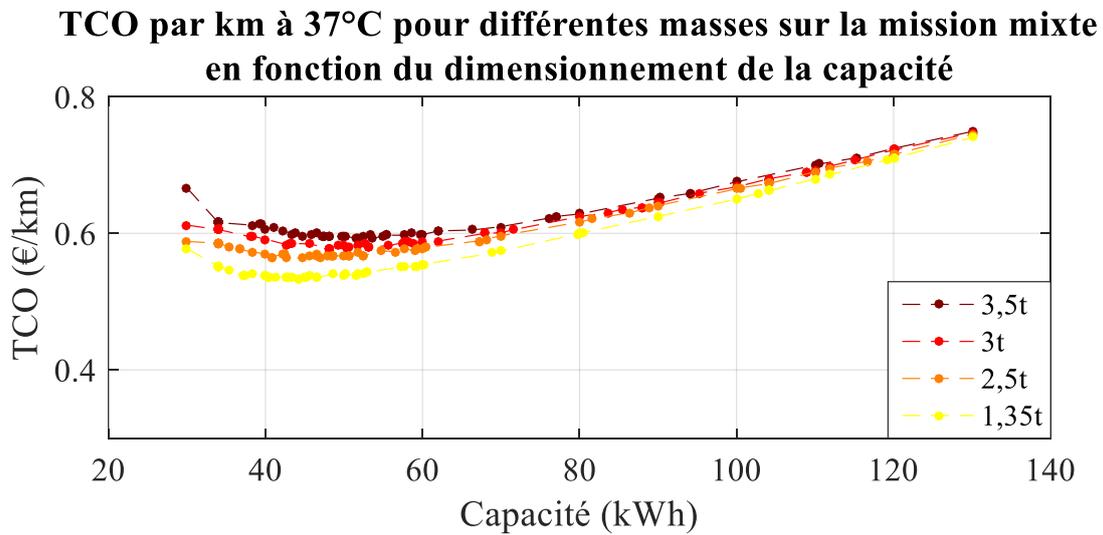


Figure A-8 : Impact du dimensionnement sur le TCO en fonction de la masse pour la mission mixte sous 37°C

A - 6. Exemple de la recharge intelligente par Enedis

Une première "intelligence" a été mise en place au niveau des bornes de recharge de la flotte des véhicules électriques d'Enedis, permettant d'optimiser la recharge en la modulant tout au long de la journée. L'avantage est à la fois économique (éviter la recharge en HP) et écologique (éviter la recharge pendant les pics de consommation).

Une politique de charge a donc été définie et appliquée quel que soit le fournisseur des bornes, en tenant compte des besoins métier. Elle correspond à des ordres fixes et récurrents en attendant la finalisation des algorithmes de recharge, à même de donner des ordres dynamiques.

Si des outils de gestion de tournée sont utilisés par les métiers (PICTREL pour les techniciens clientèle, TAMARIS pour les exploitants du réseau), le kilométrage à effectuer pour la tournée du lendemain est un paramètre déterminant pour recharger les véhicules au juste besoin.

D'autres paramètres comme la température extérieure sont pris en compte.

Grands principes retenus dans la politique de charge :

- La plage nocturne heures creuses (HC) (de 22h/minuit à 6h) permet de recharger totalement une batterie vide
- La plage du matin permet de mettre et de maintenir le véhicule en conditions thermiques pour sa prise en main (préchauffage de l'habitacle)
- La plage de midi autorise une recharge méridienne éventuelle. Elle n'est pas recommandée sauf si elle est nécessaire pour des besoins métier
- La plage avant minuit correspond au démarrage de la plage HC et a pour vocation d'amortir le pic de charge au démarrage
- Ainsi une politique de charge de base pourrait être :
- Lundi au vendredi :
 - Charge à 16 A de 00-06h
 - Charge à 8 A de 06-09h
 - Charge à 16 A de 12-15h
 - Charge à 10 A de 22-00h
- Samedi + dimanche :
 - Charge à 16 A de 00-06h
 - Charge à 10 A de 22-00h

Les véhicules électriques d'ERDF n'ont pas tous la même politique de charge.

- Dépend de la localisation (urbain, rural, montagneux...)



Annexes

A - 6 Exemple de la recharge intelligente par Enedis

- Dépend du besoin métier
- Les sites peuvent l'adapter notamment si pas de besoin de charge méridienne
- Possibilité de mettre en charge forcée par exemple pour les véhicules d'astreinte

Par ailleurs, lorsque la puissance disponible au point de livraison de l'énergie électrique est limitée à un instant t , le système peut moduler globalement les puissances de charges des véhicules électriques du site afin de contenir les dépassements de puissance souscrite. De la même manière, lorsque l'activité d'ENEDIS démarre vers 6h00 et que la consommation du site augmente, les véhicules ayant suffisamment rechargé pendant la nuit, le système peut réduire l'intensité de charge à 10 A (utilisation principale pour le préchauffage).

Les véhicules électriques achetés par ENEDIS doivent donc permettre cette recharge flexible, c'est-à-dire accepter la modulation de puissance et le respect des consignes de charge.

Seul le mode 3 AC selon IEC61851 permet une flexibilité de recharge des véhicules en pilotant la puissance de recharge par la borne. Le Battery Management System (BMS) des véhicules est esclave et doit appliquer la consigne donnée par la borne (fil pilote PWM).

Inter-opérabilité des prises de recharge et puissance de recharge : La norme européenne concernant le connecteur de recharge AC mode 3 est la prise type 2. Le socle de prise sur les véhicules doit être de type 2 (fabricant Mennekes). Celle concernant la recharge DC mode 4 est la prise type COMBO2. Le socle de prise des véhicules permettant la recharge en courant continu doit donc être du COMBO2.

Paliers de recharge du LIVRE VERT :

- 3kW AC (16 A/230 V monophasé et 7 kW 32 A/230 V monophasé) : charge normale
- 22 kW AC (32 A par phase/400 V triphasé) : charge accélérée
- 43 kW AC (64 A par phase/400 V triphasé) : charge rapide + recharge en courant continu 54 kW DC (120 A courant continu)

Le LIVRE VERT préconise également que les bornes de recharge de puissance 22 kW (recharge en triphasé accélérée) soient compatibles recharge 3 kW (recharge normale)

NB : Une nouvelle publication du LIVRE VERT est à venir.

Les véhicules électriques développés doivent garantir la bonne prise en compte de ces points.

Titre : Optimisation du coût de revient global (TCO) d'un véhicule utilitaire électrique 3,5t ; modélisation multi-physique, dimensionnement et recharge intelligente.

Mots clés : véhicule électrique, modélisation, optimisation, Coût total de possession (TCO), multi-physique, véhicule utilitaire.

Résumé : Le véhicule électrique est une des solutions de transport respectueuses de l'environnement, n'émettant pas de polluant lors de son utilisation. Gruau, constructeur carrossier pour véhicules utilitaires, se lance activement dans le transport écologique sur le segment de l'utilitaire 3,5t. Afin d'accroître les ventes de véhicules utilitaires électriques, il est nécessaire d'en réduire le coût total de possession (ou TCO (Total Cost of Ownership)). **L'objectif de cette thèse est d'étudier et de modéliser le comportement des composants de ce véhicule électrique pour simuler des calculs de TCO. Le composant principal étudié est la batterie, dont la durée de vie limitée conditionne la rentabilité du véhicule.** La première partie des travaux fut consacrée à la modélisation du comportement du véhicule en fonction d'une mission client donnée. Une étude des cellules de batterie est réalisée dans le but de construire un modèle multi-physique complet en prenant en considération le vieillissement calendaire et le vieillissement en

cyclage. Un modèle énergétique global, comprenant ce modèle batterie, permet de déterminer l'énergie nécessaire pour un parcours donné et de simuler le vieillissement des cellules électrochimiques afin de calculer le TCO. Une seconde partie est orientée vers le calcul du TCO. La mise en œuvre d'un algorithme d'optimisation avec une méthodologie d'accélération des calculs a permis de réaliser les calculs dans des temps raisonnables (passage de 13h à 15min par itération). Après étude de l'impact du dimensionnement de la batterie sur le TCO, il en ressort que la réduction de la capacité n'entraîne pas systématiquement la réduction du TCO. Il existe pour chaque mission un point de TCO optimal (jusqu'à 17% d'économie). Afin d'améliorer le TCO, des stratégies de recharge intelligentes sont élaborées et permettent rentabilité accrue du VUE (jusqu'à 29%). Ce travail a été intégré dans un logiciel d'aide à la décision de la capacité de la batterie suivant les besoins du client, destiné aux forces de ventes commerciales.

Title : Total Cost of Ownership optimization of an electric light commercial vehicle 3.5t ; multi-physics modeling, sizing and intelligent recharge

Keywords : electrical vehicle, modeling, optimization, Total cost of ownership (TCO), multi-physics, utility vehicle.

Abstract : The electric vehicle is one of the environmentally friendly transport solutions that emit no pollutant during its use. Gruau, manufacturer-converter for light commercial vehicles (LCV), is actively involved in green transport in the 3.5t segment. In order to increase sales of electric LCV, it is necessary to reduce its total cost of ownership (TCO). **The objective of this thesis is to study and model the behavior of the components of this electric vehicle in order to simulate TCO. The main component studied is the battery, whose limited lifetime will determine the profitability of the vehicle.** The first part of the work was devoted to modeling the behavior of the vehicle according to a given customer mission. The study of battery cells was done with the aim of building a complete multi-physics model taking into account calendar aging and cycling aging. Then, this battery model is integrated in a complete energy model taking into account all the components of the studied vehicle. Then a global model, including this

battery model, makes it possible to determine the energy required for a given path and to simulate the aging of the electrochemical cells in order to calculate the TCO. A second part is oriented towards the calculation of the TCO. The implementation of an optimization algorithm, with a methodology of computing acceleration, allowed to achieve the computations in reasonable times (reduction from 13h to 15min by iteration). After studying the impact of battery sizing on the TCO, it appears that the reduction of the battery capacity does not systematically lead to the reduction of the TCO. There is therefore an optimum TCO point for each mission (up to 17% savings). In order to improve the TCO, smart recharging strategies are developed and allow increasing e-LCV profitability (up to 29%). This work is integrated into a decision support software relative to the battery capacity according to customer needs, intended for commercial sales forces.

