



Université de Lille

Ecole doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur (ED SPI)

Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de (L2EP)

Thèse présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Université de Lille

Spécialité : Génie Electrique

Anatole DESREVEAUX

Impact de facteurs techniques sur la consommation énergétique de véhicules électriques

Présentée et soutenue publiquement le 4 mars 2020 devant le jury composé de :

Pr. Alain BOUSCAYROL	Université de Lille	Directeur de thèse
Dr. HDR Elodie CASTEX	Université de Lille	Co-encadrante
Dr. HDR Rochdi TRIGUI	IFSTTAR Bron, France	Co-encadrant
Pr. Samir JEMEI	Université de Bourgogne-Franche-Comté	Président
Pr. Manuela SECHILARIU	Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
Pr. Loïc BOULON	Université de Québec à Trois Rivières, Canada	Rapporteur
Dr. Eric HITTINGER	Rochester Institute of Technology, Etats-Unis	Examineur
Dr. HDR John KLEIN	Université de Lille	Invité
Dr. Gabriel-Mihai SIRBU	Renault Technologie Roumanie	Invité

Cette thèse a été cofinancée par la région Hauts-de-France et l'Université de Lille



Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de thèse, le professeur **Alain Bouscayrol** (professeur à l'université de Lille). Au départ, je n'étais pas forcément intéressé de faire une thèse. Tu as remarqué que cela pouvait m'intéresser et ce fut le cas, je t'en remercie. Également je te remercie pour tous les nombreux projets annexes que tu m'as proposés de faire et de toutes les discussions que nous avons eues malgré ton planning chargé.

J'aimerais également remercier madame **Élodie Castex**, Docteur Habilité à Diriger des Recherches à l'Université de Lille. Cette thèse est la première collaboration entre les sciences humaines et le génie électrique dans le cadre de CUMIN. Au départ, ce ne fut pas simple de dialoguer entre nous tant la différence entre nos sciences est grande. Je te remercie d'avoir pris le temps de discuter, de me montrer un autre point de vue sur mon travail. Ce fut une expérience très enrichissante du point de vue scientifique, mais aussi humainement et je te remercie pour cela.

J'aimerais remercier ensuite monsieur **Rochdi Trigui**, Directeur de recherche au LTE-IFSTTAR pour son accueil lors de mes différents passages à l'IFSTTAR, pour toutes les discussions qui ont enrichi mon travail lors de cette thèse. Je te remercie d'avoir pris le temps de discuter avec moi malgré ton emploi du temps chargé. Je souhaite également remercier les membres du LTE-IFSTTAR pour leur accueil et les échanges que nous avons eus lors de mes visites.

Je remercie monsieur **Samir Jemei**, Professeur à l'université de Bourgogne-Franche Comté) de m'avoir fait l'honneur d'être président de mon jury de thèse. Je souhaite remercier madame **Manuela Sechilariu**, Professeur à l'université de Compiègne et monsieur **Loïc Boulon**, Professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières – Canada, d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Merci pour vos remarques constructives qui ont permis d'améliorer ce rapport.

J'aimerais ensuite remercier monsieur **Eric Hittinger**, Docteur du Rochester Institute of Technology, pour avoir accepté d'être examinateur lors de ma soutenance de thèse. Je te remercie également pour tous les échanges que nous avons eus au sujet de nos travaux respectifs. J'espère que notre collaboration pendant mon futur Post-Doc à l'université de Lille sera fructueuse.

J'aimerais également remercier monsieur **John Klein**, Docteur Habilité à diriger des recherches à l'Université de Lille d'être venu assister en tant qu'invité à ma soutenance de thèse. Je te remercie pour les discussions que nous avons eues sur le générateur de cycle et pour la collaboration que nous avons eue pendant cette thèse.

Je souhaite remercier monsieur **Gabriel Mihai-Sirbu**, Docteur et Ingénieur de Renault Technologie Roumanie d'être venu assister en tant qu'invité à ma soutenance de thèse. Merci pour les discussions et les collaborations que nous avons eues dans le cadre du projet Panda et qui sont également venues enrichir cette thèse.

J'aimerais remercier **Olivier Ferla, Thierry Duquesne et Étienne Milent** pour l'aide apportée pour les différents travaux réalisés sur la Tazzari Zéro qui a permis de débiter les expérimentations de cette thèse.

Je souhaite remercier **Ludovic Horrein** pour tous les échanges que nous avons eus au sujet de ces travaux de thèse, qui sont le point de départ de cette thèse. Merci d'avoir pris le temps, notamment lors de mon bref passage à Genève, de m'expliquer tous les détails de tes travaux. Dans le même cadre, j'aimerais remercier **Clément Mayet** pour les discussions que nous avons eues sur ces travaux de thèse qui ont enrichies également cette thèse.

Merci également à **Abdoulaye (Pam), Florian (Flo) et David** pour toutes les discussions et entraides que nous avons eues sur nos travaux de thèses respectifs. Ce fut un grand plaisir de travailler avec vous. Je tiens également à remercier **Walter, Philippe et Ronan** pour les discussions qui sont venues enrichir ce travail.

Je souhaite remercier **Julia et Eugénie**, Doctorantes au TVES, pour les différents échanges enrichissants sur nos travaux de thèse respectifs.

J'aimerais ensuite remercier les doctorants du laboratoire pour l'ambiance et en particulier : **Guillaume, Emna, Clément, Kévin, Huy, Jérôme, Hugo, Laurent** (toujours un plaisir de jouer aux cartes avec vous), **Loris, Kaibo, Tan, Stéphane, Florentin, Meryem, Hussein, Leysmir, Angelica, Anis et Ahmar**.

Un grand merci aux membres du laboratoire, pour l'accueil chaleureux et les discussions que nous avons eues durant la thèse et plus particulièrement : **Amandine, Betty, Éric, Éric, Étienne, Florian, Francis, Jean-François, Julien, Kader, Loïc, Mounaïm, Nadir, Olivier, Olivier, Oualid, Sylvie, Thierry, Thierry, Thomas et Yvonnick**.

Je tiens également à remercier l'équipe de Xperium pour leur accueil, notamment **Sophie, Jean, Étienne et Olivier**. Ce fut un moment enrichissant de vulgarisation scientifique, et d'échanges sur les travaux réalisés dans les différents laboratoires de l'université. Merci également pour toutes les nombreuses rencontres réalisées dans ce cadre.

Je tiens à remercier ma famille pour leur soutien durant cette thèse.

A toutes ces personnes et celles que j'ai oubliées, un grand **MERCI**.

Résumé

Le réchauffement climatique est un défi majeur du 21^{ème} siècle. Les émissions de gaz à effet liés au secteur des transports sont l'un des principaux contributeurs à ce réchauffement. Le Véhicule Électrique (VE) est une des solutions pour réduire la pollution engendrée par le secteur des transports. Mais l'autonomie du véhicule électrique est un des freins à son adoption.

Dans le cadre du programme Campus Universitaire à Mobilité et Innovante et Neutre en carbone (CUMIN), l'Université de Lille cherche à réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux déplacements réalisés au départ, à l'arrivée ou sur son campus de la Cité Scientifique. Le VE est une des solutions envisagées. Pour encourager les conducteurs de véhicules venant sur le campus à passer au VE, l'université cherche à évaluer la consommation du véhicule en vue de proposer des solutions de recharge neutres en carbone.

La consommation d'énergie ou l'autonomie des VEs dépend de nombreux facteurs et est sujette à de fortes variations. L'évaluation de ces facteurs est primordiale pour mieux estimer la consommation du véhicule. L'objectif de cette thèse est de réaliser un outil de simulation d'un véhicule électrique en vue d'évaluer l'impact de différents facteurs sur la consommation d'énergie du véhicule. L'outil de simulation proposé prend en compte la consommation d'énergie liée à la traction du véhicule et des auxiliaires, notamment, la partie confort de l'habitacle. L'outil de simulation est organisé à l'aide de la Représentation Energétique Macroscopique (REM). Ce formalisme d'organisation conduit à une approche « directe » permettant de bien prendre en compte les limitations du système. Dans cette thèse, les modélisations sont validées à l'aide d'expérimentation avant de réaliser des comparaisons par simulation.

Abstract

Global Warming is one of the major challenges for the 21st century. The transport sector is one of the biggest emitters of greenhouse gas. Electric Vehicles (EVs) are one of the solutions able to reduce those emissions. However, the driving range of the vehicle is one of the barriers for EVs' adoption.

The Campus of University with Mobility based on Innovation and carbon Neutral (CUMIN) program aims at reducing the greenhouse gas emissions produced by mobility at campus "Cité Scientifique" of the University of Lille. EVs are one of the solutions studied to reduce emissions on this campus. For this solution, the university wishes to study the implementation of charging stations to promote EVs. In order to do this, a tool for estimating the energy consumption of an EV is required.

Many factors have an impact on the energy consumption of EVs or their driving range. It is necessary to evaluate the effects of the different factors so as to have a better estimation of the driving ranges of those cars. In this PhD Thesis, the impact of different factors on the energy consumption of an Electric Vehicle has been assessed with a simulation tool developed on purpose. The suggested tool takes into account the energy consumption of the traction system, the Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system and the other auxiliaries of the vehicle. This tool has been developed with Energetic Macroscopic Representation. This formalism aims at organizing the model using a forward approach. With this approach, it is possible to take into account the limitations of the system in the simulation tool of the vehicle. In this thesis, the modeling of the different parts have been developed, then validated with experimental tests. Finally, simulations have been carried out to evaluate the impact of the different factors on the energy consumption of an EV.

Table des matières

Introduction générale.....	1
 Chapitre I. L'autonomie des véhicules électriques : enjeux d'une mobilité plus durable.....	4
 I.1. Les véhicules électriques, une solution à une mobilité plus durable.....	5
<i>I.1.1. Contexte et enjeux de la mobilité des personnes</i>	<i>5</i>
<i>I.1.2. Le véhicule électrique, une solution pour réduire la pollution locale</i>	<i>6</i>
I.2. Les universités, terrains privilégiés d'expérimentation	9
<i>I.2.1. Le développement durable des universités</i>	<i>9</i>
<i>I.2.2. Le programme Campus Universitaire à Mobilité Innovante et Neutre en Carbone10</i>	
I.3. La variabilité de l'autonomie des véhicules électriques	18
<i>I.3.1. Facteurs influant la consommation d'un véhicule électrique</i>	<i>18</i>
<i>I.3.2. Intérêt d'étudier la consommation d'un véhicule électrique.....</i>	<i>22</i>
<i>I.3.3. Intérêt de prendre en compte les limitations dans l'estimation de la consommation d'énergie</i>	<i>23</i>
I.4. Objectif et positionnement	27
<i>I.4.1. Positionnement des travaux.....</i>	<i>27</i>
<i>I.4.2. Objectif de la thèse</i>	<i>30</i>
<i>I.4.3. Outils pour réaliser la thèse</i>	<i>30</i>
 Chapitre II. Prise en compte des conditions climatiques dans la consommation globale du véhicule	33
 II.1. Traction du véhicule électrique.....	34
<i>II.1.1. Sous-système étudié.....</i>	<i>34</i>
<i>II.1.2. Modélisation et commande</i>	<i>35</i>
<i>II.1.3. Validation du sous-système de traction.....</i>	<i>38</i>
II.2. Le confort habitacle	42
<i>II.2.1. Sous-système étudié.....</i>	<i>42</i>
<i>II.2.2. Modélisation et commande</i>	<i>46</i>
<i>II.2.3. Validation du sous-système de confort.....</i>	<i>61</i>

II.3. Etude des conditions climatiques sur la consommation	65
II.3.1. Effet du chauffage	65
II.3.2. Effet de la climatisation	66
II.3.3. Étude de la consommation annuelle avec prise en compte du confort	68
II.4. Conclusion.....	74

Chapitre III. Prise en compte des effets du trajet et du conducteur..... 75

III.1. Générateur de cycle de vitesse	76
III.1.1. Générations de cycles	76
III.1.2. Algorithme de génération	77
III.1.3. Validation.....	83
III.2. Différents profils de conduites.....	86
III.2.1. Classification des profils de conduite	86
III.2.2. Profils de conduite de véhicules électriques.....	88
III.2.3. Validation.....	93
III.3. Effet du trajet et du conducteur sur la consommation	95
III.3.1. Effet du trajet	95
III.3.2. Effet du conducteur	104
III.3.3. Étude de la consommation annuelle complète.....	105
III.4. Conclusion	111

Conclusion générale 112

ANNEXES :

Annexe A. Abréviations	116
Annexe B. Éléments de la REM	117
Annexe C. Comparaison de la consommation d'un véhicule électrique et d'un véhicule diesel	118
Annexe D. Ajout à la modélisation de l'habitacle du véhicule.....	127
Annexe E. Complément à la modélisation de la climatisation	129
Annexe F. Effet des conditions climatiques sur la consommation.....	132
Annexe G. Générateur de vitesse – simplification de la boucle de Jerk ...	133

Annexe H. Étude de la corrélation sur les données issues du Projet CEVE	134
Annexe I. Étude de sensibilité à la vitesse et à l'accélération.....	136
Bibliographie.....	138
Liste des publications	150

Introduction Générale

La réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement de la planète, est aujourd'hui un challenge majeur pour la société. Le secteur des transports en est l'un des plus gros contributeurs [IEA 18a]. Il est aussi en partie responsable de la mauvaise qualité de l'air dans les grandes villes, notamment en Asie, à cause des émissions d'oxydes d'azotes (NO_x) et de particules fines [WHO 16]. Une solution pour réduire l'impact du secteur des transports est d'électrifier ce secteur [IEA 18b].

Le remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques est donc un challenge important. En effet, le véhicule électrique (VE) émet très peu de pollution localement [Van Mierlo 17], contrairement aux véhicules thermiques. Les émissions de gaz à effet de serre du VE sont ainsi principalement dues au mix énergétique du pays où le véhicule se charge. Il émet beaucoup plus de gaz à effet de serre dans un pays utilisant fortement des énergies fossiles pour produire son électricité contre très peu pour un pays utilisant majoritairement des énergies renouvelables [Messagie 17].

Mais il existe des freins au déploiement des VEs : l'autonomie du véhicule, le prix d'achat, la possibilité de recharger le véhicule et la durée de celle-ci. L'autonomie du véhicule est le principal défaut à sa diffusion [Ipsos 18]. La perception de son autonomie est biaisée par la comparaison avec le véhicule thermique qui a une autonomie bien supérieure. L'autonomie du véhicule électrique est aussi très variable en fonction de différents facteurs et affecte négativement cette perception [Nastjuk 16].

L'autonomie d'un véhicule électrique est directement liée à l'énergie qu'il consomme lors de son fonctionnement. Ainsi tout ce qui impacte la consommation d'énergie du véhicule électrique affecte son autonomie. Pour les véhicules thermiques et hybrides, le sous-système¹ de traction est le plus énergivore et l'énergie thermique perdue par le moteur à combustion contribue grandement au chauffage de l'habitacle. Mais pour le véhicule électrique, l'énergie consommée par le sous-système de confort (chauffage et refroidissement de l'habitacle) doit être fournie par la batterie et affecte ainsi l'autonomie du véhicule. Ainsi son impact peut être aussi important [Horrein 17] [Bellochi 18]. D'autres facteurs affectent la consommation du véhicule électrique comme les conditions météorologiques [Yuksel 15] [Lindgren 16], le trajet à réaliser [Gutenkust 15] [Fiori 18], le comportement du conducteur [Neubauer 14b], et les différents sous-systèmes composant le véhicule.

La variabilité de la consommation du VE est un problème récurrent induisant un nombre important de publications. Différentes méthodes ont été utilisées pour étudier la consommation du véhicule électrique. Des modèles mathématiques sont ainsi utilisés [Liu 16], en particulier des modèles statistiques [Braun 18], mais aussi des outils de simulation. Ces derniers utilisent, soit une représentation fonctionnelle avec une simulation à approche « inverse »² [Gutenkust 15], soit une représentation structurelle [Bellochi 18]. Dans les deux cas, il s'avère difficile de reprendre en compte les limitations physiques du véhicule (par exemple celle du couple

¹ Le système véhicule peut être divisé en différentes parties : traction (permet le déplacement du véhicule), confort (chauffage, refroidissement), batterie...

² La simulation « inverse » part de la conséquence pour aller à la cause (pour un véhicule, de la vitesse vers la consommation de la batterie), l'approche « directe » est le contraire

moteur), ce qui peut induire des erreurs sur la consommation d'énergie. Une approche fonctionnelle avec une simulation « directe », déjà utilisée pour une application métro [Mayet 16], est plus adaptée. Ce point est démontré dans le chapitre I. et permettra de montrer la pertinence de l'outil de simulation proposée dans cette thèse.

De plus, outre les méthodes, deux approches sont généralement utilisées pour analyser les facteurs impactant la consommation d'énergie de VE. La première s'intéresse à quantifier l'effet de quelques facteurs indépendamment les uns des autres, généralement en utilisant des outils de simulation de véhicules [Gutenkust 15] [Bellochi 18]. La seconde approche s'intéresse à quantifier tous les effets globalement, notamment au travers d'études statistiques [Braun 18]. Peu de travaux présentent une étude progressive où les divers facteurs sont caractérisés indépendamment, avant d'en étudier la combinaison.

Enfin, la plupart des études sont réalisées pour un même pays, voire continent. Or l'utilisation d'un véhicule diffère en fonction du pays où il est utilisé. En effet, la météo ayant un impact sur la consommation du véhicule, le climat et donc le lieu géographique ont un impact sur son autonomie. Il serait alors intéressant d'avoir un outil flexible permettant de s'adapter rapidement au cas d'étude. Les démarches statistiques sont de ce fait difficiles à étendre.

L'objectif de cette thèse est de développer une méthode flexible d'étude de l'impact de différents facteurs sur la consommation d'énergie d'un véhicule électrique. La méthode proposée doit permettre de quantifier différents facteurs indépendamment puis de les combiner entre eux. Un outil de simulation sera développé pour répondre à cet objectif, suffisamment flexible pour étudier différents cas d'étude. L'outil proposé sera basé sur une représentation fonctionnelle avec une simulation avec approche directe (« forward ») afin de considérer toutes les limitations opérationnelles sans affecter les résultats. Le formalisme REM (Représentation Énergétique Macroscopique) [Bouscayrol 12] sera utilisé afin de structurer cet outil, car il organise les modèles dans une approche fonctionnelle et causale, aptes à une simulation directe, flexible et à faible temps de calcul.

Cette thèse est liée au projet EVE (Évaluation de la consommation de Véhicules Électriques) du programme CUMIN (Campus Universitaire à Mobilité Innovante et Neutre en carbone) de l'Université de Lille [CUMIN 17]. Le programme CUMIN vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre des véhicules se déplaçant sur le campus Cité Scientifique de l'Université de Lille. Les voitures sont le principal émetteur de gaz à effet de serre sur le campus [COMUE 14]. Ainsi, différents projets sont réalisés afin de proposer des solutions pour tendre vers un campus à mobilité sans carbone. Dans le cadre de CUMIN, cette thèse a pour objectif de proposer un outil afin d'évaluer la consommation d'énergie des futurs véhicules électriques des usagers (étudiants et personnels). Ainsi, un nombre de bornes et de panneaux photovoltaïques servant à la production d'énergie « zéro carbone » pourra être estimé. Il est à noter que cette thèse a aussi été réalisée dans le cadre du réseau scientifique national MEGEVH [MEGEVH 19] sur la gestion d'énergie des véhicules électrifiés. Elle a donc bénéficié de diverses études du réseau. De plus, cette thèse a aussi contribué au projet H2020 PANDA [Panda 19] [Bouscayrol 20] au travers de la mise en œuvre de la simulation des sous-systèmes énergétiques de la Renault Zoé. Ce véhicule est le véhicule de référence pour la thèse, mais aussi un des 3 véhicules de référence de PANDA. En cette occasion, une collaboration avec Renault Technologie Roumanie a permis d'affiner les modèles développés.

Le **chapitre I** présente le contexte global et local de cette thèse. Le positionnement des travaux présentés est réalisé. Les problèmes liés à la quantification des effets de différents facteurs sur la consommation sont discutés.

Le **chapitre II** concerne la quantification de l'effet des conditions climatiques sur la consommation d'un véhicule électrique. Un outil de simulation prenant en compte le sous-système de traction, le sous-système de confort et le reste des auxiliaires est développé pour réaliser cette étude. Ces différents modèles sont validés par comparaison avec des mesures réalisées sur le véhicule de référence. Finalement, l'effet des conditions climatiques sur la consommation du véhicule électrique est étudié indépendamment des autres facteurs limitants.

Le **chapitre III** propose d'évaluer l'effet du trajet et du comportement du conducteur sur l'autonomie du véhicule. Dans ce cadre, un générateur de cycle a été développé afin d'avoir des comparaisons pertinentes entre les différentes simulations. Différents profils de conducteurs sont ensuite introduits pour comparer leurs consommations. À la fin du chapitre, une étude globale est effectuée afin de quantifier les différents effets entre eux. Pour conclure ce chapitre, des éléments de réponses à CUMIN sont discutés, comme la consommation annuelle d'utilisateurs types.

Chapitre I. L'autonomie des véhicules électriques : enjeux d'une mobilité plus durable

Dans ce chapitre, le cahier des charges de la thèse est introduit. Dans un premier temps, le contexte sur l'électrification de la mobilité sera exposé. Dans la deuxième partie, la mobilité sur les campus et le programme CUMIN dont cette thèse fait partie seront présentés.

La variabilité de la consommation d'énergie est mise en avant dans la troisième partie. Cette variabilité est notamment due à différents facteurs. Ainsi, il sera montré que cette variabilité peut être forte et difficilement quantifiable par des mesures. Dans la quatrième partie, l'objectif de la thèse et les moyens utilisés pour réaliser cette thèse seront présentés.

Sommaire du chapitre :

I.1. Les véhicules électriques, une solution à une mobilité plus durable	5
<i>I.1.1. Contexte et enjeux de la mobilité des personnes</i>	<i>5</i>
<i>I.1.2. Le véhicule électrique, une solution pour réduire la pollution locale</i>	<i>6</i>
I.2. Les universités, terrains privilégiés d'expérimentation	9
<i>I.2.1. Le développement durable des universités</i>	<i>9</i>
<i>I.2.2. Le programme Campus Universitaire à Mobilité Innovante et Neutre en Carbone</i>	<i>10</i>
I.3. La variabilité de l'autonomie des véhicules électriques	18
<i>I.3.1. Facteurs influant la consommation d'un véhicule électrique</i>	<i>18</i>
<i>I.3.2. Intérêt d'étudier la consommation d'un véhicule électrique</i>	<i>22</i>
<i>I.3.3. Intérêt de prendre en compte les limitations dans l'estimation de la consommation d'énergie</i>	<i>23</i>
I.4. Objectif et positionnement	27
<i>I.4.1. Positionnement des travaux</i>	<i>27</i>
<i>I.4.2. Objectif de la thèse</i>	<i>30</i>
<i>I.4.3. Outils pour réaliser la thèse</i>	<i>30</i>

I.1. Les véhicules électriques, une solution à une mobilité plus durable

I.1.1. Contexte et enjeux de la mobilité des personnes

L'émission de gaz à effet de serre, et particulièrement le CO₂, entraîne le réchauffement de la planète. En 2016, plus de 32 millions de tonnes de CO₂ ont été émis dans le monde. La production d'électricité et de chaleurs a émis 42 % de ces émissions, le secteur des transports a émis 24 % des émissions de CO₂ (Figure I.1.a). Pour le secteur des transports, les émissions de gaz à effet de serre sont principalement dues aux transports routiers qui représentent 74 % des émissions de ce secteur (Figure I.1.b) [IEA 18a].

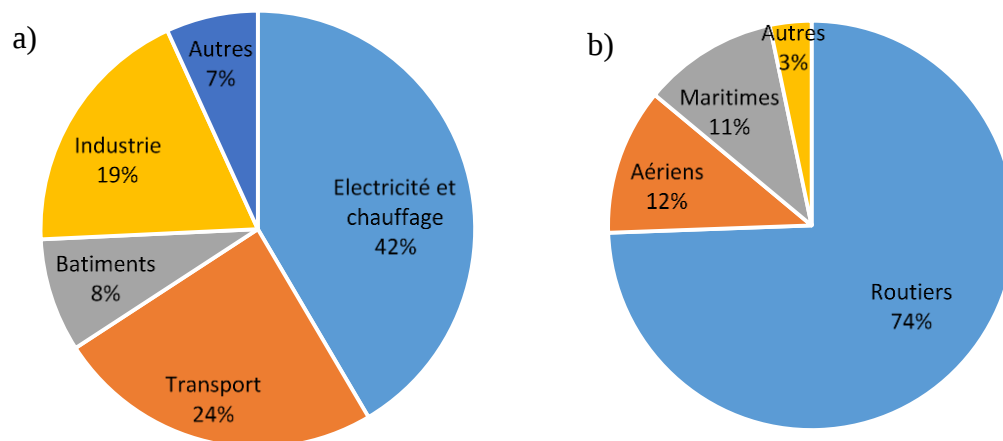


Figure I.1 : a) émissions de CO₂ mondiales par secteur

b) émissions de CO₂ mondiale du secteur des transports

Pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C à l'horizon 2100 selon l'accord de Paris, le secteur des transports doit se transformer. Différentes solutions comme les mobilités douces, les transports en commun et l'électrification des véhicules sont mises en avant. L'électrification des véhicules passe par l'hybridation des véhicules thermiques, les véhicules purement électriques et les véhicules à pile à combustible [Hiti 17] [Yue 19]. Pour tenir l'engagement de limiter le réchauffement climatique à 2 °C, pris lors de la COP 21 de Paris en 2016, plus de 140 millions de véhicules électrifiés doivent être mis en circulation dans le monde d'ici 2050 (Figure I.2). Au 1^{er} janvier 2018, 3 millions de véhicules électrifiés étaient en circulation [IEA 18b] dont 1,2 million en Chine.

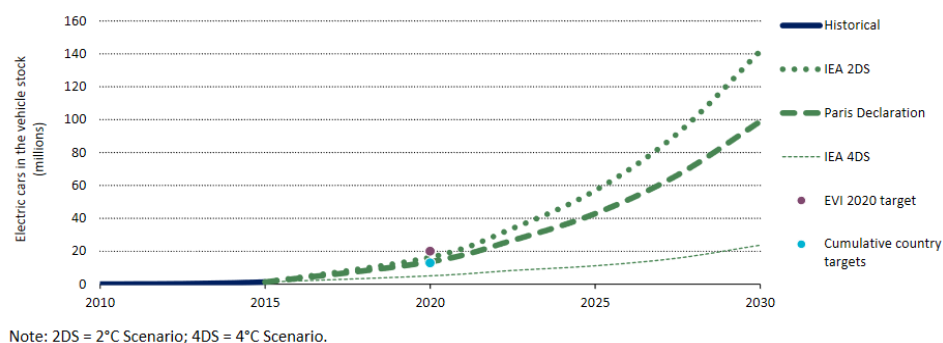


Figure I.2 : Projection du nombre de véhicules en circulation à l'horizon 2030 [IEA 16]

La pollution de l'air est un autre défi à résoudre. Les lieux, où la pollution de l'air est la plus importante, sont les grandes villes de l'Inde ou de la Chine. La production d'énergies, pour l'électricité et le chauffage, et les transports en sont la cause principale [WHO 16]. En Europe, le secteur des transports émet une grande part des particules inférieures à 2,5 μm (PM 2,5) et 10 μm (PM 10) et d'oxydes d'azote (NO_x). Les émissions de particules des grandes villes européennes sont en moyennes, supérieures à celles d'autres grandes villes de pays développés [Hooftman 18]. Dans la Métropole Lilloise, les émissions de NO_x , PM 2,5 et PM 10 sont respectivement à 61 %, à 32 % et à 35 % dues au secteur des transports [MEL 17].

I.1.2. Le véhicule électrique, une solution pour réduire la pollution locale

Une des solutions à la réduction des émissions de polluants est le remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques. Contrairement aux véhicules thermiques, ils émettent peu d'émission en fonctionnement. En effet, le véhicule électrique n'émet pas de pollution localement. La pollution émise ne dépend que du mix d'électricité de la région où est utilisé le véhicule [Woo 17] [Moro 18]. Dans [Noura 18], une étude a été réalisée pour comparer les émissions de CO_2 d'une Renault Clio Diesel et une Renault Zoé sur un circuit urbain de 7 km. La Clio a émis 1300 g de CO_2 sur ce trajet, dont 1093 g pour rouler et 226 g pour transformer le pétrole en diesel. La Renault Zoé a émis de 0 à 700 g selon le mix d'électricité choisi. Dans cette étude, les émissions de CO_2 du véhicule électrique sont au moins 2 fois inférieures aux émissions du véhicule diesel (Figure I.3), même en Pologne, où la production d'électricité est réalisée à 80 % à l'aide de charbons.

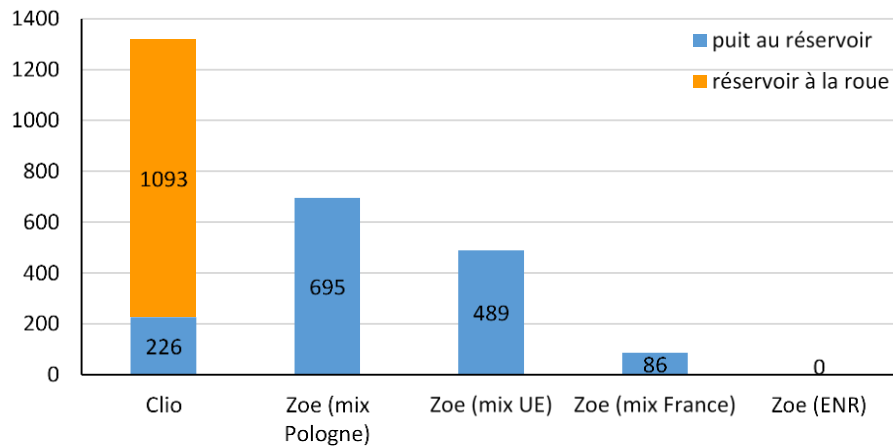


Figure I.3 : émission de CO_{2eq} sur un trajet urbain [Noura 18]

Néanmoins, le véhicule électrique génère plus de pollution pour sa fabrication. Cette pollution est notamment due à la batterie du véhicule [Van Mierlo 17] [Tagliaferri 16]. Globalement, le véhicule électrique permet une réduction d'émission de gaz à effet de serre de 24 % pour le cas le plus carboné, le mix polonais. Cette réduction peut atteindre jusqu'à 86 % pour le cas d'une production d'électricité 100 % renouvelable (Figure I.4) [Messagie 17].

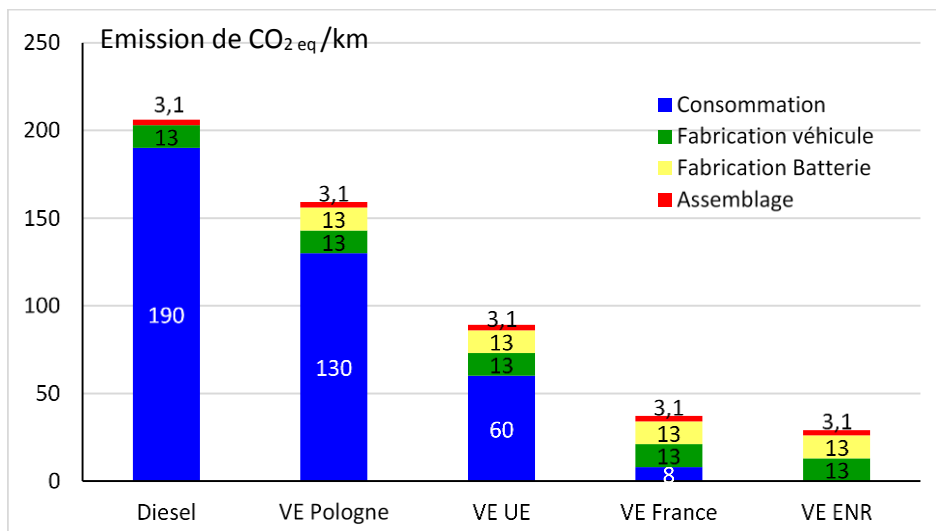


Figure I.4 : Analyse du cycle de vie des véhicules diesel et électrique [Messagie 17]

L'analyse de cycle de vie permet aussi de montrer que le véhicule électrique diminue la pollution de l'air. Il émet moins de particules en fonctionnement malgré le poids du véhicule qui est plus important [Van Mierlo 17]. La production d'énergie du véhicule électrique en est la principale source d'émission.

Pour réduire la pollution de l'air dans les grandes villes françaises, le gouvernement français a créé un bonus-malus pour la vente de véhicule afin d'inciter les personnes à acheter des véhicules plus propres et notamment des véhicules électriques. Malgré cette incitation, la vente des véhicules électriques est faible en France. 39 000 VE ont été vendues en 2018 pour un total de 2,6 millions de véhicules vendus, soit environ 1,5 % de part de marché [CCFA 19].

La Renault Zoé est le véhicule particulier électrique le plus vendu en France en 2018, 17 000 Renault Zoé vendues pour 55 % de part de marché. La Nissan Leaf, est le deuxième véhicule électrique sur le marché avec 5 000 ventes, ce qui correspond à 16 % des VE vendus [AVERE 19]. Cependant, la Nissan Leaf est le véhicule électrique le plus vendu en Europe et dans le monde.

Des freins encore nombreux

L'autonomie est le principal frein à l'adoption du véhicule électrique. Selon un sondage réalisé par l'Ipsos, l'autonomie est, pour les Français, le 1^{er} frein à la mobilité électrique [Ipsos 18]. D'après ce sondage, l'autonomie d'un véhicule est jugée trop faible. [Franke 13] a montré que l'autonomie actuelle des véhicules était suffisante pour les déplacements des usagers. Mais la mauvaise perception est due à la comparaison avec l'autonomie des véhicules thermiques qui est bien supérieure. Cette perception est aussi liée à l'anxiété du dernier kilomètre³ en véhicule électrique. Cette crainte peut augmenter à cause de la variabilité de l'autonomie selon les conditions d'utilisation [Nastjuk 18]. Dans [Rauh 15], il a été montré qu'un passage sur autoroute avec une faible autonomie augmentait cette anxiété. Une meilleure connaissance du trajet à réaliser et du véhicule peut contribuer à réduire cette anxiété. De plus, des outils d'aide à la conduite comme des outils d'estimation de la consommation ou de l'autonomie d'un véhicule électrique et une meilleure information peuvent également aider à rassurer l'utilisateur [Eisel 16] [ERTRAC 17].

Un autre frein au véhicule électrique est son coût à l'achat. Le coût de production d'un véhicule électrique est plus important que celui d'un véhicule conventionnel [ANL 16]. D'après [Lutsey 19], en 2025 le coût de production du véhicule électrique aura rejoint celui du véhicule thermique. La différence de prix entre l'électricité et l'essence pour la même utilisation compense en partie le prix d'achat plus élevé d'un véhicule électrique [Palmer 18] [Desai 19]. Des aides à l'achat ont été mises en place par l'État français pour réduire la différence de coût [France Stratégie 18]. Ces aides ont permis d'augmenter la part de marché des véhicules électriques dans les pays qui l'ont mis en place [JRC 18].

La recharge du véhicule est également un handicap pour sa diffusion. En effet, l'accès à la recharge et la durée de celle-ci sont considérés comme contraignants [Neubauer 14a]. Une meilleure accessibilité à la recharge permet aussi de diminuer l'anxiété du dernier kilomètre et d'augmenter la part de marché du VE [JRC 18].

³ Anxiété due à la faible autonomie et au risque de ne pas pouvoir terminer son parcours

I.2. Les universités, terrains privilégiés d'expérimentation

Les universités en tant qu'établissement de recherche, d'innovations et de formation peuvent contribuer à des solutions pour créer des villes plus durables [Finlay 13]. Dans cette partie, différentes initiatives seront présentées, avant de faire un focus sur le projet de campus à mobilités sans émission de polluants sur le campus « Cité Scientifique » de l'Université de Lille.

I.2.1. Le développement durable des universités

Un campus d'université peut être considéré comme une petite ville. En effet, un campus possède des lieux de travail et d'étude, des habitations, des lieux de restauration et peut être desservi par des transports en commun. Comme une ville, il entraîne des déplacements journaliers pour travailler, pour se restaurer, etc. Il génère de la mobilité et attire aussi des flux de personnes. Les campus universitaires constituent donc des lieux privilégiés pour expérimenter de nouvelles mobilités.

Les bilans carbone de différentes universités montrent l'importance des émissions de gaz à effet de serre liées aux déplacements des personnes et de production d'énergie électrique et thermique [COMUE 12] [Ozawa-Meida 13] [Vásquez 15] [Opel 17].

Depuis 2010, en France, les entreprises et collectivités publiques doivent réaliser leur bilan carbone. Ainsi, l'université de Lille a effectué le bilan carbone de ses différents campus en 2011, en prenant comme base l'année 2010 [COMUE 12]. Ce bilan a été certifié « bilan carbone ». Les déplacements des personnes pesaient pour 69 % des émissions de gaz à effet de serre du campus « Cité Scientifique ». L'estimation des gaz à effet de serre des déplacements réalisé dans ce bilan carbone est donnée avec une grande incertitude. Notamment, il a été difficile de savoir si les émissions sont principalement dues aux déplacements professionnels ou de la mobilité domicile-travail. Ce constat a permis de réaliser un travail de fond sur les émissions provenant des déplacements lors du bilan suivant, en 2014. Ce bilan sera présenté par la suite.

Malgré ces quelques exemples, il est difficile dans la littérature de trouver des exemples bien détaillés. Certains bilans carbone sont incomplets. Des émissions de gaz à effet de serre ne sont pas estimées, notamment celles liées aux déplacements. Il est à noter que l'université de Lille a entrepris un travail de fond depuis 2010 sur l'analyse des émissions de gaz à effet de serre de ses différents campus.

Une grande partie des universités se sont intéressées à la réduction des émissions de polluants des moyens de productions d'énergie, certains en utilisant la revalorisation des déchets ou en utilisant des énergies renouvelables [Finlay 13] [Opel 17] [Wiryadinata 19].

D'autres universités s'intéressent à changer la mobilité des personnes venant sur leur campus. Différentes initiatives ont été entreprises pour réduire les émissions de gaz à effet de serre liées au transport du personnel et des étudiants. En Thaïlande, comme dans la plupart des pays d'Asie du Sud-Est, la plupart des trajets domicile-travail se réalisent en moto. L'université de Thammasat promeut l'utilisation de la moto électrique, et du vélo à la place des motos à essence utilisée par les étudiants et le personnel de l'université [ISCN 18]. Un des services

proposés est la recharge des motos électriques à l'aide de source d'énergies en partie renouvelables.

D'autres universités mettent en avant la mobilité douce pour réduire les émissions de polluants des campus [Finlay 13] [Gavanas 13].

En Europe, différentes universités se sont mises à repenser leur mobilité. Différents regroupements interdisciplinaires d'universités ont ainsi lieu afin de partager les connaissances.

Le projet CAMP-sUmp (Sustainable Urban Mobility Plan for Campuses) est une collaboration entre 7 universités, pour développer un plan de mobilité durable [Campos 17] [Papantoniou 19]. Le projet regroupe les universités de Chypre, d'Athènes, de Split en Croatie, de Bologne, l'université de Catanzaro en Italie, de Malte et de Valence en Espagne.

Il existe un autre projet européen appelé U-Mob Life (European Network for Sustainable Mobility at University) [U-MOB 19]. 4 universités sont à l'origine de ce projet européen Cracovie, Bergame, Rotterdam et l'Université Autonome de Barcelone.

L'école polytechnique de Milan et l'université de Gênes se sont également associées pour transformer leur campus en campus à mobilité à zéro émission. Des véhicules électriques rechargés par des panneaux photovoltaïques sont à l'étude [Brenna 16] [Bracco 17].

Ces différents exemples présentent une diversité des profils des campus universitaires. Certains campus se trouvent en ville, par exemple à Milan, d'autres à la périphérie comme l'université autonome de Barcelone. La mobilité des personnes effectuant des trajets domicile-université est totalement différente entre l'Asie, l'Europe et l'Amérique. De plus, les conditions climatiques ne sont pas les mêmes entre les campus. Ainsi les solutions pour atteindre des campus à mobilité plus durable peuvent être multiples.

Il est à noter qu'il est difficile de trouver dans la littérature scientifique, des études et des exemples de plan de réduction d'émissions détaillées des transports. Quand il y a une étude pour un changement de mobilité, le contexte de celle-ci n'est pas assez détaillé pour savoir s'il y a une réelle volonté de mettre en œuvre la solution proposée. À l'inverse, des publications montrent une volonté de changement sans plan d'action détaillé pour atteindre un tel changement.

I.2.2. Le programme Campus Universitaire à Mobilité Innovante et Neutre en Carbone

En 2014, le campus Cité Scientifique de l'université de Lille a actualisé son Bilan Carbone [COMUE 15]. Notamment, les déplacements et les missions des personnels ont été plus finement analysés. Il s'avère que plus de la moitié des gaz à effet de serre produits sur le campus sont dus à la mobilité des personnes (56 %) (Figure I.5). 97 % des trajets effectués par les étudiants et les personnels sont des trajets domicile-universités. Les 3 % restants sont des trajets professionnels. La voiture ne représente quant à elle que 23 % des trajets effectués par les personnes venant sur le campus. Cela représente environ 5 000 voitures qui viennent quotidiennement sur le campus. De plus, les transports en commun sont bien développés sur le campus. Une ligne de métro et 2 stations desservent le campus. À l'une des 2 stations, un hub de bus connecte des villes périurbaines à la ligne de métro et donc au campus.

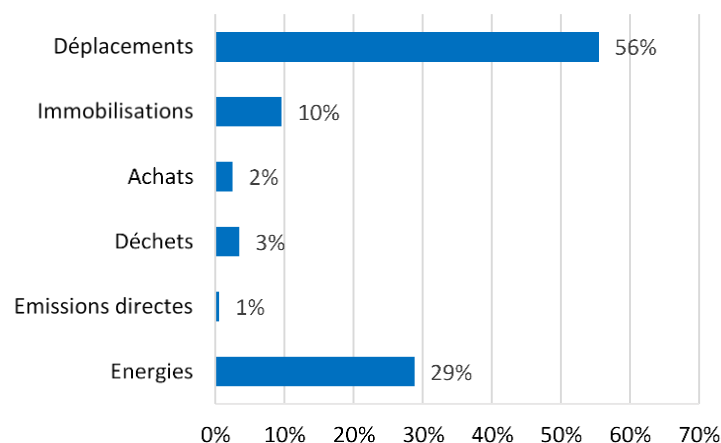


Figure I.5 : Émission de gaz à effet de serre du campus Cité Scientifique

Les voitures génèrent 78 % des émissions de gaz à effet de serre dues aux déplacements (Figure I.6). Pour le campus Cité Scientifique, la réduction de son empreinte carbone passe par la réduction des émissions de gaz à effet de serre dues aux voitures.

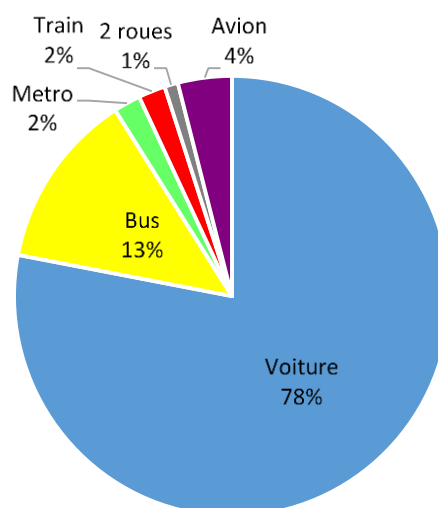


Figure I.6 : Émissions de gaz à effet dues au transport

Le programme CUMIN (Campus Universitaire à Mobilité Innovante et Neutre en carbone) [CUMIN 17] a pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre dues aux véhicules sur le campus Cité Scientifique de l'Université de Lille. Le campus étant bien desservi par les transports en commun, il est difficile d'améliorer l'offre existante. D'autres solutions sont nécessaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (Figure I.7) : limiter l'accès des voitures thermiques sur le campus, favoriser les mobilités douces, inciter les conducteurs à passer à des véhicules à basse émission comme des voitures électriques. Pour cela, il s'agirait de proposer des solutions de recharge pour véhicules électriques dont l'énergie nécessaire serait produite à l'aide d'énergie renouvelable, par exemple, à l'aide de panneaux photovoltaïques. Cette solution est notamment déjà étudiée à l'université Technologique de Compiègne [Sechilariu 17]. Le programme vise aussi à proposer des solutions pour éviter de se déplacer en voiture à l'intérieur du campus : navette autonome, vélos ou trottinettes en libre-service, véhicule électrique en autopartage, etc.



Figure I.7 : Scénario potentiel pour le campus à l'horizon 2020

Le programme CUMIN est un projet interdisciplinaire qui regroupe des chercheurs en génie électrique du laboratoire L2EP, des chercheurs en automatique du laboratoire CRISTAL, des chercheurs en aménagement et urbanisme du laboratoire TVES, et des chercheurs en économie du Rochester Institute of Technology (États-Unis).

CUMIN est divisé en différents projets :

- Le projet GRETA (Generation using Renewable Energy for Transport Activities of an eco-campus) vise à estimer la production d'énergie de panneaux photovoltaïques sur le toit des bâtiments pour recharger des véhicules électriques.
- Le projet EVE (Electric Vehicle, Estimation of mobility and charging energy for an eco-campus) vise à calculer la consommation d'énergie de différents véhicules électriques : navettes autonomes, segways et voitures électriques.
- Le projet MOUVE (MObility and Use of electric VEhicles based on dedicate charging infrastructure) s'intéresse au positionnement des bornes de charges dans la région Hauts de France et les interactions de ces bornes avec les utilisateurs.
- Le projet ADAM (Advanced Drive Analysis for electro-Mobility of an eco-campus) a pour but de réaliser une base de données de cycles de conduite de véhicules électriques et d'en faire l'analyse en vue d'estimer la consommation globale d'une flotte de VE.
- Le projet TESS (Technical-Economic Study of Sustainable cities based on electro-mobility) s'intéresse à l'étude technico-économique d'un campus à zéro émission basée sur les projets ci-dessus. Différents scénarios seront proposés pour l'évolution du campus.

- Le projet SARA (Social Acceptance of electric vehicles in Restricted Areas) a pour but d'étudier l'acceptabilité d'un campus à mobilité neutre en carbone.
- Le projet SANAA (SAfe and secure Navigation of Autonomous Vehicle) s'intéresse à rendre les véhicules plus autonomes pour améliorer la sécurité.
- Le projet REMUS (Recovery of Energy for Metros in University based on Sustainability) a pour but d'étudier la récupération d'énergie au freinage du métro pour par exemple recharger des véhicules électriques.

Dans le cadre du programme CUMIN, différentes collaborations sont prévues pour étendre le modèle d'université à mobilité neutre en carbone à d'autres universités. Dans ce contexte, une première collaboration avec l'université Québec — Trois-Rivières a été créée à travers le Laboratoire Associé International (LAI) e-CAMPUS en 2018. L'objectif est de comparer les 2 campus en termes d'électro-mobilité.

Cette thèse est une collaboration entre les laboratoires L2EP et TVES dans le cadre du projet EVE issu du programme CUMIN. Elle vise à développer un estimateur de la consommation de voitures électriques rapide afin d'estimer au mieux la consommation d'une grande partie des 5 000 voitures électriques venant sur le campus. Cela permettra de prévoir les nécessités de recharge pour ces véhicules. De plus, une estimation de la réduction potentielle des émissions de gaz à effet de serre pourra être réalisée. Ainsi, tous les cas applicatifs de la thèse seront basés sur le programme CUMIN. De plus, à la fin de chaque chapitre, une partie des conclusions sera tirée pour le cas applicatif.

Définition de trajets types

À l'aide de l'enquête ménage et déplacement dans la métropole de Lille de 2006, une étude des déplacements des personnes travaillant sur le campus a pu être réalisée. L'analyse de ces résultats et à l'aide d'un annuaire des personnels travaillant sur le campus, il est possible de définir les trajets types pour ce cas applicatif, les trajets journaliers des personnes venant travailler ou étudier sur le campus.

Dans un premier temps, il est utile de rappeler la situation géographique du campus Cité Scientifique. Il se trouve au sud de Villeneuve-d'Ascq, qui se trouve au sud-est de Lille dans le nord de la France. Les trajets des personnes vers le campus se font depuis ou vers la métropole lilloise, appelée la Métropole Européenne de Lille (MEL) (Figure I.8). La MEL est composée de 90 communes pour 1,2 million d'habitants. 8 communes de la MEL sont desservies par 2 lignes de métro.

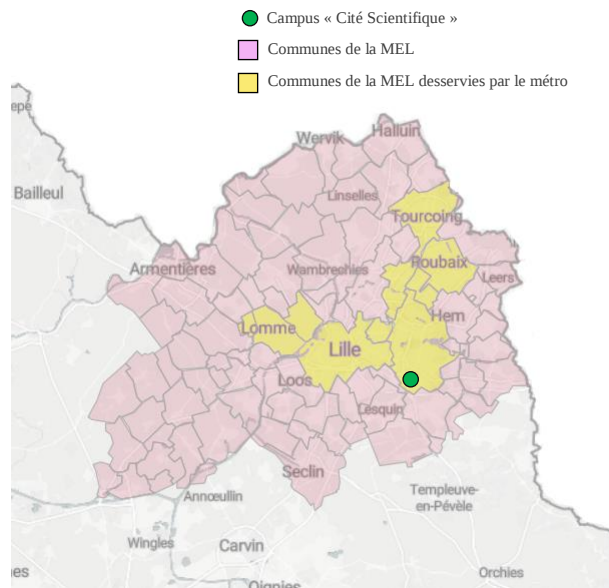


Figure I.8 : Carte de la MEL [MEL 19]

Les trajets journaliers peuvent aussi se faire depuis les zones urbaines entourant la MEL. Les communes limitrophes et celles de la MEL forment une zone appelée l'Aire Métropolitaine de Lille (AML) (Figure I.9). La particularité de L'AML est qu'elle contient des communes françaises et belges. Dans cette thèse, on ne s'intéressera qu'au personnel habitant dans la partie française de l'AML.

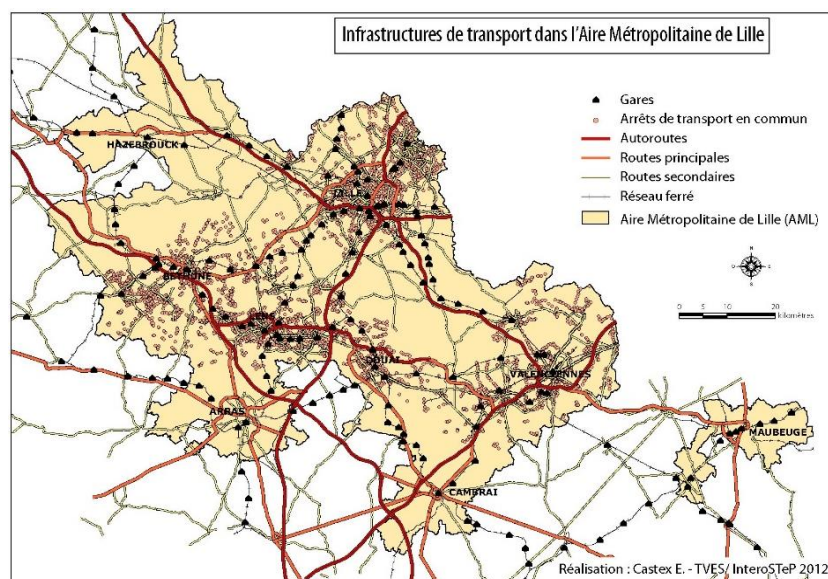


Figure I.9 : Carte de L'AML [Castex 12]

L'enquête ménage et déplacement de la MEL de 2006 donne des informations sur les déplacements des personnes sur le campus. Elle va nous permettre de définir des trajets types afin d'avoir une première estimation de la consommation d'énergie des trajets domicile-université. En 2006, il y avait 20 000 étudiants pour 3 000 personnels sur le campus.

Il y avait 43 800 échanges quotidiennement réalisés avec l'extérieur du campus et des communes se trouvant dans le périmètre de la MEL. 40 % de ces échanges se réalisaient en

voiture. La plupart des personnes habitent les alentours du campus à Villeneuve-d'Ascq, 16 900 échanges et à Lille, 15 200 échanges. L'utilisation de la voiture est différente selon le lieu d'habitation. 80 % des personnes à Lille viennent en transport en commun contre 39 % pour ceux habitants Villeneuve-d'Ascq (Table I.1). Pour Villeneuve-d'Ascq, l'étendue de la commune est importante et n'est pas totalement desservie par le métro, d'où le fait d'avoir une part importante d'utilisation de la voiture, 48 %, sur de courtes distances. Pour les communes de la MEL non desservies par le métro, 64 % des personnels utilisent leur véhicule.

Table I.1 : Moyens de locomotion des personnes venant travailler sur le campus

Zone d'origine ou de destination	Nombre d'échanges quotidiens	Marche	Transport en commun	Voiture	Vélo
Lille	15 200	1 %	81 %	18 %	0 %
Villeneuve-d'Ascq	16 900	11 %	39 %	48 %	2 %
Autres communes desservies par le métro	5 600	0 %	45 %	55 %	0 %
Autres communes de la MEL	5 400	0 %	36 %	64 %	0 %
total des échanges	43 800	4 %	54 %	40 %	1 %

En 2006, les échanges ont été décomposés entre personnels et étudiants. 67 % des personnels, environ 2 000 personnes, utilisaient une voiture. Les étudiants sont 12 % à utiliser une voiture pour leur déplacement quotidien, ce qui représentait 2 400 personnes (Figure I.10). En 2019, le nombre de véhicules venant sur le campus est estimé à 5 000.

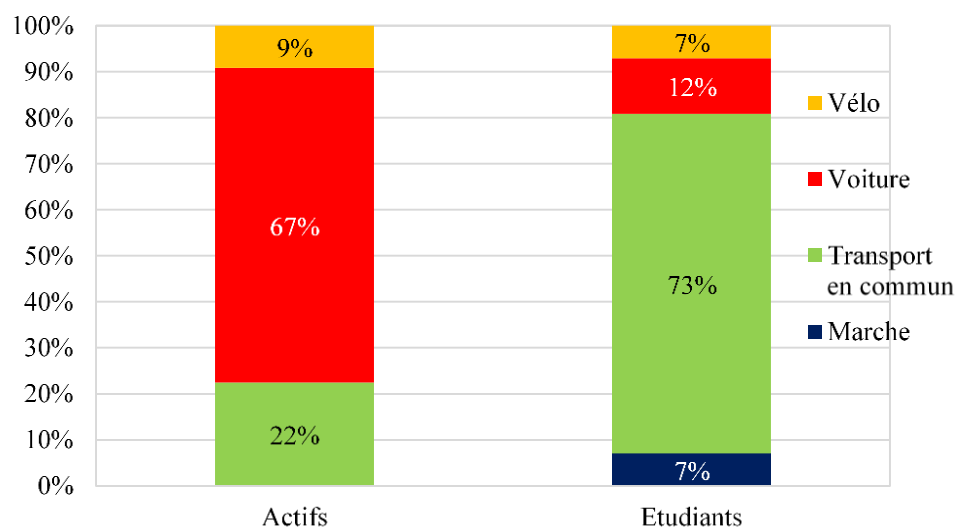


Figure I.10 : déplacement des personnes du Campus Cité Scientifique

Pour définir les trajets types, on s'intéresse à la population des personnels. Cette population est bien installée dans le territoire, la variation de la population est faible et peut être connue grâce à un annuaire, daté de 2013. De plus, elle est la population la plus difficile à convaincre du changement de mobilités [Politis 12]. Une étude statistique a été menée afin de savoir le nombre de véhicules venant de chaque zone. 72 % des personnels habitaient la MEL, 19 % le reste de l'AML et 9 % indiquent un lieu d'habitation extérieure de cette zone ou à l'étranger (Figure I.11). La répartition de la MEL peut se répartir en 24 % pour Lille, 15 % pour Villeneuve-d'Ascq, 10 % pour les autres villes de la MEL ayant le métro et 23 % pour le reste (Figure I.12).

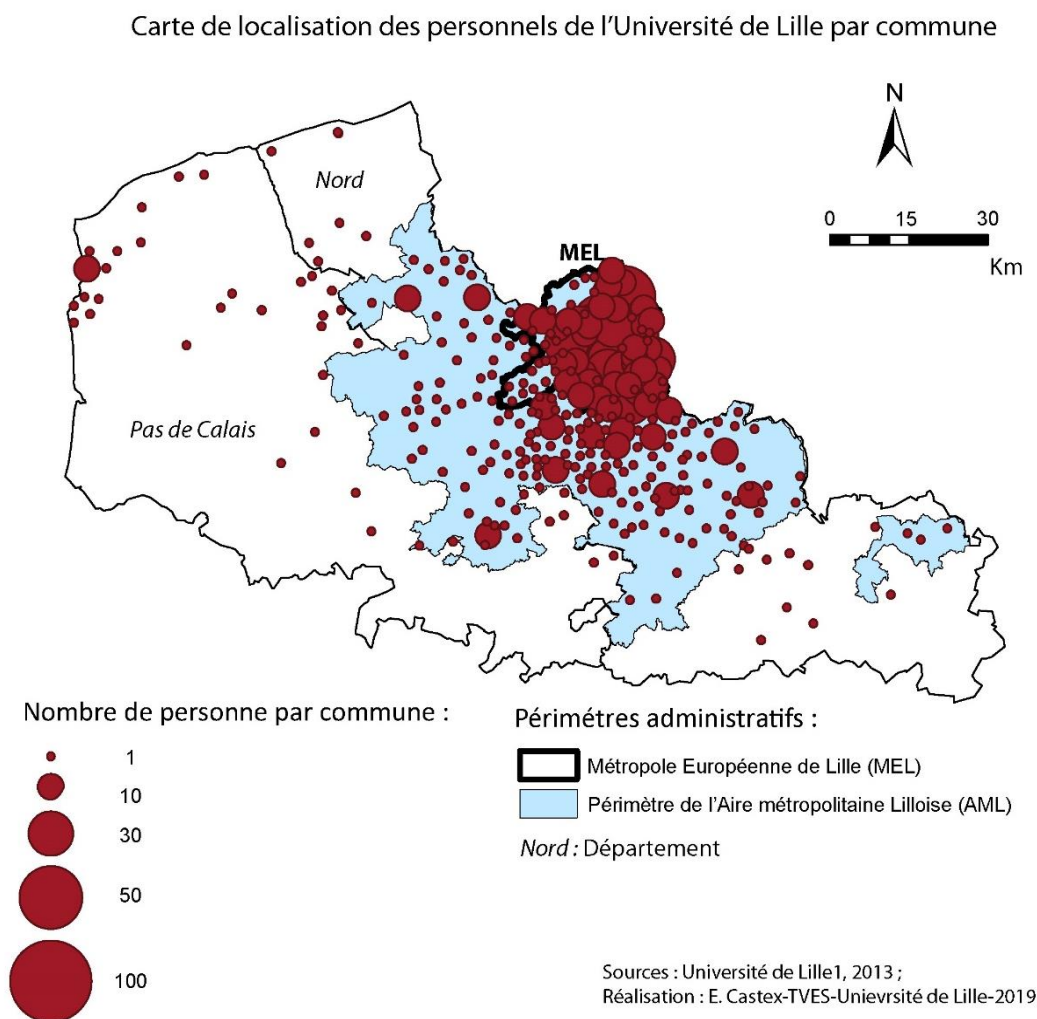


Figure I.11 : Répartition géographique des personnels du campus [Castex 19]

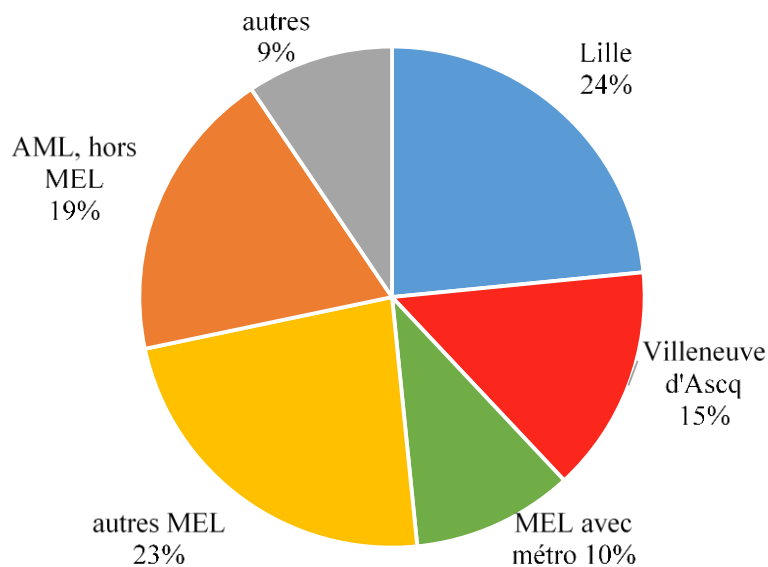


Figure I.12 : répartition des personnels dans les différentes zones d'habitations

Six trajets types peuvent être définis à partir des cas présentés en Figure I.12 et en fonction de la répartition géographique. Les six trajets représentent une partie importante des trajets réalisés par les personnels. La Table I.2 permet de connaître l'utilisation de la voiture pour les différents trajets proposés. Ainsi, la consommation globale d'énergie journalière et annuelle pour un VE peut être estimée pour ces différents trajets. Cette estimation sera donnée dans la partie III.3.3. De plus, la variation de la consommation sera aussi donnée. Les causes de ces variations sont expliquées dans la partie suivante.

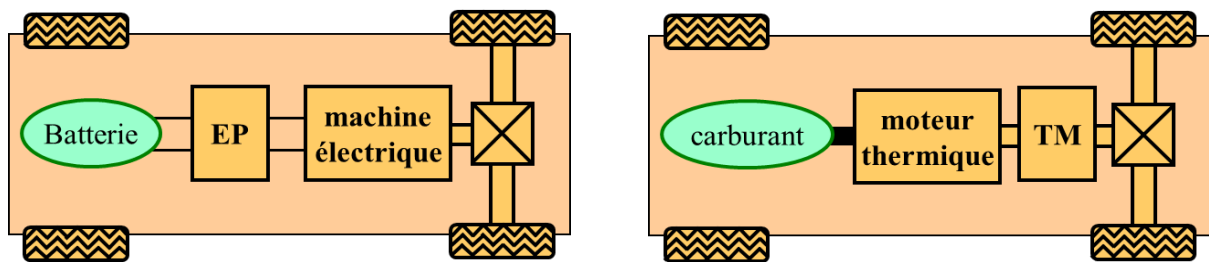
Table I.2 : Trajets Domicile Université

Ville	Caractéristiques du trajet
Villeneuve-d'Ascq	Urbain
Lille	Urbain
Baisieux	Périurbain
Roubaix	Commune de la MEL avec métro – autoroute 90 km/h
Armentières	Commune de la MEL sans métro — autoroute
Orchies	Commune de l'AML – Autoroute 130 km/h

I.3. La variabilité de l'autonomie des véhicules électriques

I.3.1. Facteurs influant la consommation d'un véhicule électrique

L'architecture d'un véhicule électrique est totalement différente de celle d'un véhicule thermique conventionnel (Figure I.13). En effet, la propulsion d'un VE est composée d'une batterie qui est la source d'énergie et d'une machine électrique. Le véhicule thermique a un moteur thermique alimenté par de l'essence ou du diesel. Le rendement maximal d'un entraînement électrique est supérieur à 90 % contre 30 à 40 % pour un moteur thermique [Chan 10]. De plus, la machine électrique permet la récupération de l'énergie au freinage. La transmission mécanique d'un véhicule électrique est simplifiée utilisant le plus souvent un simple réducteur contre une boîte de vitesse et un embrayage pour un véhicule thermique. Finalement, les pertes en chaleur du moteur thermique permettent de fournir du chauffage en hiver, ce qui n'est pas le cas pour un véhicule électrique étant données les faibles pertes du moteur électrique. De ce fait, la consommation d'un véhicule électrique est différente de celle d'un véhicule thermique [Fiori 19] [Chłopek 18]. L'utilisation de ces véhicules sera elle aussi différente. Divers facteurs peuvent impacter alors la consommation des véhicules.



TM : Transmission mécanique, boîte de vitesse et embrayage

EP : Electronique de Puissance

Figure I.13 : Architecture d'un véhicule électrique et d'un véhicule thermique [Chan 10]

Ces facteurs sont l'ensemble des éléments extérieurs aux véhicules, c'est-à-dire à l'exception des systèmes propres aux véhicules, qui font varier la consommation d'énergie. Du fait de la composition différente des véhicules thermiques et électriques, ces facteurs peuvent avoir un effet différent sur leur consommation. Les facteurs, qui seront listés par la suite, peuvent avoir un impact sur la consommation d'un véhicule électrique.

La variabilité de la consommation du véhicule électrique n'est pas un problème récent. Dès 1940, Peugeot écrivait dans le mode d'emploi de la « Voiture Légère de Ville » (VLV) que l'autonomie du véhicule pouvait varier selon différents facteurs [Debraine 09]. Dans cette notice, il était cité notamment que les faibles températures, la pente et le vent pouvaient faire varier l'autonomie de la VLV.

Les facteurs considérés peuvent avoir un effet sur la traction du véhicule électrique, sur les auxiliaires, sur la partie confort et sur la batterie. Par la suite, l'influence des facteurs sera décrite pour chaque partie du véhicule.

Facteurs influant sur la traction du véhicule

La vitesse a un effet direct sur la consommation des véhicules. Pour les deux véhicules, la consommation augmente en fonction de la vitesse de manière quadratique. Mais le rendement d'un véhicule thermique est plus faible. Les rapports de la boîte de vitesse du véhicule thermique ont un impact sur la consommation. Du fait de la différence de composition entre les deux véhicules, la consommation augmente différemment entre les deux véhicules [Fiori 19] [Horrein 17]. Les vitesses maximales autorisées impactent la vitesse du véhicule et donc la consommation d'énergie. L'état du trafic influence également la vitesse du véhicule [Fiori 19] [Younes 13].

Les accélérations ont aussi un effet sur la consommation. Dans [Braun 18], il est montré que le nombre d'accélérations et leur amplitude affectent la consommation d'énergie. Pour les décélérations, les machines électriques sont réversibles et permettent le freinage régénératif. Ainsi, une partie de l'énergie peut être récupérée. Un trafic dense augmente le nombre d'accélération et de décélération, ce qui augmente la consommation. L'autonomie est affectée par les arrêts liés à la signalisation et aux intersections, qui augmentent le nombre d'accélérations [Gutenkust 15] [Desreveaux 19a].

Le conducteur affecte aussi la consommation du véhicule. Dans la littérature, les conducteurs sont souvent classés en 3 groupes de comportement : économique, normal et sportif. Les comportements agressifs ont une vitesse maximale plus importante, des variations de vitesse plus fréquentes et des accélérations plus fortes. Ainsi ces comportements entraînent une consommation plus importante [Neubauer 14b]. De plus, l'anxiété du dernier kilomètre exergue les comportements agressifs [Shahar 09] [Steinhauser 18]. L'éco-conduite et des outils d'aide à la conduite permettent de réduire la consommation [Trigui 15] et donc de réduire ce stress [Günther 19].

Le mode de conduite du véhicule, proposé par les constructeurs et sélectionné par les conducteurs, affecte aussi la consommation. Le mode « éco » par exemple limite la vitesse maximale du véhicule et le couple maximal du moteur. Cela devrait diminuer la consommation [Horrein 17].

La pente a un effet sur la consommation. En montée, la consommation du véhicule augmente. En descente, la récupération d'énergie permet de récupérer une partie de l'énergie potentielle [Wu 15] [Liu 17].

Les conditions météorologiques ont un impact sur la consommation de la partie traction. Le vent a un effet sur la résistance aérodynamique du véhicule qui augmente ou diminue en fonction de la direction du vent. Ce facteur impacte la consommation à haute vitesse [Yi 17b]. De plus, la résistance de l'air change en fonction de la température et de la pression [Ramsey 19].

Facteurs influant sur la partie confort et les auxiliaires

La température ambiante a un impact sur la consommation de la partie confort. Dans [Kambly 15] et [Yuksel 15], il est montré que la consommation de la partie confort dépend de la température. Cette consommation varie en fonction du temps. En fonction de l'heure où le véhicule est conduit, la température varie et donc la consommation varie aussi. Mais elle varie aussi annuellement. En effet, les températures ne sont pas les mêmes en hiver et en été. Mais

elle varie aussi en fonction de la géographie et du climat. Une ville dans le désert comme Phoenix a une utilisation de la climatisation très importante (plus de 40 °C durant 6 mois). Au contraire de Phoenix, l'amplitude thermique de Détroit est très importante entre l'hiver et l'été (-20 °C à 30 °C) avec une importante consommation de chauffage.

Les radiations solaires chauffent l'habitacle, ce qui entraîne une consommation d'énergie plus importante pour réduire la température dans l'habitacle du véhicule à l'aide de la climatisation [Torregrosa 15]. Ces radiations solaires varient en fonction de la météo – les nuages absorbent les rayons du soleil – du lieu, de l'heure et du jour de l'année.

Le ressenti du confort thermique dans l'habitacle est subjectif. Des personnes préféreront une température de 16 °C dans le véhicule et d'autres personnes se sentiront bien à 20 °C. Ces ressentis peuvent entraîner une variation de la consommation d'énergie [ASHRAE 17] [Alahmer 12]. Le taux d'humidité dans l'habitacle impacte aussi sur le ressenti et la consommation.

Les autres auxiliaires comme les phares ou les essuie-glaces dépendent des conditions météorologiques et de la visibilité sur la route. Ils sont aussi sujets aux ressentis du conducteur et aux différences entre les véhicules.

Facteurs influant sur la batterie

La température a un effet sur la capacité des batteries et sur ses pertes à court terme. En effet à faible température, la capacité de la batterie et donc l'autonomie du véhicule sont réduites. De plus, la résistance interne de la batterie augmente, donc sa consommation d'énergie augmente [Yi 13] [Cappetto 17].

La température influe aussi sur la batterie à long terme, au niveau du vieillissement. Ce vieillissement de la batterie affecte sa capacité totale qui diminue, ce vieillissement est dû aux sollicitations du véhicule, mais aussi aux phases de repos (vieillissement calendaire) [Redondo 16].

Quand il fait plus froid, la batterie vieillit plus vite en cyclage et donc la capacité de stockage de la batterie diminue plus vite [Jaguemont 16b] [Waldmann 14]. Dans [Lindgren 16], il est montré que la température optimale de fonctionnement de la batterie est de 20 °C. Il peut être ainsi nécessaire de conditionner la température dans la batterie, ce qui augmente la consommation d'énergie. Le comportement du conducteur affecte le vieillissement de la batterie. Les pics de courant sont plus nombreux et ont une amplitude plus élevée pour une personne ayant une conduite plus sportive [Jafari 15].

Bilan sur les facteurs impactant la consommation des VEs

Pour conclure, les facteurs impactant la consommation des VEs peuvent être classés dans 4 différentes catégories : les conditions climatiques, les conditions routières, le comportement du conducteur et le véhicule. Ces facteurs influent sur la consommation de la traction, du confort, des auxiliaires et donc sur l'autonomie du véhicule (Figure I.14).

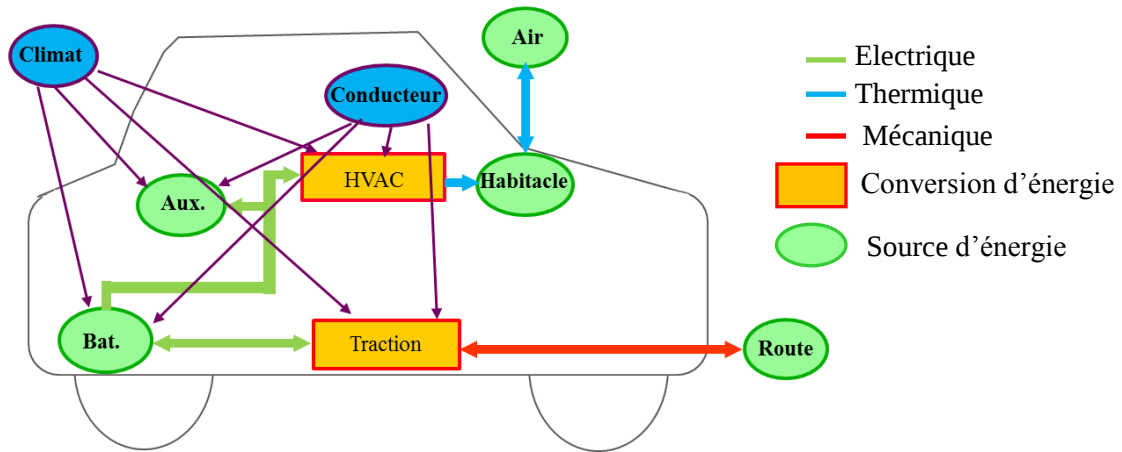


Figure I.14 : Effet des facteurs sur le véhicule électrique

Les facteurs liés aux climats sont la température, l'humidité et l'ensoleillement et les précipitations. Ces facteurs varient en fonction de la région et de la temporalité qu'elle soit journalière ou saisonnière. Ils ont un impact à la fois sur la partie confort de l'habitacle, l'utilisation des auxiliaires, la traction du véhicule et la batterie.

Les facteurs liés aux conditions routières sont la topographie de la route, la signalisation du trajet à effectuer et le trafic. Ces facteurs affectent la consommation de la traction du véhicule et peuvent impacter plus ou moins le vieillissement de la batterie.

Le comportement du conducteur est un facteur qui impacte aussi la consommation. Ce facteur regroupe le comportement face à la route qui a un impact sur les accélérations et les vitesses et donc sur la consommation et le vieillissement de la batterie. De plus, le ressenti thermique du conducteur joue sur la consommation de la partie confort. Ces comportements varient en fonction du pays et de la culture du conducteur.

Les facteurs liés aux véhicules sont liés aux différences de caractéristiques de ses composants. Selon les modèles, les véhicules peuvent ne pas avoir la même capacité de batteries, les mêmes caractéristiques de machine électrique, le même système de confort, le même poids, la même récupération d'énergie au freinage, etc.

Ainsi, la consommation varie en fonction du lieu et de la temporalité. Les facteurs peuvent aussi avoir des effets entre eux et donc modifier la consommation. Dans [Baouche 15], il est montré que la consommation d'un véhicule électrique, à différent moment de la journée, varie en fonction des changements de température et/ou du trafic. Dans [Horrein 17], il est montré que la vitesse peut avoir un impact différent selon la nécessité de chauffage ou non. En effet, la réduction de la vitesse, qui a un effet bénéfique sur la consommation de la partie traction, a un effet contraire sur la consommation de la partie confort. En effet, la réduction de la vitesse entraîne un temps de conduite plus important. En conséquence, la consommation globale de la partie confort augmente. Cela peut induire une augmentation de la consommation globale du véhicule.

I.3.2. Intérêt d'étudier la consommation d'un véhicule électrique

Dans la partie précédente, il a été montré que différents facteurs peuvent affecter la consommation d'un véhicule électrique. Mais il peut être difficile de comparer l'effet de ces différents paramètres. Deux exemples seront pris pour illustrer ce problème. Dans le premier, la variation de la consommation du sous-système de traction sera discutée. Dans le second, la variation de la consommation des auxiliaires, notamment du sous-système de confort, sera étudiée.

Deux trajets sont réalisés à l'aide d'une Renault Zoé entre le campus « Cité Scientifique » et Baisieux situé à 7 km. Un aller par la route a été effectué avec des vitesses maximales allant de 30 km/h en ville à 80 km/h. Le retour a été effectué en empruntant l'autoroute (Figure I.15a). Cette autoroute peut elle-même être subdivisée en 3 parties qui correspondent aux limites de vitesse : 130 km/h au début, 110 km/h au milieu et 70 km/h à la fin.

Pour une meilleure comparaison entre les deux trajets, il a été préféré une visualisation en fonction de la distance (Figure I.15 b). Cela permet de mieux comparer les deux trajets et d'observer les aléas rencontrés, notamment sur la partie autoroute. Pour le 1^{er} trajet, le véhicule a pu rouler aux alentours de 130 km/h sur la première partie de l'autoroute. Dans la zone à 110 km/h, la voiture a rencontré une circulation très dense. Le véhicule a ralenti et s'est arrêté plusieurs fois. Enfin dans la zone à 70 km/h, le véhicule a été limité à 50 km/h. Pour le 2^{ème} trajet, le véhicule a été limité à 110 km/h jusqu'à prendre la sortie d'autoroute où il a été rencontré la limite de 70 km/h.

L'énergie consommée sur le 1^{er} trajet est de 3,85 kWh contre 3,41 kWh sur le 2nd trajet. À cause des différents aléas, une différence de consommation de 13 % est constatée (Figure I.15c).

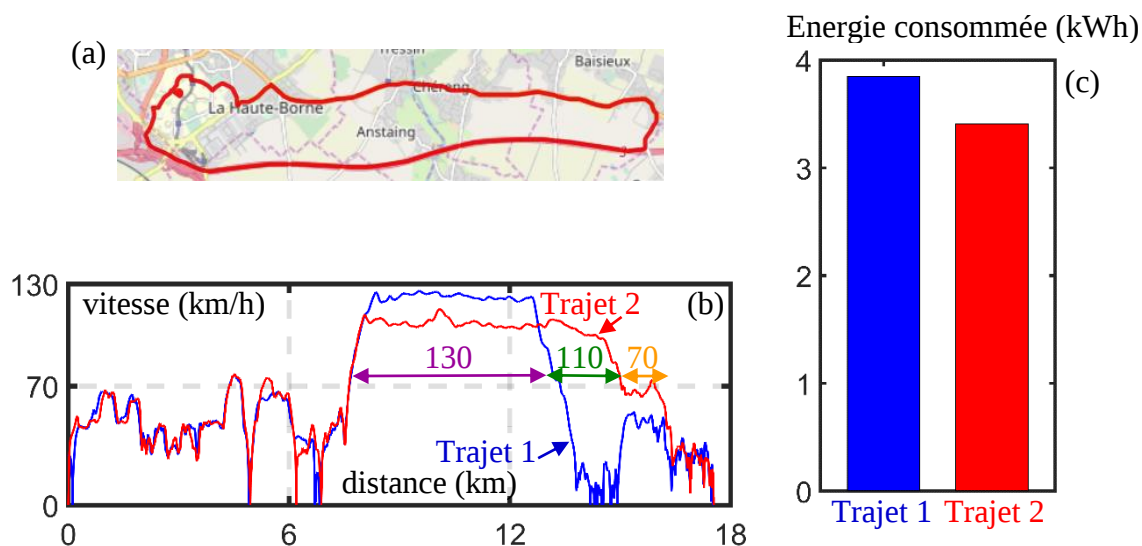


Figure I.15 : Aléa du trafic a) Trajet considéré b) Profil de vitesses c) Énergies consommées

Le deuxième exemple illustre la variabilité de la consommation due à la partie confort. En effet, 2 trajets entre le campus « Cité Scientifique » et Lille sont réalisés. Les 2 trajets ont été réalisés sur 2 jours différents avec la même température de 24 °C et à l'heure du midi. La consommation d'énergie des 2 trajets a été calculée à l'aide des mesures effectuées sur

véhicules. Le premier trajet est réalisé avec la climatisation. La consigne demandée est 19 °C pour la climatisation, 5 °C en dessous de la température extérieure. La consommation d'énergie est de 2,99 kWh. Le second trajet est effectué sans climatisation. La consommation est de 2,24 kWh. Cela représente une différence de 25 % (Figure I.16). Dans ce cas-là, il est difficile d'analyser si la différence de consommation est seulement due à l'utilisation de la climatisation ou non. En effet, entre les deux tests, il peut y avoir des aléas de circulation. De plus, les conditions météorologiques peuvent être différentes.

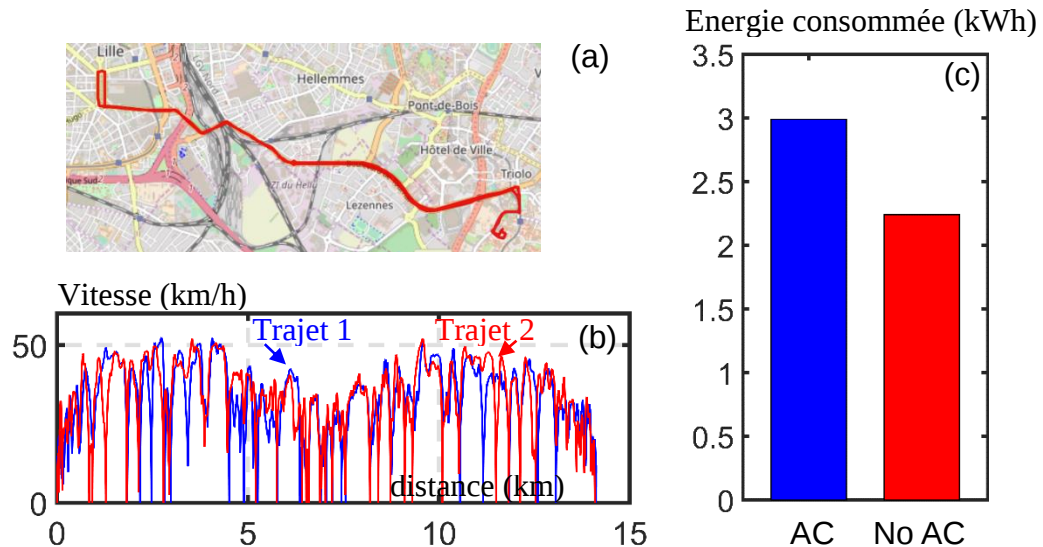


Figure I.16 : Aléa de la météo a) Trajet considéré b) Profil de vitesses c) Énergies consommées

Ces 2 exemples montrent qu'il est difficile d'évaluer la consommation d'un véhicule électrique. En effet, la consommation dépend de différents paramètres qui peuvent avoir des effets contraires. De plus entre 2 mesures, les conditions météorologiques et de circulation peuvent être très différentes et compliquer l'analyse. Il peut être ainsi difficile de quantifier l'effet de chaque paramètre sur l'autonomie. Pour avoir une comparaison significative entre les différents trajets, il est nécessaire d'avoir les mêmes conditions de test. Dans la réalité, il est difficile de trouver les mêmes conditions. Il est alors intéressant d'utiliser des outils de simulation pour estimer l'effet d'un facteur sur la consommation d'un véhicule électrique avec les mêmes conditions de départ. Les différents facteurs peuvent alors être étudiés séparément. Cependant, ces outils de simulation doivent être validés par des tests réels avant toute étude comparative.

I.3.3. Intérêt de prendre en compte les limitations dans l'estimation de la consommation d'énergie

Dans cette partie, il est discuté de comment bien prendre en compte, pour un outil de simulation, les limitations provenant du véhicule (ex. : couple de la machine), du conducteur (pédale d'accélération) ou de l'environnement (pente, vent). Ces limitations peuvent avoir un impact sur les performances du véhicule et sur le profil de vitesse.

Pour cela, deux générateurs de cycles sont utilisés pour comparer deux approches de simulation. La première simulation est de type inverse (« backward »). Pour cette approche, la simulation est réalisée de la conséquence pour remonter jusqu'à la cause. Dans une application

à un véhicule électrique, cela revient à partir de la vitesse de référence, pour remonter à la puissance demandée à la batterie. Le second utilise l'approche directe (« forward »). Pour cette approche, le modèle simulé part de la cause, la source d'énergie, pour aller vers la conséquence, la mise en mouvement du véhicule.

La comparaison présentée ci-après, a été effectuée dans [Desreveaux 19c]. Le premier générateur est basé sur les travaux de [Chrenko 14]. Ce générateur a une approche « backward » (*Figure I.17 a*), c'est-à-dire que le générateur de vitesse crée le profil de vitesse à imposer au véhicule sans retour d'information venant du modèle véhicule. Le second générateur est en approche « forward » (*Figure I.17 b*) et est basé sur le générateur pour métro développé dans la thèse de C. Mayet [Mayet 16]. Ce générateur prend en compte le retour d'information provenant du véhicule.

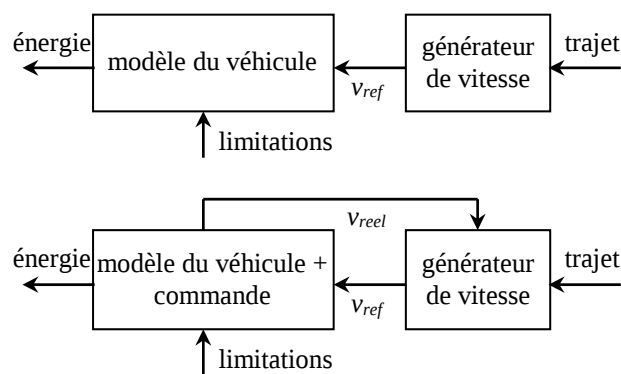


Figure I.17 : générateur de cycle a) avec approche « backward »

b) avec approche « forward »

La comparaison est effectuée en deux parties. Durant la 1^{ère} partie, le véhicule est en mode normal. Il ne subit pas de limitations. Dans la 2^{nde} partie, le véhicule roule en mode « éco », ce qui induit des limitations sur le couple et la vitesse de la machine électrique.

Le cycle utilisé pour la comparaison se compose d'un tronçon de route qui a une vitesse maximale de 90 km/h et d'un autre tronçon de type autoroutier avec une vitesse maximale de 130 km/h. Le trajet est de 5,1 km et a une durée de 3 min et 50 s.

En mode normal, les deux générateurs donnent les mêmes performances pour réaliser le trajet considéré (*Figure I.18 a*). Notamment, ils réalisent bien la distance souhaitée (*Figure I.18 b*). La consommation d'énergie simulée pour le véhicule électrique Renault Zoé est de 1,3 kWh pour les deux générateurs.

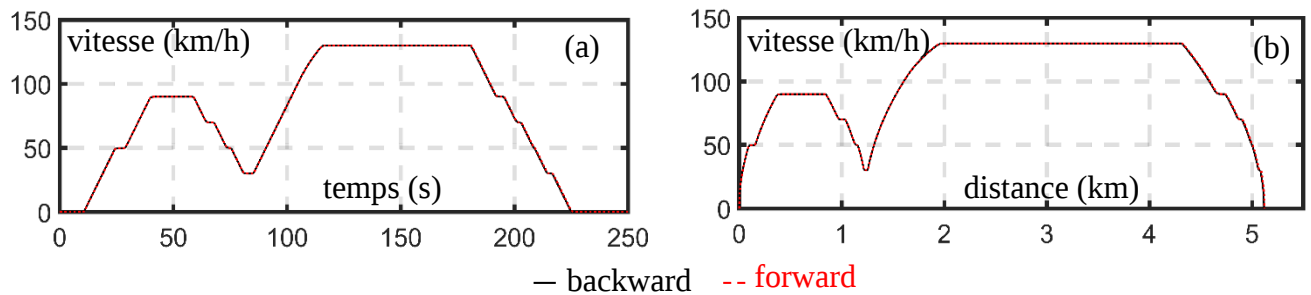


Figure I.18 : mode normal a) vitesse en fonction du temps

b) vitesse en fonction de la distance

Le deuxième test utilise un mode « éco ». Pour ce test, seulement une limitation du couple de la machine électrique est considérée. Cette limitation est suffisante pour montrer la différence entre les générateurs. La limitation entraîne une accélération plus longue, surtout au niveau de l'autoroute, où la vitesse maximale de 130 km/h est atteinte 40 s plus tard pour les deux générateurs (Figure I.19). Finalement, pour le générateur avec approche « forward », le temps de parcours est de 3 min et 55 s contre 3 min 50 s pour l'approche « backward ».

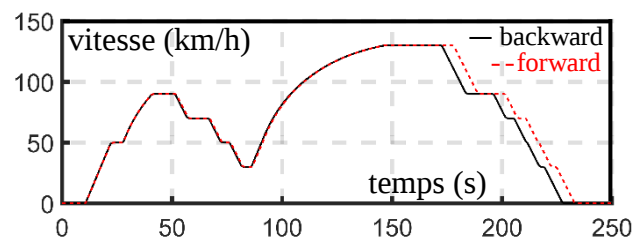


Figure I.19 : vitesse en fonction du temps en mode éco

En termes de distance, le générateur à approche « forward » réalise entièrement le trajet de 5,1 km. Pour le générateur à approche « backward », ce n'est pas le cas, la distance parcourue est inférieure à la distance demandée. La distance parcourue est de 4,9 km, ce qui induit une erreur de 4 %. Pour le générateur de type « backward », il n'y a pas de retour d'information, de vitesses ou de distances. Pour ce générateur, le cycle généré est donc toujours celui de la Figure I.18. Sauf qu'au niveau du véhicule, une limitation de couple est appliquée, ce qui diminue l'accélération dans la partie autoroute. Une erreur se crée alors entre la vitesse théorique appliquée par le générateur et la vitesse réelle.

L'approche « backward » ne corrige pas l'erreur commise sur la distance par la limitation de couple du mode « éco ». En conséquence, l'énergie calculée par le générateur à approche « backward » est erronée, elle est inférieure de 5 % par rapport au générateur à approche « forward » qui est plus proche de la réalité (pris comme référence) (Table I.3).

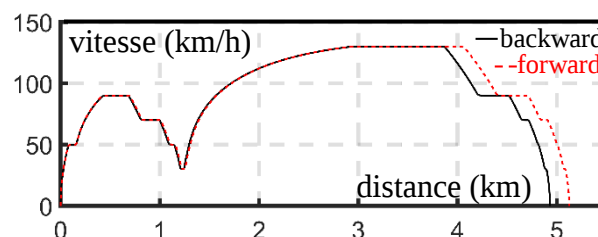


Figure I.20 : Vitesse en fonction de la distance pour le mode éco.

Table I.3 : Comparaison des 2 générateurs en mode éco.

Avec mode « économique »	Backward	Forward
Distance parcourue (km)	4,93	5,12
Erreur (%)	3,71 %	Référence
Temps de parcours	3'50	3'55
Différence (%)	-2,13	Référence
Consommation (kWh)	1,19	1,25
Erreur (%)	-4,8	Référence

Le couple de la machine permet d'expliquer l'erreur commise par le générateur à approche « backward ». En mode « éco », les générateurs subissent des limitations de couple, ce qui diminue le couple maximal, visible entre 100 et 150 s. Durant les 170 premières secondes, les couples des 2 générateurs en mode éco sont confondus. Après la limitation de la partie autoroute, le couple du générateur à approche « forward » suit le couple de l'approche « backward » avec un retard. Le générateur à approche « forward » corrige l'erreur de distance en retardant dans le temps le freinage du véhicule.

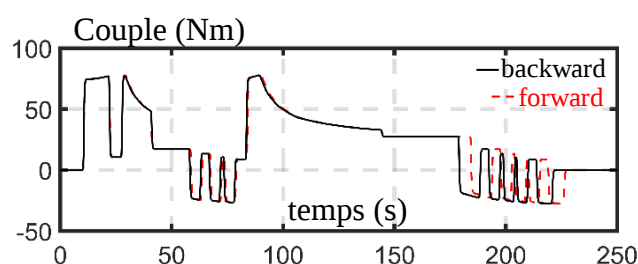


Figure I.21 : couple en fonction du temps pour le mode normal et le mode économique

En conclusion, il est important de prendre en compte les limitations du véhicule pour l'étude des effets liés au trajet. En effet, dans le cas simple présenté ici, l'erreur commise par le générateur à approche « backward » est de 5 % sur la consommation d'énergie, ce qui est important. La distance à réaliser par le véhicule n'est pas atteinte par ce générateur. Dans des cas plus complexes, avec des limitations plus importantes, l'erreur commise peut être plus importante. Ainsi, une simulation à approche directe est conseillée pour bien prendre les différentes limitations imposées par le véhicule, le conducteur ou l'environnement.

I.4. Objectif et positionnement

I.4.1. Positionnement des travaux

L'évaluation de la consommation d'énergie et de l'autonomie des véhicules électriques est importante pour leur acceptabilité. Une différence de consommation peut être constatée jusqu'à 40 % entre les cycles standards et les cycles réels [Fontaras 17]. Jusqu'à présent, il n'y a pas d'application grand public d'outil d'estimation de la consommation d'énergie des VEs. Cependant, dans la littérature scientifique, différents outils ont été développés pour estimer la consommation des véhicules électriques.

Des outils ont été développés pour la planification de trajet avec prise en compte de la recharge [Baouche 15] [De Cauwer 17] [Yi 17a]. Notamment, deux projets européens ont porté sur ce sujet [Optemus 19] [Cevolver 19]. Ces outils ont besoin de modèle de véhicules électriques rapides nécessaire à l'optimisation de trajets, mais ces modèles sont peu précis [Basso 19].

D'autres outils ont été développés pour étudier l'impact des facteurs sur la consommation d'énergie des VEs. Dans [Liu 16], un modèle mathématique basée sur la régression linéaire est développé pour expliquer l'influence de facteurs sur la consommation d'énergie. Des modèles statiques peuvent être également utilisés [Zhang 19]. Différents modèles basés sur les dérivées (approche « backward ») sont présents dans la littérature [Gutenkust 14] [Wu 15] [Asamer 16]. Ces modèles ne permettent pas d'étudier les limitations imposées par le système comme nous l'avons montré dans la partie précédente (voir I.3.3.). Ces modèles peuvent donc fausser le calcul de consommation.

Un autre moyen d'étudier la variation de l'autonomie est d'utiliser des méthodes statistiques pour voir l'impact de facteurs sur la consommation d'énergie [Wu 15] [Fetene 17] [Qi 18]. Ces méthodes agrègent un grand nombre de mesures. Elles font donc ressortir les grandes tendances. Les effets d'un facteur sur un autre peuvent alors être lissés et fausser l'interprétation.

La plupart des études réalisées à partir de modèles ne s'intéressent qu'à 1 ou 2 facteurs pris indépendamment [Varga 19]. Les études statistiques ne s'intéressent qu'à certains paramètres et donnent des tendances globales. Or certains facteurs peuvent avoir un effet sur d'autres, il est donc nécessaire d'avoir des études de facteurs pris indépendamment et globalement. Dans cette thèse, l'impact de chaque facteur étudié sera quantifié indépendamment. Puis une étude globale sera effectuée afin de pouvoir déterminer le poids de chaque facteur par rapport aux autres.

Le climat et le comportement du conducteur ont aussi un impact sur la consommation d'énergie. Ces 2 facteurs varient en fonction du lieu d'étude. La plupart des études sont réalisées pour un même pays, voire continent. Ainsi, les études statistiques sont difficiles à étendre à d'autres lieux d'études. Un outil de simulation flexible permettrait de réaliser différentes études pour différents pays.

En conclusion, la majorité des articles présentés dans ce positionnement sont récents : de 2014 à 2019. Ils montrent une tendance forte à améliorer le calcul de la consommation des véhicules électriques et voir les effets des facteurs sur cette consommation. Des outils

développés dans la littérature sont utilisés pour étudier l'impact de différents facteurs indépendamment des autres. D'autres outils réalisent des statistiques en agrégeant des centaines de trajets et leur consommation. Ces outils essaient de voir l'impact d'un facteur sur la consommation alors qu'ils sont influencés par plusieurs, ce qui peut créer des biais. Dans la littérature, il n'existe pas ou peu d'études qui comparent les facteurs à la fois indépendamment et dépendamment des autres.

Réseau MEGEVH

Le réseau MEGEVH (Modélisation Énergétique et Gestion d'énergie des Véhicules Hybrides et électriques) regroupe 11 laboratoires et 9 industriels français autour de la modélisation et de la gestion d'énergie de véhicules électrifiés (Figure I.22) [MEGEVH 19]. Le réseau favorise les collaborations entre ces membres. Cette thèse est une collaboration entre 2 laboratoires de recherche appartenant au réseau MEGEVH : le L2EP de l'Université de Lille et le LTE de l'IFSTTAR qui se trouve dans la région lyonnaise.



Figure I.22 : Carte du Réseau MEGEVH [MEGEVH 19]

Positionnement scientifique par rapport aux travaux réalisés au LTE-IFSTTAR

Fouad Baouche a développé des outils pour optimiser la consommation énergétique des véhicules électriques [Baouche 15]. Un outil d'éco-itinéraire a été développé pour proposer le meilleur trajet pour optimiser la consommation du véhicule en prenant en compte une éventuelle recharge. Pour vérifier la précision de cet outil, des essais en véhicule réel ont été réalisés en hiver. Il a été montré que la consommation du véhicule électrique variait selon le trajet et la météo. L'étude précédente ne concerne qu'une saison et sera donc étendue dans cette thèse pour voir la variation annuelle de la consommation en fonction des conditions climatiques.

Lenaïc Poupon a travaillé dans sa thèse sur le rôle des émotions sur l'acceptabilité des véhicules électriques [Poupon 17]. Des essais ont été réalisés avec des conducteurs de VE novices. Un autre test concerne la mise en place de l'éco-conduite et de ses effets bénéfiques sur la consommation énergétique. Les essais réalisés au LTE suite à cette thèse vont être exploités afin de définir des profils de conduite de véhicules électriques.

Positionnement scientifique par rapport aux travaux réalisés au laboratoire L2EP

Dans sa thèse, Clément Depature a développé un modèle de traction pour véhicule électrique. Cette thèse MEGEVH en collaboration entre l'Université de Lille et l'Université de Québec à Trois-Rivières (Canada) s'appuie sur la Tazzari Zéro du L2EP [Depature 17]. Dans nos travaux, le modèle sera adapté sur un véhicule commercial, la Renault Zoé.

Ludovic Horrein a, dans sa thèse, réalisé la modélisation de l'habitacle et du chauffage d'un véhicule hybride, la Peugeot 3008 HY4 et d'un véhicule électrique, la Tazzari Zéro du L2EP [Horrein 15]. Cette thèse est une collaboration entre le L2EP et PSA Peugeot Citroën dans le cadre du réseau MEGEVH. Dans la présente thèse, la partie confort du véhicule sera complétée par la modélisation de la climatisation.

Jean-Noël Verhille a réalisé la commande d'un système de métro en collaboration entre Siemens et le L2EP. Il a notamment réalisé un système de pilotage d'un métro en tenant compte des contraintes du système [Verhille 07]. Par la suite, ce système de pilotage du métro a été repris et développé dans la thèse de Clément Mayet. Cette thèse en collaboration entre Siemens et le L2EP a permis de créer un générateur de cycle pour piloter le métro [Mayet 16]. Dans la présente thèse, le générateur sera adapté pour une application véhicule sur route.

Dans les thèses précédentes de MEGEVH sur les véhicules électriques, hybrides ou à Pile à Combustible, le système de traction et le système de confort ont été modélisés sans prendre en compte le conducteur et l'environnement. Dans nos travaux, le conducteur et l'environnement seront pris en compte.

Contribution au projet Européen H2020 PANDA

Cette thèse a contribué au projet européen H2020 PANDA (Power Advanced N-Level Digital Architecture for models of electrified vehicles and components) [PANDA 19] [Bouscayrol 20]. Le projet PANDA a pour objectif de proposer une organisation unifiée de modèles pour véhicules électrifiés. Cette organisation pourra être utilisée de la conception du véhicule et de ses composants aux tests à réaliser avant la mise sur le marché. Ainsi, une accélération du temps de mise sur le marché est envisagée. Dans le cadre de ce projet, la Renault Zoé est un des véhicules de référence.

Le travail réalisé dans cette thèse a été utilisé pour développer un modèle de la traction de la Zoé sous AMESIM© [Husar 19]. La REM est utilisée dans PANDA pour unifier les modèles. Des échanges ont ainsi été réalisés avec Renault Technologie Roumanie afin d'affiner les divers paramètres de ce véhicule.

I.4.2. Objectif de la thèse

L'autonomie du véhicule électrique est un problème majeur constituant un frein à son développement. Cette autonomie varie dans le temps en fonction des conditions climatiques, du comportement du conducteur, de la route et du comportement de la batterie. L'objectif de la thèse est d'étudier des facteurs impactant la consommation de véhicules électriques.

Le programme CUMIN vise à créer un campus à mobilité neutre en carbone, le Projet EVE dont cette thèse fait partie, a pour but à estimer la consommation d'énergie de véhicules électriques. Dans cette thèse, un outil d'estimation de consommation d'une voiture électrique est développé. Pour CUMIN, l'objectif de la thèse est de réaliser un outil d'estimation rapide de la consommation d'énergie pour des trajets domicile-université. Il sera intégré à terme dans un outil d'estimation de consommation d'énergie de l'ensemble des déplacements à partir ou vers l'université.

L'étude réalisée dans cette thèse se limitera à des cas applicatifs de CUMIN. Dans la partie I.2, différents trajets Domicile-Université représentatifs ont été définis. Les consommations journalières et annuelles seront étudiées. Les trajets seront considérés comme directs. Les effets du trafic ne seront pas considérés. Différents profils de conducteurs seront définis pour prendre en compte l'effet de ces profils sur la consommation du VE.

Le climat du nord de la France est considéré. Il est océanique tempéré avec une amplitude de température de 20 °C entre l'été et l'hiver. La variation de la température et de l'ensoleillement seront considérés. L'effet des précipitations sur la consommation ne sera pas étudié. Les effets liés à la variation de température sur la batterie du véhicule ne seront pas considérés dans cette thèse et par extension, les effets liés au vieillissement ne seront pas pris en compte.

Dans la partie 1.1, il a été montré que la Renault Zoé est le véhicule électrique le plus vendu en France en 2018. Il sera pris comme modèle de référence pour évaluer l'impact de facteurs sur la consommation. Ce véhicule est d'autant plus pertinent qu'il est un véhicule de référence du projet PANDA et que nous avons un partenariat dans ce cadre avec Renault Technologie Roumanie.

I.4.3. Outils pour réaliser la thèse

Dans cette thèse, un outil de simulation d'un véhicule électrique est développé. Les choix pour réaliser cet outil sont expliqués dans cette partie. Pour étayer ce choix, différentes définitions sont données dans un premier temps.

Différentes équations mathématiques modélisent le véhicule. Ce système d'équations peut être statique, quasi-statique ou dynamique en fonction de l'objectif de l'étude à réaliser. Un modèle statique est rapide à simuler, mais la précision est moindre. Un modèle dynamique est long à simuler, mais a une grande précision. Un modèle quasi-statique cherche à conserver la ou les dynamiques les plus importantes du système. Sa précision et son temps de calcul se situent entre les deux autres modèles [Letrouvé 12] [Desreveaux 17].

La représentation du modèle permet d'organiser les différentes équations. Ainsi, le modèle peut être représenté de manière structurelle ou fonctionnelle. Une représentation structurelle s'attache à respecter les différents sous-systèmes du véhicule. Une représentation fonctionnelle décrit le système à l'aide de fonctions mathématiques. Ainsi, il se peut que cette dernière ne respecte pas la structure du système.

Une représentation est dite causale si elle respecte la causalité intégrale. La causalité intégrale induit que la variable de sortie (conséquence) d'un sous-système réagit avec un retard au changement d'état de la variable d'entrée (cause). Une représentation acausale ne respecte pas ce principe.

Les simulations peuvent être de type inverse (« backward ») ou directe (« forward »). En approche « backward », le système part de la conséquence pour remonter jusqu'à la cause. La commande du système est estimée comme parfaite. En approche directe, la modélisation part de la cause, à la conséquence. L'approche « forward » requiert une représentation causale. Un des défauts de l'approche directe est qu'une structure de commande doit obligatoirement être réalisée. L'approche inverse a également, un défaut. Comme la commande est considérée comme parfaite, les limitations imposées au système ne sont pas prises en compte comme nous l'avons montré au I.3.3. Ainsi dans cette thèse, une approche directe sera utilisée. Par conséquent, la représentation doit être causale.

Une représentation structurelle est acausale, car elle mélange des équations aux dérivées et des équations aux intégrales pour pouvoir respecter la structure du système. Ainsi dans cette thèse, une représentation fonctionnelle sera utilisée pour garder la causalité intégrale.

L'objectif de cette thèse porte sur l'étude de la variation de la consommation d'énergie d'un véhicule électrique. Ainsi le modèle du véhicule doit avoir un bon compromis entre rapidité et précision. En effet, la ou les dynamiques principales doivent être conservées pour avoir une bonne estimation de la consommation d'énergie du véhicule, mais elle doit être aussi rapide pour permettre le calcul de la consommation. Un modèle quasi-statique, permettant un bon compromis entre temps de calcul et précision, sera donc dans cette thèse.

En conclusion, l'outil utilisé dans cette thèse doit satisfaire différentes exigences : l'outil permet une simulation à approche directe, et sa représentation est causale et fonctionnelle. La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) répond à ces différentes exigences.

La REM est un formalisme d'organisation de modèle développée par le L2EP [Bouscayrol 12]. Elle se base sur deux principes :

Le *principe de causalité* : Tout système énergétique suit le principe de causalité intégrale. Les sorties du système sont la conséquence de l'entrée et subissent donc un retard temporel. [Iwasaki 94] [Hautier 96].

Le *principe d'interaction* : Chaque sous-système interagit avec les sous-systèmes environnants. Ainsi chaque interaction est représentée par deux variables. La première représente l'action d'un sous-système sur un autre. La seconde représente la réaction de ce dernier.

Une commande du système est nécessaire par l'utilisation de l'approche directe. La Structure Maximale de Commande (SMC) peut être déduite à partir de la REM en suivant le *principe d'inversion*. La SMC peut ainsi être déduite de manière systémique de la REM.

Les différentes fonctions et les blocs associés constituant la REM sont présentés en Annexe B. La REM étant un formalisme d'organisation, elle peut être utilisée dans différents logiciels, par exemple AMESIM© [Husar 19] ou Matlab-Simulink©. Pour cette dernière, une librairie est disponible en ligne [EMR 19].

Chapitre II. Prise en compte des conditions climatiques dans la consommation globale du véhicule

L'objectif de cette partie est d'étudier l'effet des conditions climatiques sur la consommation d'un véhicule électrique. Pour cela, un modèle multi-physique d'un véhicule est développé. Au vu du nombre de domaines physiques utilisés pour modéliser un véhicule électrique complet, une nomenclature est nécessaire (Table II.1).

Table II.1 : variables énergétiques utilisées

Domaine physique	Variable cinétique	Variable potentielle	Puissance
Électrique	Courant : i [A]	Tension : u [V]	$u.i$
Mécanique (translation)	Vitesse linéaire : v [m/s]	Force : F [N]	$F.v$
Mécanique (Rotation)	Vitesse angulaire : Ω [rad/s]	Couple : Γ [Nm]	$\Gamma.\Omega$
Fluidique (débit volumique)	Débit volumique : qv [m ³ /s]	Pression : p [Pa]	$p.qv$
Fluidique (débit massique)	Débit massique : qm [kg/s]	Enthalpie massique : h [J/kg]	$h.qm$
Thermique	Flux entropique : qs [J/(K.s)]	Température : T [°K]	$T.qs$

La 1^{ère} partie de ce chapitre concerne le sous-système traction du véhicule qui est modélisé. L'organisation du modèle est effectuée avec la REM. La commande en est ainsi déduite. Enfin, le modèle de la traction est validé par comparaison avec des données expérimentales. La 2^{ème} partie concerne la modélisation de la partie confort de l'habitacle (« confort habitacle ») qui regroupe l'habitacle et les systèmes de chauffage et de climatisation du véhicule. De l'organisation du modèle, une commande est déduite. Le modèle est enfin validé à l'aide de différentes expérimentations. La 3^{ème} partie de ce chapitre concerne l'utilisation de ces différents modèles pour évaluer l'influence des conditions climatiques sur la consommation d'un véhicule électrique.

Sommaire du chapitre :

II.1. Traction du véhicule électrique.....	34
II.1.1. Sous-système étudié.....	34
II.1.2. Modélisation et commande	35
II.1.3. Validation du sous-système de traction.....	38
II.2. Le confort habitacle	42
II.2.1. Sous-système étudié.....	42
II.2.2. Modélisation et commande	46
II.2.3. Validation du sous-système de confort.....	61

II.3. Etude des conditions climatiques sur la consommation	65
II.3.1. Effet du chauffage	65
II.3.2. Effet de la climatisation	66
II.3.3. Étude de la consommation annuelle avec prise en compte du confort	68
II.4. Conclusion.....	74

II.1. Traction du véhicule électrique

II.1.1. Sous-système étudié

Dans cette thèse, la Renault Zoé est prise comme exemple pour la validation du modèle du véhicule (Figure II.1). Ce choix se justifie par le nombre important de Zoé en circulation en France (en 2018, 17 000 Zoé vendues pour 55 % de part de marché) [AVERE 19]. La pertinence de ce choix est confortée par le Projet européen PANDA (voir I.4.1) [PANDA 19] [Bouscayrol 20]. Dans le cadre de ce projet, un partenariat a été noué avec Renault Technologie Roumanie et la Renault Zoé est un des véhicules de référence.



Figure II.1 : Renault Zoé [Renault 19]

La traction du véhicule est composée de différents systèmes électriques et mécaniques. Une batterie de 22 kWh est reliée à une machine synchrone à rotor bobiné de 65 kW commandé par un onduleur. L'arbre de la machine est relié à un réducteur puis au différentiel relié aux roues motrices du véhicule (Figure II.2).

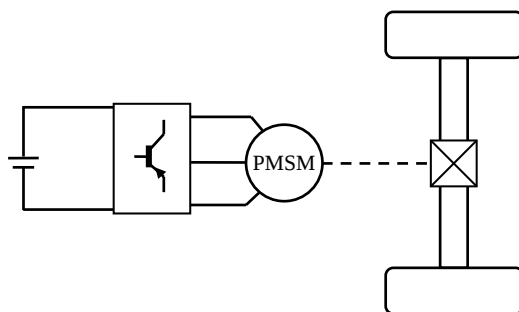


Figure II.2 : schéma structurel du véhicule électrique

Différents outils de simulation de véhicules électriques existent dans la littérature pour l'étude des variations de la consommation d'énergie. Des représentations structurales ont été utilisées notamment par le laboratoire Argonne National Lab pour le logiciel Autonomie [ANL 18] ou Siemens pour le logiciel AMESIM [Husar 19]. Des outils de simulations avec approche « backward » (voir I.4.3. pour plus d'explication) ont aussi été développés [De Cauwer 15] [Gutenkust 15]. Le problème de l'approche « backward » (ou inverse) est que les limitations ne sont pas prises en compte par cette approche. Ainsi des erreurs sur la consommation peuvent apparaître (voir I.3.3). Dans cette thèse, une simulation de type « forward » (ou directe) d'un véhicule électrique est développée. La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) est utilisée pour organiser le modèle.

II.1.2. Modélisation et commande

La modélisation du véhicule va être réalisée de manière « directe », c'est-à-dire en partant de la source d'énergie, la batterie pour aller vers le châssis du véhicule.

Dans cette thèse, les effets des facteurs sur la batterie ne seront pas considérés. Notamment, les effets thermiques et de vieillissement ne seront pas pris en compte. En effet, la température a notamment un effet important sur la capacité de la batterie en dessous de 0 °C et au-dessus de 40 °C [Lindgren 16]. Dans cette thèse, la température ambiante considérée dans l'étude, celle de Lille, est comprise la majeure partie du temps entre les 0 °C et 40 °C, l'hypothèse considérant que l'impact de la température sur la batterie est faible est donc valable pour cette étude. Mais des travaux du L2EP s'intéresse à modéliser ces effets [German 20] pour mieux prendre en compte l'effet du vieillissement de la batterie sur sa consommation.

La batterie d'un véhicule électrique est composée de différents modules contenant le même nombre de cellules. Ces cellules seront considérées comme étant identiques. Le modèle de la batterie pourra donc se ramener au modèle d'une cellule en supposant que toutes les cellules se comportent d'une manière identique par rapport aux grandeurs étudiées (tension et courant). Dans cette thèse, le modèle de la batterie considérée est purement électrique. Ces modèles sont communément utilisés pour les applications véhicules [Jaguemont 16a]. Ce modèle est composé d'une source de tension qui représente la tension en circuit ouvert (OCV) de la batterie et d'une résistance (Figure II.3).

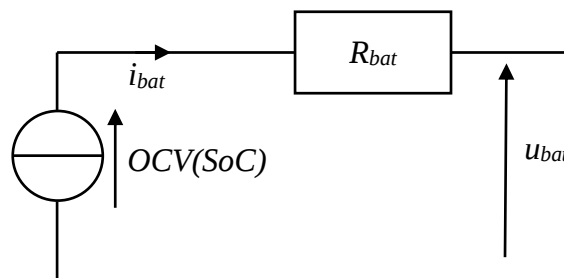


Figure II.3 : modèle de la batterie

La batterie de traction délivre la tension aux différents systèmes. Le courant de la batterie dépend des courants consommés par les auxiliaires et la machine électrique.

$$i_{bat} = i_{aux} + i_{ed} \quad (II.1)$$

Pour les auxiliaires, leur puissance globale est considérée. Ainsi la batterie auxiliaire basse tension et le convertisseur permettant de passer d'une tension de 400 V à 12 V ne sont pas considérés.

$$i_{aux} = \frac{P_{aux}}{u_{bat}} \quad (II.2)$$

La machine électrique et sa commande peuvent être modélisées de différentes manières. Dans [Desreveaux 19b], différents modèles de machine ont été comparés en termes de consommation d'énergie. Il a été montré que le modèle statique a une précision proche du modèle dynamique. Dans cette thèse, on utilisera un modèle statique avec un rendement constant de 87 %. Les grandeurs électriques et mécaniques peuvent alors être reliées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \Gamma_{ed} = \Gamma_{ed_ref} \\ i_{ed} = \frac{\Gamma_{ed} \Omega_{gb}}{u_{bat}} \eta_{ed}^{k_{ed}} \text{ avec } \begin{cases} k_{ed} = 1 \text{ si } P_{ed} \geq 0 \\ k_{ed} = -1 \text{ si } P_{ed} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (II.3)$$

La transmission mécanique permet de transmettre la puissance de la machine aux roues.

$$\begin{cases} \Gamma_{gb} = k_{gb} \Gamma_{ed} \eta_{gb}^{k_{tr}} \\ \Omega_{gb} = k_{gb} \Omega_{wh} \end{cases} \text{ with } \begin{cases} k_{tr} = 1 \text{ si } P_{gb} \geq 0 \\ k_{tr} = -1 \text{ si } P_{gb} < 0 \end{cases} \quad (II.4)$$

Les roues permettent de transformer la rotation en translation. Il est supposé que le véhicule roule en ligne droite et sans dérapage. Ainsi, le modèle des roues peut être simplifié, une roue équivalente peut être donc considérée :

$$\begin{cases} F_{wh} = \frac{\Gamma_{gb}}{R_{wh}} \\ \Omega_{wh} = \frac{V_{veh}}{R_{wh}} \end{cases} \quad (II.5)$$

La force issue des roues est additionnée à la force de freinage mécanique des roues.

$$F_{tot} = F_{wh} + F_{br} \quad (II.6)$$

La loi de Newton exprime la vitesse en fonction de la force totale produite par le véhicule et la force de résistance liée à l'environnement.

$$v_{veh} = \frac{1}{M_{veh}} \int (F_{tot} - F_{res}) dt \quad (II.7)$$

Différentes résistances à l'avancement du véhicule sont générées par l'environnement : la pente, la force aérodynamique et la force de résistance au roulement sont considérées.

$$F_{res} = F_{slope} + F_{aero} + F_{roul} \quad (II.8)$$

L'organisation du modèle du véhicule électrique à l'aide la REM est classique et a été réalisée de nombreuses fois [Letrouvé 12] [Depature 17] [Horrein 17]. Ainsi, l'organisation du

modèle sera résumée dans cette thèse. Des explications sur la REM sont néanmoins disponibles en Annexe B.

La batterie et les auxiliaires sont modélisés comme des sources (ovales verts). Un couplage électrique réalise le nœud de courant entre la batterie, les auxiliaires et la machine électrique (double carré orange). La machine électrique est représentée comme un élément de conversion multi-physique (rond orange). Le réducteur et les roues transmettent l'énergie mécanique et sont représentés par des éléments de conversion mono-physique (carré orange). L'inertie du véhicule est un bloc d'accumulation (rectangle orange barré) (Figure II.4).

La commande est réalisée en inversant les blocs un à un en partant du châssis jusqu'à la machine électrique. L'équation représentant l'inertie du véhicule (II.7) est inversée indirectement en utilisant un correcteur :

$$F_{tot} = C_{ch}(t) (v_{veh_{ref}} - v_{veh_{mes}}) + F_{res} \quad (II.9)$$

Le couplage entre les freins et les roues (II.6) est inversé par un élément de distribution (II.10). Le coefficient k_{br} distribue l'énergie de freinage entre les freins et la traction du véhicule et est défini par la stratégie.

$$\begin{cases} F_{wh_{ref}} = F_{tot_{ref}} k_{br} \\ F_{br_{ref}} = F_{tot_{ref}} (1 - k_{br}) \end{cases} \quad (II.10)$$

L'équation modélisant les roues (II.5) est directement inversée.

$$\Gamma_{gb_{ref}} = F_{wh_{ref}} R_{wh} \quad (II.11)$$

L'équation du réducteur (II.4) est aussi inversée directement :

$$\Gamma_{ed_{ref}} = \frac{\Gamma_{gb_{ref}}}{k_{gb_{ref}}} \quad (II.12)$$

Une stratégie de freinage est nécessaire pour répartir l'énergie entre les freins mécaniques et la récupération d'énergie permise par la machine électrique. Cette stratégie vérifie le signe de la force totale demandée par le véhicule. Si la force est négative, le véhicule freine. La stratégie répartit la force totale entre les freins mécaniques et le frein électrique. L'énergie de freinage de la partie traction permet de recharger la batterie.

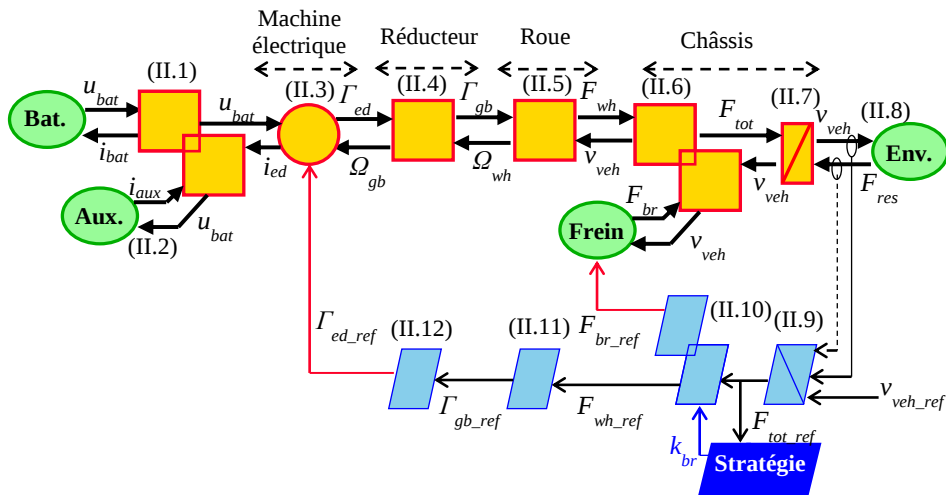


Figure II.4 : REM de la traction du véhicule électrique

II.1.3. Validation du sous-système de traction

Le véhicule a été modélisé et organisé avec la REM. Afin de s'assurer que le modèle et les paramètres du véhicule soient les bons, une validation est nécessaire. Le modèle sera comparé avec des mesures effectuées sur un véhicule réel.

Les mesures sur véhicule sont effectuées à l'aide d'un lecteur OBD-II (On Board Diagnostic) qui permet de lire le bus CAN (Convertisseur Analogique Numérique) du véhicule. Une application sur téléphone portable permet de récupérer les différentes données telles que le courant, la tension de la batterie de traction, l'état de charge et la vitesse du véhicule (Figure II.5).



Figure II.5 : système de mesure de la Renault Zoé : (a) lecteur OBD (b) application utilisée

L'outil de simulation est validé en utilisant deux trajets qui représentent différents points de fonctionnements de notre véhicule. Le premier est réalisé dans un contexte urbain et le second est un trajet périurbain (c'est-à-dire réalisé en périphérie de l'agglomération lilloise). Ils seront présentés plus précisément par la suite. Les trajets choisis correspondent à 2 des trajets définis

dans le 1^{er} chapitre. Les trajets ont été réalisés sans l'utilisation des organes de confort qui seront modélisés par la suite.

a) Trajet urbain.

Le trajet urbain choisi est un trajet aller-retour entre le campus Cité Scientifique et le centre-ville de Lille (Figure II.6a). Il a été mesuré avec la Renault Zoé (Figure 6 b). Le trajet est limité à 50 km/h avec des passages à 30 km/h (Figure II.7). Le nombre de feux de signalisation est d'environ 40. Le trajet a une longueur de 14 km pour une durée de 41 min.



Figure II.6 : Tracé du trajet urbain

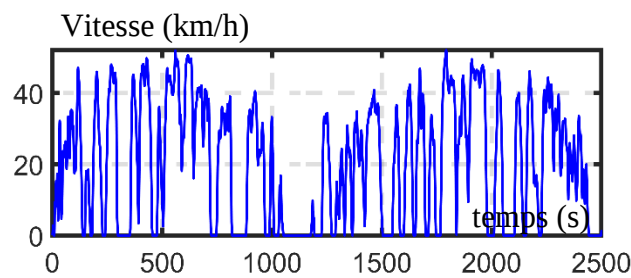


Figure II.7 : profil de vitesse du trajet urbain

Le cycle de vitesse est alors utilisé comme entrée du programme de simulation (Figure II.8).

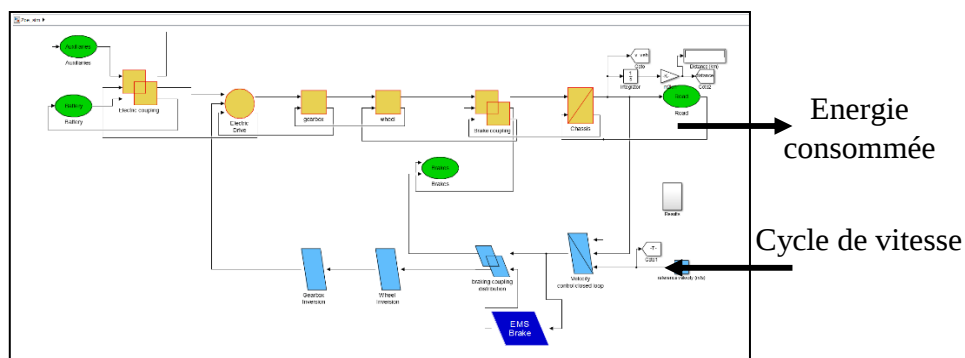


Figure II.8 : Programme de simulation du sous-système de traction sous Matlab-Simulink©

La validation est réalisée avec l'état de charge (SoC) de la batterie et non l'énergie consommée. Le système de mesure a un pas d'échantillonnage très important et irrégulier. Cela ne permet pas de mesurer correctement l'énergie consommée par le véhicule. L'état de charge est une image de l'énergie consommée par le véhicule, il nous permettra de valider le modèle de traction du véhicule. Cet état de charge peut être calculé de différentes manières

[Hannan 17]. Pour la simulation, la méthode utilisée est la loi de Coulomb. Pour la mesure, elle est inconnue.

Les SoC simulé et mesuré sont comparés dans la Figure II.9. L'état de charge initial du véhicule est de 94 % et descend à 85 %. La précision sur l'état de charge mesuré est de 0,5 %. L'état de charge simulé suit la mesure. L'erreur est calculée par l'équation (II.13). L'évolution de l'erreur en fonction du temps est donnée par la Figure II.10. Ainsi l'erreur reste inférieure à 1 % avec une erreur moyenne de 0,3 %.

$$err_{soc}(\%) = \left| \frac{SoC_{mes} - SoC_{sim}}{SoC_{mes}} \right| \times 100 \quad (II.13)$$

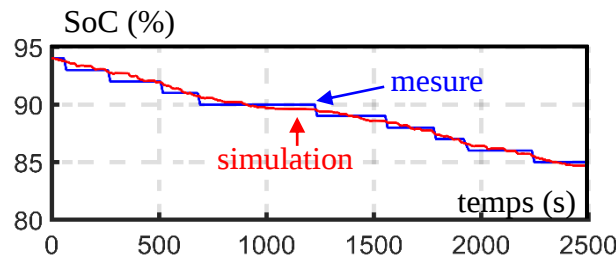


Figure II.9 : État de charge du véhicule mesuré et simulé

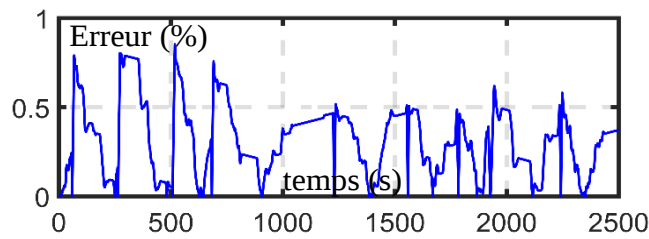


Figure II.10 : erreur sur l'état de charge

b) Trajet périurbain

Un second trajet est réalisé entre le campus et la commune de Baisieux avec un aller par l'autoroute (Figure II.11) et un retour par une route nationale. Ce trajet a pour intérêt d'avoir des vitesses différentes tout au long du parcours avant d'arriver à l'autoroute. Les vitesses varient ainsi de 30 km/h à 130 km/h (Figure II.12). Ce trajet a pour distance 21 km et se réalise en 27 min dans des conditions de circulations normales.

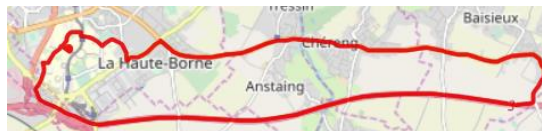


Figure II.11 : Tracé du trajet périurbain

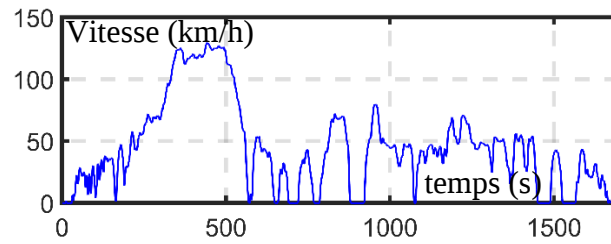


Figure II.12 : profil de vitesse du trajet périurbain

L'état de charge de la batterie simulée et mesurée est comparé (Figure II.13). L'état de charge initial de la batterie est de 51 % et l'état de charge final est de 36 %. Comme le montre la Figure II.14. L'erreur augmente à haute vitesse, car le rendement de la chaîne de traction diminue. L'erreur est cependant inférieure à 3 % avec une moyenne de 1 %.

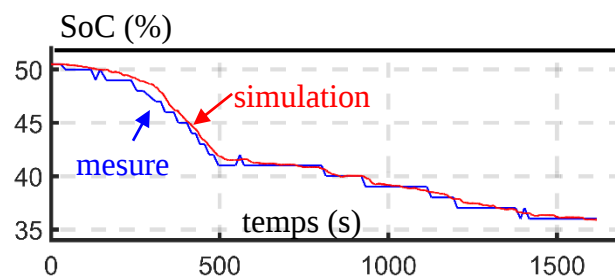


Figure II.13 : État de charge du véhicule mesuré et simulé

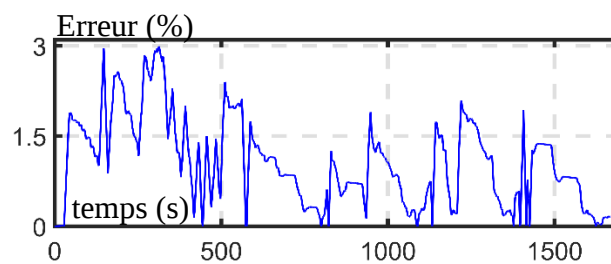


Figure II.14 : erreur sur l'état de charge

Dans les 2 exemples précédents, la différence des états de charges entre la mesure et la simulation est faible, moins de 3 % d'erreur, ce qui reste acceptable pour l'étude de la consommation d'énergie.

II.2. Le confort habitacle

Dans la partie précédente, la traction de la Renault Zoé a été modélisée et représentée à l'aide de la REM. Différentes simulations du véhicule sont réalisées à l'aide de Matlab-Simulink®. Une comparaison est réalisée à l'aide de mesures effectuées sur un véhicule réel afin de valider la traction du véhicule.

Dans les véhicules thermiques, le chauffage est assuré par la chaleur produite par le moteur thermique. À l'inverse, pour refroidir l'air dans l'habitacle, un système de climatisation est nécessaire. Cette climatisation est couplée à l'arbre du moteur thermique à l'aide d'un embrayage.

Pour les véhicules électrifiés, la chaleur produite par la motorisation n'est plus suffisante pour assurer le chauffage de l'habitacle, car le rendement du moteur électrique est nettement meilleur que celui du moteur thermique. Une des solutions pour le système de confort est d'utiliser un système de pompe à chaleur réversible qui pourra être utilisé pour chauffer ou refroidir l'habitacle.

Pour un véhicule électrique, le sous-système de confort est un des systèmes qui consomment le plus après la traction. En effet, il peut dans un certain cas réduire l'autonomie de 35 % [Horrein 2017].

Dans cette partie, le système de « confort habitacle » représentant l'habitacle et les éléments permettant de chauffer ou de climatiser ce dernier sont modélisés. Une validation est ensuite effectuée à l'aide de mesures prises sur le véhicule.

II.2.1. Sous-système étudié

Le confort habitacle de la Renault Zoé est réalisé par un système de pompe à chaleur réversible. Le chauffage du véhicule peut être assuré par la pompe à chaleur, des résistances ou les 2 ensembles. La climatisation est réalisée par la pompe à chaleur en mode climatisation (Figure II.15). La stratégie de commande du système de confort est complexe et n'est pas connue.

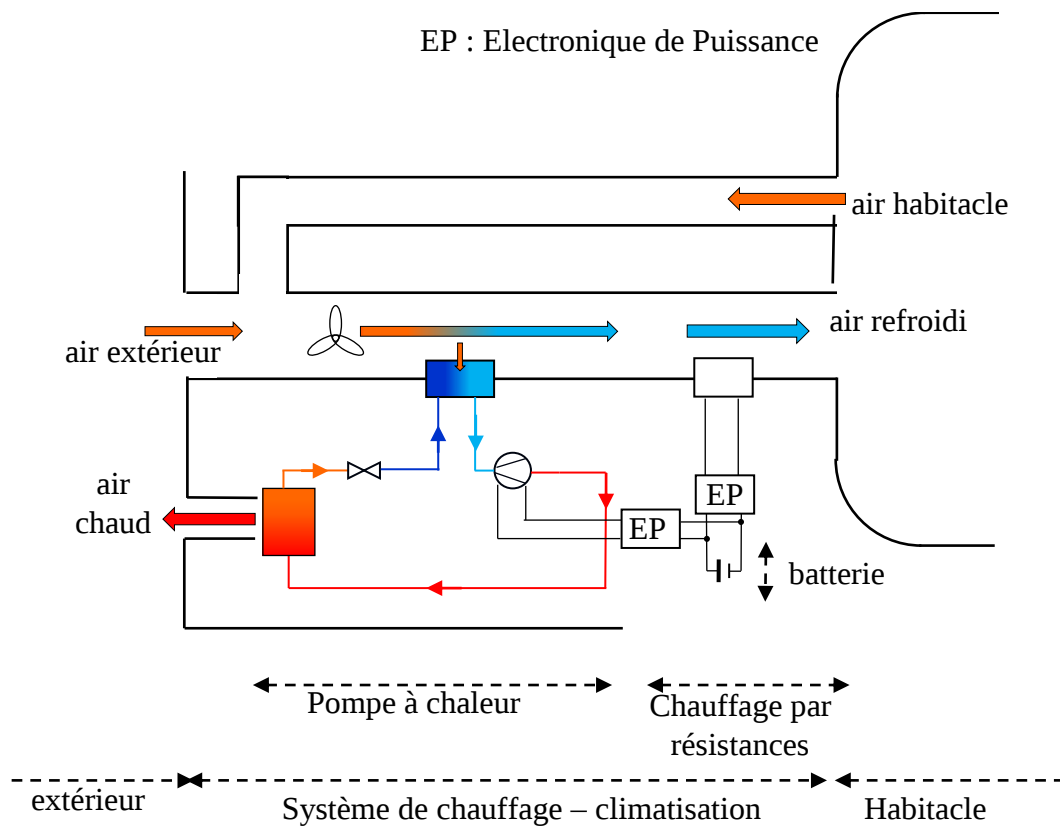


Figure II.15 : schéma du système de confort de la Renault Zoé en mode climatisation

Des sélecteurs permettent le réglage de la température et du débit d'air dans l'habitacle. Un des boutons sur le tableau de bord permet d'éteindre la climatisation. Ainsi, la ventilation peut être utilisée seule pour rafraîchir le véhicule avec l'air ambiant. En mode chauffage, les résistances peuvent être utilisées seules.

II.2.1.a. Pompe à chaleur réversible

Une pompe à chaleur permet de transférer la chaleur d'une source froide vers une source chaude⁴ à l'aide d'un réfrigérant. Les fonctions principales de la pompe à chaleur sont réalisées par quatre éléments : un compresseur, un détendeur et deux échangeurs de chaleur (un condenseur, et un évaporateur) (Figure II.16a). Les structures de l'évaporateur et du condenseur sont les mêmes, ce qui permet la réversibilité du système en inversant le sens de déplacement du réfrigérant. Ainsi le condenseur devient évaporateur et l'évaporateur devient condenseur quand la pompe à chaleur passe du mode chauffage en mode climatisation [Thuez 17].

⁴ La source ayant la température la plus élevée est appelée source chaude, l'autre est appelée source froide.

Un cycle thermodynamique simplifié de notre pompe à chaleur peut être représenté sur un diagramme de Mollier (Figure II.16b) qui représente les différents états du réfrigérant en fonction de l'enthalpie et de la pression. Quatre états du réfrigérant, représentés par des chiffres, peuvent ainsi être définis [Cengel 15] :

- De 1 à 2 : dans le compresseur, la compression augmente la pression et l'enthalpie du réfrigérant sous forme gazeuse.
- De 2 à 3 : lors de la condensation, le réfrigérant passe de l'état gazeux à l'état liquide. L'enthalpie du gaz diminue. La pression reste constante dans le condenseur.
- De 3 à 4 : la détente du réfrigérant diminue sa pression. L'enthalpie reste constante dans le détendeur.
- De 4 à 1 : lors de l'évaporation, le réfrigérant passe sous forme gazeuse. Son enthalpie augmente. La pression reste constante dans l'évaporateur.

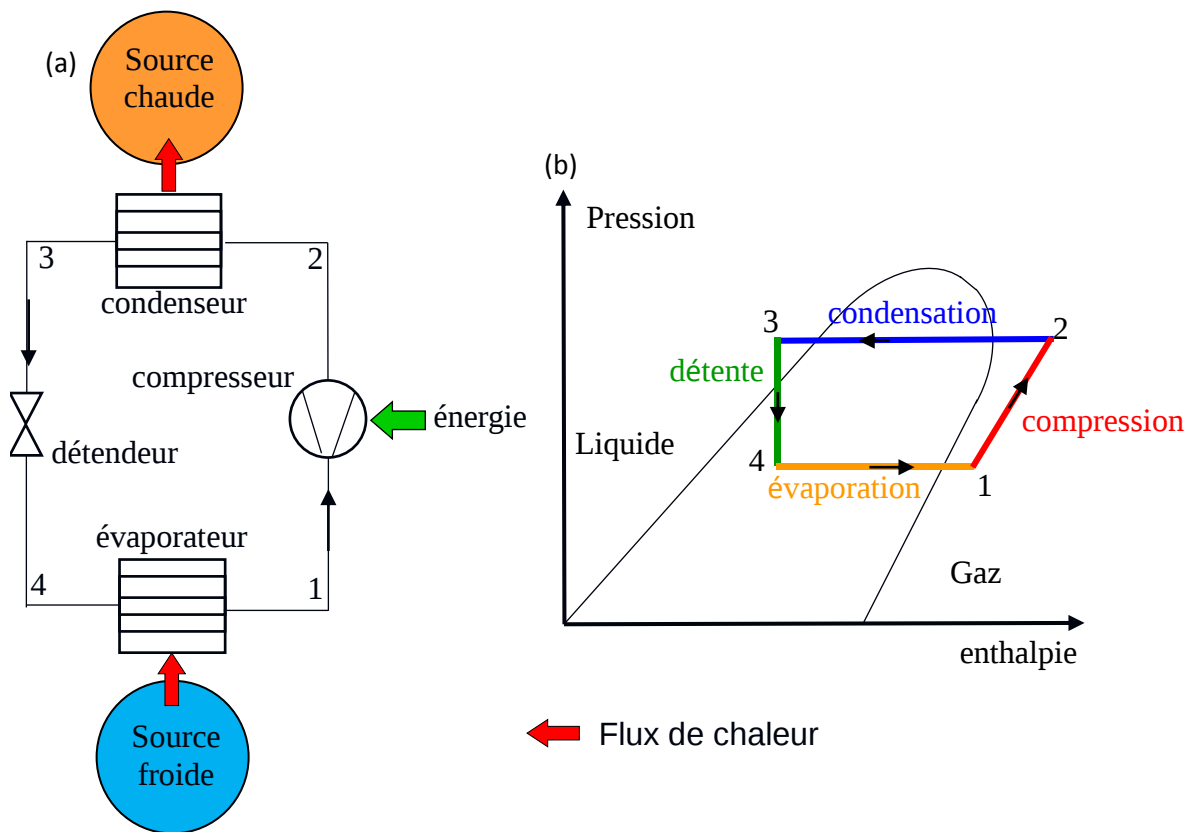


Figure II.16 : Fonctionnement de la pompe à chaleur
a) Schéma simplifié
b) Cycle thermodynamique

Le mode de fonctionnement du système dépend du sens de déplacement du réfrigérant. Celui-ci est assuré par des valves. Le compresseur est relié à une machine électrique. De plus, des résistances peuvent être ajoutées au système de confort pour améliorer l'efficacité thermique du mode chauffage à basse température.

Dans les systèmes de climatisation, l'énergie électrique est utilisée pour transporter l'énergie thermique. Il existe donc un indicateur de performance appelé Coefficient de Performance réelle (COP). Cet indicateur compare la chaleur obtenue Q_{sys} à l'énergie consommée en entrée du système W_{sys} . Pour une résistance, le COP vaut 1. Pour un système de climatisation, il est compris entre 1 et 6 et peut varier en fonction de différents paramètres, notamment la différence de température [Hosoz 06].

$$COP = \frac{Q_{sys}}{W_{sys}} \quad (II.14)$$

II.2.1.b. Modélisation de la pompe à chaleur

Dans la littérature, il existe peu de référence sur la modélisation et la commande des systèmes de pompe à chaleur pour une application véhicule en comparaison aux travaux réalisés sur la traction. Cela est dû à la confidentialité des travaux réalisés par les groupes industriels. Néanmoins, depuis quelques années et avec l'arrivée des véhicules électrifiés, le nombre d'articles sur les systèmes de confort est en augmentation. Ils existent différents articles dans la littérature qui traite de la modélisation pour la commande des systèmes de climatisation. Un grand nombre de ces papiers traitent de l'optimisation de la commande de ces systèmes. À nouveau, les modèles de pompe à chaleur peuvent être statiques, quasi-statique ou dynamique selon le nombre de variables d'état considérées.

Les travaux les plus importants sur les systèmes de climatisation sont ceux de l'équipe du Pr. Alleyne de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign. Ils ont développé des modèles dynamiques des échangeurs de chaleur à l'aide des frontières mobiles⁵. Les modèles de ces échangeurs de chaleur contiennent une dizaine de variables d'état pour chaque échangeur de chaleur (plus de 20 variables d'états dans le système) [McKinley 08] [Rasmussen 05]. Ils ont également développé des commandes associées à ces échangeurs de chaleur.

Il est possible d'utiliser des modèles statiques qui représentent plus ou moins les organes du système de climatisation. Dans [Ruz 17], un modèle de climatisation est développé en prenant en compte les différents organes de la climatisation. Il est nécessaire dans ce cas d'avoir des données expérimentales du système de climatisation. D'autres modèles utilisent le COP sous forme d'abaque [Suh 15] ou prennent en compte le rendement de la climatisation [Vatanparvar 19].

Des modèles structurels sont aussi beaucoup utilisés, notamment avec les logiciels Dymola de Dassault System [Bellocchi 18] ou AMESIM de Siemens [Gillet 16].

Des modèles quasi-statiques ont été également développés. Les méthodes les plus utilisées sont les modèles à paramètres localisés [Zhang 16]. Dans la thèse de D. Esqueda Merino [Esqueda Merino 13], un modèle structurel quasi-statique d'un système de climatisation réversible et sa commande associée sont développés à l'aide de mesure prise sur une climatisation. Dans cette thèse, un modèle à paramètre localisé sera organisé à l'aide la REM.

⁵ Méthode de modélisation considérant que le réfrigérant peut être réparti en fonctions de 3 milieux (gaz, liquide et mélange liquide-gaz). Ces 3 zones ont des limites (frontières) variables.

II.2.2. Modélisation et commande

La modélisation et la commande sont divisées en deux parties. Dans la première partie, la modélisation de l'habitacle et des résistances de chauffage est développée. Dans la seconde partie, le système de climatisation est modélisé.

II.2.2.a. Notions de thermique

Cette partie sert à expliquer les choix de modélisations effectuées et des variables utilisées dans ces travaux. En effet, la REM impose l'utilisation d'un variable d'action et une de réaction, ce qui n'est pas forcément usuel pour les systèmes thermiques. Généralement, la puissance ou l'énergie sont directement utilisées pour expliquer les échanges de chaleur.

Dans la littérature, il existe différentes manières d'exprimer le débit massique ($\frac{dm}{dt}$, $\dot{m}$, q), le débit volumique ($\frac{dV}{dt}$, $\dot{V}$, q) et le flux d'entropie ($\frac{dS}{dt}$, $\dot{S}$, ΔS). Pour éviter les confusions, la convention suivante est utilisée dans cette thèse : $qm [\frac{kg}{s}]$ pour le débit massique, $qv [\frac{m^3}{s}]$ pour le débit volumique et $qs [\frac{J}{K.s}]$ pour le flux entropique.

Ainsi la puissance dans un système quelconque P_{xx} peut être donnée dans les différents domaines [Boulon 09] :

- $P_{xx} = qs_{xx}T_{xx}$ dans le domaine thermique
- $P_{xx} = qm_{xx}h_{xx}$ dans le domaine fluidique avec un débit massique
- $P_{xx} = qv_{xx}p_{xx}$ dans le domaine fluidique avec un débit volumique

II.2.2.b. Modélisation de l'habitacle du véhicule

La modélisation de l'habitacle et l'organisation du modèle à l'aide de la REM ont déjà été réalisées pour un véhicule hybride [Horrein 15] et pour un petit véhicule électrique [Horrein 17]. Dans cette thèse, le modèle est adapté et sera validé pour l'utilisation de la Renault Zoé.

Dans [Horrein 17], la recirculation d'air a été considérée. Dans cette thèse, l'air est considéré ne venant que de l'extérieur, ainsi cette partie n'est pas modélisée.

Dans [Desreveaux 17], il a été montré que le modèle de l'habitacle peut être simplifié à condition que l'ordre de grandeur des constantes de temps de l'habitacle et des parois soit les mêmes. Pour le véhicule étudié, l'isolation des parois de l'habitacle entraîne, une différence de constante de temps entre les parois et l'habitacle. Ainsi ces simplifications ne peuvent pas être utilisées.

Dans cette thèse, les flux de puissances sont modélisés de l'extérieur du véhicule vers l'intérieur. Des échanges thermiques (par convection) ont lieu entre l'air extérieur et les parois du véhicule. La puissance échangée P_{par_amb} dépend de la température des parois T_{par} et de la température ambiante T_{amb} (II.15). Le coefficient de convection K_{air_par} dépend de différents paramètres et est développée en annexe D.

$$P_{par_amb} = K_{air_par}(T_{par} - T_{amb}) \quad (II.15)$$

Deux flux entropiques peuvent être définis à partir de l'équation (II.15). L'effet de la convection sur les parois est représenté par qS_{par_amb} . L'effet de la convection sur la température extérieure est qS_{hab_par} :

$$\begin{cases} qS_{par_amb} = K_{air_par} \frac{(T_{par} - T_{amb})}{T_{amb}} \\ qS_{amb_par} = K_{air_par} \frac{(T_{par} - T_{amb})}{T_{par}} \end{cases} \quad (II.16)$$

Les radiations provenant du soleil émettent une puissance qui réchauffe l'habitacle et les parois du véhicule. Le flux entropique qS_{sol} peut être défini à partir de la puissance émise par le soleil P_{sol} . Dans ce modèle, les effets des radiations sont pris en compte uniquement au niveau des parois.

$$qS_{sol} = \frac{P_{sol}}{T_{par}} \quad (II.17)$$

Le flux entropique qS_{par_ext} représente le couplage entre les flux d'entropies qS_{sol} et qS_{air_par} :

$$qS_{par_ext} = qS_{air_par} - qS_{sol} \quad (II.18)$$

La variation d'énergie dans les parois dépend de la variation de la température T_{par} , de la masse des parois M_{par} et la capacité calorifique des parois cp_{par} :

$$P_{par_tot} = \frac{dE_{par_tot}}{dt} = M_{par}cp_{par} \frac{dT_{par}}{dt} \quad (II.19)$$

La puissance P_{par_tot} dépend des échanges thermiques avec l'extérieur du véhicule et avec l'habitacle :

$$P_{par_tot} = (qS_{hab_par} - qS_{par_ext}) T_{par} \quad (II.20)$$

À l'aide des équations (II.19) et (II.20), il est possible de donner l'équation régissant la température T_{par} de manière causale. Cette équation fait apparaître une exponentielle.

$$T_{par} = T_{par_init} \exp\left(\frac{1}{M_{par}cp_{par}} \int (qS_{hab_par} - qS_{par_ext}) dt\right) \quad (II.21)$$

La température T_{hab} est la température de l'air dans l'habitacle. Les parois et l'air de l'habitacle s'échangent de la chaleur par convection, ce qui crée des variations de température dans l'habitacle. Cette convection peut être naturelle ou forcée. Le coefficient de convection K_{hab_par} dépend de différents paramètres et est développé dans l'annexe D. Les flux d'entropies qS_{par_hab} et qS_{hab_par} peuvent être définis par :

$$\begin{cases} qS_{par_hab} = K_{hab_par} \frac{(T_{hab} - T_{par})}{T_{hab}} \\ qS_{hab_par} = K_{hab_par} \frac{(T_{hab} - T_{par})}{T_{par}} \end{cases} \quad (II.22)$$

L'inertie thermique de l'habitable permet d'exprimer la température T_{hab} en fonction des échanges de chaleur internes à la cabine et avec les parois de l'habitable.

$$T_{hab} = T_{hab_init} \exp\left(\frac{1}{M_{hab}cp_{hab}} \int (qs_{hab} - qs_{par_hab})dt\right) \quad (II.23)$$

Le flux d'entropie qs_{hab} dépend du flux de chaleur émise par les passagers qs_{pas} et par le flux émis par les systèmes de régulations de la température qs_{HVAC} ⁶.

$$qs_{hab} = qs_{HVAC} + qs_{pas} \quad (II.24)$$

Chaque passager émet en moyenne une puissance calorifique P_{pas} correspondant à 100 W [ASHRAE 17]. Cette puissance est transformée en flux entropique qs_{pas} :

$$qs_{pas} = \frac{P_{pas}}{T_{hab}} \quad (II.25)$$

Le flux d'entropie qs_{hvac} peut se décomposer en 3 parties, le flux d'air propulsé par un ventilateur qs_a auquel on ajoute le flux d'entropie lié aux résistances qs_{res} et à la pompe à chaleur qs_{clim} .

$$qs_{HVAC} = qs_a + qs_{res} + qs_{clim} \quad (II.26)$$

Le flux de chaleur liée au mouvement de l'air extérieur produit par le ventilateur dépend du débit d'air qm_{vent} , la capacité cp_{air} et les températures T_{hab} et T_{amb} . Les flux d'entropies correspondants sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} qs_{air} = qm_{vent}cp_{air} \frac{(T_{hab} - T_{amb})}{T_{amb}} \\ qs_a = qm_{vent}cp_{air} \frac{(T_{hab} - T_{amb})}{T_{hab}} \end{cases} \quad (II.27)$$

Les résistances de chauffage transforment l'énergie électrique en énergie thermique. La puissance transmise est définie par la stratégie de commande et transformée en flux entropique qs_{res_ref} .

$$\begin{cases} qs_{res} = \frac{P_{res_ref}}{T_{hab}} \\ i_{res} = \frac{P_{res_ref}}{u_{bat}} \end{cases} \quad (II.28)$$

La REM est déduite des équations données ci-dessus (Figure II.17). Les parois échangent des flux de chaleurs avec l'air extérieur. Cet échange est représenté par une conversion mono-physique (carré orange). Les radiations solaires sur l'habitable sont représentées par une source. Un couplage est nécessaire pour additionner les flux thermiques venant de l'extérieur et des radiations. Les parois ont une inertie thermique qui est représentée par un bloc d'accumulation.

⁶ HVAC : Heating, Ventilation and Air Conditionning, nom anglais du système de pompe à chaleur

Un élément de conversion permet de représenter les échanges de chaleur par convection entre les parois et l'habitacle. La température de l'habitacle est représentée par un bloc d'accumulation. La chaleur émise par les passagers est représentée par une source et est reliée à l'habitacle par un nœud thermique avec le sous-système de confort. Le sous-système de confort se décompose en 3 parties : la ventilation, la pompe à chaleur et les résistances. Les résistances sont représentées par un bloc de conversion multi-physique permettant le transfert d'énergie électrique en chaleur. La ventilation est représentée par un bloc de conversion mono-physique.

La température de l'habitacle doit être régulée. La commande interne du véhicule n'est pas connue. En conséquence, il a été décidé de réaliser une boucle de contrôle de température qui peut être commandé à l'aide de deux flux différents : le flux de chaleur provenant de la pompe à chaleur et le flux de chaleur provenant des résistances.

À l'aide du principe d'inversion, il est possible de réaliser la commande de la température en inversant les blocs entre l'habitacle et le système de confort. L'inversion indirecte de l'équation (II.23) entraîne l'apparition d'un logarithme.

$$q_{shab_ref} = C_{hab}(t)(\ln(T_{hab_ref}) - \ln(T_{hab_mes})) + q_{shab_par_mes} \quad (II.29)$$

Le flux de chaleur produit par le sous-système de confort est calculé en retranchant le flux émis par les passagers :

$$q_{SHVAC_ref} = q_{shab_ref} - q_{spas_mes} \quad (II.30)$$

Le flux de chaleur du système de confort est distribué en 2 parties représentées par q_{sclim_ref} et q_{sres_ref} , une variable de réglages est donnée par la stratégie. Le coefficient k_{hvac} permet de découpler les résistances et la pompe à chaleur.

$$\begin{cases} q_{sclim_ref} = (q_{SHVAC_ref} - q_{s_{ames}})k_{hvac} \\ q_{sres_ref} = (q_{SHVAC_ref} - q_{s_{ames}})(1 - k_{hvac}) \end{cases} \quad (II.31)$$

Une Structure Maximale de Commande (SMC) est ainsi obtenue à l'aide des équations (II.29) à (II.31). Cette structure considère que toutes les grandeurs sont mesurables. Ce qui n'est pas forcément le cas dans la réalité. En effet, les flux entropiques ne peuvent pas être mesurés directement. Mais ils peuvent être approximés à partir d'autres grandeurs mesurables.

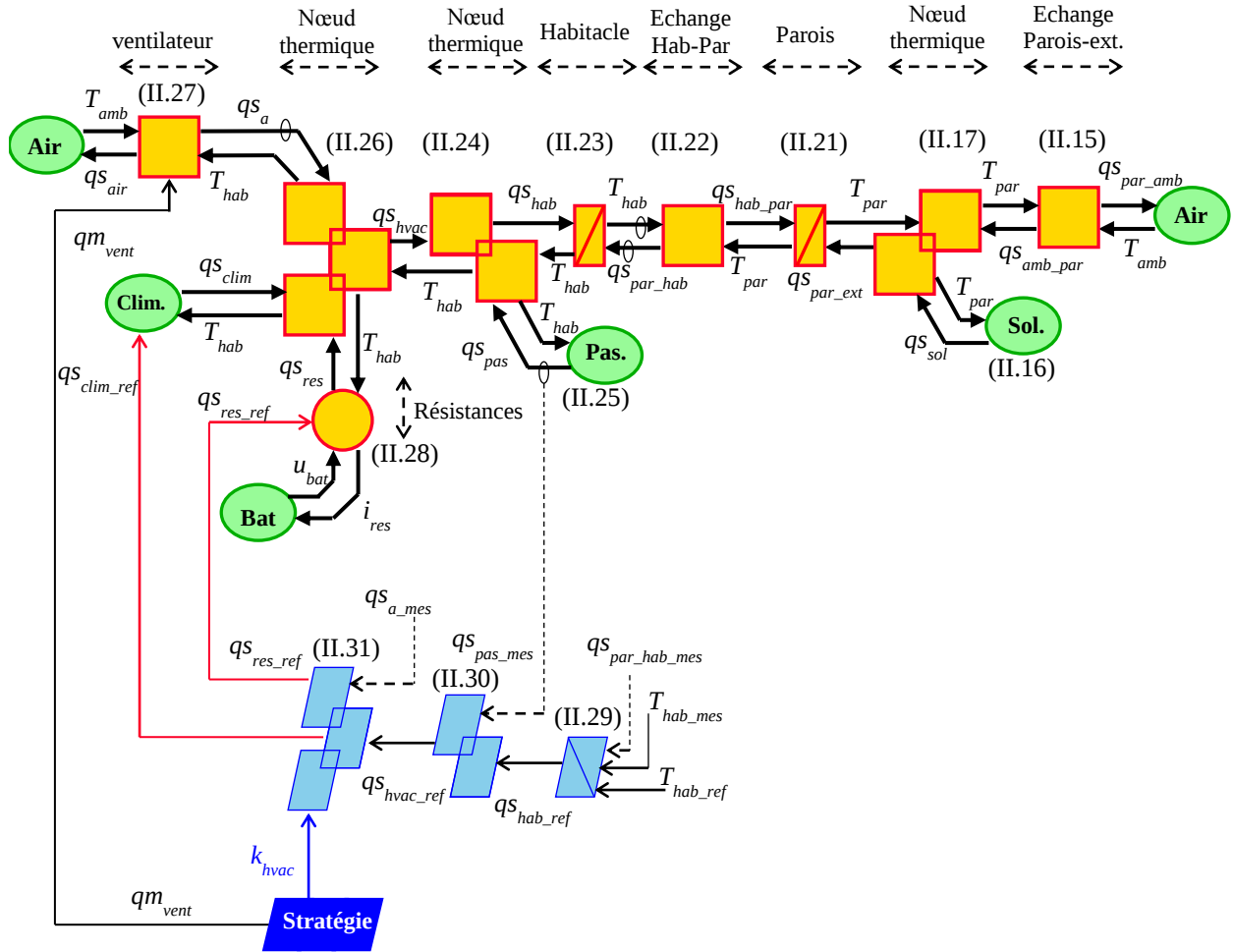


Figure II.17 : REM et SMC de l'habacle

II.2.2.c. Modélisation de la pompe à chaleur

Pour le cas de notre véhicule électrique, la pompe à chaleur a pour rôle de refroidir ou chauffer l'habacle du véhicule. En été, l'habacle a besoin d'être refroidi, donc il joue le rôle de la source froide (Figure II.16). L'air extérieur au véhicule est la source chaude. Ainsi, l'échangeur de chaleur côté habitacle est l'évaporateur. Inversement, en hiver, l'habacle doit être chauffé, il est donc la source chaude. L'air extérieur est la source froide. Dans cette configuration, l'échangeur de chaleur interne fonctionne comme condenseur.

Le modèle de la pompe à chaleur présentée dans cette thèse se base sur les travaux de [Zhang 16] et [Yan 18] qui ont développé un modèle simplifié d'une climatisation que l'on va organiser à l'aide de la REM. Dans [Zhang 16], le modèle de la climatisation est celle d'un véhicule thermique. Ce modèle utilise différentes hypothèses afin de simplifier la modélisation de la pompe à chaleur. Il a été validé par comparaison avec des mesures prises [Zhang 16].

Le taux d'humidité de l'air n'est pas considéré. En mode climatisation, quand l'air est refroidi par l'évaporateur en dessous du point de rosée⁷, elle ne peut plus alors contenir toute la vapeur d'eau qu'elle avait précédemment. Celle-ci se condense et a tendance à réduire l'efficacité de la climatisation. Dans cette thèse, il est considéré que le point de rosée n'est jamais atteint à la sortie de l'évaporateur.

Comme nous l'avons vu dans la partie II.2.1, la climatisation est composée de quatre éléments principaux : un compresseur, un évaporateur, un détendeur et un condenseur. L'évaporateur et le condenseur sont des échangeurs de chaleurs et fonctionnent de la même manière. La modélisation s'effectue en 3 parties, le compresseur en premier, un échangeur de chaleur ensuite et le détendeur.

La plupart des paramètres dépendent du fluide réfrigérant utilisé. Le réfrigérant utilisé dans la climatisation de la Renault Zoé est le R1234-yf contrairement aux anciens véhicules qui utilisait le R134a. Le nouveau réfrigérant répond à des normes écologiques plus contraignantes, mais les propriétés thermodynamiques restent proches. Les propriétés sont données dans des abaques pour les formes liquides et gazeuses en fonction de la pression du réfrigérant [DuPont 11].

Modélisation du compresseur

Le débit massique du réfrigérant dans le compresseur qm_{comp} peut être donné en fonction de la vitesse de rotation du compresseur Ω_{comp} , du volume de compression V_d , du rendement volumétrique η_v et la densité du réfrigérant ρ_{eva} à la sortie de l'évaporateur. Cette densité dépend directement de la pression de l'évaporateur p_{eva} . Ce débit massique est uniforme dans tout le système de climatisation.

$$qm_{comp} = \Omega_{comp} \frac{V_d}{2\pi} \eta_v \rho_{eva}(p_{eva}) \quad (II.32)$$

L'enthalpie du réfrigérant provenant de l'évaporateur h_{eva_out} peut être donnée en fonction de la température T_{eva} et de la pression p_{eva} par un abaque. Par hypothèse, la température à la sortie T_{eva} est considérée comme ayant constamment 10 °C de plus que la température de saturation à l'intérieur de l'évaporateur $T_{sat}(p_{eva})$ [Zhang 16].

L'enthalpie à l'entrée du condenseur h_{cond_in} peut être calculée en fonction de l'enthalpie en sortie de l'évaporateur h_{eva_out} , du rapport entre les pressions de l'évaporateur et du condenseur, du coefficient de chaleur spécifique ζ et du rendement isentropique η_s

$$\begin{cases} T_{eva} = T_{gaz}(p_{eva}) + 10 \text{ } ^\circ\text{C} \\ h_{eva_out} = f(p_{eva}, T_{eva}) \\ h_{cond_in} = h_{eva_out} \left(\frac{\left(\frac{p_{cond}}{p_{eva}} \right)^{\frac{\zeta-1}{\zeta}} - 1}{\eta_s} + 1 \right) \end{cases} \quad (II.33)$$

⁷ Température, en dessous de laquelle et à la pression donnée constante, la vapeur d'eau, contenue dans l'air, se condense.

Le réfrigérant est mis en mouvement par la rotation du compresseur. Ainsi le couple peut être calculé à l'aide des grandeurs thermodynamiques et de la vitesse Ω_{comp} .

$$\Gamma_{comp} = \frac{qm_{comp}(h_{cond_in} - h_{evap_out})}{\Omega_{comp}} \quad (II.34)$$

Les choix de modélisations réalisés dans cette thèse sont de prendre des pressions et des débits volumiques comme entrées-sorties de la partie thermique. Ainsi, les débits volumiques équivalents qv_{eva_out} et qv_{cond_in} sont définis en fonctions des enthalpies h_{eva_out} et h_{cond_in} :

$$\begin{cases} qv_{eva_out} = \frac{qm_{comp}h_{eva_out}}{p_{eva}} \\ qv_{cond_in} = \frac{qm_{comp}h_{cond_in}}{p_{cond}} \end{cases} \quad (II.35)$$

Ainsi le compresseur peut être modélisé avec les équations (II.32) (II.33) (II.34) et (II.35). Le modèle pour la conversion mécanique fluide est modélisé par un bloc de conversion multi-physique (Figure II.18).

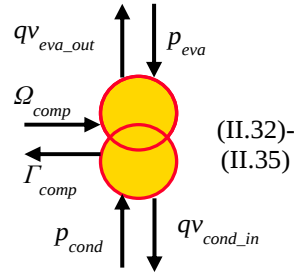


Figure II.18 : Conversion mécanique fluide du compresseur.

La machine électrique qui commande le compresseur est modélisée en statique. Elle est commandée en vitesse. Ainsi la vitesse de référence Ω_{comp_ref} est donnée par la commande du système. La machine est considérée ayant un rendement η_{comp} constant de 0,92.

$$\begin{cases} \Omega_{comp} = \Omega_{comp_ref} \\ i_{comp} = \frac{\Gamma_{em}\Omega_{comp}\eta_{comp}}{u_{bat}} \end{cases} \quad (II.36)$$

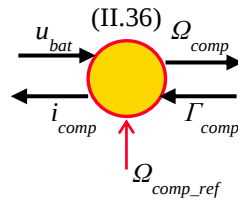


Figure II.19 : REM de la machine électrique du compresseur

Modélisation d'un échangeur de chaleur

Différentes hypothèses permettent de simplifier le modèle de l'échangeur de chaleur en un modèle quasi-statique [Zhang 16] :

- Chaque échangeur est considéré comme un simple tube de métal à l'intérieur duquel coule le réfrigérant. L'air passe autour du tube (Figure II.20).
- Le réfrigérant est considéré comme étant présent en deux phases dans le tube.
- La température du réfrigérant est considérée comme uniforme sur tout l'échangeur et égale à la température de saturation (qui ne dépend que de la pression).
- Le tube de métal, entre le réfrigérant et l'air, a une faible résistance thermique et une faible capacité thermique, ainsi il est considéré comme ayant la même température que le réfrigérant.

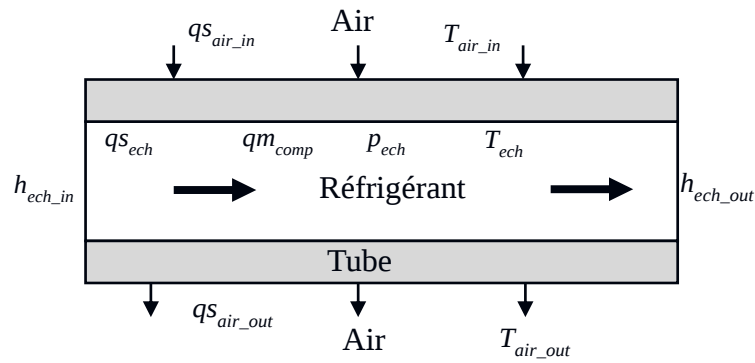


Figure II.20 : schéma de l'échangeur de chaleur considéré

Dans [Zhang 16], l'équation régissant la pression dans l'échangeur de chaleur p_{ech} est donnée par l'équation (II.37). La variation de la pression dépend des échanges de chaleur engendrés par la différence d'enthalpie entre l'entrée h_{ech_in} et la sortie h_{ech_out} et d'entropie qS_{ech} . L'obtention de cette expression et la définition du coefficient K_{ech} sont expliquées en annexe E.

$$V_{ech} K_{ech}(p_{ech}) \frac{dp_{ech}}{dt} = qS_{ech} T_{ech} + qm_{comp}(h_{ech_in} - h_{ech_out}) \quad (II.37)$$

Pour respecter les principes de la REM, les termes de droites sont remplacés à l'aide des égalités de puissance par des pressions et des débits volumiques. Ainsi les débits volumiques équivalents qv_{ech} , qv_{ech_in} et qv_{ech_out} sont définis respectivement par les équations (II.38) à (II.40).

$$qv_{ech} = \frac{qS_{ech} T_{ech}}{p_{ech}} \quad (II.38)$$

$$qv_{ech_in} = \frac{qm_{comp} h_{ech_in}}{p_{ech}} \quad (II.39)$$

$$qv_{ech_out} = \frac{qm_{comp} h_{ech_out}}{p_{ech}} \quad (II.40)$$

Ainsi une équation dépendant de la pression et de sa dérivée est obtenue. Comme pour les équations régissant l'inertie de la température dans l'habitable, la mise sous forme causale entraîne l'apparition d'une exponentielle :

$$p_{ech} = p_{ech_init} \exp\left(\frac{1}{V_{ech}} \int \left(\frac{1}{K_{ech}} (qv_{ech_in} - qv_{ech_tot}) dt\right)\right) \quad (II.41)$$

Le débit volumique qv_{ech_tot} définit le couplage entre les débits volumiques qv_{ech_out} et qv_{ech} :

$$qv_{ech_tot} = qv_{ech_out} - qv_{ech} \quad (II.42)$$

La conversion entre le domaine fluide et le domaine thermique se fait au niveau du tube en métal. La température dans l'échangeur T_{ech} dépend directement de la pression et est donnée par un abaque.

$$\begin{cases} T_{ech} = T(p_{ech}) \\ qv_{ech} = \frac{T_{ech} qS_{ech}}{p_{ech}} \end{cases} \quad (II.43)$$

L'équation (II.41) est représentée par un bloc d'accumulation. Les équations (II.42) et (II.43) induisent l'utilisation d'un bloc couplage multi-physique dans la REM (Figure II.21).

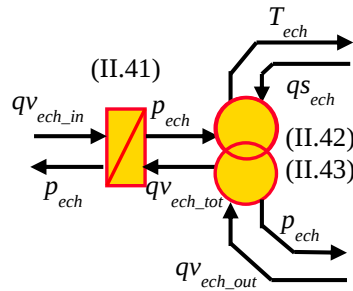


Figure II.21 : REM du changement d'état du réfrigérant dans un échangeur de chaleur.

L'échange de chaleur entre les parois de l'échangeur et l'air est réalisé par convection :

$$\begin{cases} qs_{ech_out} = K_{air_ech} \frac{(T_{ech} - T_{ech_out})}{T_{ech_out}} \\ qs_{ech} = K_{air_ech} \frac{(T_{ech} - T_{ech_out})}{T_{ech}} \end{cases} \quad (II.44)$$

L'équation (II.44) est organisée par un élément de conversion mono-physique (Figure II.22).

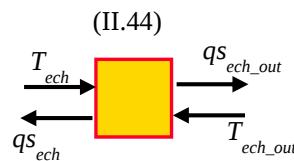


Figure II.22 : REM de la conversion de chaleur réfrigérant-air

La REM de l'échangeur de chaleur est le couplage des 4 blocs présentés précédemment :

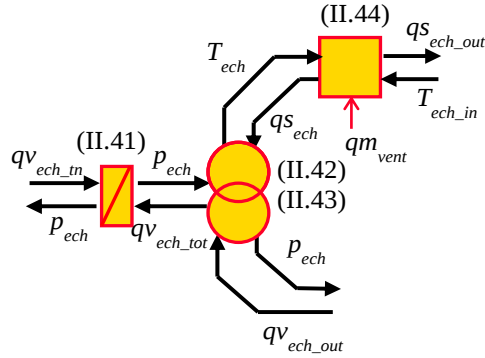


Figure II.23 : REM d'un échangeur de chaleur

Modélisation du détendeur

L'enthalpie à la sortie du détendeur, c'est-à-dire à l'entrée de l'évaporateur h_{eva_in} , est considérée égale à l'enthalpie à la sortie du condenseur h_{cond_out} . Cette enthalpie peut être approximée comme étant l'enthalpie du liquide en saturation $h_l(p_{cond})$ à la sortie du condenseur qui dépend de la pression.

$$h_{eva_in} = h_{cond_out} = h_l(p_{cond}) \quad (II.45)$$

Le système est considéré comme conservant le débit massique donné par le compresseur. Les débits volumiques équivalents peuvent donc être calculés en fonction des pressions en entrée et de l'équation (II.45).

$$\begin{cases} qv_{eva_in} = \frac{qm_{comp} h_{eva_in}}{p_{eva}} \\ qv_{cond_out} = \frac{qm_{comp} h_{cond_out}}{p_{cond}} \end{cases} \quad (II.46)$$

La REM du détendeur est obtenue comme étant un bloc de conversion mono-physique (Figure II.24).

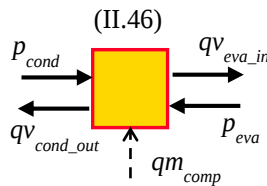


Figure II.24 : REM du détendeur

Prise en compte des différents modes dans la pompe à chaleur

La pompe à chaleur a deux modes de fonctionnement : chauffage et climatisation. Pour changer de modes, deux valves servent à modifier le sens de déplacement du réfrigérant. Dans le mode climatisation, l'échangeur de chaleur côté habitacle est l'évaporateur. À l'entrée de l'évaporateur, le réfrigérant est en deux phases (mélange liquide-gaz). Il est à une température inférieure à celle de l'habitable. Dans le mode chauffage, cet échangeur devient le condenseur, car en entrée (la même que précédemment), le réfrigérant arrive à l'état gazeux et à une température plus chaude que l'air entrant dans l'échangeur de chaleur.

Dans notre modélisation, les entrées-sorties du compresseur et du détendeur sont fixes. L'une doit être connectée au condenseur et l'autre à l'évaporateur. Les échangeurs de chaleur sont, eux, liés aux sources avec lesquelles ils échangent de l'énergie. Leurs dimensionnements sont différents et dépendent de la source à laquelle ils sont connectés. Un des échangeurs est connecté à l'habitable et l'autre à l'extérieur. Pour prendre en compte les deux principes énumérés ci-dessus, il faut prendre en compte la fonction d'aiguillage des valves dans notre modélisation.

Un sélecteur de mode est donc nécessaire pour connecter les échangeurs de chaleur au compresseur et au détendeur. Les deux aiguillages fonctionnent de la même manière. En mode climatisation (refroidissement), l'échangeur 1 connecté à l'habitable est l'évaporateur. En mode chauffage, il fonctionne comme condenseur. L'échangeur 2 est connecté à l'extérieur et a le fonctionnement inverse. Ainsi, avec un coefficient de distribution k_s ayant deux états : 0 ou 1, il est possible d'aiguiller les flux entre les différents éléments (II.47). Le bloc REM utilisé est un élément de commutation qui assure la fonction d'aiguillage des flux d'énergies (Figure II.25). Contrairement aux thèses précédentes du laboratoire, cet élément est ici utilisé comme carrefour giratoire au lieu du fonctionnement classique d'un aiguillage [Lhomme 07] [Mayet 16]. En effet, la fonction aiguillage permet ici de diriger les flux de puissance, un vers le premier échangeur et l'autre vers le second échangeur ou inversement. Les deux sorties de l'élément de commutation (partie droite de la Figure II.25) sont donc utilisées simultanément, contrairement aux utilisations précédentes de ce bloc.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} qv_{ech1} \\ qv_{ech2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 1 - k_s \\ 1 - k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} qv_{cond} \\ qv_{eva} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} p_{cond} \\ p_{eva} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 1 - k_s \\ 1 - k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ech1} \\ p_{ech2} \end{bmatrix} \end{cases} \text{ avec } k_s = \begin{cases} 0 & \text{pour le refroidissement} \\ 1 & \text{pour le chauffage} \end{cases} \quad (II.47)$$

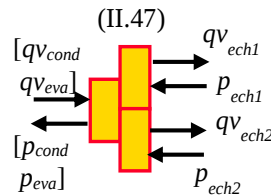


Figure II.25 : REM de la commutation des flux de chaleur dans la pompe

La REM globale de la pompe à chaleur peut être obtenue en connectant les différentes REM des parties décrites (Figure II.26).

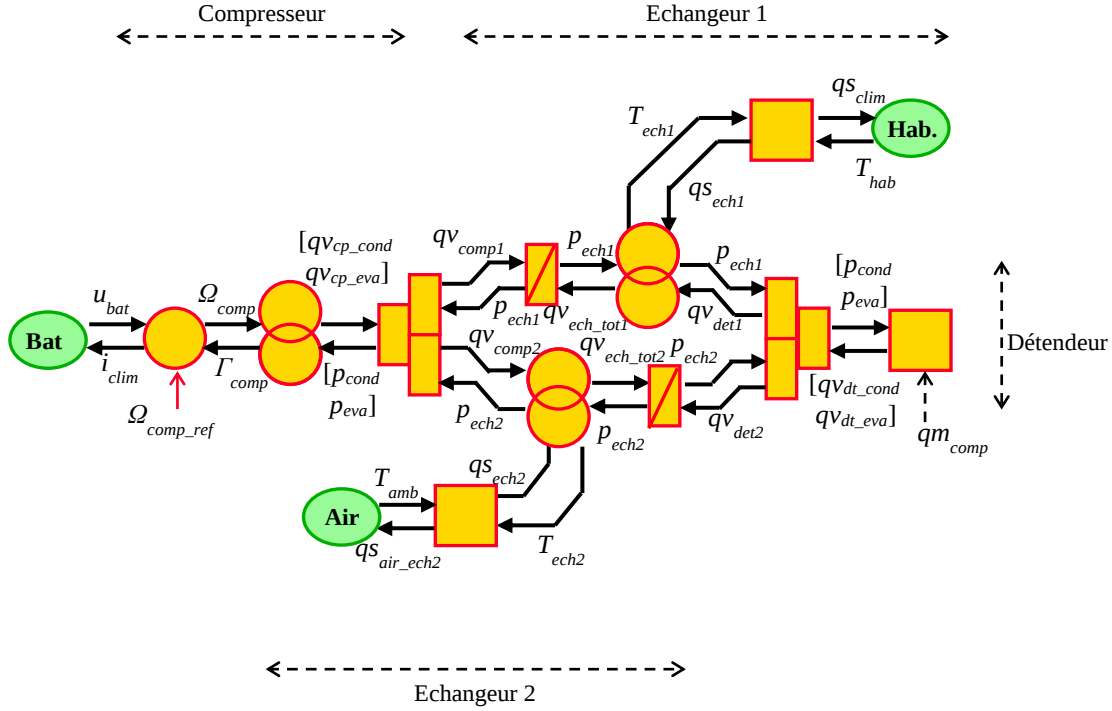


Figure II.26 : REM de la pompe à chaleur

II.2.2.d. Commande de la pompe à chaleur

Avant de réaliser la commande de la pompe à chaleur, il est utile de rappeler que celle-ci est connectée à l'habitacle du véhicule. Ainsi, la commande de la pompe à chaleur du véhicule ne peut se réaliser sans celle de l'habitacle (voir II.2.2b). La commande peut être déduite directement en inversant les blocs de la REM. Le chemin de commande peut être défini comme suit : la variable à commander est le flux d'entropie qs_{clim} qui permet d'agir sur la température habitacle (voir II.2.2.b.). La vitesse du compresseur Ω_{comp} est l'unique entrée commandable du système. Cela donne les chemins de réglage (Figure II.27) et de commande (Figure II.28) :

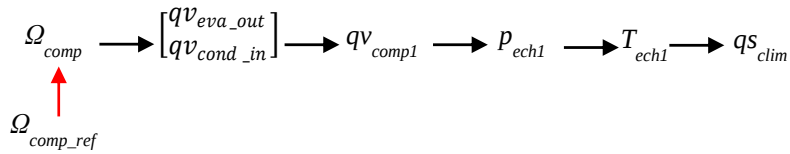


Figure II.27 : chemin de réglage de la climatisation



Figure II.28 : chemin de commande de la climatisation

En suivant le chemin de commande, il est possible de réaliser la SMC du système. La température dans l'échangeur 1 T_{ech1_ref} est donnée en fonction de la température mesurée dans l'habitacle T_{hab_mes} et le flux d'entropie de référence donnée par la commande de température provenant de l'habitacle qs_{clim_ref} .

$$T_{ech1_ref} = T_{hab_mes} + \frac{q_{S_{clim_ref}} T_{hab_mes}}{K_{air_ech}} \quad (II.48)$$

La pression dans l'échangeur p_{ech1_ref} est donnée par l'inversion de l'abaque donnant la température en fonction de la pression.

$$p_{ech1_ref} = p(T_{ech1_ref}) \quad (II.49)$$

L'inversion du bloc d'accumulation de la pression est réalisée indirectement en ajoutant un correcteur proportionnel intégral. L'inversion indirecte de l'équation (II.41) fait apparaître un logarithme népérien de la pression.

$$qv_{comp1_ref} = C_{ech1}(t)(\ln(p_{ech1_ref}) - \ln(p_{ech1_mes})) + qv_{ech_tot1_mes} \quad (II.50)$$

L'équation (II.47) régissant l'aiguillage est inversée :

$$\begin{bmatrix} qv_{cond_in_ref} \\ qv_{eva_out_ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 1 - k_s \\ 1 - k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} qv_{comp1_ref} \\ qv_{comp2_mes} \end{bmatrix} \quad (II.51)$$

avec $k_s = \begin{cases} 0 & \text{pour le refroidissement} \\ 1 & \text{pour le chauffage} \end{cases}$

Le débit massique du réfrigérant qm_{comp_ref} peut être calculé en fonction du flux massique dans l'échangeur 1, qui peut être celui dans l'évaporateur ou dans le condenseur. Ainsi la vitesse du compresseur Ω_{comp_ref} peut être donnée en fonction du débit massique.

$$\begin{cases} qm_{comp_ref} = (1 - k_s) \frac{qv_{eva_out_ref} p_{eva_out}}{h_{eva_out}} + k_s \frac{qv_{cond_in_ref} p_{cond_in}}{h_{cond_in}} \\ \Omega_{comp_ref} = qm_{comp_ref} \frac{2\pi}{V_d \rho_{eva}(p_{eva})} \end{cases} \quad (II.52)$$

La SMC est réalisée en inversant les blocs de la REM (Figure II.29). Les équations décrivant les différents blocs sont données par les équations (II.48) à (II.52). La SMC de l'habitable est connectée à la SMC de la pompe à chaleur au travers de la variable $q_{S_{clim_ref}}$ et représentée par le carré en pointillé.

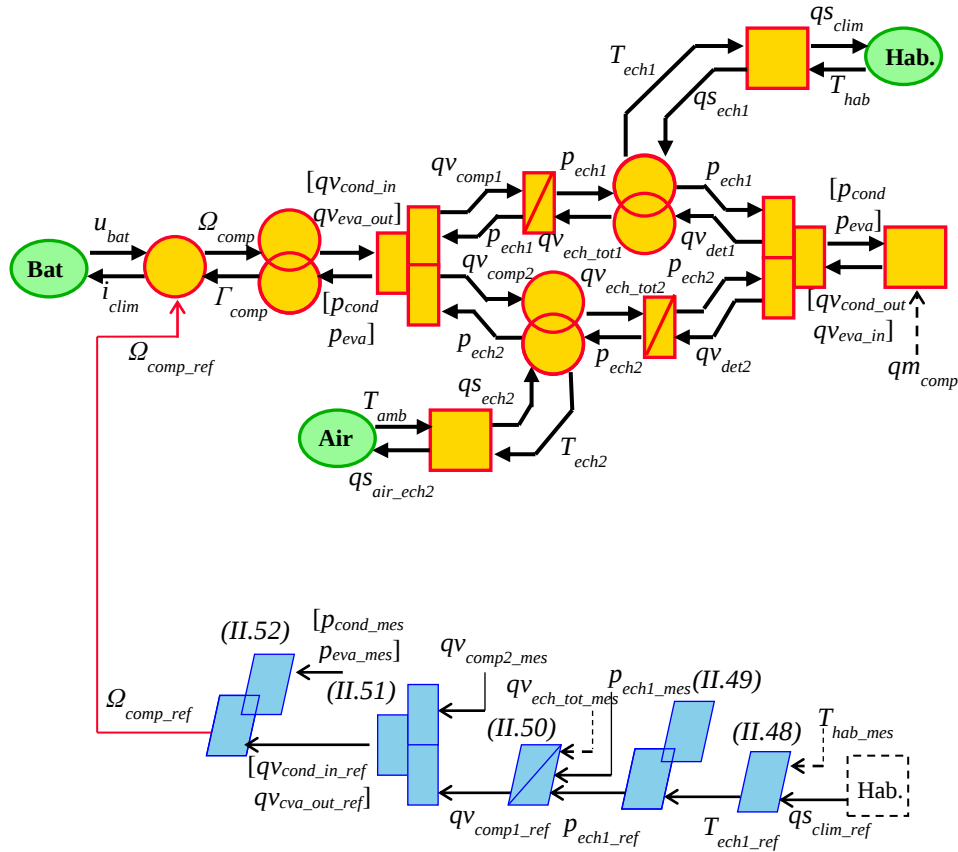


Figure II.29 : REM et SMC de la pompe à chaleur

II.2.2.d Outil de simulation d'un véhicule électrique

Dans cette thèse, par manque de temps et au vu de la difficulté de valider l'ensemble du système de pompe à chaleur, il a été décidé de le simplifier. En mode chauffage, les résistances seront utilisées pour chauffer l'habitable, la pompe à chaleur est désactivée. Il faut préciser que l'utilisation des résistances permet de donner une première estimation de la consommation en mode chauffage du véhicule. Les résistances consommant plus que la pompe à chaleur, la consommation d'énergie est surestimée. Ainsi les résultats présentés dans la suite doivent être pris comme des tendances. En refroidissement, la climatisation est utilisée. Ainsi, la REM de la pompe à chaleur peut être simplifiée. Les échangeurs de chaleurs sont ainsi définis comme étant l'évaporateur au-dessus et le condenseur en dessous. Par conséquent, les aiguillages sont ainsi supprimés. En connectant les différentes REM du chapitre, la REM globale du véhicule peut être réalisée (Figure II.30).

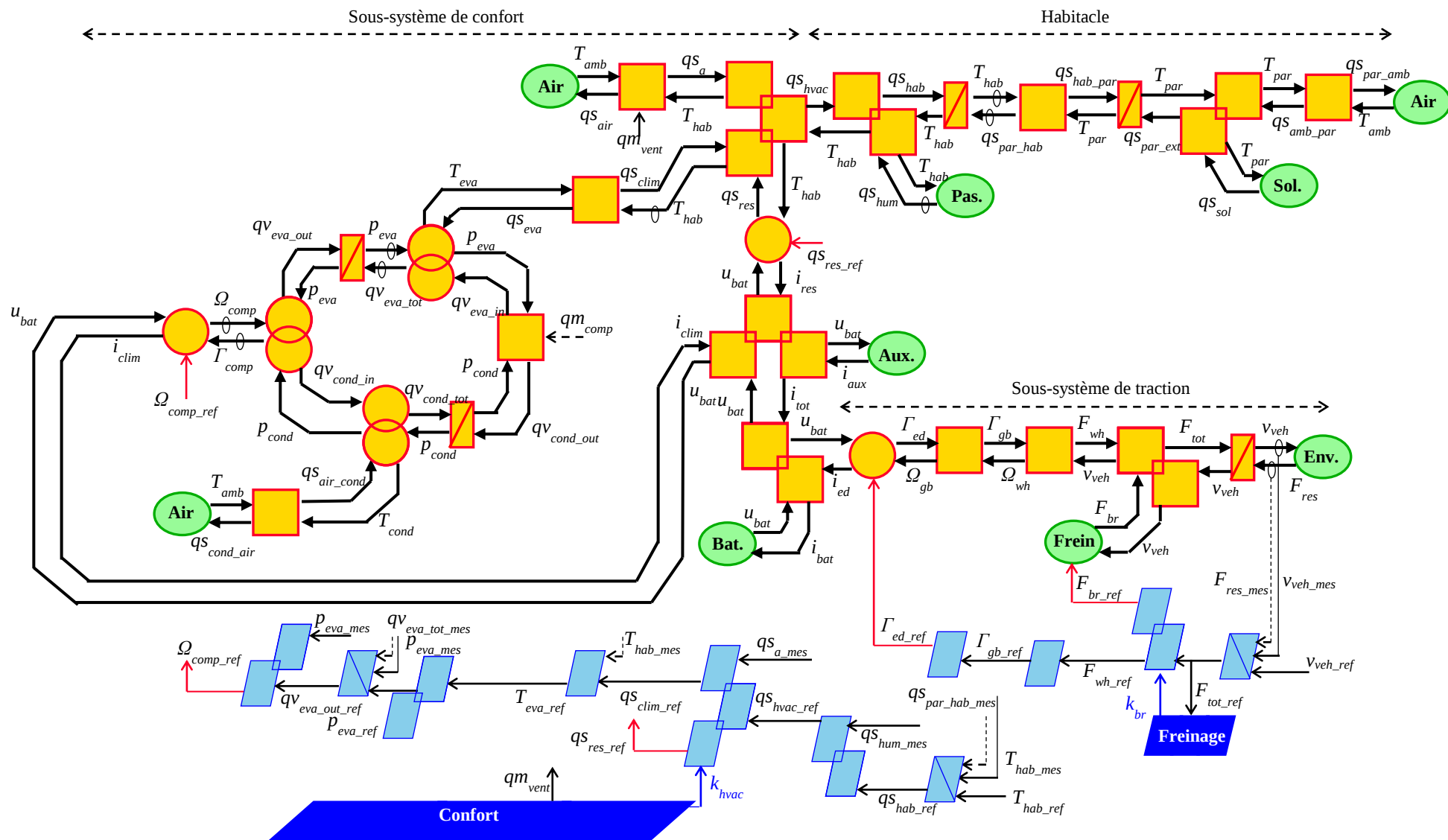


Figure II.30 : REM globale du véhicule électrique

II.2.3. Validation du sous-système de confort

La REM et la SMC du système de confort ont été définies dans la partie précédente. Dans cette partie, différentes validations vont être réalisées pour s'assurer de la bonne estimation de la consommation d'énergie du chauffage et de la climatisation.

II.2.3.a. Validation de l'habitacle

Avant de réaliser la validation de l'habitacle, les paramètres de l'habitacle ont été estimés à partir de mesures réalisés dans un test différent de ceux utilisés pour la validation et ne sont pas présentés dans cette partie. L'habitacle est validé grâce à deux tests qui ont été réalisés en avril 2019 et ont eu lieu à l'extérieur. Le véhicule est à l'arrêt. Les deux essais ont été réalisés à la suite. Le premier a permis de valider le modèle de l'habitacle et le second, l'effet du soleil sur l'habitacle.

Pour chaque test, un capteur est placé à l'avant pour mesurer la température au niveau du conducteur. Un second capteur mesure la température extérieure. Un chauffage extérieur est utilisé pendant l'expérience, la puissance de ce chauffage peut être mesurée à l'aide d'un wattmètre et est donc connue, ce qui n'est pas forcément le cas avec le chauffage du véhicule (Figure II.31).



Figure II.31 : expérience réalisée

Le 1^{er} test a une durée de 3 h. Dans la 1^{ère} moitié de ce test, le temps est couvert. La température ambiante est autour des 13 °C (Figure II.32). À partir de la moitié du test, le temps commence petit à petit à s'éclaircir. La température ambiante augmente. L'habitacle est totalement fermé et il n'y a personne dans le véhicule.

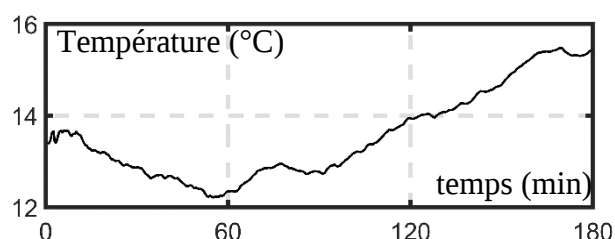


Figure II.32 : température extérieure durant l'expérimentation

Pour ce premier test, la plage arrière du véhicule a été abaissée pour placer un chauffage électrique. Ce chauffage est considéré comme donnant une puissance de 700 W quand il est

allumé. Le système est au départ au repos. Au bout de 7 minutes, le chauffage est allumé pendant une durée de 1 h 30. La température est montée de 21 °C pour atteindre 35 °C. Le chauffage est ensuite arrêté pour le reste de l'expérimentation, c'est-à-dire les 80 dernières minutes. La température dans l'habacle diminue alors jusqu'à atteindre 20 °C (Figure II.33).

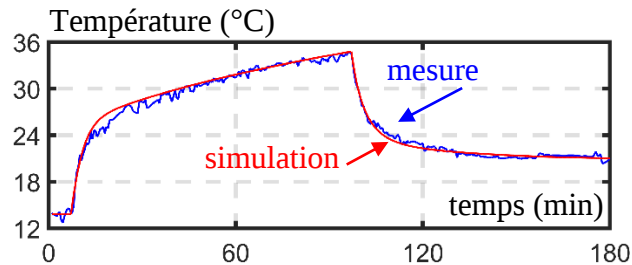


Figure II.33 : température dans l'habacle durant l'expérimentation

L'erreur de la simulation est calculée à partir de mesures réalisées en °C. L'erreur moyenne est de 1,6 % pour une erreur maximale de 10 % (Figure II.34). L'erreur est assez faible, ce qui valide notre modèle d'habacle.

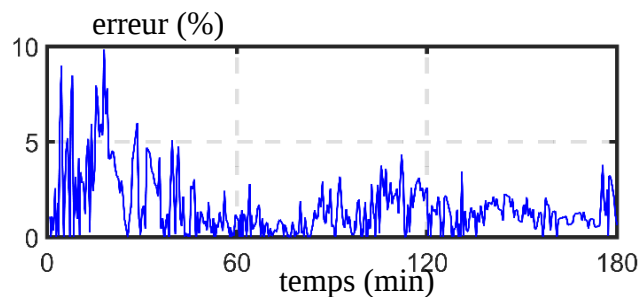


Figure II.34 : erreur sur la température

Le deuxième test dure 1 h et 20 min, les mêmes paramètres sont utilisés. La température ambiante part de 16 °C pour atteindre les 20 °C (Figure II.35). Le soleil est présent. La puissance des radiations du soleil est considérée à 700 W/m² pour une toiture du véhicule de 2 m², valeur donnée par les relevés météorologiques de la station la plus proche lors du jour de test [Infoclimat 19]. L'habacle est totalement fermé et aucune personne n'est à l'intérieur.

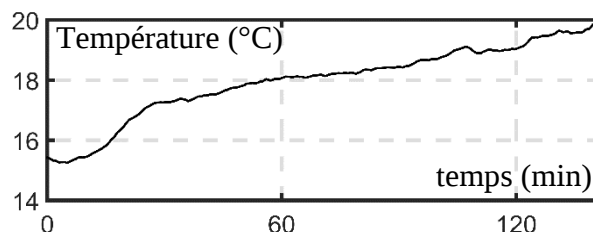


Figure II.35 : température extérieure durant l'expérimentation

La température initiale est de 20 °C puis elle augmente progressivement pour atteindre 35 °C. Comme le montre la Figure II.36, la température simulée par le modèle suit la

température mesurée. Il est à noter que l'ensoleillement varie, mais que les mesures fournies ne donnent pas toutes les variations. Ce qui a un impact sur l'augmentation de la température.

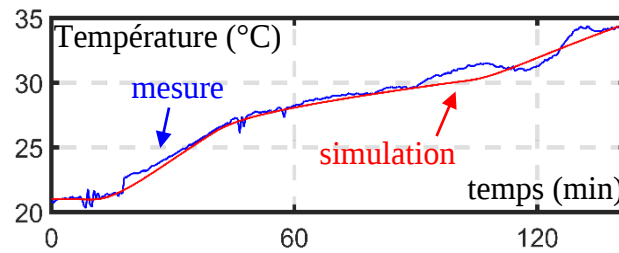


Figure II.36 : température dans l'habacle durant l'expérimentation

L'erreur est en moyenne de 1,3 % et ne dépasse pas les 5 % (Figure II.37). L'erreur est assez faible dans ce cas aussi, ce qui tend à valider le modèle de l'habacle avec prise en compte de l'ensoleillement.

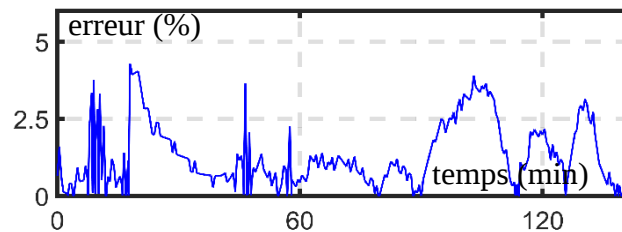


Figure II.37 : erreur sur la température

II.2.3.b. Validation du système de climatisation

Un test a été réalisé pour valider la climatisation en septembre 2019 sur le circuit urbain de 14 km, entre l'Université et le centre-ville de Lille. Le temps de trajet est de 40 min. Le profil de vitesse est donné par la Figure II.38.

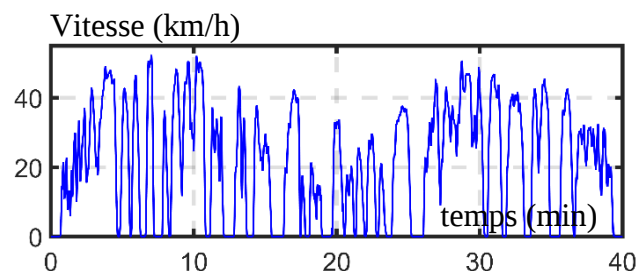


Figure II.38 : cycle de vitesse pour la validation de la climatisation

La température ambiante lors du test était de 24 °C. La climatisation a été allumée pendant tout le trajet, et a pour objectif de maintenir la température à 19 °C. Deux personnes sont dans le véhicule lors de la validation. Les radiations solaires produisent une puissance de 750 W/m². La température simulée est donnée par la Figure II.39.

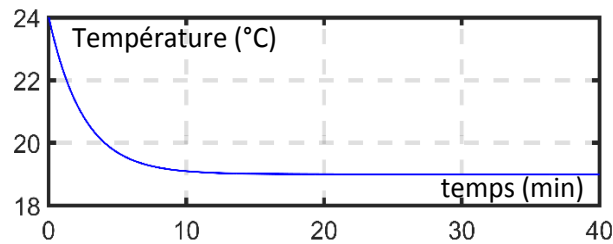


Figure II.39 : Température dans l'habitacle lors de la validation de la climatisation

L'état de charge a été mesuré sur le véhicule. L'état de charge initial est de 93 %, le SoC final est de 80 % (Figure II.40). L'erreur entre la mesure et la simulation est donnée par la Figure II.41. L'erreur moyenne est de 1,25 %. L'erreur sur l'état de charge final est de 2,3 %. L'erreur a tendance à augmenter. Cette erreur est due aux hypothèses effectuées sur la modélisation de la climatisation. Notamment, la non-prise en compte du radiateur après l'évaporateur a un impact sur la puissance consommée par la climatisation. Cette puissance est donc sous-estimée. Nous pouvons considérer que le modèle est valable pour un écart de température de 5 °C et une durée maximale de 40 min. Un modèle plus perfectionné serait à développer pour étendre la plage de validité.

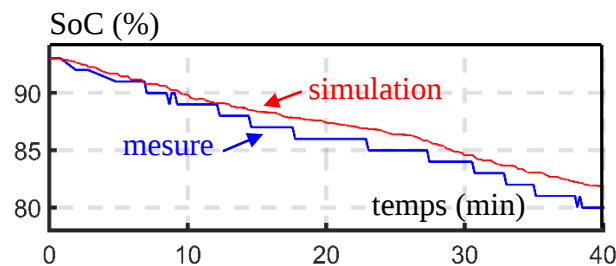


Figure II.40 : État de charge mesuré et simulé pour la validation de la climatisation

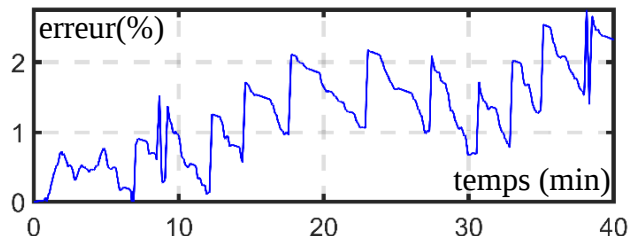


Figure II.41 : Erreur sur l'état de charge mesuré et simulé pour la validation de la climatisation

En conclusion, la partie traction du véhicule a été modélisée puis validée par comparaison avec des mesures réalisées sur véhicule. La partie confort du véhicule (habitacle et système pompe à chaleur) a été modélisée. L'habitacle de la Renault Zoé a été validé expérimentalement. La partie climatisation a également été validée dans une plage restreinte. La validation du mode chauffage n'a pas pu être réalisée dans cette thèse. La stratégie de chauffage n'est pas connue et les mesures prises sur le véhicule ne permettent pas de différencier la consommation due aux résistances et la consommation liée à la pompe à chaleur. Des études complémentaires devront être réalisées pour valider le mode chauffage. Ainsi, dans cette thèse, la partie chauffage utilisera uniquement des résistances. Ce mode chauffage a été validé pour la Tazzari Zero dans la thèse de L. Horrein [Horrein 15].

II.3. Étude des conditions climatiques sur la consommation

Dans les parties précédentes, les modèles de sous-systèmes de traction et de confort de notre véhicule ont été validés. Dans cette 3^e partie, ils sont utilisés pour quantifier l'effet des conditions climatiques sur la consommation des véhicules électriques.

Dans la première partie, l'effet du chauffage et de la climatisation sur la consommation d'énergie sont quantifiés. Dans la 2^e partie, l'effet des conditions climatiques est analysé.

II.3.1. Effet du chauffage

L'effet du chauffage sur la consommation d'un véhicule peut être quantifié. Pour cela, la consommation du véhicule sera comparée dans un cas sans chauffage à 2 cas avec utilisation du chauffage avec une consigne de température différente. Le trajet utilisé est le trajet urbain qui a servi à faire la validation de la partie traction (Figure II.42). La température ambiante de 5 °C est considérée comme constante durant tout le trajet. La température initiale dans l'habitacle est égale à la température extérieure. L'habitacle n'est donc pas pré-conditionné. Il est considéré que le chauffage est réalisé uniquement à l'aide des résistances. La pompe à chaleur n'est pas utilisée. Il est à noter que la consommation des résistances est supérieure à celle de la pompe à chaleur, ainsi la consommation du chauffage sera surestimée et ne donne qu'une tendance qui sera à affiner dans des travaux futurs. Un modèle utilisant les résistances de chauffages a été validé pour la Tazzari Zéro dans la thèse de L. Horrein [Horrein 15]. Les consignes de chauffages sont de 15 °C et 20 °C. Le trajet est réalisé par une personne seule et sans soleil.

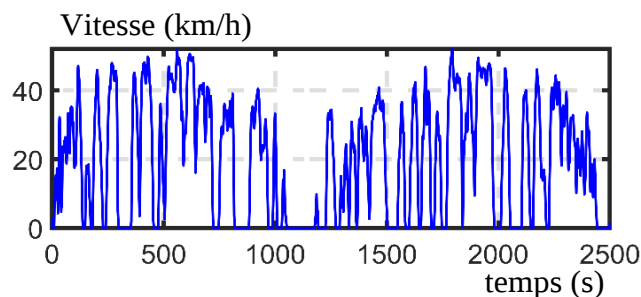


Figure II.42 : cycle de vitesse du parcours urbain

La consommation d'énergie sans chauffage est de 2,05 kWh pour le trajet considéré. La consommation d'énergie avec une consigne de chauffage à 15 °C augmente la consommation pour atteindre 2,28 kWh, ce qui représente une augmentation de 11 %. Pour une consigne à 20 °C, la consommation est de 2,52 kWh, soit 23 % d'augmentation. La consommation du chauffage est un facteur important pour la consommation d'énergie du véhicule, car elle peut grever l'autonomie de 10 à 20 % dans le cas de ce test.

Plus la différence de température entre l'habitacle et l'extérieur est grande, plus la consommation du chauffage augmente. La consommation d'énergie liée au chauffage peut-être plus ou moins importante en fonction de la température ambiante, du trajet effectué, de la présence de soleil et d'avoir ou non pré-conditionné le véhicule.

Pour rappel, une hypothèse forte a été considérée sur la modélisation de la batterie. En effet, il a été considéré que la batterie n'est pas affectée par la température. Mais, en réalité, la capacité de la batterie diminue à faible température, ce qui a pour conséquence d'avoir une chute d'autonomie supplémentaire uniquement due à l'état thermique de la batterie [Jaguemont 16a] [German 20]. La consommation liée au chauffage et la baisse de capacité des batteries peuvent entraîner une baisse d'autonomie supérieure à 50 % dans certains cas.

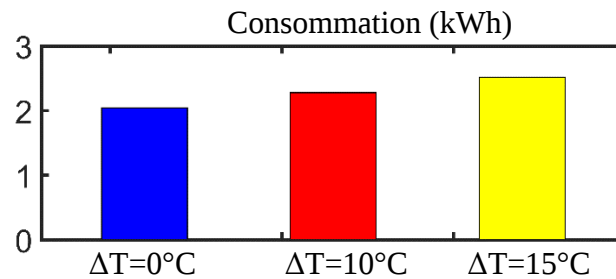


Figure II.43 : consommation du véhicule en fonction de la température de consigne

Table II.2 : Résultat de l'effet du chauffage

Écart de température (°C)	0	10	15
Consommation (kWh)	2,045	2,279	2,519
Différence (%)	Référence	+ 11,44	+23,18

II.3.2. Effet de la climatisation

Pour montrer l'impact de la climatisation sur la consommation d'énergie d'un véhicule électrique, trois tests sont réalisés. L'étude utilise le même trajet que l'étude précédente (Figure II.42). La température ambiante est de 30 °C. Une personne est seule dans le véhicule durant tout le trajet. Les radiations solaires sont de 1100 W. Le 1^{er} test est réalisé sans climatisation, la consommation est de 2,0 kWh et est prise pour référence. Le deuxième test est réalisé avec une réduction de température de 5 °C pour atteindre 25 °C dans l'habitacle, la consommation augmente pour atteindre 2,4 kWh. La différence est de 19 %. Pour une consigne de température de 20 °C dans l'habitacle, la consommation atteint 3,2 kWh. Ainsi, une augmentation de consommation de 58 % est constatée. Mais il faut rappeler que la plage de validité du modèle est dépassée, et que ce résultat ne peut exprimer qu'une tendance.

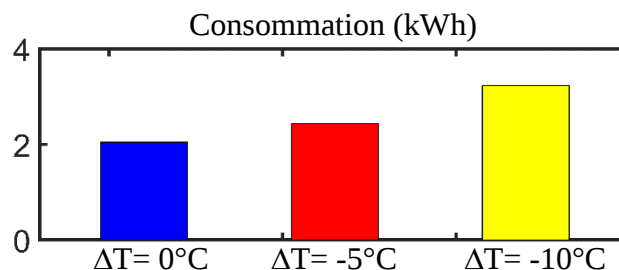


Figure II.44 : Consommation d'énergie pour l'étude de l'effet de la climatisation

Table II.3 : Effet de la climatisation

Écart de température (°C)	0	-5	-10
Consommation (kWh)	2,045	2,435	3,234
Différence (%)	Référence	+ 19,07	+ 58,14

II.3.3. Étude de la consommation annuelle avec prise en compte du confort

II.3.3.a. Étude de la consommation annuelle pour Lille

Après avoir vu l'effet du chauffage et de la climatisation sur la consommation sur un simple test, une étude sur la variation de la consommation annuelle est réalisée pour la Métropole de Lille. Les conditions climatiques évoluent toute l'année, différentes simulations seront donc nécessaires pour prendre en compte une telle variation. Les données météorologiques issues de la station de Lille-Lesquin permettent de présenter le climat de la région [MétéoFrance 19]. La moyenne des températures de l'année 2018 est donnée sur la Figure II.45. La courbe rouge représente la température maximale moyenne pour chaque mois. Tandis que la bleue représente la température minimale moyenne. Il est à noter que la moyenne des températures maximales en juillet est de 29 °C, ce qui est très rare pour Lille.

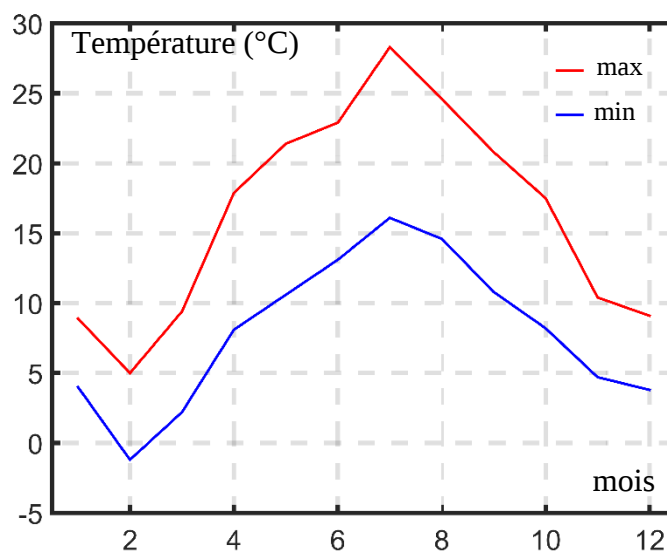


Figure II.45 : température moyenne à la station de Lille-Lesquin en 2018

Les conditions climatiques considérées sont l'effet de la température, la présence du soleil et la puissance de ses radiations. Les effets des précipitations ne sont pas considérés dans cette thèse. Le tableau complet des paramètres de la simulation est donné en annexe F. Le chauffage par résistances a pour objectif de maintenir la température à 15 °C, 23 °C pour la climatisation.

Dans une année, les personnels de l'université travaillent en moyenne 205 jours par an. Cela donne une moyenne de 17 jours de travail par mois⁸. Les horaires de travail de la personne considérée dans nos simulations sont de 8 h 30 à 17 h. Ainsi la température du matin est considérée comme équivalente à la température minimale. À 17 h, la température maximale est utilisée.

Le trajet type choisi est un trajet urbain, car il est représentatif d'au moins 40 % des trajets réalisés lors des trajets domicile-université (voir I.2.2). Le trajet réalisé part du centre-ville de Lille au campus Cité Scientifique puis du campus à Lille-centre. Il a été mesuré avec la Renault Zoé. Le trajet est divisé en 2, pour représenter un aller et un retour. L'aller est de 7,5 km et dure 19 min. Et le retour a pour longueur 6,6 km et dure 18 min (Figure II.46). La différence en

⁸ En considérant que le nombre de jours travaillés est égal chaque mois, ce qui n'est pas le cas. Les études futures devront affiner cette répartition.

termes de kilométrage est due au fait que le véhicule arrive dans une rue à sens unique et doit faire demi-tour pour prendre la même route à l'aller qu'au retour.

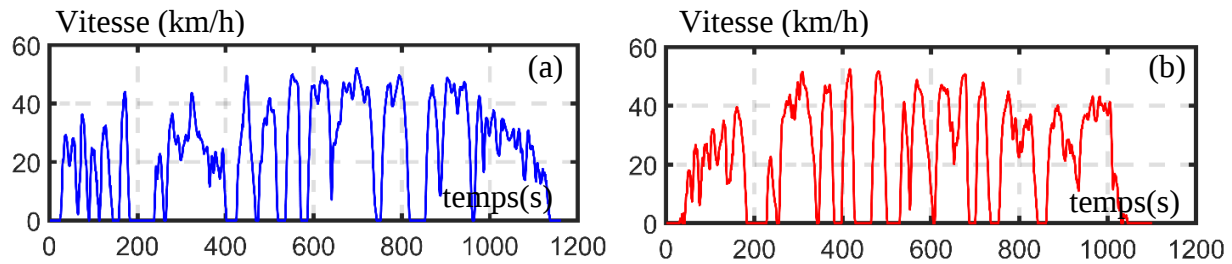


Figure II.46 : profils de vitesse d'un trajet domicile-université (a) aller (b) retour

L'énergie consommée par le véhicule est calculée pour chaque trajet et pour chaque mois (Figure II.47), le trajet du matin est représenté en bleu, celui du soir en rouge. Bien que le tracé soit quasiment équivalent, il est difficile de comparer la consommation d'énergie des 2 trajets. Le trajet le plus long qui est celui du matin consomme 9 % d'énergie de moins que l'autre trajet.

Le trajet du matin permet de voir l'effet de la température sur la consommation d'énergie. En effet, entre février et juin, la température varie de $-1,2^{\circ}\text{C}$ à $+13^{\circ}\text{C}$. La consommation de chauffage diminue progressivement du fait de l'augmentation de la chaleur. La consommation en février est de 1,35 kWh contre 1,08 kWh en juin. Le chauffage entraîne une consommation supplémentaire de 25 % par rapport au cas sans chauffage.

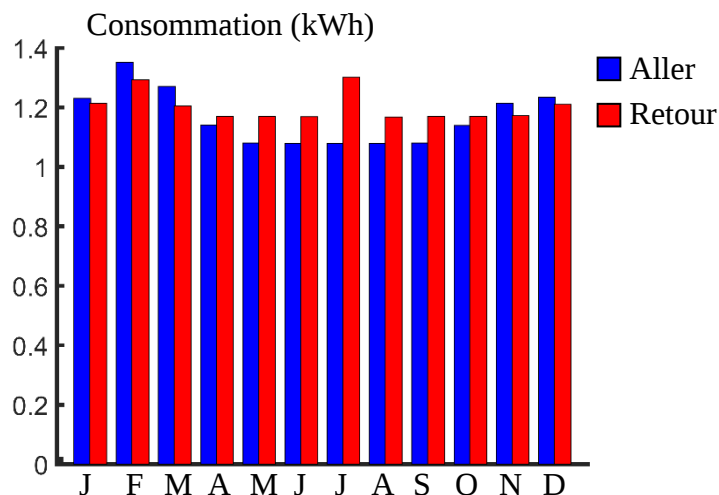


Figure II.47 : évolution de la consommation d'énergie pour Lille

La consommation sur le trajet du soir en juillet permet d'évaluer la consommation d'énergie avec la climatisation. La consommation est de 1,30 kWh contre 1,17 en juin. La climatisation augmente la consommation de 11 % par rapport au cas sans climatisation. Le modèle de climatisation restant dans sa plage de validité, les résultats obtenus peuvent donc être considérés comme valides.

En conclusion, la consommation d'énergie varie fortement entre l'été et l'hiver. Ainsi, la consommation augmente de 25 % le matin à cause de l'utilisation du chauffage. Pour le retour, la consommation augmente de 11 % quand la climatisation ou le chauffage sont utilisés.

II.3.3.b. Étude dans le cadre de CUMIN

Le programme CUMIN, dont cette thèse fait partie, a pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre des véhicules venant sur le campus de la Cité Scientifique de l'Université de Lille (voir I.2.2). Dans le cadre de ce projet, une étude de remplacement des véhicules conventionnels par des véhicules électriques rechargés à l'aide de panneaux photovoltaïques est notamment réalisée.

Pour ce programme, il est à noter que la consommation la plus importante est en février. Cette consommation permettra ainsi de définir la consommation maximale et donc la puissance et le nombre de bornes à disposer sur le campus pour recharger les véhicules électriques. Pour le dimensionnement des infrastructures de charge, la consommation maximale est à considérer.

De manière plus globale, en connaissant le nombre de jours travaillés moyens par mois pour un personnel de l'université, il est possible de donner la consommation annuelle sur ce trajet (Figure II.48). La consommation annuelle avec système de confort pour notre trajet urbain est de 483 kWh. Si la climatisation n'est pas prise en compte, la consommation baisse de 483 kWh à 480 kWh, ce qui induit une différence de 0,5 % sur ce trajet. Sans système de confort, la consommation est de 458 kWh, ce qui induit une différence de 5 %. Pour calculer la consommation annuelle d'énergie de ce type de trajet et avec le climat actuel de Lille, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la consommation de la climatisation qui est faible.

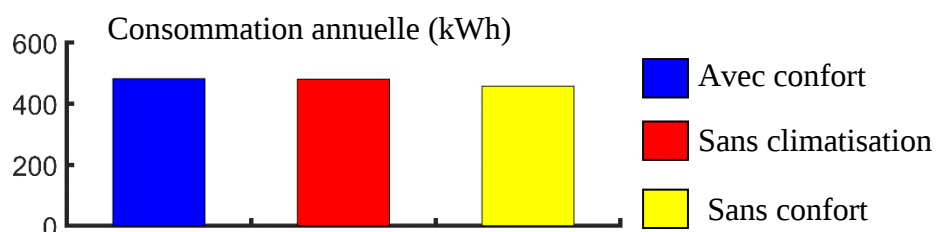


Figure II.48 : consommation annuelle avec et sans prise en compte du confort de l'habitable

II.3.3.c. Étude de la consommation annuelle pour d'autres climats

L'étude précédente est reprise en considérant les températures des villes d'Helsinki en Finlande (climat continental froid) et d'Athènes en Grèce (climat méditerranéen) pour l'année 2018. Il est rappelé que la limitation du modèle de climatisation ne permet que d'avoir des tendances.

Le climat d'Helsinki est plus froid que celui de Lille, les températures vont de -9 à 12 °C le matin et de -3 à 22 °C l'après-midi (Figure II.49) [WWO 19]. Le chauffage doit être utilisé une grande partie de l'année. La climatisation n'est pas utilisée.

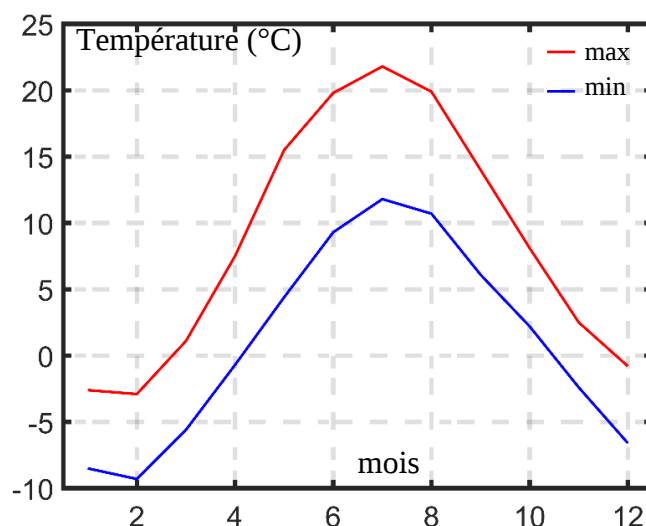


Figure II.49 : température moyenne à Helsinki

La consommation varie fortement à cause des températures froides en hiver (Figure II.50). L'utilisation du chauffage entraîne une variation forte de la consommation. En juillet, la température est de 12 °C. La consommation d'énergie du véhicule est de 1,08 kWh. En février, la consommation est de 1,59 kWh. Une augmentation de 47 % de consommation annuelle est observée dans ce cas-là.

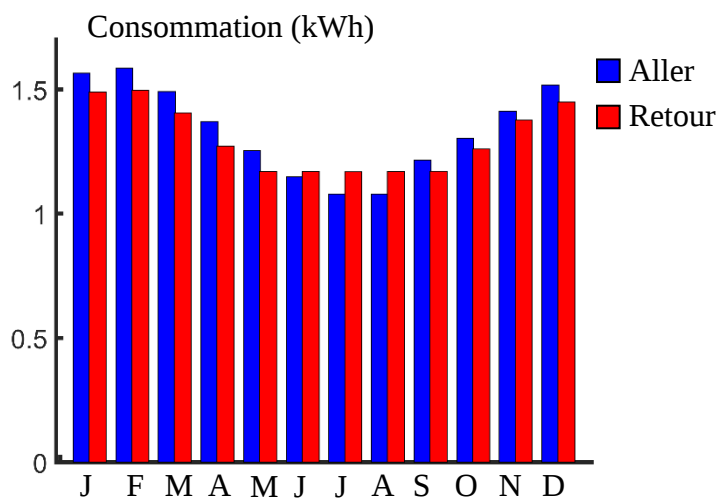


Figure II.50 : évolution de la consommation d'énergie pour Helsinki

La consommation annuelle en prenant en compte l'utilisation du chauffage est de 5,38 kWh (Figure II.51). La consommation sans en tenir compte est de 4,59 kWh. En ne considérant pas la consommation de la partie confort, l'erreur sur la consommation d'énergie est de 17 %. Donc, dans ce cas, il est nécessaire de prendre en compte la consommation due à la partie confort pour l'étude annuelle.

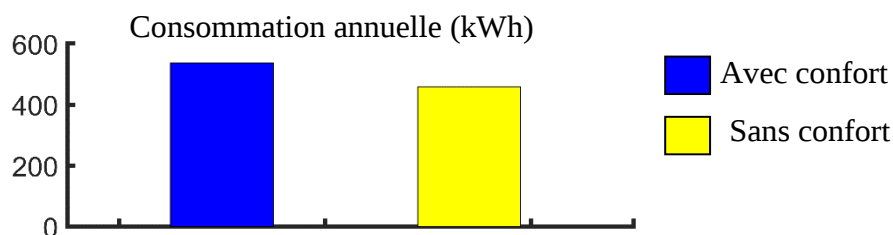


Figure II.51 : consommation annuelle avec et sans prise en compte du confort de l'habitable

Athènes a un climat plus chaud que celui de Lille (Figure II.52) [WWO 19]. La température est supérieure à 25 °C, 5 mois dans l'année. Ainsi la climatisation est nécessaire pendant 5 mois de l'année.

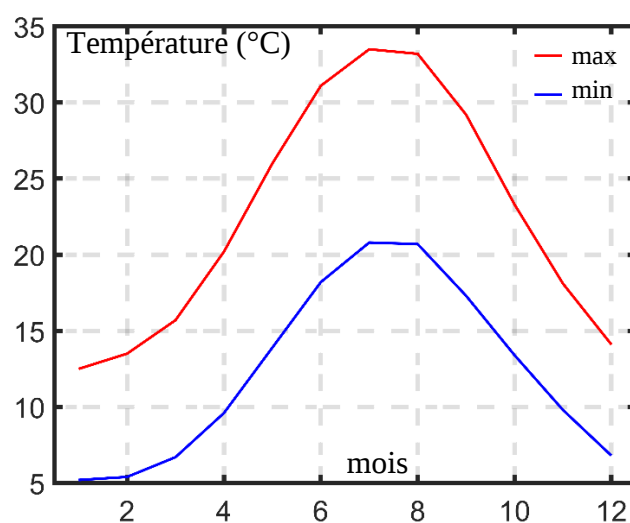


Figure II.52 : température moyenne à Athènes

La consommation d'énergie due à la climatisation entraîne une augmentation de la consommation de 44 % (Figure II.53). En effet, la consommation est de 1,59 kWh pour le mois de juillet sur le trajet de l'après-midi, contre 1,17 kWh pour le mois d'avril, sur le même trajet. L'effet de la climatisation est donc très important dans la variation mensuelle de la consommation.

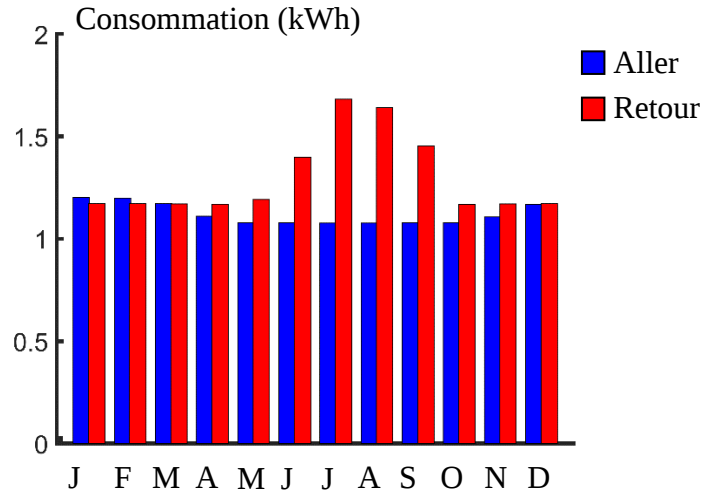


Figure II.53 : évolution de la consommation d'énergie pour Athènes

À nouveau, la consommation annuelle avec et sans système de confort est comparée. En prenant en compte le système de confort, la consommation est de 493 kWh (Figure II.54). La consommation sans prendre en compte la climatisation est de 467 kWh. Une différence de consommation de 5,6 % est observée. La consommation annuelle sans système de confort revient à 458 kWh. La différence est de 7,6 %. Dans le cas d'un véhicule roulant à Athènes, il est important de prendre en compte l'énergie consommée par la partie confort et notamment celle de la climatisation.

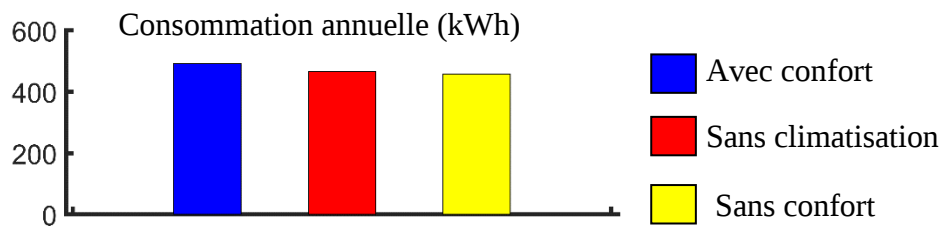


Figure II.54 : consommation annuelle avec et sans prise en compte du confort de l'habitacle

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, un outil de simulation a été développé afin d'estimer la consommation d'énergie d'un véhicule électrique. L'outil de simulation a été développé en utilisant la REM.

Dans un 1^{er} temps, la traction du véhicule a été modélisée, organisée avec la REM. Sa commande a été déduite grâce à la Structure Maximale de Commande (SMC). Le modèle de la traction a été validé par comparaison avec des mesures réalisées avec un véhicule. L'erreur du modèle de traction sur l'estimation de l'état de charge de la batterie est de l'ordre de 2 %.

Ensuite, la partie confort du véhicule a été modélisée. Elle est composée d'une pompe à chaleur réversible qui permet la climatisation du véhicule et de résistances qui sont utilisés en chauffage. L'habitacle a été modélisé puis validé en effectuant deux tests qui ont permis de comparer la température simulée avec la température mesurée dans le véhicule. La partie climatisation a été validée par un test réalisé avec le véhicule, mais la plage de validité reste limitée. La pompe à chaleur en mode chauffage n'a pas été validée dans cette thèse. Celle-ci devra être réalisée.

Cet outil de simulation a permis d'estimer l'impact du système de chauffage et de la climatisation sur la consommation du véhicule. Cet impact varie de 10 à 40 % en fonction des conditions climatiques appliquées (températures, ensoleillement...), des passagers et de leur ressenti du confort.

Ensuite, cet outil a permis de quantifier l'impact des conditions climatiques sur une année entière. La variation des conditions climatiques entraîne une variation importante de la consommation d'énergie en fonction de la nécessité d'utiliser les systèmes de confort ou non qui est de l'ordre de 20 % dans le cas considéré (projet CUMIN : trajet université — Lille centre).

En revanche, pour le calcul de la consommation annuelle sur le trajet, les hypothèses considérées montrent qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte la consommation de la climatisation pour le cas de la ville de Lille et ses environs. Ainsi, la consommation annuelle sur ce trajet peut être estimée en tenant compte de 2 calculs de consommation : l'un avec chauffage et l'autre sans pour l'aller et le retour.

L'application du modèle à d'autres villes (Helsinki et Athènes) avec des conditions climatiques différentes montre des variations de consommation plus importantes selon le climat considéré.

Chapitre III. Prise en compte des effets du trajet et du conducteur

Dans le chapitre précédent, un outil de simulation d'un véhicule électrique a été réalisé. Cet outil permet de calculer la consommation de la chaîne de traction, des auxiliaires et de la partie confort du véhicule. Cet outil a été utilisé pour étudier l'effet des auxiliaires liés aux conditions climatiques sur la consommation du véhicule électrique. Lors de cette étude, un cycle réel a été utilisé. Lors du premier chapitre, il a été démontré que ces cycles réels ne pouvaient être utilisés pour l'étude des effets du trajet à cause des aléas qui peuvent être rencontrés.

L'objectif de ce chapitre est de prendre en compte les effets du trajet et du conducteur sur la consommation. Dans la première partie de ce chapitre, un générateur de cycle est développé. Le générateur permet de créer des cycles de vitesses théoriques, non affectés par les aléas de la route. La deuxième partie concerne la prise en compte de différents profils de conduite. Une étude sur des trajets réalisés par le LTE-IFSTTAR est menée afin de définir ces profils. Des profils de conduites sont ensuite introduits dans le générateur de cycle. La troisième partie a pour but de caractériser l'effet du trajet et du conducteur sur la consommation d'énergie d'un VE. À la fin de cette partie, l'étude de la consommation annuelle des personnels du campus Cité Scientifique sera menée dans le cadre de CUMIN.

Sommaire du chapitre :

III.1. Générateur de cycle de vitesse	76
<i>III.1.1. Générations de cycles</i>	<i>76</i>
<i>III.1.2. Algorithme de génération</i>	<i>77</i>
<i>III.1.3. Validation.....</i>	<i>83</i>
III.2. Différents profils de conduites.....	86
<i>III.2.1. Classification des profils de conduite</i>	<i>86</i>
<i>III.2.2. Profils de conduite de véhicules électriques.....</i>	<i>88</i>
<i>III.2.3. Validation.....</i>	<i>93</i>
III.3. Effet du trajet et du conducteur sur la consommation	95
<i>III.3.1. Effet du trajet</i>	<i>95</i>
<i>III.3.2. Effet du conducteur</i>	<i>104</i>
<i>III.3.3. Étude de la consommation annuelle complète.....</i>	<i>105</i>
III.4. Conclusion	111

III.1. Générateur de cycle de vitesse

Différents facteurs peuvent influencer la consommation énergétique du véhicule sur un trajet : les vitesses maximales, les accélérations et décélérations du véhicule, les arrêts liés à la signalisation routière... Pour pouvoir étudier l'effet des différents facteurs, un outil ayant la capacité de faire varier un facteur sans impacter les autres est nécessaire.

III.1.1. Générations de cycles

Un profil ou un cycle de vitesse est nécessaire pour calculer la consommation d'énergie et les émissions des véhicules. Notamment, les cycles de vitesses servent à l'homologation des véhicules. Il existe quatre groupes de méthodes de génération de cycles dans la littérature.

Le premier groupe de méthodes est basé sur la mesure directe. Cette méthode se base sur la mesure de profil de vitesse à l'aide d'un ou plusieurs véhicules instrumentés pour mesurer la vitesse sur un trajet. Comme il a été démontré dans le 1^{er} chapitre, 2 profils de vitesse réalisés sur la même route peuvent être totalement différents à cause des aléas liés à la circulation et à la conduite. Ainsi, cela induit une consommation d'énergie parfois très différente pour les 2 cycles.

Le deuxième groupe de méthodes est l'utilisation de méthodes statistiques. Un nombre important de mesures sont réalisées afin de pouvoir réaliser un ou plusieurs cycles représentatifs des trajets réalisés par une population donnée [Pfriem 16]. Cette méthode a été notamment utilisée pour réaliser les cycles de vitesse Artémis [André 04] et NEDC (ancien cycle d'homologation en Europe). Un cycle réel qui est donné en fonction du temps et réalisé avec un véhicule donné ne permet pas non plus d'avoir de bonnes comparaisons s'il est utilisé pour un véhicule ayant des caractéristiques différentes (notamment de puissance). En effet, si une limitation de vitesse est introduite par le véhicule, le cycle sera modifié et la distance à parcourir ne sera plus respectée. Par conséquent, la consommation d'énergie sera faussée et la comparaison ne pourra pas être réalisée.

Le troisième groupe de méthodes est basé sur les probabilités (ou méthode stochastique). Ces méthodes sont aussi basées sur l'agrégation de centaines de mesures pour créer de nouveaux cycles à partir de probabilités. Différentes méthodes existent et peuvent jouer sur différents paramètres. Dans [Gruosso 17], les cycles sont découpés en différents segments de différentes longueurs et de vitesse moyenne différentes. Le nouveau cycle est construit par ajout de segments successifs pour réaliser le trajet voulu. Une autre méthode se base sur le découpage fréquentiel des profils de vitesse pour reconstruire d'autres cycles. Cela a été notamment réalisé pour une application ferroviaire [Jaafar 13], mais aussi terrestre [Schwarzer 13]. D'autres méthodes se basent sur la variation de la vitesse et de l'accélération. Dans [Chrenko 12], une méthode basée sur une distribution normale de vitesses est utilisée pour créer des cycles de vitesses. Une méthode basée sur les chaînes de Markov est la dernière méthode de ce groupe et est très utilisée dans la littérature [Kooijman 15] [Nyberg 16]. Notamment, le nouveau cycle d'homologation européen des véhicules, le cycle WLTC, est basé sur l'utilisation de chaîne de Markov [Kooijman 15]. Les méthodes stochastiques ont aussi la capacité de créer n'importe quel cycle de vitesse à partir de données fournies par l'utilisateur. Ainsi il n'est pas nécessaire de mesurer tous les trajets pour estimer la consommation des véhicules. Par exemple, Argonne

National Lab a développé un logiciel appelé SV-Trip basée sur les chaînes de Markov. Ce logiciel reçoit des informations provenant d'un autre logiciel appelé Polaris qui génère les vitesses maximales du trajet ou provenant de planificateur de trajet [Freyermuth 19]. Deux cycles générés par cette méthode seront différents, car générés aléatoirement, cela ne permet pas d'avoir de bonnes comparaisons sur la variation des facteurs.

Dans la littérature, il existe un dernier groupe de méthode pour générer des cycles de vitesses. Ce groupe est appelé générateur flexible de cycle idéalisé. Ce groupe crée des cycles idéalisés, car il génère directement le cycle en se basant sur l'application de limitations sur la vitesse ou les accélérations. Contrairement aux autres méthodes, il n'est pas basé sur la mesure de cycle réel. Ce générateur est flexible, car il permet la modification d'une limitation sans impacter les autres limitations. Différents travaux ont été réalisés avec l'aide de ce type de générateur. [Verhille 10] et [Mayet 18] ont développé un générateur avec une approche « forward » basée sur les limitations pour une application de métro. Des générateurs avec une approche « backward » ont été développés dans [Chrenko 14] et [Baouche 15] pour l'étude de l'autonomie d'un véhicule électrique.

En résumé, il existe dans la littérature, quatre groupes de méthodes pour générer des cycles de vitesse. La première est basée sur la réalisation de mesures. Les aléas sur les cycles mesurés ne permettent pas de réaliser une bonne comparaison sur les trajets. La deuxième méthode se base sur les statistiques. Un cycle représentant les différentes mesures réalisées est créé. La modification d'un paramètre sur le cycle généré entraîne la variation d'un ou plusieurs autres, ce qui n'est pas possible pour l'objectif de notre étude à réaliser. La troisième méthode se base sur les probabilités. Les variations engendrées par les probabilités ne permettent pas pour des raisons de répétabilité de réaliser l'étude souhaitée. Le quatrième groupe de méthodes, les générateurs flexibles de cycle idéalisés permettent de modifier la vitesse ou l'accélération indépendamment des autres variables. Cette méthode va être utilisée ici pour étudier l'effet des facteurs liés au trajet.

Dans la partie I.3.3, il a été montré que le générateur de cycle idéalisé à approche « forward » permet de prendre en compte les limitations provenant du véhicule (ex : couple de la machine), du conducteur et de la route (ex : vent). Ces limitations ne sont pas bien prises en compte par le générateur à approche « backward », ce qui induit des erreurs sur la consommation d'énergie du véhicule.

En conclusion, le générateur flexible de cycle idéalisé à approche « forward » est le générateur qui permet au mieux d'étudier l'effet des facteurs liés au trajet sur la consommation. Ainsi, ce générateur est utilisé dans le cadre de l'étude menée dans cette thèse et est détaillé dans la suite de ce manuscrit.

III.1.2. Algorithme de génération

III.1.2.a. Algorithme de génération

L'algorithme développé dans cette partie est basé sur les travaux de thèse de Jean-Noël Verhille [Verhille 07]. Un système de pilotage d'un métro a été développé afin d'estimer et de limiter l'accélération et le jerk (la dérivée de l'accélération) de celui-ci. Ce système de pilotage a été étendu dans la thèse de Clément Mayet [Mayet 16] afin de pouvoir générer des profils de

vitesse pour une application sur le métro. La particularité de ce générateur est qu'il respecte la causalité intégrale. Dans cette thèse, le générateur est adapté pour le cas de véhicules sur route. La boucle de Jerk est notamment supprimée (voir Annexe G).

L'algorithme génère la vitesse de référence du véhicule v_{veh_ref} en fonction de la distance parcourue par le véhicule pour atteindre la position finale de son parcours. Le profil de vitesse est découpé en différents segments. Chaque segment ou tronçon est défini par 2 éléments :

- la distance à parcourir sur le segment,
- la limitation de vitesse sur le segment.

Cette limite de vitesse peut être donnée par la signalisation routière ou par la présence d'un virage. Le changement de vitesse maximale entraîne ainsi un changement de segment. De plus, la présence ou non d'un arrêt sur le segment, ainsi que sa position sur le parcours sont prises en compte en dehors de la segmentation. Cet arrêt peut être dû à la fin du trajet ou par la signalisation : feu tricolore, stop, cédez-le passage à réaliser.

Un planificateur de trajets comme Google Maps [Google Maps 19] ou OpenStreetMap [OpenStreetMap 19] est utilisé pour obtenir les différentes informations sur le trajet à parcourir. La première partie de l'algorithme permet ainsi d'obtenir les informations topographiques de la route à partir d'un planificateur de trajet en donnant le point de départ et le point d'arrivée du trajet à réaliser. Les données sont traitées afin d'obtenir les distances et les vitesses maximales sur chaque tronçon ainsi que la position de chaque arrêt.

  partir des distances à réaliser sur chaque tronçon, il est possible alors de connaître la position de chaque changement de vitesse. La suite x_{ref} qui représente les différentes positions de changement de vitesse est définie par :

$$\begin{cases} x_{ref}(0) = 0 \\ x_{ref}(i) = x_{ref}(i - 1) + x_{seg}(i) \forall 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (III.1)$$

La dernière position $x_{ref}(n)$ correspond à la distance à parcourir par le véhicule pour réaliser le trajet. Elle sera appelée x_{fin} par la suite.

La position où se situe le véhicule, c'est-à-dire la distance qu'il a parcourue, dans la simulation est donnée à l'aide de l'intégrale de la vitesse :

$$x_{ve}(t) = \int v_{ve_mes}(t) dt \quad (III.2)$$

Comme la vitesse est l'intégrale pure de la distance (III.2), un correcteur est nécessaire pour passer de la distance à la vitesse à appliquer au véhicule. Ce correcteur est particulier, car il fonctionne à hystérésis [Mayet 16]. Si la distance parcourue par le véhicule n'a pas atteint la position à laquelle se trouve la fin du segment, la vitesse maximale ne change pas. Quand il atteint ou dépasse la position de fin de segment, la nouvelle vitesse maximale s'applique ainsi que la nouvelle position à atteindre. Si le véhicule arrive à la distance totale à parcourir, la vitesse est forcée à 0.

$$v_{max} = \begin{cases} v_{max}(x_{ref}(i)) & \text{si } x_{ve} < x_{ref}(i) \\ v_{max}(x_{ref}(i + 1)) & \text{si } x_{ref}(i) \leq x_{ve} < x_{fin} \\ 0 & \text{si } x_{ve} \geq x_{fin} \end{cases} \quad (III.3)$$

Une contrainte liée au Code de la route doit être prise en compte. En effet, le véhicule doit atteindre la nouvelle vitesse à la position indiquée. Plus particulièrement, la position des arrêts étant définie (feux de circulation, stops...), le véhicule est obligé de s'arrêter à la position indiquée. Le freinage du véhicule doit donc être anticipé. La contrainte ne s'applique que si la vitesse du segment suivant est inférieure à la vitesse actuelle du véhicule. Cette définition s'applique aussi pour l'arrêt où la vitesse suivante est imposée à 0. La distance de freinage est donnée par l'équation (III.4). La distance de freinage dépend de l'accélération actuelle et de la vitesse actuelle du véhicule. Ainsi, si la décélération est limitée par le couple de la machine, la distance est recalculée pour freiner. La démonstration de cette formulation est donnée dans [Mayet 16].

$$x_{frein} = \frac{1}{3} \frac{\gamma_{ve}^3}{J_{max}^2} + \frac{\gamma_{ve}}{J_{max}} v_{ve} + \frac{1}{2\gamma_{max}} \left[v_{ve}^2 + \frac{\gamma_{ve}^4}{4J_{max}^2} + \frac{\gamma_{ve}^2}{J_{max}} v_{ve} - v_{frein}^2 \right] + \frac{\gamma_{max}}{2J_{max}} \left[v_{ve} + \frac{1}{2} \frac{\gamma_{ve}^2}{J_{max}} + v_{frein} \right] \geq 0 \quad (III.4)$$

La nouvelle position x'_{ref} est donnée par la différence entre la position de fin du segment et la distance de freinage :

$$x'_{ref} = x_{ref} - x_{frein} \quad (III.5)$$

La nouvelle limitation qui s'applique est donnée par l'équation (III.6). Si la distance de freinage est nulle, la position où la vitesse s'applique est la distance originelle de fin de segment x_{ref} .

$$v_{max} = \begin{cases} v_{max}(x_{ref}(i)) & \text{si } x_{ve} < x'_{ref}(i) \\ v_{max}(x_{ref}(i+1)) & \text{si } x'_{ref}(i) \leq x_{ve} < x'_{fin} \\ 0 & \text{si } x_{ve} \geq x'_{fin} \end{cases} \quad (III.6)$$

Cette vitesse doit forcément être inférieure à la vitesse maximale du véhicule (140 km/h pour la Renault Zoé). Il est nécessaire ensuite de limiter l'accélération du véhicule. L'accélération est l'intégrale pure de la vitesse (III.7).

$$v_{ve_ref} = \int \gamma_{ve} dt \quad (III.7)$$

Ainsi, un correcteur proportionnel permet de passer de la vitesse à l'accélération [Verhille 10].

$$\gamma_{ref} = k_{\gamma}(v'_{max} - v_{ve_ref}) \quad (III.8)$$

L'accélération obtenue est ensuite limitée par les performances du véhicule. La caractéristique couple/vitesse de la machine électrique a une influence sur la limitation de l'accélération et de la décélération. Elle peut être prise en compte au niveau de la modélisation du véhicule dans la partie machine électrique. Cette limitation s'applique alors directement au couple de la machine, qui va vers la transmission mécanique (voir II.1). Ou elle peut être prise en compte dans le générateur, le couple doit alors être transformé en accélération à l'aide des équations II.4 II.5 et II.7.

$$\Gamma_{max} = \Gamma_{lim_em}(\Omega_{em_mes}) \quad (III.9)$$

$$F_{max} = \frac{k_{tr}}{R_{wh}} \Gamma_{max} \quad (III.10)$$

$$\gamma_{em_max} = \frac{F_{max} - F_{res}}{M_{ve}} \quad (III.11)$$

Une limitation supplémentaire de l'accélération est ajoutée au générateur. Cette limitation dépend de l'accélération maximale et de la décélération maximale du véhicule imposées par l'appui sur les pédales. Dans cette partie, l'accélération et la décélération sont considérées comme constante. Une première comparaison est effectuée avec l'accélération maximale donnée par la machine puis l'accélération de référence est bornée par la plus petite des deux limites d'accélération.

$$\begin{cases} \gamma_{max}^+ = \gamma_{ev_max}^+ \leq \gamma_{em_max} \\ \gamma_{max}^- = \gamma_{ev_max}^- \end{cases} \quad (III.12)$$

$$\gamma_{ve} = \gamma_{max}^- \leq \gamma_{ref} \leq \gamma_{max}^+ \quad (III.13)$$

Avec ses différentes boucles, le générateur permet de prendre en compte différentes limitations (*Figure III.1*). Ainsi, si une limitation est activée, une erreur sera constatée dans l'une des boucles du générateur. Cette erreur sera en particulier répercutée sur la position réelle. La boucle externe permettra alors d'atteindre quand même la position finale en adaptant la vitesse de référence.

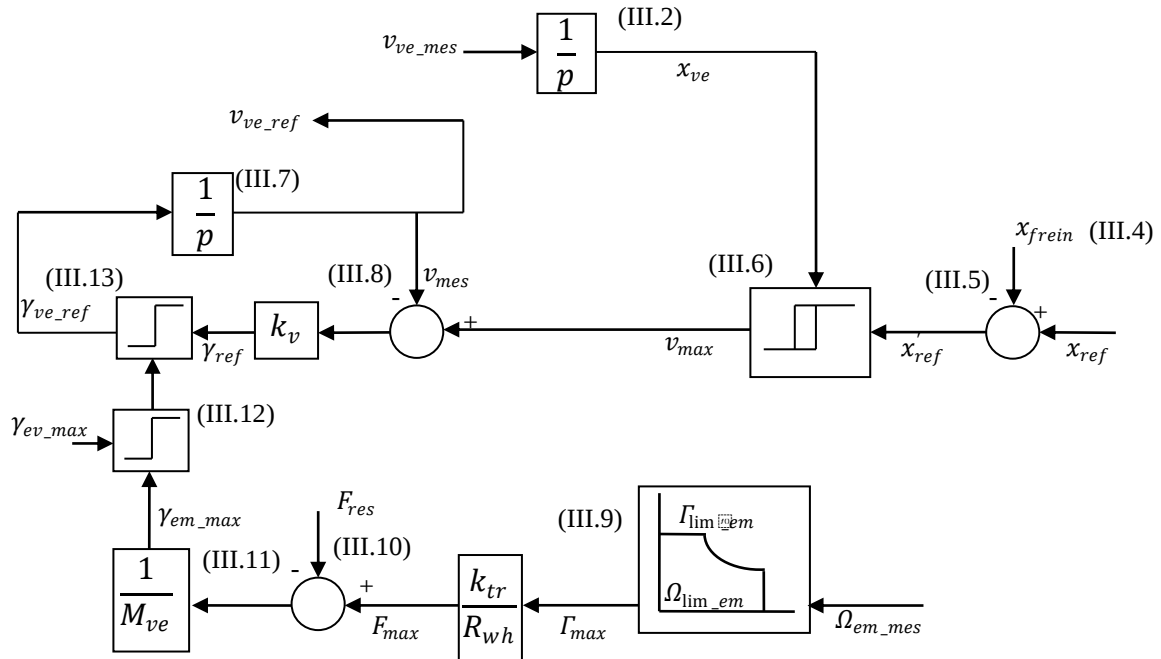


Figure III.1 : Structure du générateur de vitesse

III.1.2.b. Couplage générateur et simulation véhicule

Le générateur de vitesse est couplé à l'outil de simulation du véhicule présenté dans le chapitre II. Le générateur de vitesse est un bloc de stratégie ayant pour entrée la distance à réaliser pour chaque tronçon. Une deuxième entrée donne la vitesse réelle du véhicule. 2 limitations changent la vitesse appliquée et dépendent de la vitesse maximale et de l'accélération maximale. En sortie du générateur, la vitesse de référence est appliquée au niveau de l'inversion du châssis du véhicule (Figure III.2). Sur cette figure, le système de confort est représenté par une source donnant un courant total du système de confort i_{conf} .

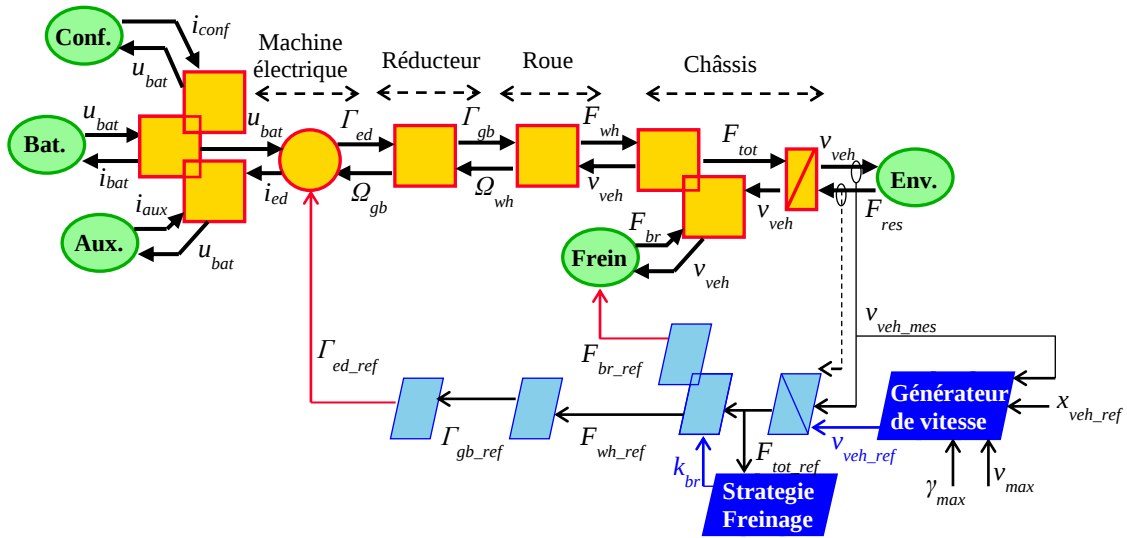


Figure III.2 : REM, SMC du véhicule électrique et générateur de profil de vitesse

III.1.2.c. Exemple de profil généré

Pour résumer la génération de cycle, un exemple est présenté. Le profil de vitesse a été récupéré à l'aide du planificateur de trajet OpenStreetMap. Ce profil est composé d'une portion sur route nationale à 90 km/h et d'une portion sur autoroute à 130 km/h. Ce profil est mis à l'entrée du générateur (Figure III.3 a). Le générateur prend la vitesse en fonction de la distance et la transforme en vitesse en fonction du temps (Figure III.3 b). Le profil réalise bien les différents segments imposés en entrée du générateur (Figure III.3 a et c). La distance de 5,1 km est bien respectée par le générateur. L'accélération est limitée par la machine électrique dans la partie autoroute (à 100 s) (Figure III.3 d). L'outil de simulation calcule l'énergie consommée en fonction du profil de vitesse imposée par le générateur. La consommation est de 1,3 kWh (Figure III.3 e).

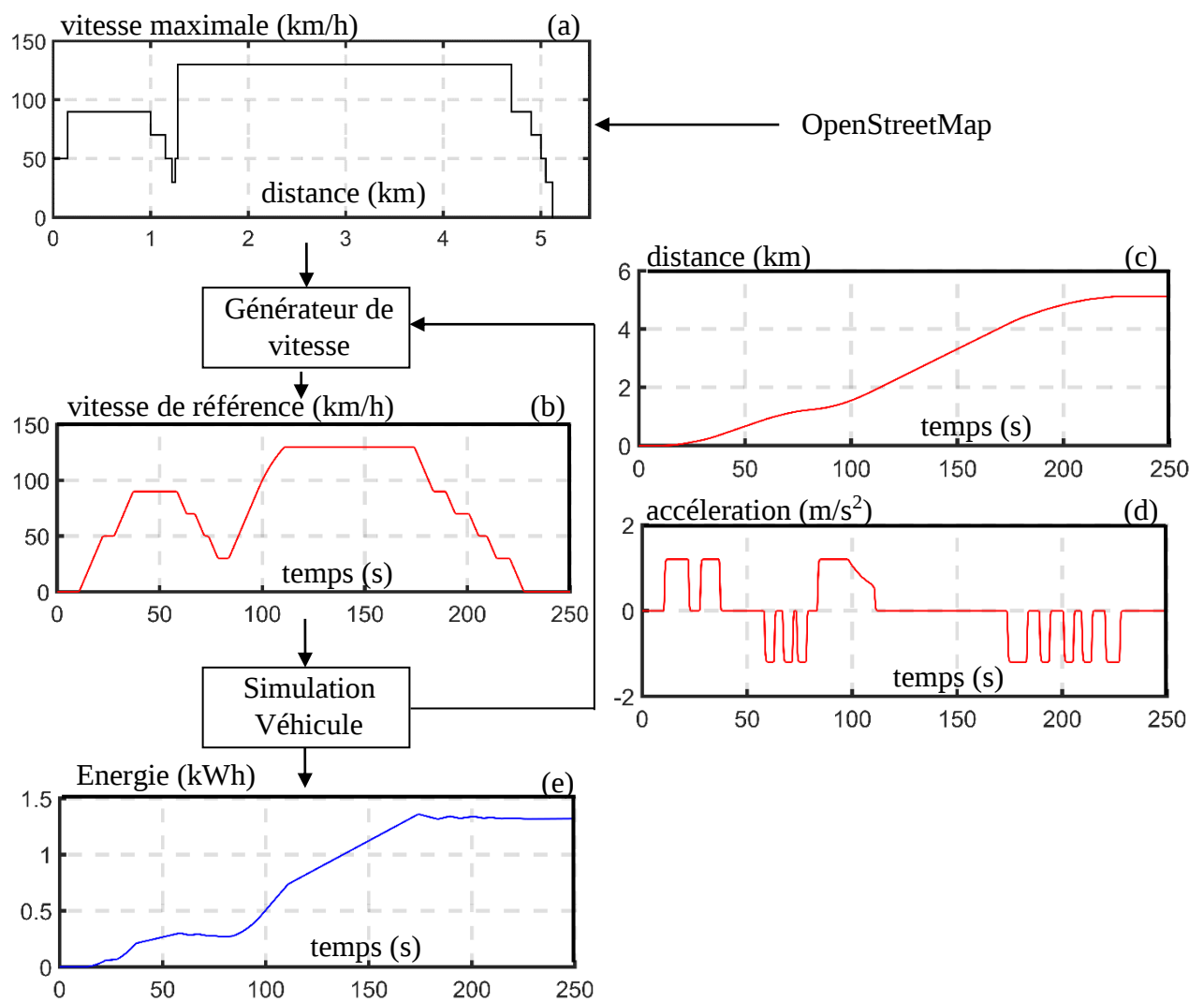


Figure III.3 : exemple de trajet généré

III.1.3. Validation

Le générateur a été réalisé dans la partie précédente, il est validé par comparaison avec des trajets mesurés avec le véhicule. Les profils obtenus par le générateur utilisent des données issues du planificateur de trajet OpenStreetMap. Les arrêts liés à la circulation et la signalisation (feux tricolores, stops...) sont ajoutés. Les profils choisis permettent de voir la sensibilité du générateur par rapport aux mesures réalisées.

Pour faciliter la comparaison, les profils seront représentés en fonction de la distance au lieu du temps. En effet, le générateur utilisé conserve la distance à effectuer, quels que soient les profils de vitesse. Le générateur de vitesse suit les limitations de vitesse imposées par la route et n'est pas victime d'aléas. Au contraire de la mesure qui elle peut être impactée par des aléas et peut avoir une vitesse réduite par rapport à la vitesse limite. Par conséquent, le temps de parcours sera différent.

Le premier trajet est un trajet urbain entre le campus Cité Scientifique de l'université et le centre-ville de Lille (Figure III.4). Le trajet aller-retour est de 14 km. Un zoom est réalisé entre 5,2 et 8,2 km. Le générateur de vitesse suit les limites de vitesse qui sont comprises entre 30 km/h et 50 km/h. Le profil mesuré subit différents aléas, ce qui ne permet pas toujours de rouler à la vitesse maximale du tronçon, notamment à 50 km/h. Ainsi le temps de parcours entre les 2 véhicules est différent. Avec le générateur, le trajet est réalisé en 37 min contre 40 min et 40 s pour le trajet issu des mesures. Cela crée une erreur de 9 %. Pour la consommation d'énergie, le trajet mesuré induit une consommation de 2 kWh contre 2,1 pour le trajet généré. L'erreur est de 5 %. (Table III.1)

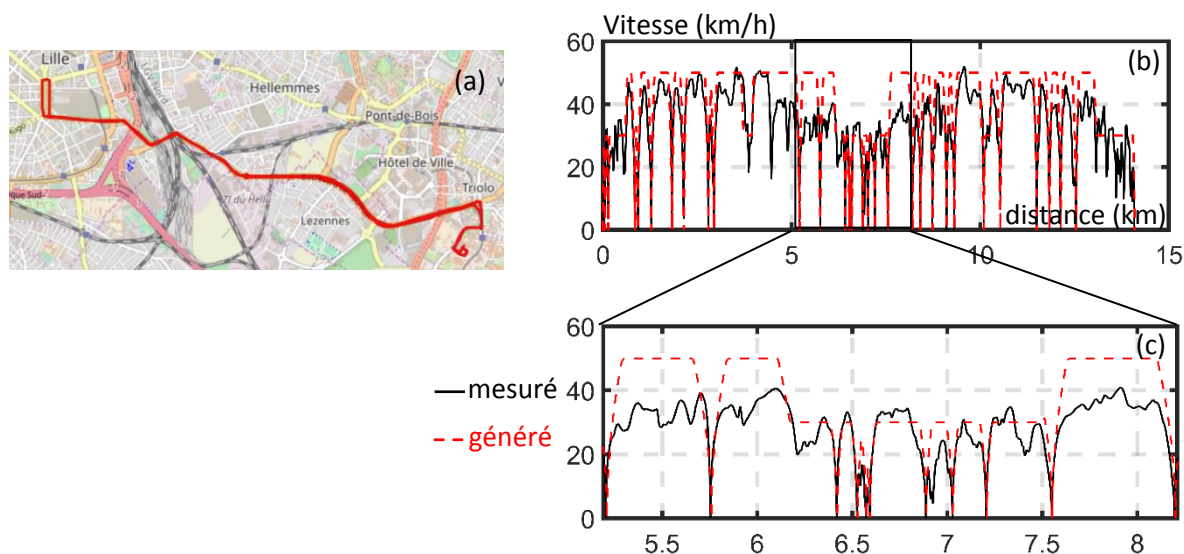


Figure III.4 : profil de vitesse urbain a) trajet considéré b) Profils de vitesse c) Zoom

Table III.1 : comparaison des profils de vitesse pour le cycle urbain

	Mesure	Simulation
Temps de parcours	40 min 42 s	37 min 2 s (-9,01 %)
Consommation (kWh)	2,01	2,11 (+ 5 %)

Le deuxième profil de vitesse testé est un cycle extra-urbain pour relier Orchies au campus Cité Scientifique par la route (Figure III.5). La route choisie est composée de différentes portions à 90 km/h entrecoupées par des portions à 30, 50 et 70 km/h pour passer des intersections. Le temps de parcours est de 34 minutes pour la mesure et 32 minutes pour la simulation, ce qui donne une différence de 4 %. La consommation d'énergie est d'environ 5,0 kWh pour les deux cycles de vitesses. La consommation diffère de 0,1 % (Table III.2).

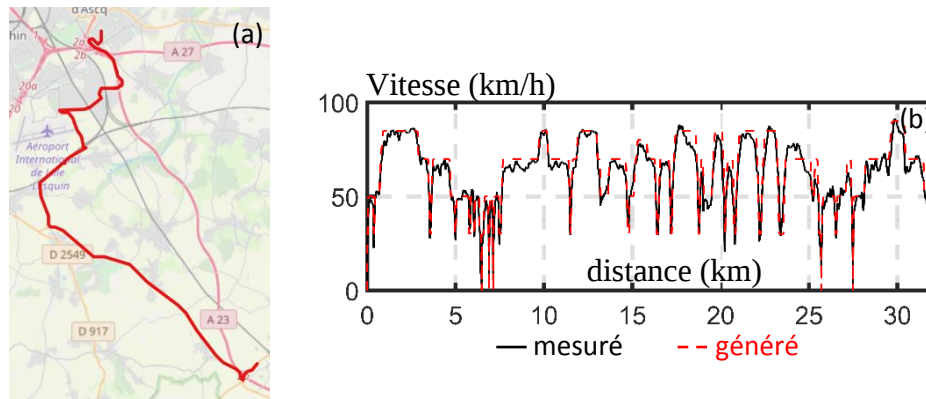


Figure III.5 : profil de vitesse extra-urbain a) trajet considéré b) Profils de vitesse

Table III.2 : comparaison des profils extra-urbains

	Mesure	Simulation
Temps de parcours (s)	33 min 39 s	32 min 18 s (-4,01 %)
Énergie (kWh)	5 021	4 963 (-0,12 %)

Le troisième trajet est un trajet autoroutier de 19 km réalisé entre Orchies et le campus (Figure III.6). Au départ d'Orchies, l'autoroute permet d'aller jusqu'à 130 km/h pendant 12 km jusqu'à l'entrée sur la métropole lilloise, la vitesse diminue ensuite à 110 km/h puis 90 km/h juste avant la sortie vers le campus. Le temps de parcours réalisés lors de la mesure est de 15 min 30 s contre 14 min et 40 s pour le profil généré. La consommation du véhicule avec le profil mesuré est de 4,6 kWh contre 4,7 kWh pour le cycle généré. Une différence de 2,7 % est observée. À nouveau, les différences sont dues aux aléas rencontrés lors du cycle réel même s'ils sont moins nombreux que sur les autres cycles. De plus, l'accélération du cycle généré sur autoroute est importante par rapport au profil mesuré (Table III.3).

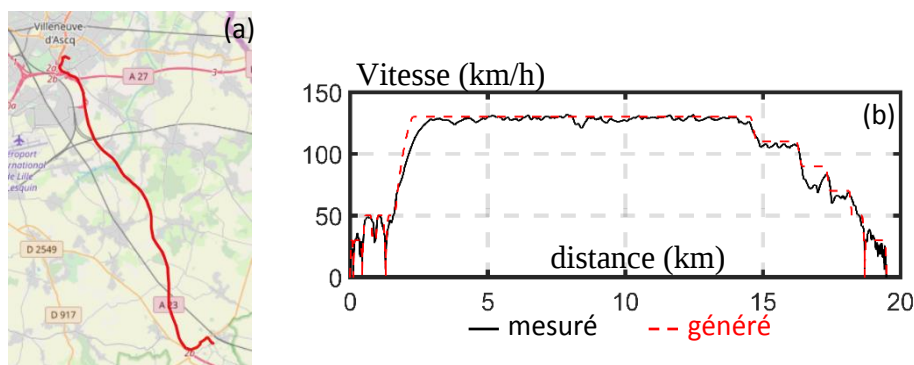


Figure III.6 : profil de vitesse autoroutier a) trajet considéré b) Profils de vitesse

Table III.3 : comparaison des profils de vitesse pour le cycle autoroutier

	Mesure	Simulation
Temps de parcours	15 min 28 s	14 min 40 s (-5,17 %)
Énergie (kWh)	4 545	4 667 (+ 2,68 %)

La validation du générateur utilise 3 trajets différents, la différence sur la consommation est de l'ordre de 0 à 5 % selon le type de trajet et les aléas rencontrés lors des trajets réalisés. Ces 3 trajets montrent qu'il est difficile à l'aide de mesure d'avoir des profils sans aléas. Les profils générés représentent le cas idéal où le véhicule peut se déplacer sans être affecté par différents aléas, ce qui est rarement le cas. Le générateur ainsi développé permettra par la suite de faire des études séparées des différents phénomènes liés au trajet sans aléas.

III.2. Différents profils de conduites

Dans la partie précédente, un générateur de vitesse, basé sur une description en vitesse maximum en fonction de la distance et associé à des limitations, a été présenté. Comme vu dans le 1^{er} chapitre, les conducteurs ont aussi un effet sur la consommation des véhicules électriques. Dans cette partie, différents profils de conduites seront définis et pris en compte à l'aide du générateur de profil de vitesse. Ensuite, ces profils seront utilisés pour caractériser l'effet de la conduite sur la consommation.

III.2.1. Classification des profils de conduite

Les systèmes d'aide à la conduite sont de plus en plus présents dans les véhicules. Notamment, certains systèmes ont pour but d'aider le conducteur à réduire sa consommation d'énergie, comme les outils d'éco-conduite. Certains de ces outils les plus évolués ont besoin de connaître le profil du conducteur afin d'adapter leur conseil. Dans la littérature, il existe différentes manières de classer les profils de conduite. Les études peuvent être classées en fonction de trois critères principaux : la méthode utilisée, le nombre de classes ou de profils définis et les paramètres utilisés pour définir les profils. Elles sont plus ou moins complexes en fonction du choix d'étude à réaliser [Martinez 18]. Une représentation de la répartition des profils de conducteurs peut être donnée par une gaussienne (Figure III.7) [Neubauer 13] [Ferreira 15].

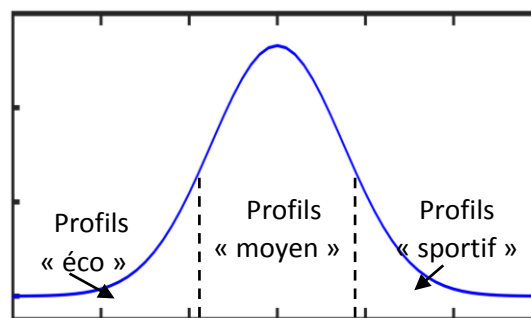


Figure III.7 : distribution des profils de conduite

Les profils peuvent être classés en différentes classes qui varient de 2 à une infinité (système de score) [Martinez 18]. Pour des études de sensibilité à la consommation ou aux émissions de gaz à effet de serre, le nombre de classes choisies sont généralement de 2 ou 3, de calme à agressif [Andrieu 12] [Neubauer 14b] [Jafari 15].

Différentes méthodes de classification stochastiques peuvent être utilisées afin de définir des profils de conduite, par exemple, ils peuvent être définis avec des Réseaux de Neurones [Diaz Alvarez 14] [Vatanparvar 19], ou des méthodes d'analyse de données [Ericsson 01] [Younes 13] [Ben-Marzouk 18].

Différents paramètres peuvent être utilisés pour différencier les conducteurs, certaines études se basent sur les règles d'éco-conduite [Andrieu 12], la vitesse et les accélérations sont dans ce cas utilisées pour effectuer la classification [Jafari 15]. D'autres utilisent le jerk pour catégoriser les profils. Enfin, certains utilisent la consommation d'énergie.

Dans la littérature, il n'y a pas de véritable consensus sur la méthode à choisir pour définir des profils de conduite. Grâce à certaines études, bien que peu nombreuses, certaines variables peuvent se dégager pour définir des profils, notamment la vitesse et les accélérations.

Projet Conduite Efficiente des Véhicules Électriques

La définition des profils de conduites se base sur des mesures effectuées par le LTE-IFSTTAR lors du projet Conduite Efficiente des Véhicules Électriques (CEVE) [Trigui 15]. Les mesures ont été réalisées entre septembre et novembre 2015. Il avait pour but d'étudier différentes manières de présenter l'éco-conduite à des personnes n'ayant jamais pratiqué l'éco-conduite et sans expérience de conduite d'un véhicule électrique. Environ une centaine de conducteurs ont réalisé chacun 2 trajets sur le même tracé. Le 1^{er} trajet est une conduite sans contrainte. Le 2^{ème} trajet a été réalisé avec les règles de l'éco-conduite présentée de différente manière. Dans l'étude que nous menons ici sur l'ensemble de ces conducteurs, le 2^{ème} trajet n'est pas utilisé, car les règles de l'éco-conduite peuvent fausser le profil initial du conducteur. Ainsi, le 1^{er} trajet de chaque conducteur sera réanalysé afin de définir des profils types de conduites.

Le véhicule utilisé lors du projet CEVE est une Citroën C-Zéro (Figure III.8). La C-Zéro est une micro-citadine. Ses caractéristiques sont données dans la Table III.4. Il est à noter la différence de poids avec la Renault Zoé, qui est plus lourde de 400 kg que la C-Zéro.



Figure III.8 : Citroën C-Zéro du LTE-IFSTTAR

Table III.4 : caractéristique de la C-Zéro

Masse	1065 kg
Batterie	Lithium-ion 16 kWh
Autonomie	150 km

Le véhicule est instrumenté à l'aide d'un lecteur OBD-II qui permet de lire le bus CAN du véhicule. Un GPS est aussi utilisé pour mesurer la vitesse du véhicule. Différentes informations sont disponibles comme la vitesse, l'accélération, le courant et la tension de la batterie, le couple et la vitesse de la machine électrique. Ainsi les puissances et énergies électriques au niveau de la batterie et au niveau de la machine peuvent être calculées.

Les différents participants à l'étude réalisent le même parcours de 12,5 km composés de cinq tronçons : deux parties urbaines deux parties extra-urbaines et d'une autoroute urbaine, limitée à 90 km/h (Figure III.9).

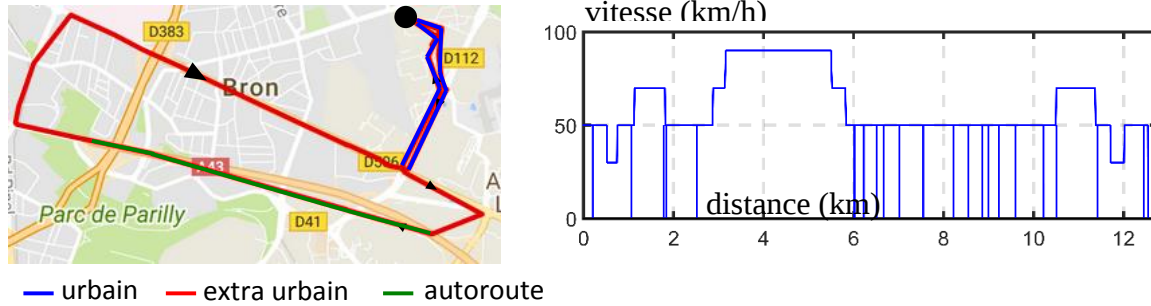


Figure III.9 : parcours considéré pour la définition des profils de conduite

III.2.2. Profils de conduite de véhicules électriques

100 conducteurs ont réalisé le test de conduite proposé. Certains aléas ont empêché 9 personnes de réaliser le trajet considéré et ont été éliminés de l'étude. L'étude présentée par la suite concerne 91 conducteurs. Ils sont classés en 3 groupes : calme, normal et sportif. Les caractéristiques de chaque groupe sont données afin d'étudier l'effet du conducteur sur la consommation d'un véhicule électrique.

III.2.2.a. Étude préliminaire

Une première exploration est menée en étudiant les corrélations entre différentes variables issues des mesures réalisées dans le cadre de CEVE. Pour rappel, la corrélation est un outil statistique qui permet de définir l'indépendance ou non de deux variables entre elles. Dans cette thèse, seule la corrélation linéaire est étudiée. Dans ce cas, la corrélation est le coefficient de qualité r d'une droite de régression entre les variables X et Y avec σ_X l'écart-type de X , σ_Y l'écart-type de Y et σ_{XY} la covariance entre les variables X et Y .

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (\text{III.14})$$

Si le coefficient r vaut 0, les variables sont indépendantes. Si le coefficient vaut 1, les variables sont totalement dépendantes l'une de l'autre. C'est-à-dire, que l'une des variables peut être la cause de la variation de l'autre.

Par exemple, la tension varie peu dans la batterie du véhicule électrique donc la puissance moyenne et le courant moyen dans la batterie doivent avoir une corrélation proche de 1. La courbe donnée par la Figure III.10 qui donne la puissance moyenne en fonction du courant moyen dans la batterie est bien une droite avec un coefficient de corrélation de 1,0.

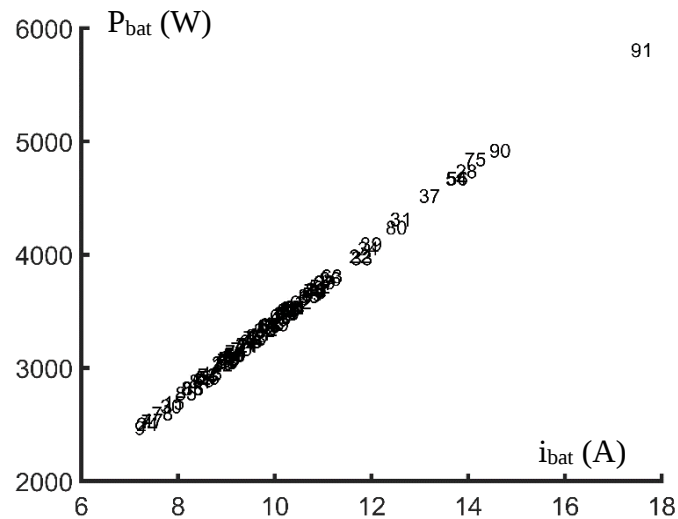


Figure III.10 : puissance moyenne de la batterie en fonction du courant moyen

L'énergie mécanique est l'image de la consommation de la partie traction du véhicule et donc peut être influencée par le profil de route, le conducteur et les conditions météorologiques. Mais elle n'est pas impactée par les auxiliaires du véhicule contrairement à l'énergie consommée au niveau de la batterie. Comme les tests ont été réalisés durant l'automne 2015, il y a une grande amplitude de températures entre les premiers et derniers tests. Ainsi dans certains cas, le chauffage a été utilisé, ce qui peut avoir un impact sur la consommation de la batterie.

Les corrélations entre l'énergie mécanique, la vitesse moyenne $\bar{V}$, l'écart-type de la vitesse σ_v , l'accélération moyenne $\bar{\gamma}^+$ et la décélération moyenne $\bar{\gamma}^-$ sont données dans la Table III.5. Les corrélations sont aux alentours de 0,5. Toutes les variables créent une variation sur la consommation sans que l'une ne soit majoritaire.

Table III.5 : valeur de la corrélation en comparaison avec l'énergie mécanique

Variable	$\bar{V}$	σ_v	$\bar{\gamma}^+$	$\bar{\gamma}^-$
Corrélation	0,43	0,64	0,56	-0,64

Une étude plus complète des corrélations est réalisée en annexe H. Deux variables à elles seules ne peuvent donner de bons profils de conduite. Une méthode plus avancée est utilisée pour donner différents profils avec plus de 2 variables. Pour cela, différentes notions mathématiques sont rappelées.

III.2.2.b. Notions de mathématique

Afin de visualiser les résultats en représentation en 2D. Il est nécessaire d'utiliser une méthode de changement de base de vecteur afin d'en réduire le nombre. Par exemple, un changement de base est très employé en commande des machines : la transformation de Park. En effet, elle permet de passer de 3 courants ou tensions pour une machine triphasée à 2 courants ou 2 tensions.

La méthode utilisée pour faire ce changement de base est une méthode d'analyse de données appelée Analyse en Composante Principale (ACP). Cette méthode utilise les corrélations pour réduire le nombre de variables. Toutes les variables et tous les profils sont définis dans un cercle unité. Les variables sont ainsi centrées et réduites (comprises entre -1 et 1 et ont pour moyennes 0). Elles ont donc toutes le même poids, chaque variable a donc la même influence.

La méthode de classification utilisée dans cette thèse est une Classification Ascendante Hiérarchique. Dans cette méthode, les profils sont représentés dans un espace défini par les variables en entrée de la classification. Cela peut être la vitesse, l'accélération ou bien les variables issues de l'ACP. Les individus sont classés en comparant la longueur des segments les séparant.

III.2.2.c. Aléas et profils impactés

La particularité de cette étude est que les conducteurs ont réalisé un seul trajet sans contrainte. Ainsi certains trajets ont été sujets à des aléas. Dans cette étude, le terme utilisé est profil de conduite à la place de profil de conducteur, car les profils définis ne peuvent être dissociés des effets liés à la route. Néanmoins, les conducteurs les plus impactés par les aléas peuvent profondément modifier la définition des profils. Ils doivent donc être exclus de la classification.

L'un des aléas rencontrés dans le projet CEVE est la densité de trafic dans la banlieue de Lyon. En effet, cette densité de trafic peut entraîner des réductions de vitesse importantes et augmenter le nombre d'arrêts, ce qui peut altérer la formation des différents profils de conduite. Notamment, le tronçon autoroutier a créé un nombre important d'aléas (Figure III.11). 75 % des profils ont une vitesse moyenne comprise entre 63 km/h et 82 km/h sur ce tronçon.

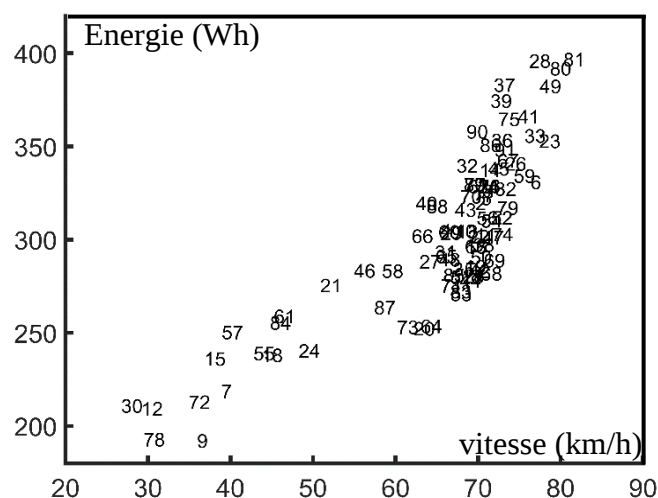


Figure III.11 : consommation d'énergie en fonction de la vitesse sur la partie autoroute

Également, le nombre total d'arrêts réalisés par le conducteur peut être aussi un facteur important. Il a été décidé de garder plus ou moins 3 arrêts autour de la moyenne. La médiane du nombre d'arrêts a pour valeur 20 arrêts pour une moyenne de 20,5 arrêts. Le 1^{er} quartile a pour valeur 17 arrêts et le 3^{ème} quartile est 23. Il reste après cette simplification, 46 profils qui vont permettre de définir nos trois groupes.

III.2.2.d. Classification des profils restants

Les différents conducteurs sont ensuite classés à l'aide de leur vitesse moyenne, de leur accélération moyenne et leur décélération moyenne sur le trajet complet. Une ACP est réalisée, une nouvelle base vectorielle est créée à partir de l'ancienne. La Figure III.12 donne les vecteurs vitesse et accélérations dans la nouvelle base. Il est à noter que le vecteur en abscisse est quasiment colinéaire à la consommation d'énergie.

Une classification est réalisée à l'aide des variables issues de l'ACP. Il en résulte 3 groupes bien distincts (Figure III.12). La vitesse moyenne du groupe vert est la plus faible alors que celle du groupe rouge est la plus élevée. De même pour l'accélération moyenne et la décélération moyenne, elles sont plus faibles pour le groupe vert et plus élevées pour le groupe rouge. L'énergie moyenne consommée et l'écart-type de chaque groupe sont donnés dans la Table III.6. Le groupe bleu a une consommation moyenne de 985 Wh contre 934 Wh et 1049 Wh respectivement pour les groupes vert et rouge. La différence de consommation par rapport au groupe bleu (au centre), est de 5 % pour le groupe vert et de 7 % pour le groupe rouge. L'écart-type du groupe rouge montre que le groupe est plus étendu que les deux autres, ce qui est dû à deux éléments extrêmes dans ce groupe. Ainsi les groupes peuvent être définis comme suit :

Le groupe vert représente un groupe « économique » avec une consommation d'énergie une vitesse moyenne et une accélération plus faible que la moyenne. À l'autre extrémité, le groupe rouge représente les profils les plus « sportifs ». Le groupe a une énergie consommée plus importante que les autres. Il en est de même pour la vitesse moyenne et les accélérations. Le groupe central représente les profils moyens.

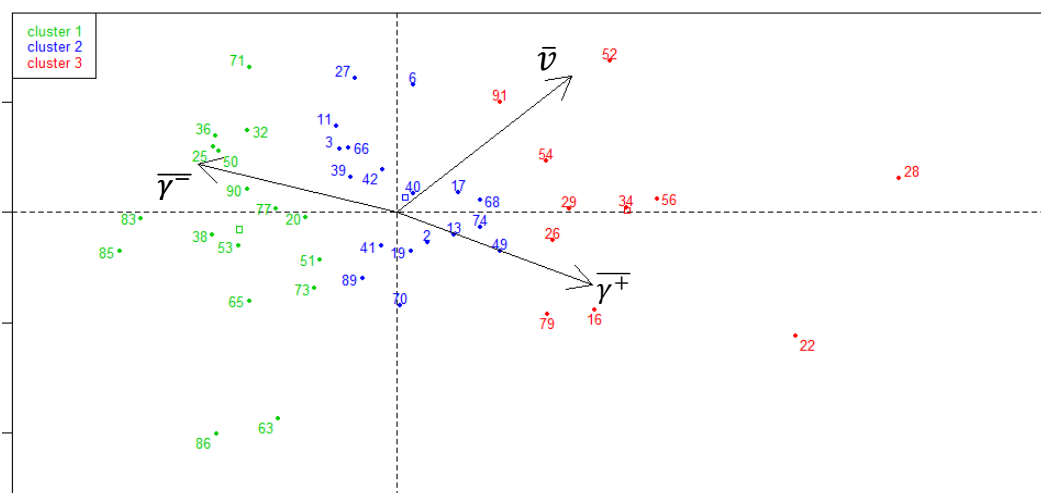


Figure III.12 : classification en fonction de la vitesse, de la décélération et de l'accélération moyennes

Table III.6 : Énergie moyenne consommée et écart-type pour les différentes classes

Profil (couleur)	Énergie moyenne consommée (Wh)	Écart-type	Différence
éco (V)	933,5	43,4	-5,2 %
moyen (B)	984,9	47,1	Ref
sportif (R)	1048,6	83,5	+6,5 %

III.2.2.e. Adaptation des paramètres du générateur de cycle

À l'aide de l'étude menée précédemment, il est possible d'améliorer le générateur de cycle et de prendre en compte nos différents profils de conduite. Nos profils de conduites ont notamment des différences au niveau de l'accélération. Cette accélération varie en fonction de la vitesse du véhicule. Ainsi, l'accélération maximale imposée par le véhicule est remplacée par l'accélération imposée par le conducteur en fonction de la vitesse. La décélération varie peu en fonction de la vitesse, mais elle dépend du type de conducteur comme vu précédemment.

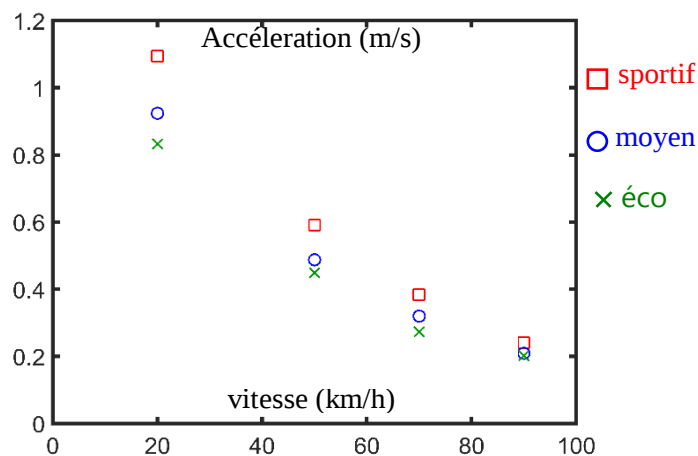


Figure III.13 : variation de l'accélération en fonction de la vitesse pour les différents profils

Entre classes de profil, il existe aussi une variation de vitesse. Ainsi une variation de 7 % est considérée entre les profils. Pour faciliter l'utilisation des différences de vitesses entre les profils, il est considéré que le conducteur normal suit les limitations de vitesse imposées par la route.

Table III.7 : variation de la vitesse entre les différents profils

Profil	Éco	Moyen	Sportif
Vitesse moyenne (km/h)	26,96	28,94	30,85
Différence (%)	-6,9	Référence	+6,6

III.2.3. Validation

Les différents profils de vitesse ont été définis précédemment et analysés pour donner les différentes caractéristiques de chaque classe de conducteur. Une comparaison est effectuée en introduisant les profils dans le générateur de cycle. Une comparaison des différents profils est donnée par la Figure III.14. Des différences de consommation apparaissent entre les cas générés et les cas mesurés. Le générateur suit les limites de vitesse des différents tronçons, ce qui n'est pas le cas pour nos profils mesurés. Le générateur a des vitesses établies continues contrairement aux profils mesurés qui ont des variations plus ou moins fortes.

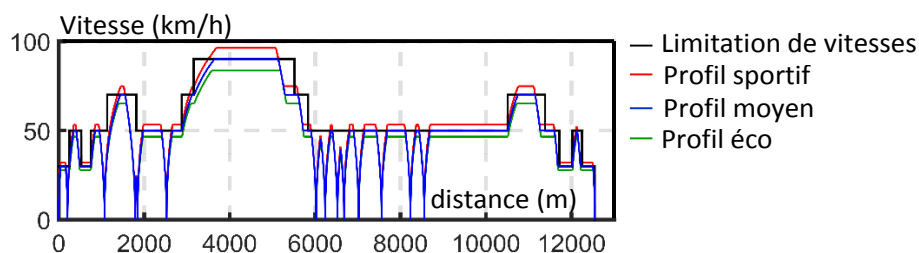


Figure III.14 : Vitesse de chaque profil de conducteurs

Table III.8 : Consommation de chaque profil de vitesse

Conducteurs	Éco	Moyen	Sportif
Consommation (kWh)	1,784	1,893	2 009
Différence (%)	-5,76	Référence	+6,13

La différence observable entre chaque profil est faible. En effet, les centres de classe sont proche les uns des autres, ce qui réduit l'effet du conducteur sur la consommation. Mais en réalité, l'hétérogénéité du comportement des conducteurs peut induire des variations de consommation très importantes. Il serait intéressant de mieux prendre en compte les extrêmes en ajoutant deux classes supplémentaires (Figure III.15). En effet, entre les extrêmes, la différence d'accélération, de vitesse moyenne et de consommation donne respectivement 36 %, 25 % et 27 %. La différence entre les extrêmes est donc très importante.

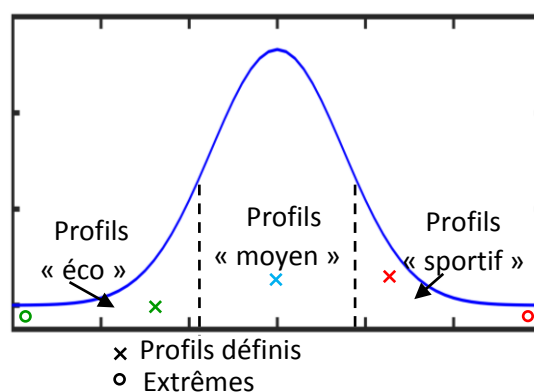


Figure III.15 : Représentation des différents profils

Table III.9 : Profils extrêmes issus du projet CEVE.

Extrême	Économique	Sportif
Accélération moyenne (m/s ²)	0,45 (-35,7 %)	0,70
Vitesse moyenne (m/s)	7,08 (-24,9 %)	9,43
Consommation (kWh)	0,87 (-27,1 %)	1,19

En conclusion, l'étude réalisée a permis de définir différents profils de conduite à partir de mesures réalisées par le LTE-IFSTTAR durant le projet CEVE. Trois profils se dégagent de l'étude statistique réalisée dans cette partie. Un profil éco se dégage et a pour caractéristiques des vitesses et des accélérations inférieures à la moyenne. Un profil sportif apparaît aussi, ce profil est caractérisé par des vitesses et des accélérations supérieures à la moyenne. Le troisième profil est un groupe avec des individus proches de la moyenne. Même si on observe une tendance bien établie, les trois groupes trouvés ont finalement des caractéristiques assez proches. Il serait intéressant dans des études futures de mieux prendre en compte les extrêmes. Car ces profils montrent une grande différence dans la consommation d'énergie.

III.3. Effet du trajet et du conducteur sur la consommation

Grâce au générateur de vitesse développé précédemment et à la définition de profils de conduite, il est possible d'étudier l'effet du trajet et du conducteur sur la consommation d'énergie d'un véhicule électrique. À la suite de ces études, une étude annuelle de la consommation est réalisée.

III.3.1. Effet du trajet

Différents effets liés au trajet à réaliser sont étudiés dans cette partie. Dans une première partie, l'impact des arrêts sur la consommation du véhicule est traité. Dans la seconde, les effets de la vitesse du véhicule sur sa consommation sont étudiés.

III.3.1.a. Effet des arrêts

Dans [Desreveaux 19a], l'effet des arrêts sur la consommation d'un véhicule électrique en circulation urbaine est étudié. Le trajet considéré est celui entre campus Cité Scientifique et le centre-ville de Lille et a une longueur de 6,6 km.

Trois scénarios sont comparés à l'aide du générateur de cycle. Une comparaison peut être réalisée avec l'outil de simulation sans être affectée par les aléas liés aux conditions de trafic et du conducteur.

Le premier scénario est une configuration avec un unique arrêt final (Figure III.16). Le trajet est réalisé en 9 minutes. La consommation est de 0,74 kWh.

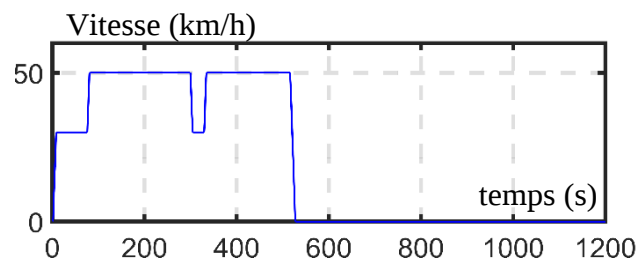


Figure III.16 : trajet urbain sans arrêt.

Le deuxième scénario entraîne 21 arrêts (feux tricolores) sur ce même trajet. Sur ce trajet, le nombre d'accélération et le nombre de décélérations sont donc importants (Figure III.17). Le temps de trajet est de 20 minutes. La consommation du véhicule est de 1,18 kWh.

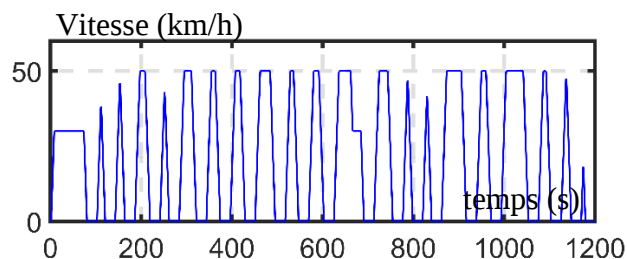


Figure III.17 : trajet urbain avec tous les arrêts considérés

Le troisième scénario considère 10 arrêts tout au long du trajet. Le temps de trajet est de 13 min. La consommation est de 0,92 kWh.

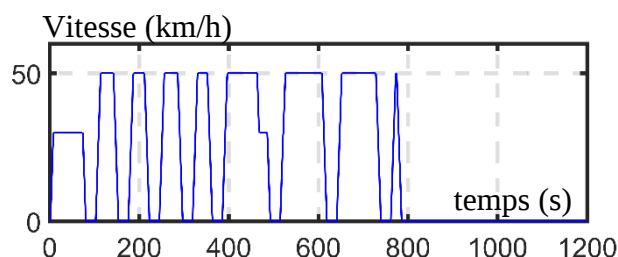


Figure III.18 : trajet urbain avec tous les arrêts considérés

La Table III.10 résume les différentes consommations d'énergie et temps de trajets pour les cas considérés. La consommation d'énergie est réduite de 22 % quand la moitié des feux est considéré par rapport au cas où il y a tous les feux. La réduction de la consommation passe à 37 % pour le cas sans feux par rapport au cas avec tous les feux. En conclusion, il est important de prendre en compte les arrêts dans l'étude de la consommation d'énergie, notamment dans les trajets urbains, car ils peuvent augmenter de plus d'un tiers la consommation d'énergie.

Table III.10 : temps de parcours et consommation pour les trajets avec et sans arrêts

Arrêts	Aucun	Moitié	Tous
Temps de parcours	8 min 48 s (-55 %)	13 min 7 s (-33 %)	19 min 40 s
Consommation (kWh)	0,74 (-37 %)	0,92 (-22 %)	1,18

À la suite de ces travaux, des statistiques ont été réalisées sur ce trajet pour connaître le nombre d'arrêts réalisés par les véhicules y circulant. Le trajet a été réalisé 58 fois. Les arrêts sur ces trajets ne sont que des feux tricolores. Le nombre de feux rencontrés sur chaque trajet est de 21. Le véhicule s'est arrêté en moyenne 9 fois par trajet. Ainsi le véhicule s'arrête à environ 41 % des feux de circulation. Le temps d'arrêt moyen à chaque feu est de 23 secondes. Dans cette thèse, on prendra ces valeurs pour tous les trajets considérés. Des études complémentaires devront être effectuées pour confirmer les résultats trouvés sur ce trajet.

Table III.11 : Statistique des feux sur le trajet université de Lille- centre-ville de Lille

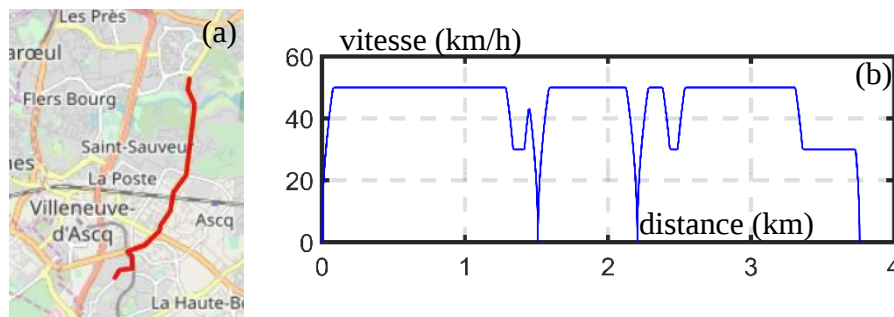
Paramètre	Valeur
Nombre d'arrêts moyen	8,68
Écart-type	2,95
Pourcentage de feu au rouge	41,33 %
Temps d'arrêt moyen	22,94 s

III.3.1.b. Effet de la vitesse

L'effet de la vitesse sur la consommation est étudié dans cette partie. Pour cela, les six trajets de CUMIN sont utilisés. Les trajets présentés ici sont identifiés à partir de l'étude sur la répartition géographique des personnels du campus Cité Scientifique, présentée au I.3. Les parcours représentent des déplacements domicile-travail des personnels. Ils sont au départ de Villeneuve d'Ascq, Lille, Roubaix, Baisieux, Orchies et Armentières pour rejoindre le campus de la Cité Scientifique.

Les données liées à ces trajets sont récupérées à partir d'une API du planificateur d'itinéraire d'OpenStreetMap [OpenStreetMap 19]. Les trajets réalisés ne prennent pas en compte les aléas générés par le trafic qui peuvent pousser certains personnels à faire des détours, pour éviter un bouchon par exemple. Une étude complémentaire sera à réaliser par la suite dans le cadre du futur projet ADAM du programme CUMIN (analyse de cycles pour estimer la consommation des VE). Les parcours sont suffisants pour évaluer et analyser les facteurs impactant la consommation. Ils s'appuient sur différents cas de figure de localisation des personnels et de conditions de circulation (trajets sur voirie urbaine limitée à 50 km/h, trajet sur route départementale limité à 80 km/h ou sur autoroute (110 ou 130 km/h selon la portion considérée)).

Le 1^{er} trajet correspond au cas de figure d'un personnel habitant à proximité du campus et venant en voiture (*Figure III.19*). Le trajet dure 6 min et a une distance de 4 km. La vitesse moyenne sur son trajet est de 34 km/h. La consommation d'énergie est de 0,5 kWh.



*Figure III.19 : profil de vitesse du trajet Villeneuve-d'Ascq- campus Cité Scientifique
a) trajet considéré b) Profils de vitesse*

Le 2^{ème} trajet est celui d'un trajet entre la commune de Lille et le campus Cité Scientifique (*Figure III.20*). Ce trajet a pour distance 7 km et correspond à un trajet urbain avec des vitesses maximales de 30 et 50 km/h. Il est réalisé en 15 min avec le générateur, ce qui donne une vitesse moyenne de 28 km/h. La consommation sur ce trajet est de 1 kWh.

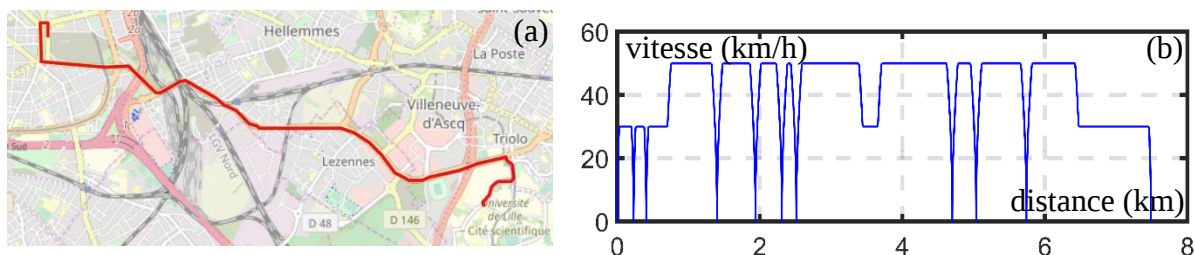


Figure III.20 : profil de vitesse du trajet Lille- campus Cité Scientifique
a) trajet considéré b) Profils de vitesse

Le 3^{ème} trajet part de Baisieux, une commune périurbaine située à la limite du périmètre de la Métropole Européenne de Lille (MEL). La vitesse maximale entre cette commune et le campus varie de 30 à 80 km/h (Figure III.21). La distance à parcourir est de 9 km et se réalise en 12 min. La vitesse moyenne est de 42 km/h. La consommation sur ce trajet est de 1,3 kWh.

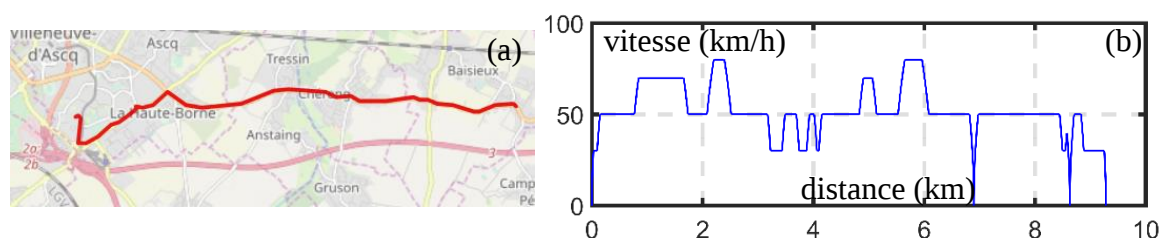


Figure III.21 : profil de vitesse du trajet Baisieux- campus Cité Scientifique
a) trajet considéré b) Profils de vitesse

Le quatrième trajet a pour ville de départ Roubaix, située au nord de la MEL (Figure III.22). Le trajet a pour distance 16 km et se réalise en 19 min. Il a donc une vitesse moyenne de 49 km/h. La consommation sur ce trajet est de 2,6 kWh.

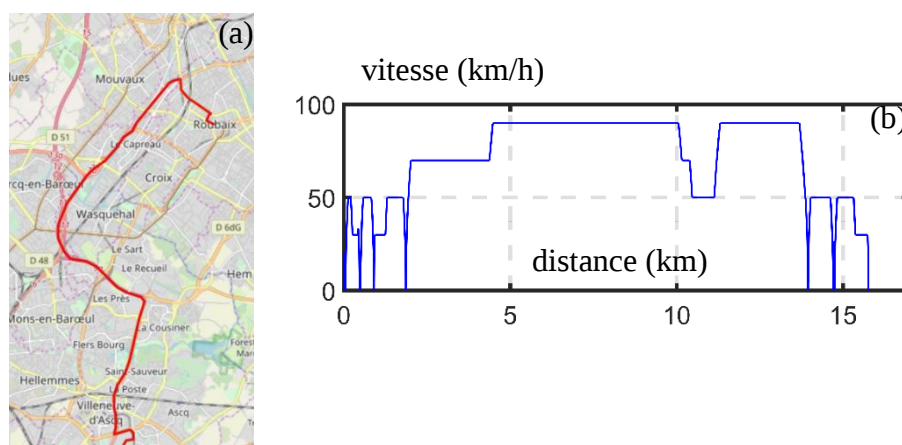


Figure III.22 : profil de vitesse du trajet Roubaix- campus Cité Scientifique
a) trajet considéré b) Profils de vitesse

Le cinquième trajet part d'Orchies (une commune située en dehors de la MEL et au sud du campus où de nombreux personnels habitent) et rejoint le campus par l'autoroute (Figure

III.23). Le trajet de 20 km est réalisé en 13 min. La vitesse moyenne sur ce trajet est de 89 km/h. La consommation sur ce trajet est de 4,8 kWh.

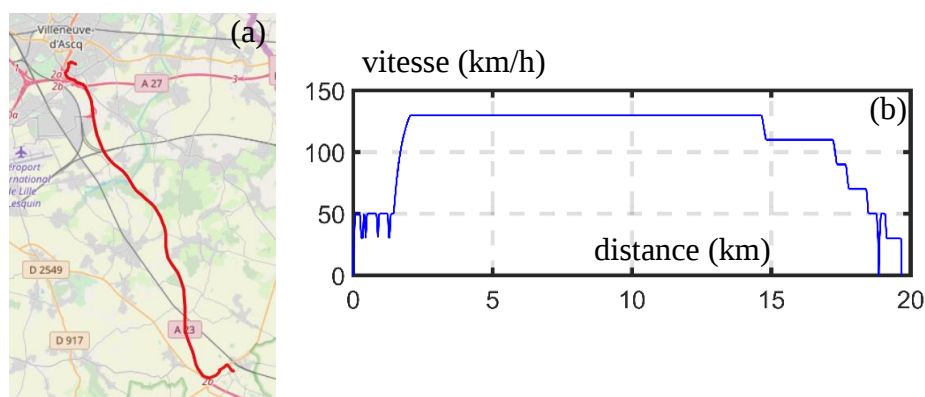


Figure III.23 : profil de vitesse du trajet Orchies- campus Cité Scientifique
a) trajet considéré b) Profils de vitesse

Le sixième et dernier trajet démarre d'Armentières (Figure III.24). Le trajet a pour distance 27 km et dure 23 min. Bien que le trajet soit réalisé en grande partie sur autoroute, la vitesse moyenne du trajet est de 69 km/h à cause des limitations de vitesse. La consommation sur ce trajet est de 4,6 kWh.

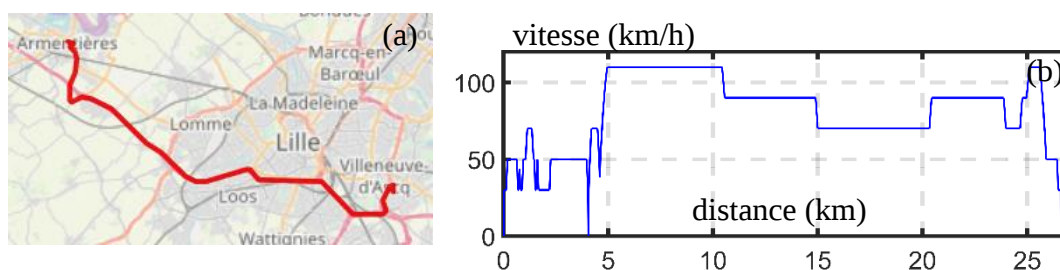


Figure III.24 : profil de vitesse du trajet Armentières- campus Cité Scientifique
a) trajet considéré b) Profils de vitesse

La consommation d'énergie au 100 km est représentée en fonction des vitesses moyennes de chaque trajet. La consommation évolue fortement en fonction de la vitesse moyenne (Figure III.25) (Table III.12). Différents paramètres affectent la consommation d'énergie sur nos différents trajets : le nombre d'arrêts, les accélérations et les décélérations, la pente. En effet, quand la vitesse moyenne augmente, la consommation d'énergie a tendance à augmenter. Sauf entre Lille et Villeneuve d'Ascq, où la consommation diminue. En effet, quand la vitesse augmente, la consommation d'énergie augmente. Ce qui n'est pas le cas entre les deux premiers trajets, la consommation diminue. À partir de ce constat, il est difficile de donner la variation d'énergie en fonction de la vitesse à l'aide des six trajets utilisés. Une étude de sensibilité à la vitesse doit donc être menée pour voir l'effet de la variation de vitesse sur la consommation d'énergie d'un véhicule électrique.

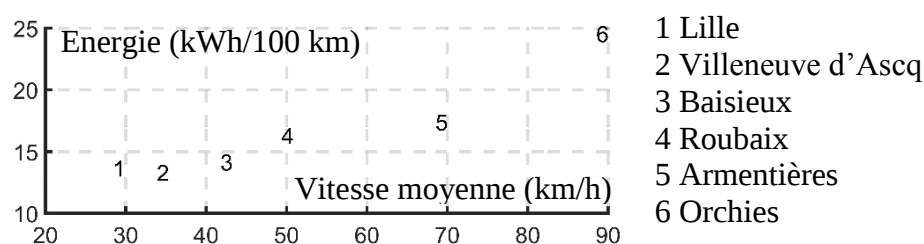


Figure III.25 : consommation d'énergie en fonction de la vitesse moyenne

Table III.12 : vitesse et consommation d'énergie pour les différents trajets étudiés

Ville de départ	Lille	Villeneuve d'Ascq	Baisieux	Roubaix	Armentières	Orchies
Vitesse moyenne (km/h)	28,4	33,8	41,8	49,3	68,5	88,5
Énergie consommée (kWh/100 km)	13,7	13,3	14,2	16,3	17,4	24,6

III.3.1.c. Étude de sensibilité à la vitesse

Dans [Desreveaux 19c], une étude est réalisée sur l'effet du profil de vitesses sur la consommation d'énergie d'un véhicule électrique. Lors de ce travail, l'effet de la vitesse sur la consommation d'énergie est notamment discuté. Le générateur de cycle proposé dans ce chapitre permet de modifier la vitesse sans modifier les autres paramètres qui peuvent avoir une influence sur la consommation du véhicule. Trois trajets de l'étude précédente sont utilisés, les deux trajets avec les consommations extrêmes sont choisis : ceux au départ de Lille et d'Orchies. Le dernier est le trajet au départ de Roubaix qui est un cas qui se situe entre les deux.

La vitesse de chaque tronçon est modifiée entre - 20 et + 20 % de la vitesse de base. L'énergie consommée par le véhicule et le temps de parcours sont représentés en fonction de la modification de la vitesse. Les résultats sont détaillés pour trois trajets avec des modifications de vitesse de 5 en 5 %.

Le premier cycle est le cycle urbain entre Lille et le campus. Le temps de parcours (Figure III.26) et l'énergie consommée (Figure III.27) sont représentés en fonction du changement de la vitesse. Le temps de parcours évolue entre 14 min et 18 min. La référence est de 16 min. En pourcentage, le plus rapide donne un gain de temps de 9 % contre une perte de temps de 15 % avec une vitesse réduite de 20 %. La consommation d'énergie varie de 0,88 kWh à 1,19 kWh. La consommation de référence est de 1,03 kWh. Une variation de -14 % à 16 % est constatée pour ce cycle.

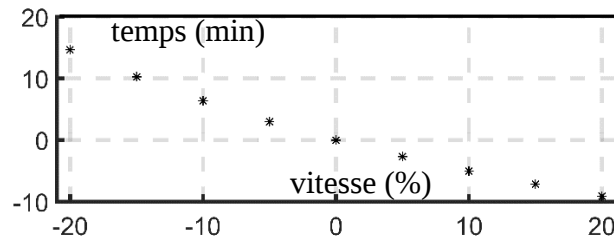


Figure III.26 : temps de parcours en fonction de la limitation de la vitesse pour le cycle Lille-campus Cité Scientifique

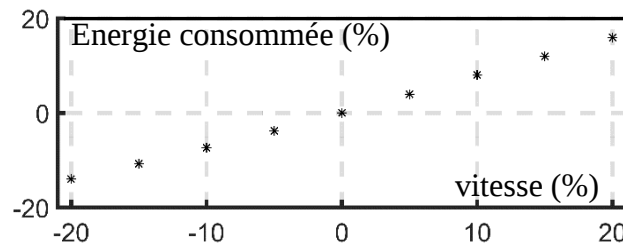


Figure III.27 : consommation d'énergie en fonction de la limitation de la vitesse pour le cycle Lille- campus Cité Scientifique

Pour les deux cas suivants, les courbes sont disponibles en Annexe I. Le deuxième trajet étudié est celui entre Roubaix et le campus. Le temps de parcours varie entre 16 min 38 s et 22 min 8 s pour une référence de 18 min 47 s. La variation du temps de parcours est entre – 11 % et + 18 %. La consommation d'énergie est entre 2,11 kWh et 2,57 kWh pour une référence à 3,13 kWh. La consommation varie de – 18 à 21 %.

Le troisième cycle est le cycle autoroutier d'Orchies au campus. Le temps de parcours varie entre 11 min et 30 s et 16 min et 17 s pour un cas de référence de 12 min 47 s. Le temps de parcours varie de -10 % à + 23 %. Pour la consommation d'énergie, elle varie de 3,67 kWh à 5,36 avec une référence à 4,84 kWh. La consommation varie de -24 % à 11 %. L'augmentation de la consommation d'énergie est moins importante pour une augmentation de vitesses supérieures à 10 %. En effet, les limitations dues à la vitesse maximale du véhicule, 136 km/h et du couple de la machine entraînent un plafonnement de la vitesse maximale sur l'autoroute.

Les résultats sont regroupés dans la Table III.13. Pour conclure, la vitesse est un facteur impactant fortement la consommation d'énergie. La fonction régissant la consommation en fonction de la vitesse est un polynôme d'ordre deux. Ainsi plus la vitesse augmente, plus la différence de consommation augmente.

Table III.13 : consommation en fonction des limitations de vitesse pour les différents trajets étudiés

Ville de départ	- 20 % (kWh)	Référence (kWh)	+ 20 % (kWh)
Lille	0,88 (-14,0)	1,03	1,19 (+16,0)
Roubaix	2,11 (-18,0)	2,57	3,13 (+21,5)
Orchies	3,67 (-24,2)	4,84	5,36 (+10,7)

III.3.1.d. Effet des accélérations

L'effet de l'accélération sur la consommation d'énergie est maintenant étudié. Pour n'avoir que l'effet de l'accélération, la méthode utilisée pour la sensibilité de la vitesse est réutilisée dans cette partie. L'accélération de référence est à 1 m/s^2 .

Pour les 3 cycles précédemment utilisés, l'effet de l'accélération est faible sur la consommation d'énergie du véhicule électrique. Pour le cycle urbain, une diminution de l'accélération de 40 % entraîne une diminution de la consommation de 1 %. Pour une augmentation de 40 %, la consommation d'énergie augmente de 0,2 % (Figure III.28).

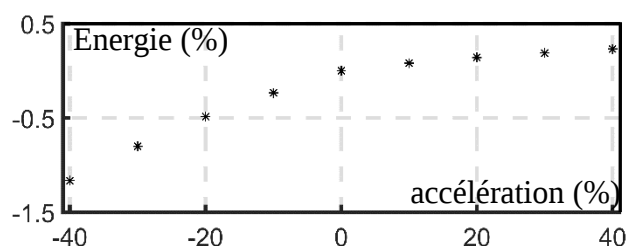


Figure III.28 : consommation d'énergie en fonction de la limitation de l'accélération pour le cycle Lille - campus Cité Scientifique

Pour les deux autres cas, les courbes sont en Annexe I. Pour le trajet entre Roubaix et l'Université, le changement de 40 % d'accélération entraîne une diminution de la consommation de 0,6 % ou une augmentation de 0,2 % (Table III.14). Sur le cycle autoroutier, une diminution de la consommation de 0,8 % est induite par une diminution de l'accélération de 40 %. Une augmentation de 40 % de l'accélération entraîne une augmentation de la consommation de 0,3 % (Table III.14).

En résumé, la consommation d'énergie est peu impactée par la variation de l'accélération comme le montre l'étude réalisée sur les 3 cycles de vitesse étudiés (Table III.14).

Table III.14 : résultat de consommation pour les différents trajets

Ville de départ	- 40 % (kWh (%))	Référence (kWh (%))	+ 40 % (kWh (%))
Lille	1,013 (-1,06)	1,024	1,026 (+0,23)
Roubaix	2,553 (-0,63)	2,569	2,576 (+0,24)
Orchies	4,792 (-0,77)	4,829	4,842 (+0,28)

III.3.1.e. Conclusion sur les effets liés au trajet

Différents effets liés au trajet effectué ont été étudiés ici. Le générateur de cycle permet de générer différents cycles de vitesses en découplant les différents effets. Ainsi il est possible de faire des études séparées de chaque facteur.

La vitesse est le facteur ayant le plus grand effet sur la consommation dans cette partie. Plus la vitesse augmente, plus la consommation d'énergie augmente. Réduire sa vitesse permet ainsi de diminuer sa consommation et d'avoir une autonomie plus grande pour le véhicule électrique.

Le deuxième effet qui a son importance est les arrêts effectués par le véhicule. Comme nous avons vu, les arrêts peuvent avoir un impact important sur la consommation en urbain. Par extrapolation, le nombre d'accélération et de décélération a donc un effet important sur la consommation d'énergie du véhicule.

L'étude sur les effets liés à l'accélération du véhicule a montré que son impact sur la consommation était moindre. Cela est dû à la faible variation du rendement de la traction électrique. La même conclusion peut être donnée sur la décélération du véhicule.

III.3.2. Effet du conducteur

Dans la partie précédente, différentes études découpées ont été effectuées pour voir l'effet des trajets sur la consommation d'énergie. Dans cette partie, différents couplages sont effectués pour étudier l'impact du conducteur sur la consommation du véhicule.

Le générateur est cette fois-ci utilisé avec les différents profils définis par le Projet CEVE. Comme les études précédentes, leur impact sur la consommation d'énergie est calculé sur trois profils différents. Le cycle urbain entraîne des différences de consommation de 5 % de moins pour le profil éco par rapport au profil moyen et 6 % de plus pour le profil sportif. Sur le cycle mixte, l'autonomie augmente de 7 % pour le profil éco et diminue de 7 % pour le profil sportif par rapport au conducteur moyen. Pour le cycle autoroutier, les différences de consommation sont de -6 % et 7 % respectivement pour le profil éco et le profil sportif par rapport au profil moyen (*Table III.15*).

Les profils de conduite impactent la consommation d'énergie du véhicule. Mais comme discuté dans la partie précédente, la vitesse a le plus gros impact sur la consommation du véhicule. Ainsi, le conducteur a plus d'impact en choisissant la vitesse à laquelle il roule qu'un impact réel sur la consommation. L'accélération a plus d'impact sur l'intensité du courant dans la batterie (voir Annexe H), ce qui a un impact sur le vieillissement de celle-ci [Jafari 15].

Ce résultat a toutefois quelques limites. En effet, notre modèle du conducteur est plutôt simple. Notamment, les oscillations de la vitesse qui sont un effet lié au conducteur et à sa réaction par rapport au trafic proche ne sont pas prises en compte dans cette thèse. Un modèle plus poussé de conducteur doit donc être réalisé pour voir si des effets qui ne sont pas pris en compte ont un impact sur la consommation.

Autre point important, les profils de conduite choisis ne reflètent pas la totalité des profils de conduite existants, ce qui peut engendrer aussi des variations moins importantes de la consommation d'énergie que dans la réalité. Une étude plus complète avec un panel plus important doit être réalisée pour compléter le nombre de profils et permettra d'avoir des profils plus distincts.

Table III.15 : Consommation de chaque profil en fonction du trajet effectué

Profil Ville de départ	Eco	Moyen	Sportif
Lille	0,98 (-4,8)	1,03	1,09 (+5,9)
Roubaix	2,44 (-6,9)	2,62	2,81 (+7,2)
Orchies	4,54 (-5,6)	4,81	5,14 (+6,9)

III.3.3. Étude de la consommation annuelle complète

Une étude de consommation annuelle a été réalisée dans la partie II.3. Cette étude est reprise en tenant compte des différents trajets définis dans cette partie et des différents conducteurs. L'étude est développée dans un premier temps pour le trajet urbain d'un personnel entre le campus Cité Scientifique et Lille. Puis elle est généralisée pour les 6 différents trajets.

III.3.3.a. variation saisonnière pour le trajet campus – Lille

La variation saisonnière sur un trajet est montrée dans cette partie. La consommation d'énergie est calculée pour un personnel de l'université travaillant sur le campus de la Cité Scientifique et habitant Lille. La température minimale et maximale moyenne mensuelle de l'année 2018 à Lille est donnée par la station météo de Lille-Lesquin (Figure II.45) [MétéoFrance 19]. Le personnel part travailler le matin vers 8 h, la température extérieure étant proche de la température minimale, celle-ci est considérée pour la simulation du premier trajet. De même, il quitte le travail aux alentours de 17 h où la température est proche de la maximale. Ainsi la température maximale est considérée pour ce trajet. Pour le mois de juillet, le soleil est considéré comme donnant une radiation moyenne de 500 W/m^2 . Le reste de l'année, le ciel est considéré comme nuageux ou de nuit, et donc sans effet du soleil. Les autres effets météorologiques comme les précipitations ne sont pas considérés.

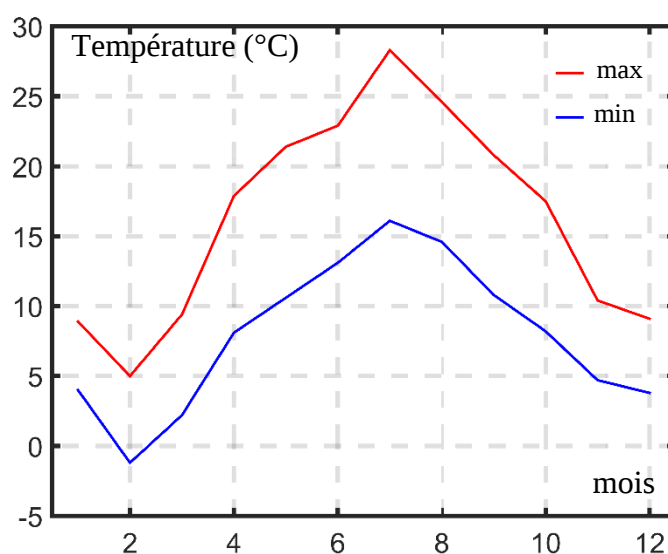


Figure III.29 : température moyenne à la station de Lille-Lesquin en 2018

Le chauffage a pour objectif de maintenir la température à 15°C contre 23°C pour la climatisation. La consommation varie mensuellement en fonction de l'utilisation du confort et de la température (Figure II.47). La consommation varie fortement entre février et juin sur le trajet du matin du fait de l'utilisation du chauffage. La consommation maximale est de $1,31 \text{ kWh}$ en février contre $1,08$ en juin. Une variation de 18 % est ainsi observée. Pour le trajet du soir, la consommation est impactée par le chauffage pendant l'hiver et par la climatisation en juillet.

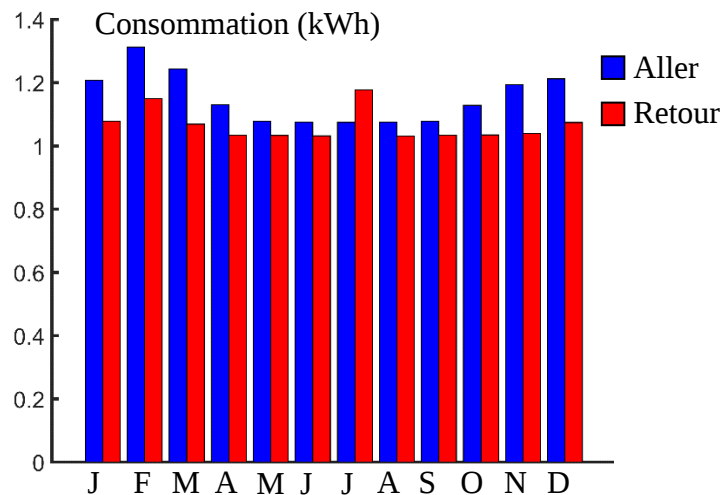


Figure III.30 : évolution saisonnière de la consommation d'énergie pour Lille

À cette variation annuelle, les trois profils de conduites présentées en III.2.2 sont considérés : éco, normal et sportif. Le conducteur moyen est à nouveau représenté par l'histogramme et la variation liée aux conducteurs par une barre d'erreur (Figure III.31). La variation liée aux différents profils est faible et est comprise entre 3 et 5 %.

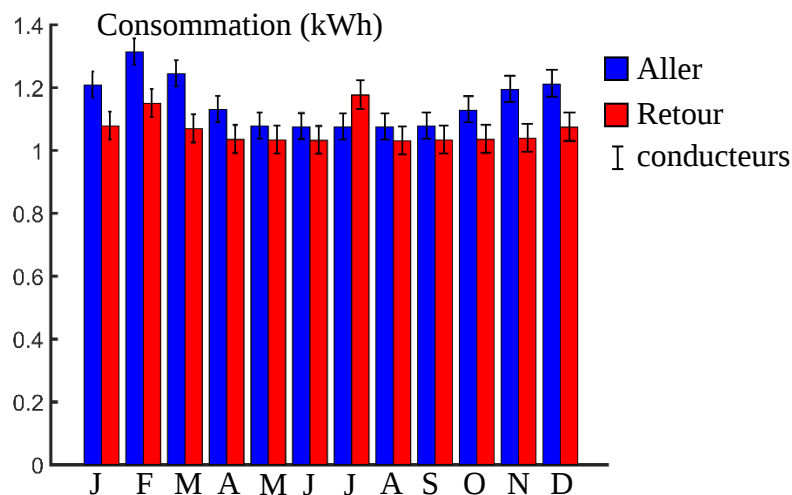


Figure III.31 : évolution saisonnière de la consommation d'énergie avec prise en compte du conducteur pour Lille.

III.3.3.b. comparaison saisonnière des 6 trajets types.

L'étude réalisée pour le cycle de Lille est également réalisée pour cinq autres cycles. Au total, 432 simulations sont réalisées pour évaluer l'impact des différents facteurs sur la consommation énergétique du véhicule électrique. Les facteurs étudiés sont la température, les différents trajets qui affectent la vitesse moyenne, les différents profils de conduites. Les différents facteurs sont ainsi couplés pour voir quels facteurs ont le plus d'impacts.

La consommation réalisée sur un trajet journalier, c'est-à-dire un aller et un retour, est considérée. Afin de pouvoir comparer les différents trajets, la consommation est moyennée sur 100 km. Les différents trajets sont ordonnés en fonction de la vitesse moyenne (voir Figure III.25). La variation de la consommation est donnée par des boîtes à moustaches⁹ (Figure III.32). Le trajet effectué a un grand impact sur la consommation d'énergie. La consommation moyenne passe de 13,2 kWh/100 km pour le trajet au départ de Villeneuve-d'Ascq à 24,2 kWh/100km pour la personne habitant Orchies. L'augmentation de consommation est de 85 %. La variation de consommation augmente aussi avec la vitesse. En effet, entre le profil consommant moins et celui consommant le plus, il y a une variation de consommation de 8,7 % pour le trajet avec la plus petite consommation contre une variation de 15,8 % pour le trajet autoroutier.

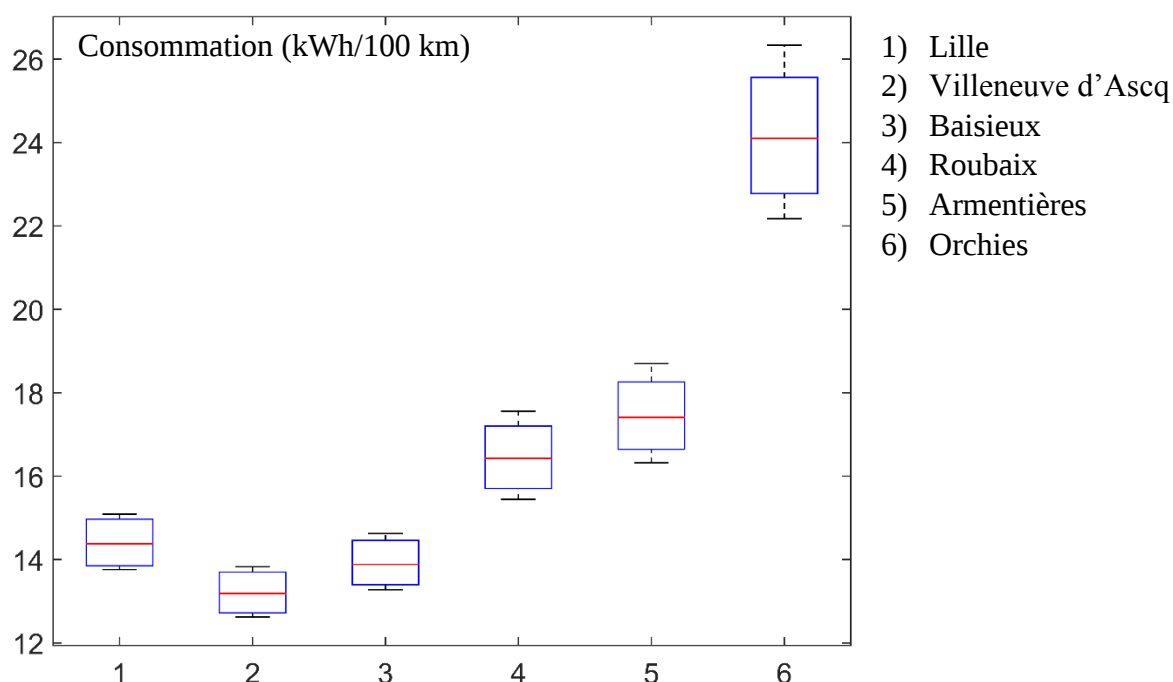


Figure III.32 : Énergie consommée de la partie traction en fonction du trajet

En tenant compte de toutes les énergies consommées par le véhicule, la vitesse est la variable impactant le plus la consommation d'énergie (Figure III.33). Le trajet de la personne habitant à Villeneuve-d'Ascq consomme 15,5 kWh/100 km contre 25,2 kWh/100 km pour celui d'Orchies. Une différence de 39 % est observée entre ces 2 moyennes.

Les différences de consommations entre le maximum et le minimum sur chaque trajet sont comprises entre 16,8 % pour le trajet de la personne habitant Baisieux et 20,1 % pour le trajet lillois. L'augmentation de la consommation due au confort est plus importante sur les petits trajets, l'amplitude de consommation augmentant le plus. Cela semble logique, vu qu'il faut plus de temps à basse vitesse pour faire le même nombre de kilomètres.

⁹ Une boîte à moustache est un moyen de représenter la variabilité. La boîte est réalisée à l'aide du 1^{er} et du 3^{ème} quartile et est coupée par la médiane. La moustache est donnée par les extremums.

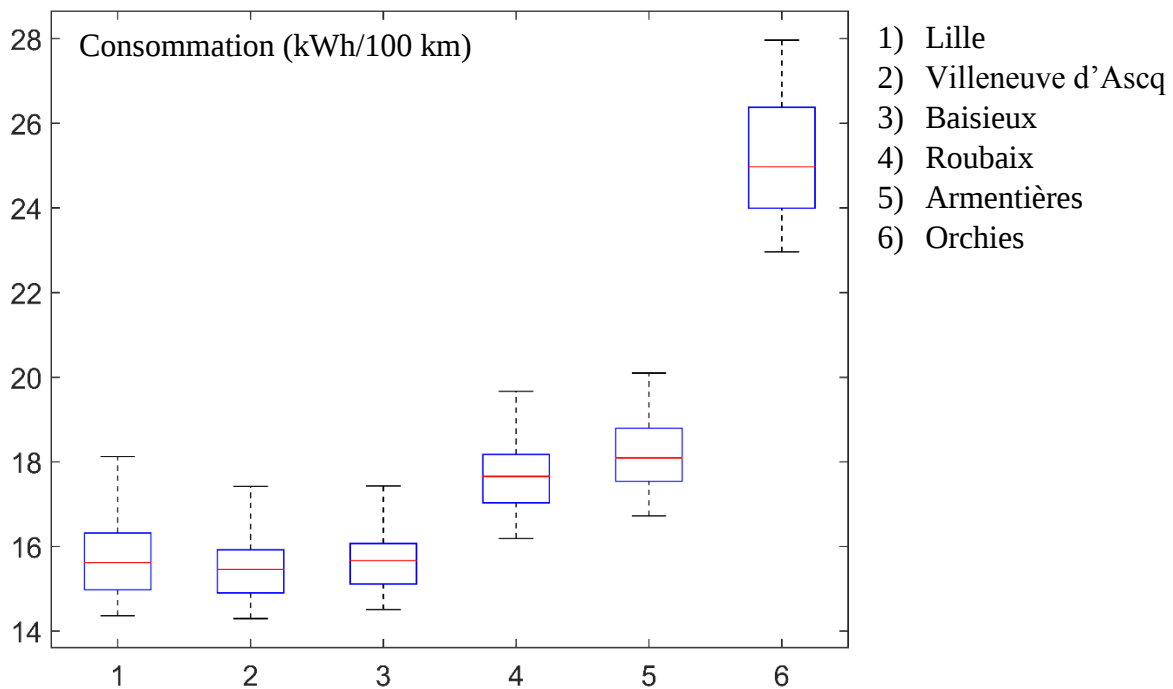


Figure III.33 : consommation moyennée du véhicule électrique en fonction du trajet

Dans le cadre du programme CUMIN, la consommation journalière est plus indiquée pour connaître la consommation quotidienne d'un personnel venant sur le campus (Figure III.34). La consommation d'une personne habitant proche du campus, sur Villeneuve-d'Ascq est beaucoup plus faible qu'une personne habitant sur Armentières ou Orchies dues à la distance plus grande à parcourir. Ainsi, une personne habitant Villeneuve-d'Ascq consomme environ 8,5 fois moins d'énergie qu'une personne d'Armentières ou d'Orchies à cause de la distance à parcourir.

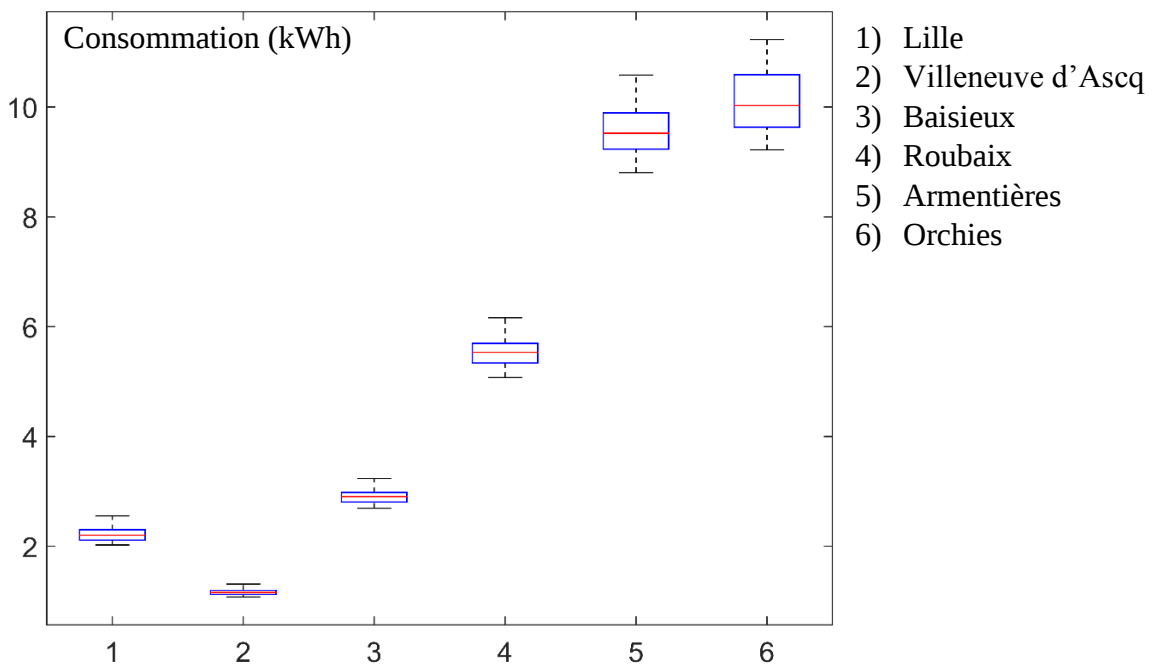


Figure III.34 : consommation du véhicule électrique en fonction du trajet

La consommation annuelle pour chaque profil et chaque trajet montre la forte variation due au trajet comparée à la faible variation créée par le profil de conduite (*Table III.16*).

Table III.16 : Consommation annuelle (MWh) pour chaque trajet et profil

Profil Domicile	Eco	Moyen	Sportif
Lille	0,435	0,452	0,470
Villeneuve d'Ascq	0,228	0,237	0,247
Baisieux	0,569	0,591	0,617
Roubaix	1,070	1,124	1,182
Armentières	1,849	1,945	2,051
Orchies	1,931	2,060	2,199

Pour le programme CUMIN, il est important de connaître la consommation annuelle de chaque groupe de personnels. La répartition des personnels en fonction de différentes zones d'habitations est prise en compte à partir de l'étude réalisée précédemment (voir I.3) (Figure I.12). La consommation moyenne annuelle par groupe montre l'importance de prendre en compte la consommation des trajets les plus lointains. Ces deux trajets ont la plus grande consommation d'énergie (Figure III.36). Sur cette étude, il est considéré que l'ensemble des conducteurs utilisant une voiture passent à l'électrique (5 000 véhicules). D'autres scénarios seront analysés dans la suite du programme CUMIN.

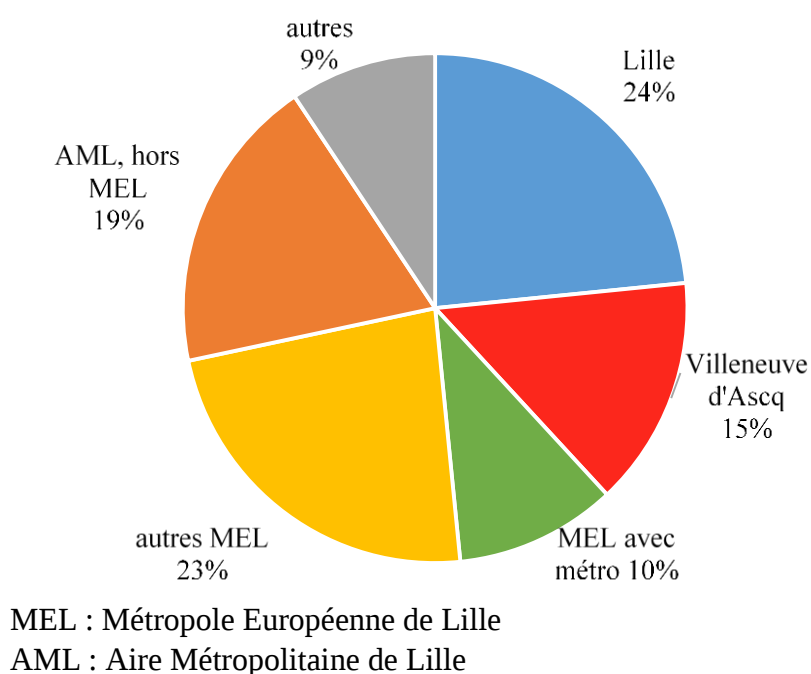


Figure III.35 : répartition des personnels dans les différentes zones d'habitations

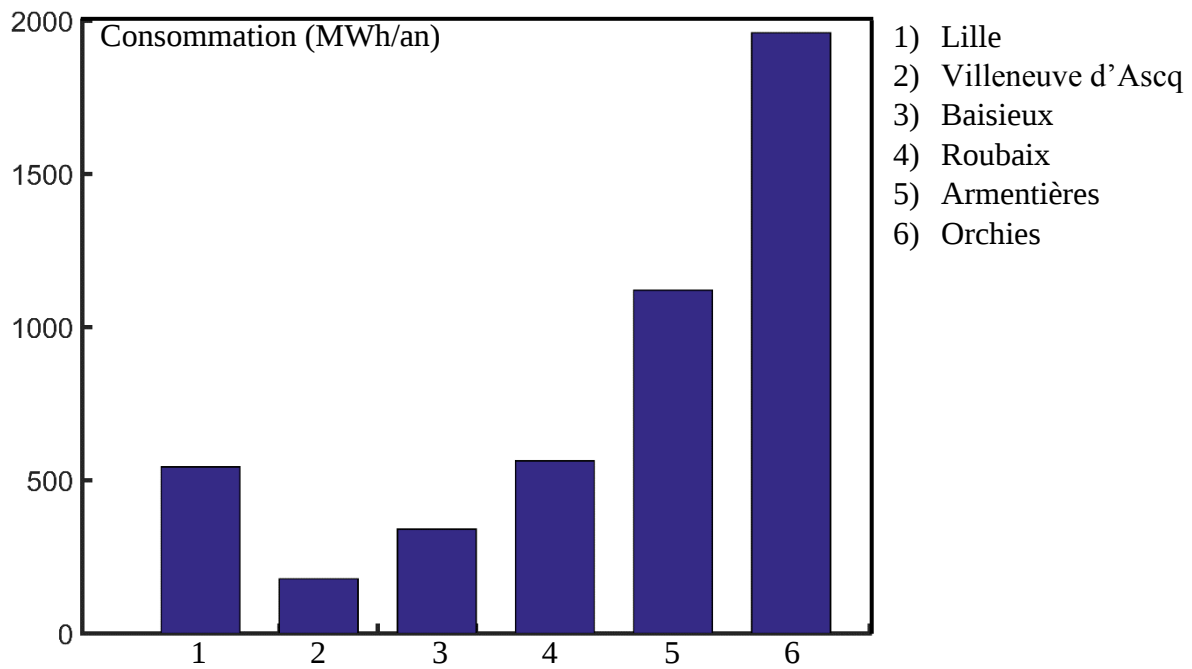


Figure III.36 : consommation annuelle moyenne du véhicule électrique en fonction du trajet

Les trajets définis dans cette thèse permettent d'avoir une première étude sur la consommation des véhicules venant sur le campus. Mais, il y a deux hypothèses qui peuvent avoir un impact sur ce résultat. Il a été considéré que le nombre de personnels dans chaque zone d'habitant utilisant leur voiture était homogène, ce qui n'est pas forcément le cas. Deuxième point, le choix des trajets n'est pas forcément représentatif de chaque groupe. Dans le cadre de cette thèse, ces aspects n'ont pu être investigués. Néanmoins, de futures recherches prévues dans le cadre du programme CUMIN permettront d'affiner les profils et les résultats obtenus.

III.4. Conclusion

Un générateur de cycle a été réalisé pour permettre d'étudier la variabilité de certains paramètres liés aux trajets sans en varier d'autres. Ce générateur permet de créer des profils à l'aide de tronçons en connaissant leur longueur et des vitesses maximales autorisées sur ces tronçons. Ce générateur est à approche « forward », c'est-à-dire que les contraintes liées aux caractéristiques du véhicule (vitesses maximales, accélérations maximales, aux limites de fonctionnements) peuvent être prises en compte sans avoir d'erreur sur la consommation d'énergie. D'autres générateurs issus de la littérature font des approximations lors de ces limitations. Le générateur a été validé par comparaison entre cycles générés et mesurés. Il en résulte une différence de consommation maximale de 5 % qui dépend de la vitesse et des aléas rencontrés sur la route.

À l'aide de ce générateur, une étude a été menée sur la consommation d'énergie en utilisant différents trajets. Il en résulte que la vitesse est le principal facteur de la consommation d'énergie d'un véhicule électrique en considérant un trajet sans aléas et sans utilisation du système de confort. Le deuxième contributeur est le nombre d'arrêts qui peut avoir un impact sur la consommation d'énergie. Par extension, cela induit que le nombre d'accélérations a son importance sur l'autonomie du véhicule électrique. Enfin, la variation de l'accélération a moins d'impact sur la consommation d'énergie du véhicule.

Des profils de conduite ont été ensuite définis par étude statistique à l'aide de donnée provenant de mesures réalisées dans le cadre du Projet de Conduite Efficace de Véhicule Électrique. Trois profils ont été déterminés à partir d'une analyse statistique des données de trajets réalisés par une centaine de conducteurs. Le générateur de cycle de conduite a été adapté pour utiliser les trois profils de conduite. Les variations de la vitesse, des accélérations et des décélérations ont été prises en compte dans la simulation du véhicule électrique. L'étude de ces différents profils a montré que, en dehors des cas extrêmes, le conducteur avait un faible impact. Ce résultat est notamment dû au fait que les profils trouvés en essayant d'éliminer l'effet du trafic sont au final assez proches. Les extremums ne sont pas notamment pris en compte dans ces profils.

Finalement, une étude de la consommation annuelle sur différents trajets a été effectuée. La vitesse a un impact important sur la consommation du véhicule électrique. Elle impacte fortement la consommation de la partie traction. La température a aussi une influence sur la variabilité de la consommation. En effet, selon la température, le système de confort est plus ou moins utilisé, ce qui augmente ou diminue la consommation du véhicule et par conséquent son autonomie. Le temps de parcours et la distance à parcourir influencent aussi la consommation du véhicule et sa variabilité. En effet, plus la distance ou le temps de parcours augmentent, plus la consommation et sa variabilité peuvent être importantes.

Dans le cadre du programme CUMIN, il a été montré que les trajets les plus lointains ont le plus d'impact sur la demande en énergie journalière. Cela est dû à la grande distance à réaliser et à la vitesse moyenne élevée sur ces trajets. Annuellement, les trajets lointains ont le plus grand impact sur la consommation. Ce dernier résultat est tout de même sujet à deux hypothèses fortes : la représentativité des trajets choisis et l'utilisation de la voiture dans chaque zone d'habitation qui peuvent varier et avoir un impact sur la consommation. Ces questions seront notamment traitées dans des travaux futurs du programme CUMIN qui vont venir compléter et affiner les travaux réalisés dans cette thèse.

Conclusion Générale

Le véhicule électrique est une solution pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et la pollution de l'air. Néanmoins, l'adoption du véhicule électrique est limitée, car son coût à l'achat est élevé, l'infrastructure de recharge n'est pas forcément accessible à tous et la durée de celle-ci peut être importante. Le plus gros frein est l'autonomie du véhicule qui est jugée faible et très variable. Différents facteurs peuvent faire varier cette autonomie. Ces facteurs sont classés en quatre groupes : le climat (température, vent...), les conditions routières (topographie, signalisation, trafic...), le comportement du conducteur et les facteurs liés au véhicule (comportement de la batterie). L'objectif de la thèse est d'étudier l'impact de différents facteurs sur la consommation d'énergie d'un véhicule électrique.

Cette thèse s'inscrit dans le programme Campus Universitaire à Mobilité innovante et Neutre en carbone de l'Université de Lille (CUMIN). Ce programme a pour but de réduire les émissions de polluants liés à la mobilité sur le campus de la Cité Scientifique de l'université. Il est envisagé de proposer des solutions de recharge avec de l'énergie issue de panneaux photovoltaïques pour amorcer la transition vers la mobilité électrique. Cette thèse vise ainsi à développer une méthode flexible d'estimation de la consommation d'énergie d'un véhicule électrique en vue de connaître l'énergie nécessaire à la recharge des véhicules électriques. Les différentes catégories de conducteurs (futur projet ADAM¹⁰) pourront ainsi être étudiées facilement sans devoir réaliser des campagnes d'essais fastidieuses et coûteuses.

Le **chapitre I** a permis de montrer l'intérêt d'une méthode flexible pour étudier l'impact de divers facteurs sur sa consommation. En effet, il est difficile d'évaluer l'impact d'un facteur sur la consommation à partir de mesures, car des aléas affectent les conditions de trajets. De plus, plusieurs facteurs peuvent impacter de manière différente la consommation. Un outil de simulation sera proposé pour implémenter cette méthode. Cet outil doit permettre d'étudier l'impact d'un facteur sur la consommation sans modifier d'autres facteurs (flexibilité). Dans le cadre de CUMIN, différents trajets domicile-travail ont été définis à partir de données issues d'une étude des déplacements domicile-travail de personne venant sur le campus.

Dans le **chapitre II**, un outil de simulation d'un véhicule électrique a été réalisé. La traction du véhicule a été modélisée et validée par comparaison avec des mesures prises sur véhicules. Une différence de consommation, entre la simulation et la mesure, inférieure à 3 % a été constatée. Le système de confort a été ensuite pris en compte. Les résistances de chauffage et une pompe à chaleur réversible ont été modélisées. Des essais sur véhicule ont permis de valider l'habitacle et le fonctionnement en climatisation de la pompe à chaleur.

À l'aide de l'outil de simulation développé, une étude de consommation du système de confort a été réalisée. Il en résulte une augmentation de la consommation comprise entre 10 et 40 % en fonction des conditions climatiques considérées. La perte d'autonomie est donc relative à cette surconsommation.

Une étude de la variation annuelle de la consommation d'un véhicule a été menée ensuite. Cette étude est basée sur des données issues du programme CUMIN (climat de Lille, trajet urbain). Il a été montré que la consommation varie de l'ordre de 20 % en fonction du mois de

¹⁰ Projet d'analyse de cycles de vitesses pour l'estimation de la consommation d'énergie de véhicule électrique

l'année. L'évaluation annuelle de la consommation montre qu'il n'est pas utile de prendre en compte la consommation de la climatisation pour le climat de Lille. Cette étude a été également réalisée pour les villes d'Helsinki (climat continental froid) et Athènes (climat méditerranéen) sur le même trajet que l'étude précédente. Les variations de la consommation sont plus importantes dans ces deux climats. L'étude annuelle montre pour ces deux villes qu'il faut prendre en compte la consommation du système de confort afin d'éviter des erreurs importantes sur la consommation.

Dans le **chapitre III**, un générateur de cycle a été réalisé. Ce générateur crée des profils de vitesse à partir des limitations de vitesse qui sont fonction de la distance. Ces informations sont récupérées d'un planificateur de trajet. Ce générateur a la particularité de prendre en compte les limitations internes du véhicule, afin d'éviter des erreurs sur la consommation. Le générateur a été validé par comparaison avec des trajets mesurés. Une différence maximale de 5 % a été constatée. Ce générateur permet de découpler les différents paramètres. Ainsi, il est possible de modifier la vitesse sans impacter l'accélération du véhicule et inversement. Ce générateur peut alors étudier l'impact sur la consommation d'un paramètre lié au trajet sans modifier les autres.

Différents trajets ont été ainsi générés. Il a été montré que leur consommation est affectée par différents paramètres (limitations de vitesse, nombres d'accélération et de décélération). La vitesse est le facteur le plus influant sur un trajet sans aléas et sans utilisation du système de confort. Le nombre d'arrêts a aussi un impact important sur la consommation. L'accélération a un effet moins important sur la consommation.

Différents profils de conduite ont ensuite été définis à partir d'une étude statistique de trajet réalisé sur un même parcours par une centaine de conducteurs. Trois profils ont ainsi été définis : éco, moyen et sportif. Le générateur de cycle a été adapté pour prendre en compte les trois profils de conduite. Une étude de sensibilité réalisée à l'aide des trois profils a montré que si l'on ne considère pas les profils extrêmes, que le profil conducteur a globalement un faible impact sur la consommation d'énergie du véhicule pour les trajets considérés.

L'étude de la variation annuelle de la consommation réalisée dans le chapitre II a été reprise et appliquée sur différents trajets définis dans le chapitre I. L'impact de la vitesse sur la consommation est important. La variation de la température joue sur la consommation du système de confort. Cela entraîne une forte variation de la consommation du véhicule et donc de son autonomie.

Dans le cadre de CUMIN, il a été montré que le trajet considéré pouvait créer de fortes variations sur la consommation. En effet, les trajets les plus lointains, à cause de la vitesse élevée et des distances à parcourir, et le trajet urbain le plus emprunté ont le plus fort impact sur la consommation annuelle.

Perspectives

Concernant l'outil de simulation réalisée, certaines hypothèses ont été choisies afin de le simplifier. Certaines doivent être évaluées plus précisément afin d'étudier leur impact sur l'autonomie du véhicule. La première concerne la batterie. La température de la batterie a été considérée constante à 20 °C pour toutes nos études. Une collaboration entre le L2EP et AMPÈRE dans le cadre de MEGEVH [German 20] ayant montré que la température de la

batterie avait un impact sur la consommation, une étude couplant ces deux effets est nécessaire. Concernant la pompe à chaleur, à court terme, une validation en mode chauffage doit être réalisée. À plus long terme, des modélisations plus fines doivent être réalisées afin notamment de voir l'impact du taux d'humidité sur la consommation et ainsi vérifier l'hypothèse prise dans cette thèse. La modélisation de la pompe réalisée pourrait aussi permettre de créer un modèle statique afin de réduire le temps de calcul de l'outil de simulation. Des optimisations de la gestion d'énergie d'un véhicule électrique en tenant compte du système de confort pourraient être proposées.

L'outil de simulation a permis ensuite de réaliser une étude de conditions climatiques. Dans cette thèse, nous nous sommes limités principalement à l'effet de la température dans un climat tempéré. Il serait intéressant d'étudier l'impact de températures extrêmes sur la consommation du véhicule électrique. Ceci est l'objet d'une thèse en cours dans le cadre du Laboratoire Associé International e-CAMPUS qui vise à étudier la réduction de la pollution émise par la mobilité sur le campus « Cité Scientifique » de l'Université de Lille et celui de l'Université du Québec–Trois-Rivières au Canada. Ainsi, des validations du système de confort dans différentes plages de températures seront réalisées. D'autres conditions climatiques n'ont pas été étudiées dans cette thèse : l'effet du vent et des précipitations. Des études complémentaires pourraient être réalisées pour voir l'impact de ces facteurs sur la consommation d'un véhicule électrique.

Un générateur de cycle a été développé dans cette thèse. Il génère des profils de cycles « idéaux », c'est-à-dire sans aléas. Une étude sur l'effet des aléas sur la conduite et la consommation des véhicules électriques doit être réalisée. Une amélioration du générateur de cycle pourrait être proposée afin de mieux les prendre en compte. Des études seront réalisées dans le cadre du projet ADAM (analyse de cycles de conduite) du programme CUMIN.

Concernant les profils de conduite, à court terme, la classification doit être affinée afin de mieux prendre en compte les profils extrêmes. Ceux-ci peuvent avoir un impact important sur l'autonomie du véhicule. À plus long terme, des recherches sur des modèles fins de conducteurs doivent être menées. Pour cela, des analyses statistiques plus poussées devraient être réalisées afin de mieux discerner les profils de conduites. Les oscillations de vitesses hautes fréquences provoquées par le conducteur et leur impact sur l'autonomie et le vieillissement des batteries pourront ainsi être menées.

Dans le cadre du programme CUMIN, cette thèse a développé une méthode implémentée dans un outil de simulation qui permet de calculer la consommation d'un véhicule électrique à partir de données issues de planificateurs de trajet. Les résultats de cette thèse vont permettre des études économiques pour étudier différents scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre sur le campus Cité Scientifique. Cette étude sera réalisée dans le projet TESS de CUMIN. L'outil de simulation créé pourra être étendu à d'autres véhicules. Pour augmenter l'adoption du véhicule électrique, il est possible de coupler l'outil de simulation avec un outil d'estimation d'émission de gaz à effet de serre. Un outil de comparaison de consommation et des émissions de gaz à effet de serre d'un véhicule électrique et d'un véhicule diesel a été initié en parallèle de cette thèse (voir annexe C). L'outil de comparaison pourra être amélioré à l'aide de la modélisation du système de confort réalisé dans cette thèse.

Annexe A. Abréviations

ACP : Analyse en Composante Principale

ADAM : projet “Advanced Drive Analysis for electro-Mobility of an eco-campus” du programme CUMIN.

AML : Aire Métropolitaine de Lille

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

CEVE : projet Conduite Efficente de Véhicules Électriques

COP : Coefficient de Performance

CRISAL : Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille

CUMIN : Campus Universitaire à Mobilité et Innovante et Neutre en carbone

EVE : projet Évaluation de la consommation de Véhicules Électriques du programme CUMIN

HVAC : Heat, Ventilation, and Air Conditioning system

IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies du Transport et de l’Aménagement des Routes

L2EP : Laboratoire d’Électrotechnique et d’Électronique de Puissance de Lille

LTE : Laboratoire Transport et Environnements de l’IFSTTAR

MEGEVH : Modélisation Énergétique et Gestion d’Énergie des Véhicules Hybrides et électriques

MEL : Métropole Européenne de Lille

NO_x : oxydes d’azotes

OBD : On Board Diagnostic – lecteur de diagnostic interne au véhicule

OCV : Open Circuit Voltage – Tension en circuit ouvert

PM : Particulate Matter, Particules fines en suspension dans l’air

REM : Représentation Énergétique Macroscopique

SMC : Structure Maximale de Commande

SoC : State of Charge - État de charge de la batterie

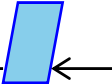
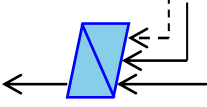
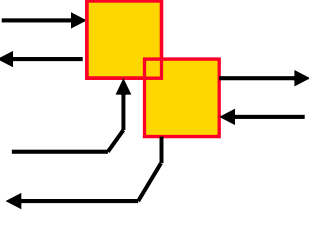
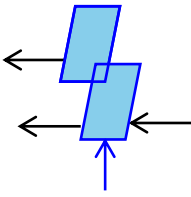
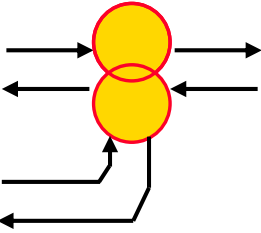
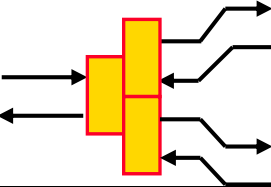
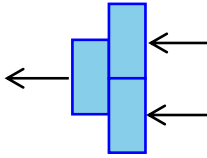
TVES : laboratoire Territoire, Ville Environnement et Société

VE : Véhicule Électrique

Annexe B. Éléments de la REM

Cette annexe est réalisée à partir des travaux de [Lhomme 07] et [Mayet 16]. Les différents éléments de la REM sont donnés par la Table B.1. Une librairie et plus d'information sur la REM peuvent être trouvées sur le site du formalisme [EMR 19].

Table B.1 : Éléments de la REM et de la commande

Eléments de la REM		Eléments de la commande	
	Variables d'action et de réaction		Signal de commande obligatoire
0	Capteur de mesure		Signal de commande optionnel
	Conversion mono-physique		Inversion directe
	Conversion multi-physique		
	Accumulation		Inversion indirecte
	Couplage mono-physique		Inversion du couplage
	Couplage multi-physique		
	Aiguillage		Inversion de l'aiguillage
	Source d'énergie		Stratégie

Annexe C. Comparaison de la consommation d'un véhicule électrique et d'un véhicule diesel

Dans cette annexe, les consommations et les émissions de CO₂ de deux véhicules équivalents, un diesel et un électrique, sont comparés. Le véhicule électrique pris en compte pour la comparaison est la Renault Zoé qui a été modélisée dans le chapitre II. Le véhicule de comparaison est une Renault Clio diesel de 2007. Ce véhicule est du même segment que la Renault Zoé. Cette annexe est l'extension de l'article [Noura 18].

C.1. Modélisation du véhicule thermique

Le véhicule diesel a un moteur à combustion connecté à la boîte de vitesse via un embrayage. Cet embrayage est considéré comme parfait et ne sera pas modélisé ici. La boîte de vitesse est reliée aux roues par un différentiel. Les roues sont connectées au châssis et aux freins du véhicule. Il est à noter que le poids de la Renault Clio est plus faible que la Renault Zoé, 1185 kg contre 1468 kg. Le schéma structurel du véhicule est présenté à la Figure C.1.

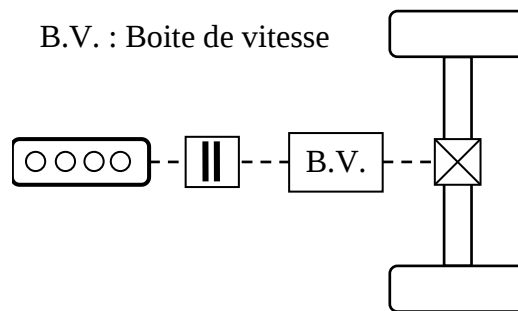


Figure C.1 : schéma structurel du véhicule thermique

Le moteur à combustion est modélisé en statique avec une cartographie de consommation (Figure C.2) [Trigui 18].

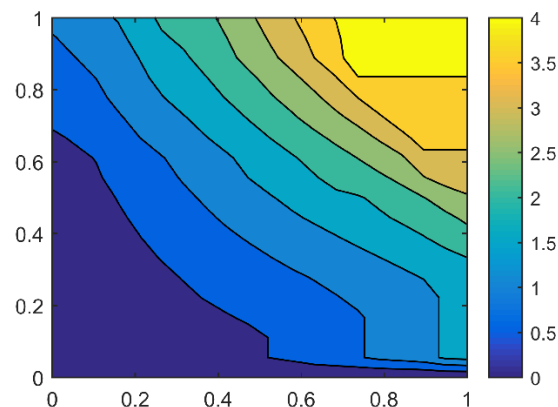


Figure C.2 : cartographie de consommation du moteur thermique [Trigui 18]

Le couple provenant du moteur thermique est transmis aux roues par la boîte de vitesse (C.1). La boîte de vitesse est composée de différents rapports de vitesse. Ces rapports sont calculés à partir des cycles simulés.

$$\begin{cases} \Gamma_{gb} = k_{gb} \Gamma_{ICE} \eta_{gb}^{k_{tr}} \\ \Omega_{gb} = k_{gb} \Omega_{wh} \end{cases} \text{ with } \begin{cases} k_{gb} = 1 \text{ si } P_{gb} \geq 0 \\ k_{gb} = -1 \text{ si } P_{gb} < 0 \end{cases} \quad (C.1)$$

Les roues transforment la rotation en translation :

$$\begin{cases} F_{wh} = \frac{\Gamma_{gb}}{R_{wh}} \\ \Omega_{wh} = \frac{V_{veh}}{R_{wh}} \end{cases} \quad (C.2)$$

La modélisation du châssis et de l'environnement est équivalente à celle du véhicule électrique (voir II.1.2). La REM est utilisée pour organiser le modèle du véhicule thermique (Figure C.3). La commande est réalisée par inversion du modèle du véhicule (voir II.1.2). La stratégie de freinage n'utilise que le frein mécanique pour le véhicule thermique.

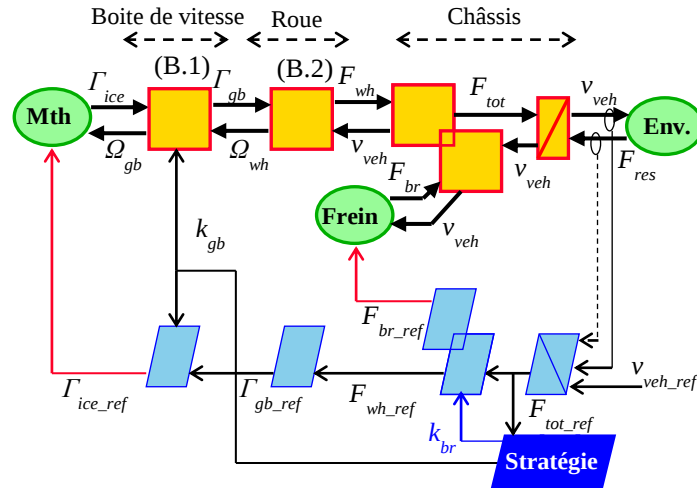


Figure C.3 : REM du véhicule thermique

C.2. Validation du modèle

La validation de la Renault Clio est réalisée sur 2 trajets différents : le premier est un trajet péri-urbain. Le second est un trajet urbain. Un GPS et un lecteur OBD qui permet de lire le bus CAN du véhicule sont utilisés. Les données sont collectées via l'application Torque [Torque 19] sur un smartphone.

a) Trajet péri-urbain

Le trajet péri-urbain est le trajet entre l'université et Baisieux avec un retour par l'autoroute. Le profil de vitesse est donné en Figure C.4.

La consommation en carburant est de 4.98 l/100 km pour la simulation et de 4,88 l/100 km pour le cycle mesuré (Figure C.5). L'erreur sur la consommation est de l'ordre de 0,7 % sur ce cycle (Table C.1).

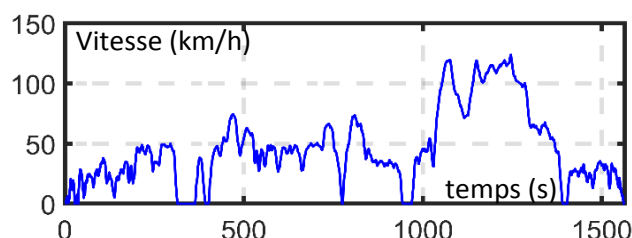


Figure C.4 : Cycle de vitesse péri-urbain

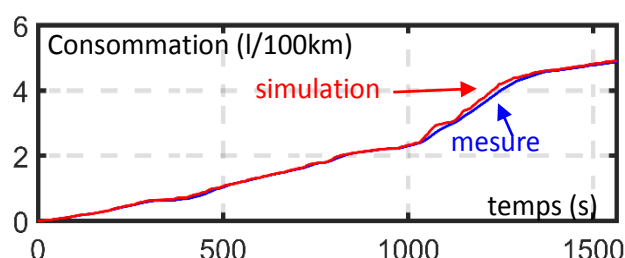


Figure C.5 : consommation de carburant

Table C.1 : consommation mesurée et simulée sur le trajet péri-urbain

	Simulation	Mesure
Consommation (l/100 km)	4,909	4,875
Erreur (%)	0,7	Ref

b) Trajet urbain

De même, le modèle est validé sur un trajet urbain (Figure C.6). Le trajet utilisé est un trajet aller-retour entre l'université et le centre de Lille. Le profil de vitesse a plus d'oscillation que le précédent. La consommation du véhicule simulé est de 5,7 l/100km. La consommation mesurée est de 5,3 l/100 km (Figure C.7). L'erreur sur la consommation est de 5,2 %. Elle est plus élevée que sur le trajet péri-urbain.

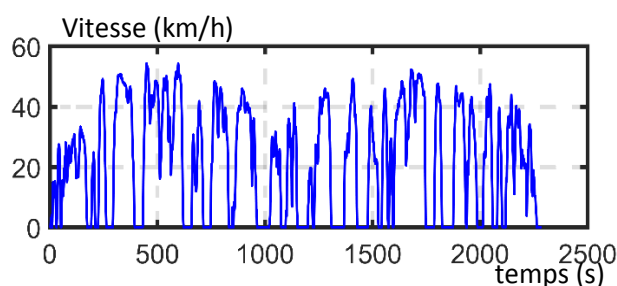


Figure C.6 : cycle de vitesse urbain

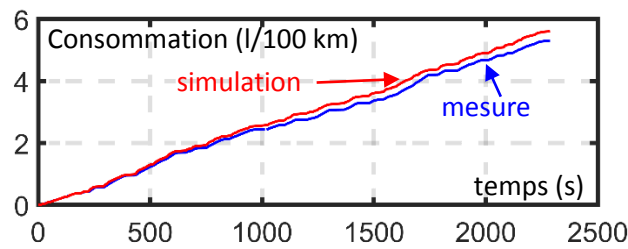


Figure C.7 : consommation du véhicule thermique

Table C.2 : consommation mesurée et simulée sur le trajet urbain

	Simulation	Mesure
Consommation (l/100 km)	5,33	5,67
Erreur (%)	5,22	Ref

C.3. Comparaison du modèle électrique et du modèle thermique

Les deux véhicules sont comparés en termes de consommations d'énergie et d'émissions de CO₂ sur 4 cycles de vitesse différents. Les 2 premiers sont des cycles standards. Le NEDC et le WLTC. Les 2 autres sont 2 cycles réels que nous avons utilisés précédemment pour valider les véhicules. Pour avoir une bonne comparaison, les systèmes de confort sont considérés comme éteints.

a) Cycle normalisé NEDC

Le 1^{er} cycle considéré est le cycle d'homologation des véhicules qui étaient utilisés en Europe avant septembre 2018, le NEDC (Figure C.8). Ce cycle est très utilisé dans les études des émissions du puits à la roue (WTW). La consommation des deux véhicules est ramenée au kilomètre pour avoir une comparaison entre les différents cycles qui ont des distances différentes. La consommation du véhicule diesel est de 0,46 kWh contre 0,14 kWh pour le véhicule électrique (Figure C.9). Le véhicule électrique consomme 3 fois moins d'énergie que le véhicule diesel.

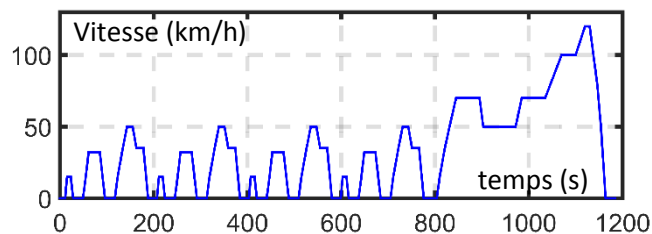


Figure C.8 : cycle NEDC

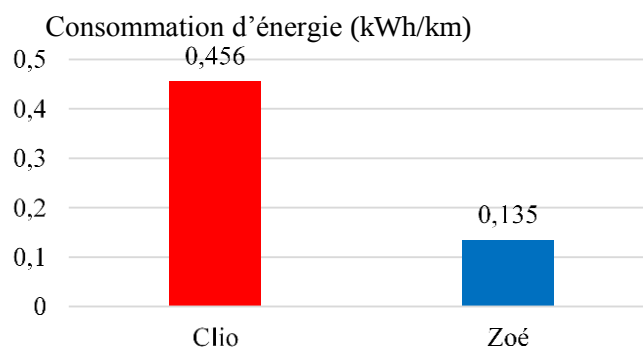


Figure C.9 : consommation d'énergie pour le cycle NEDC

Les émissions de CO₂ du véhicule thermique sont calculées à partir du standard donné par le Joint Research Center (JRC) de l'Union Européenne [JRC 14]. Les émissions de CO₂ du véhicule thermique sont décomposées en 2 parties. La 1^{ère} partie des émissions concerne du puits aux réservoirs du véhicule (WTT). Cette partie concerne les émissions pour extraire le pétrole, le transporter et le raffinage en carburant. Pour le véhicule thermique, sur le cycle NEDC, cela représente une émission de 24 g CO_{2eq} /km. La 2^{ème} partie est l'émission du réservoir à la roue (TTW). Cela concerne l'utilisation du carburant dans le moteur thermique pour faire avancer le véhicule. Les émissions atteignent 127 g CO_{2eq} /km. Au total, le véhicule thermique émet 151 g/km.

Pour le véhicule électrique, les émissions du réservoir à la roue sont nulles. La production d'électricité peut émettre différents taux de CO₂ en fonction du moyen de production. Pour voir la diversité des émissions de CO₂, trois exemples sont utilisés : le 1^{er} concerne le mix français qui est bas en carbone par l'utilisation importante de centrale nucléaire notamment. Le mix européen représente la moyenne des émissions des pays de l'Union Européenne. Le dernier exemple est le mix polonais qui est un mix très carboné à cause de l'utilisation de centrale à charbon qui représente en moyenne 80 % de la production d'électricité. Les taux d'émissions proviennent de l'Agence Européenne de l'Énergie pour l'année 2016 [EEA 18]. Les mix de production peuvent varier fortement en fonction de la période de l'année, une variation de 20 % sera utilisée pour voir la variabilité des émissions. Les émissions sont très différentes en fonction du mix choisi. Le VE émet en moyenne, 8 g/km en France, contre 40 avec le mix européen et 105 avec le mix Polonais. Avec cette moyenne, les 3 émissions de CO₂ sont inférieures aux émissions de CO₂ du véhicule thermique. D'au moins 31 % pour le cas le moins favorable. Avec une forte variation de 20 % pour le mix Polonais, il est susceptible dans certains cas, certes minoritaires, que le véhicule électrique émet plus que le véhicule thermique (Figure C.10).

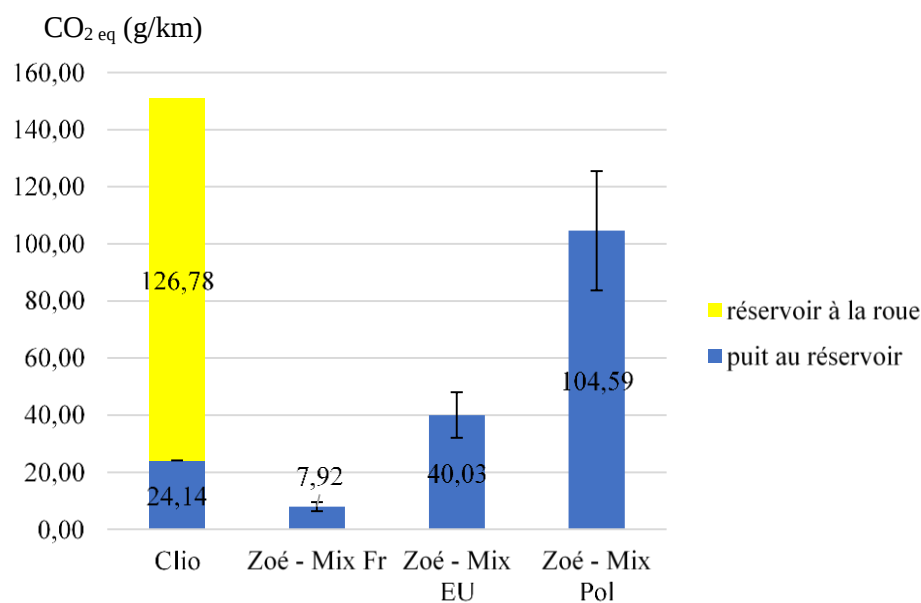


Figure C.10 : émission de gaz à effet de serre pour le cycle NEDC

b) Cycle normalisé WLTC

De même pour le second cycle standard, le WLTC qui est le nouveau cycle d'homologation de l'Union Européenne (Figure C.11), la consommation des 2 véhicules est calculée (Figure C.12). Pour le véhicule thermique, la consommation de 0,48 kWh/km contre 0,17 pour le véhicule électrique. La consommation est environ 3 fois supérieure par rapport au véhicule électrique.

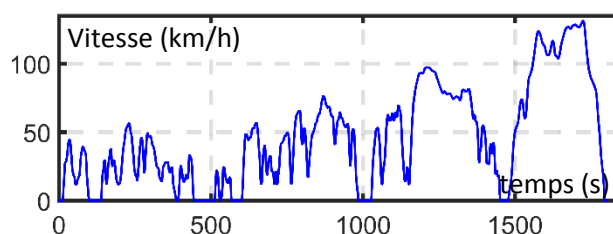


Figure C.11 : cycle WLTC

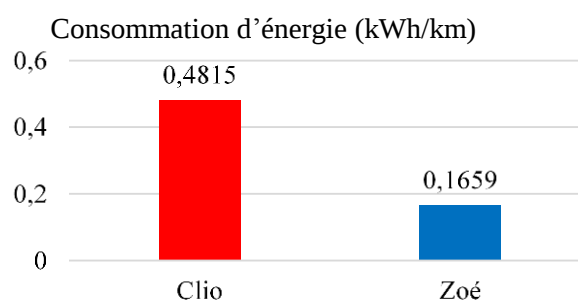


Figure C.12 : consommation d'énergie pour le cycle WLTC

Les émissions de CO₂ de la Renault Clio sont de 26 g/km du puits au réservoir et de 137 g/km du réservoir à la roue. Ce qui donne un total de 163 g/km de CO_{2eq}. Pour le véhicule électrique, les émissions de gaz à effet de serre sont de 10 g/km pour le mix français, 49 g/km pour le mix européen et 128 g/100 km. Le véhicule électrique en moyenne permet une réduction de 21 % à 94 % selon le mix d'énergie choisi sur le cycle WLTC (Figure C.13).

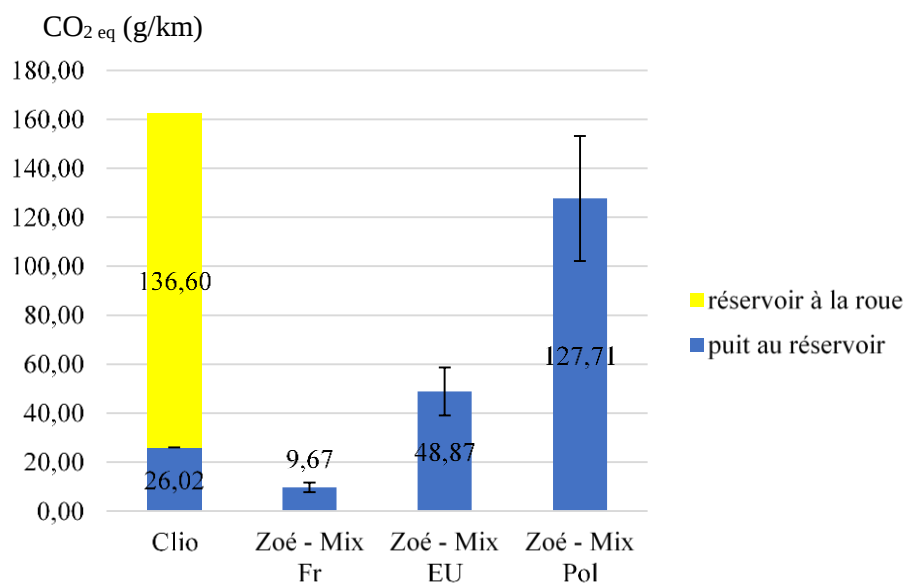


Figure C.13 : émission de gaz à effet de serre pour le cycle WLTC

c) Trajet péri-urbain

Pour le cycle péri-urbain, le véhicule thermique consomme 0,5 kWh/km contre 0,17 pour le véhicule électrique. A nouveau, le véhicule électrique consomme 3 fois moins d'énergie que le véhicule thermique (Figure C.14).

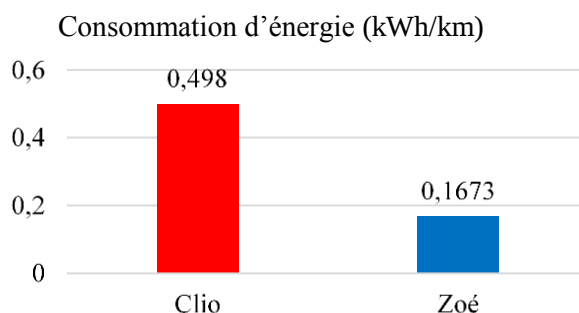


Figure C.14 : consommation d'énergie pour le cycle réel péri-urbain

Pour le véhicule diesel, les émissions de gaz à effet de serre sont de 27 et 140 g/km pour respectivement, du puits au réservoir et du réservoir à la roue. Au total, le véhicule émet 167 g CO_{2eq} /km pour le cycle péri-urbain. Pour le véhicule électrique, les émissions varient de 10 à

129 g/km. Les émissions de gaz à effet de serre sont réduites de l'ordre de 23 à 94 % (Figure C.15).

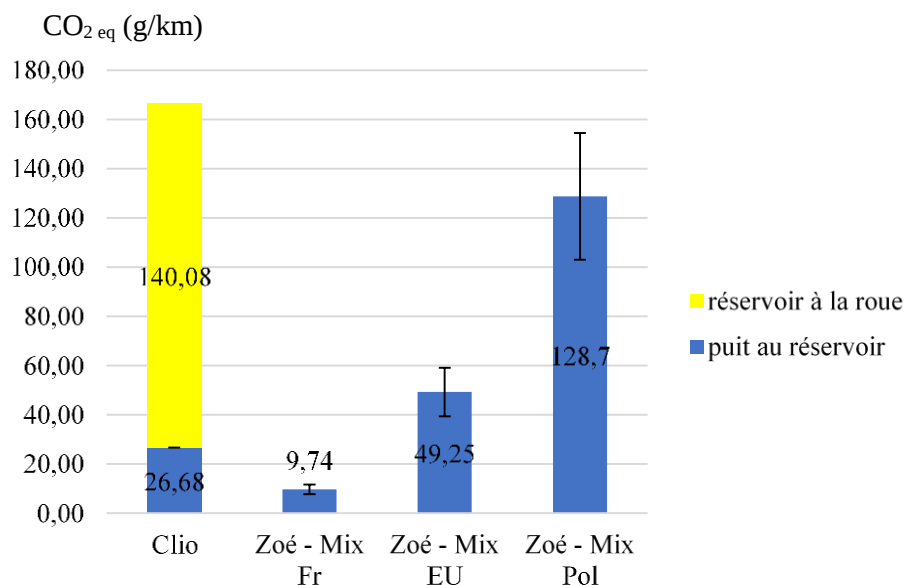


Figure C.15 : émission de gaz à effet de serre pour le cycle péri-urbain

d) Trajet urbain

La consommation du véhicule diesel est de 0,57 kWh/km. Le véhicule électrique consomme 0,15 kWh/ km. Le véhicule électrique consomme 4 fois moins d'énergie dans ce cas que le véhicule thermique (Figure C.16).

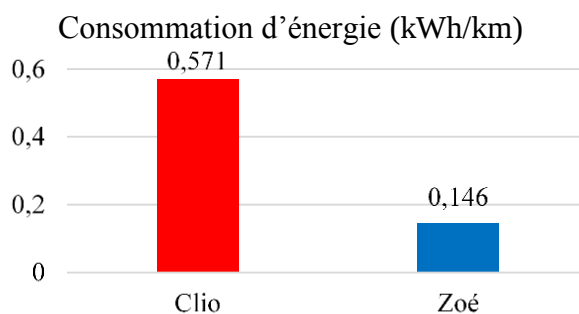


Figure C.16 : consommation d'énergie pour le cycle réel urbain

Les émissions du véhicule thermique sont de 30 g CO_{2eq}/km et de 159 g/km pour respectivement du puit au réservoir et du réservoir à la roue. Ce qui donne une émission du puit à la roue de 189 g/km. Pour le véhicule électrique, les émissions sont respectivement de 9 g/km pour la France, 43 g/km et 113 g/km, le mix européen et le mix polonais. Les émissions de gaz à effet de serre sont réduites de 40 à 95 % selon le mix d'électricité (Figure C.17).

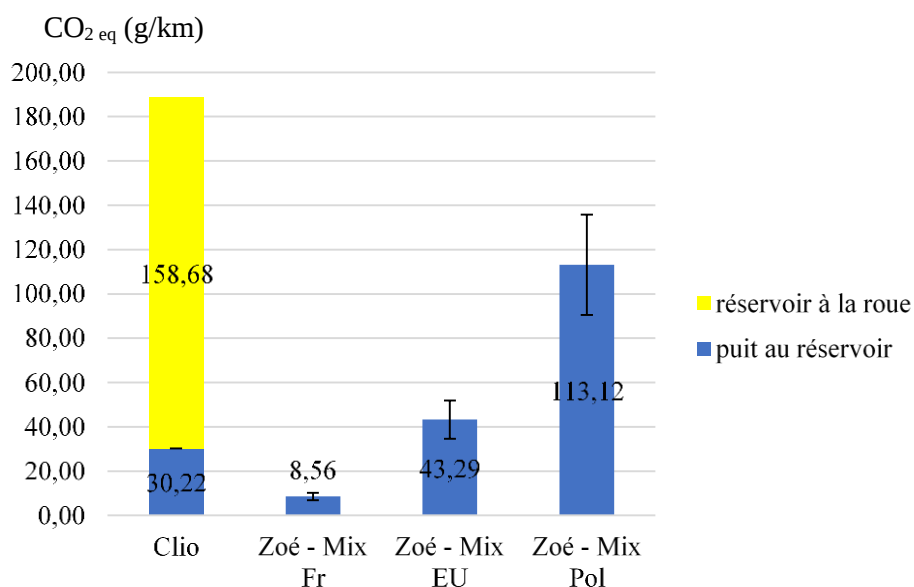


Figure C.17 : émission de gaz à effet de serre pour le cycle urbain

C.4. Conclusion

La Renault Zoé consomme 3 fois moins d'énergie que la Renault Clio, malgré son poids plus important, 1468 kilos à vide contre 1185 kilos pour la Clio. Le véhicule électrique permet de réduire en moyenne les émissions de gaz à effet de serre. Mais cette réduction peut être fortement variable en fonction du mix d'électricité et du cycle de vitesse choisie. En effet, en ville, le véhicule électrique permet de réduire fortement la pollution même avec un mix d'électricité fortement carboné. Pour les cycles péri-urbains, le meilleur rendement du moteur diesel et le poids supplémentaire du véhicule électrique expliquent la plus faible différence d'émission avec le cycle le plus carboné, ici, le mix polonais. Néanmoins, le véhicule électrique reste toujours un moyen de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour les mixes bas carbone comme le mix français, l'utilisation du véhicule électrique permet une réduction significative des émissions de CO₂, quel que soit le cycle de vitesse utilisé.

Dans cette annexe, il n'est question que de la comparaison d'un véhicule électrique avec un véhicule diesel en termes de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂, il serait intéressant de compléter la comparaison avec un véhicule essence de même profil puis de faire une étude selon différentes classes de véhicules. Il serait aussi pertinent de regarder les émissions d'autres polluants, notamment des oxydes d'azotes (NO_x).

Annexe D. Ajout à la modélisation de l'habitacle du véhicule

Cette annexe décrit les formules pour prendre en compte les convections naturelles (libres) et forcées qui se produisent près des parois de l'habitacle. Cette annexe est basée sur les travaux de [Horrein 15]. La puissance thermique P_{par_amb} qui s'échange entre les parois et l'air dépend d'un coefficient de convection K_{air_par} et de la différence de températures entre les deux milieux :

$$P_{par_amb} = K_{air_par}(T_{par} - T_{amb}) \quad (D.1)$$

Le coefficient K_{air_par} est le produit entre l'aire de la surface d'échange A_{par} et du coefficient décrivant l'échange convectif h_{air_par} :

$$K_{air_par} = A_{par}h_{air_par} \quad (D.2)$$

Ce coefficient h peut se décomposer en convection libre h_{libre} et en convection forcée $h_{forcé}$:

$$h_{air_par} = \sqrt[3]{h_{libre}^3 + h_{forcé}^3} \quad (D.3)$$

Les deux convections sont déterminées en fonction du nombre de Nusselt Nu , de la conductivité thermique de l'air λ et du volume d'air V_{air} :

$$\begin{cases} h_{libre} = Nu_{libre} \frac{\lambda}{V_{air}} \\ h_{forcé} = Nu_{forcé} \frac{\lambda}{V_{air}} \end{cases} \quad (D.4)$$

Le nombre de Nusselt est défini en fonction des nombres de Prandtl Pr et de Grashof Gr pour la partie libre. Pour la partie forcée, le nombre de Nusselt est défini à l'aide des nombres de Reynolds Re et de Prandtl Pr :

$$\begin{cases} Nu_{libre} = 0,68 + 0,67 Gr Pr \left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{-\frac{4}{9}} \\ Nu_{forcé} = (0,037 Re^{0,8} - 871) \sqrt[3]{Pr} \end{cases} \quad (D.5)$$

Le nombre de Prandtl Pr dépend de la capacité calorifique de l'air cp_{air} , de la conductivité thermique de l'air λ et de la viscosité dynamique μ :

$$Pr = \frac{\mu cp_{air}}{\lambda} \quad (D.6)$$

Le nombre de Grashof Gr est défini en fonction de la constante gravitationnelle g , de la viscosité de l'air α , de la différence de température entre les milieux, du volume d'air V_{air} et la viscosité cinématique ν :

$$Gr = \frac{g\alpha (T_{par} - T_{amb})V_{air}}{\nu^2} \quad (D.7)$$

Le nombre de Reynolds dépend de la vitesse du fluide, du volume d'air V_{air} et la viscosité cinématique ν :

$$Re = v_f \frac{\sqrt[3]{V_{air}}}{\nu} \quad (D.8)$$

La vitesse du fluide dépend de la vitesse du véhicule pour la partie extérieure. Pour la convection entre les parois et l'habitacle, la vitesse du fluide est donnée en fonction de la constante aérodynamique de l'air k , le débit massique de l'air qm_{vent} , le volume d'air déplacé V_{int} et la densité de l'air ρ :

$$v_f = \frac{k}{\rho V_{int}^{\frac{2}{3}}} qm_{vent} \quad (D.9)$$

Annexe E. Complément à la modélisation de la climatisation

Modélisation d'un échangeur de chaleur

La modélisation de l'échangeur de chaleur est expliquée plus en détail dans cette annexe. Un échangeur de chaleur permet le transfert de chaleur entre le réfrigérant et l'air ou inversement. Cet échangeur est un tube de métal plus ou courbé pour avoir plus ou moins de surface pour transférer la chaleur (Figure E.1).

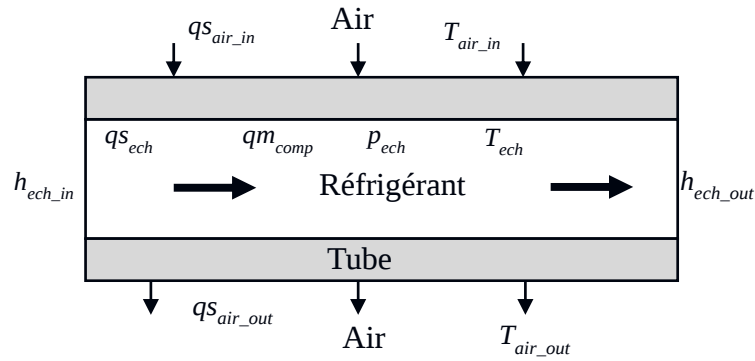


Figure E.1 : schéma de l'échangeur de chaleur considéré

À l'aide du principe de conservation de l'énergie, il est possible de donner l'équation qui régit le transfert d'énergie calorifique entre le réfrigérant et l'air. L'équation dépend de l'énergie interne spécifique u_{ech} , le volume de l'échangeur V_{ech} , la densité du réfrigérant ρ , le flux d'entropie qs_{ech} et la température T_{ech} , du débit massique du réfrigérant donnée par le compresseur qm_{comp} et de la différence d'enthalpie entre l'entrée h_{ech_in} et la sortie h_{ech_out} du réfrigérant.

$$V_{ech} \frac{d(\rho u_{ech})}{dt} = qs_{ech} T_{ech} + qm_{comp} (h_{ech_in} - h_{ech_out}) \quad (E.1)$$

L'énergie interne à l'échangeur u_{ech} peut être exprimée en fonction de la pression dans l'échangeur p_{ech} , et des propriétés moyennes du réfrigérant (enthalpie moyenne h et densité moyenne ρ) :

$$u_{ech} = (h(p_{ech}) - \frac{p_{ech}}{\rho(p_{ech})}) \quad (E.2)$$

L'équation (E.1) est modifiée par (E.2) :

$$V_{ech} \frac{d(\rho h(p_{ech}) - p_{ech})}{dt} = qs_{ech} T_{ech} + qm_{comp} (h_{ech_in} - h_{ech_out}) \quad (E.3)$$

La fonction $\rho h(p_{ech})$ peut être exprimée comme une distribution entre les densités et les enthalpies de saturation à l'état liquide et à l'état gazeux. La répartition est réalisée par le taux moyen de vide¹¹ $\bar{\gamma}$:

$$\rho h(p_{ech}) = (1 - \bar{\gamma})\rho_l h_l + \bar{\gamma}\rho_g h_g \quad (E.4)$$

L'équation (E.4) ne dépend que de la pression. Ainsi, sa dérivée peut être réécrite comme une dérivée partielle de la pression :

$$\frac{d\rho h(p_{ech})}{dt} = \left[(1 - \bar{\gamma}) \frac{\partial \rho_l h_l}{\partial p} + \bar{\gamma} \frac{\partial \rho_g h_g}{\partial p} + (\rho_g h_g - \rho_l h_l) \frac{\partial \bar{\gamma}}{\partial p} \right] \frac{dp_{ech}}{dt} \quad (E.5)$$

Le système entre crochets est appelé K_{ech} dans la suite et ses différents paramètres sont donnés par des abaques qui dépendent de la pression. Ainsi on obtient l'équation régissant le système qui correspond à l'équation (II.37) :

$$V_{ech} K_{ech}(p_{ech}) \frac{d(p_{ech})}{dt} = q s_{ech} T_{ech} + q m_{comp} (h_{ech_in} - h_{ech_tot}) \quad (E.6)$$

Pour respecter les principes de la REM, les termes de droites sont remplacés à l'aide des égalités de puissance par des pressions et des débits volumiques. Ainsi les débits volumiques équivalents qv_{ech} , qv_{ech_in} et qv_{ech_out} sont définis respectivement par les équations (E.7) à (E.9) :

$$qv_{ech} = \frac{q s_{ech} T_{ech}}{p_{ech}} \quad (E.7)$$

$$qv_{ech_in} = \frac{q m_{comp} h_{ech_in}}{p_{ech}} \quad (E.8)$$

$$qv_{ech_out} = \frac{q m_{comp} h_{ech_out}}{p_{ech}} \quad (E.9)$$

À l'aide des trois équations précédentes, l'équation (E.6) peut être réécrite :

$$V_{ech} K_{ech}(p_{ech}) \frac{d(p_{ech})}{dt} = qv_{ech} p_{ech} + qv_{ech_in} p_{ech} - qv_{ech_out} p_{ech} \quad (E.10)$$

L'équation aux dérivées ne dépend plus que de la pression, elle est mise sous forme de Laplace, avec s la variable de Laplace :

$$V_{ech} K_{ech}(p_{ech}) p_{ech} s = qv_{ech} p_{ech} + qv_{ech_in} p_{ech} - qv_{ech_out} p_{ech} \quad (E.11)$$

La transformée inverse de Laplace de cette équation est :

$$\ln\left(\frac{p_{ech}}{p_{init}}\right) = \int_0^t \frac{1}{V_{ech} K_{ech}(p_{ech})} (qv_{ech} + qv_{ech_in} - qv_{ech_out}) dt \quad (E.12)$$

¹¹ Le taux de vide est une fonction paramétrique qui caractérise le réfrigérant, et dépend de la pression, une expression de cette valeur est disponible dans [Mc Kinley 08].

Avec p_{init} , la pression initiale dans l'échangeur. Pour avoir la pression dans l'échangeur, il suffit d'utiliser l'exponentielle. Ainsi l'équation régissant la pression de manière causale est :

$$p_{ech} = p_{init} \exp\left(\frac{1}{V_{ech}} \int_0^t \frac{1}{K_{ech}} (qv_{ech} + qv_{ech_in} - qv_{ech_out}) dt\right) \quad (E.13)$$

Pour respecter les principes de la REM, et afin d'avoir 2 entrées sorties du bloc d'accumulation, on pose :

$$qv_{ech_tot} = qv_{ech_out} - qv_{ech} \quad (E.14)$$

Ainsi, on obtient l'équation régissant la variation de pression dans l'échangeur :

$$p_{ech} = p_{init} \exp\left(\frac{1}{V_{ech}} \int_0^t \frac{1}{K_{ech}} (qv_{ech_in} - qv_{ech_tot}) dt\right) \quad (E.15)$$

Pour l'inversion de cette formule, il faut revenir à l'expression en logarithme trouvée à l'équation (E.12) et réaliser le correcteur pour calculer le débit fluidique en fonction de la pression :

$$qv_{ech_in_ref} = C_{ech}(t) V_{ech} K_{ech} \left(\ln\left(\frac{p_{ech_ref}}{p_{init}}\right) - \ln\left(\frac{p_{ech_mes}}{p_{init}}\right) \right) + qv_{ech_tot} \quad (E.16)$$

La simplification de la pression initiale p_{init} est réalisée grâce à une propriété du logarithme népérien :

$$\ln\left(\frac{p_{ech_ref}}{p_{init}}\right) = \ln(p_{ech_ref}) - \ln(p_{init}) \quad (E.17)$$

Finalement, on obtient pour le correcteur l'expression suivante :

$$qv_{ech_in_ref} = C_{ech}(t) V_{ech} K_{ech} (\ln(p_{ech_ref}) - \ln(p_{ech_mes})) + qv_{ech_tot} \quad (E.18)$$

Annexe F. Effet des conditions climatiques sur la consommation

Dans cette annexe, différentes tables donnent le détail des conditions prises pour réaliser les calculs de la partie II.3.3 sur l'effet des conditions climatiques sur la consommation

La première table rassemble les données climatiques prises pour chaque trajet réalisé en fonction des variations de température mensuelles.

Table F.1 : conditions climatiques prises en compte pour l'étude à Lille [MétéoFrance 19]

Mois	Trajet du matin	Trajet du soir
Janvier	4,0 °C	8,9 °C
Février	-1,2 °C	5,0 °C
Mars	2,2 °C	9,4 °C
Avril	8,1 °C	17,8 °C
Mai	10,6 °C	21,4 °C
Juin	13,1 °C	22,9 °C
Juillet	16,1 °C	28,3 °C
Août	14,6 °C	24,6 °C
Septembre	10,8 °C	20,8 °C
Octobre	8,2 °C	17,5 °C
Novembre	4,7 °C	10,4 °C
Décembre	3,8 °C	9,1 °C

Annexe G. Générateur de vitesse – simplification de la boucle de Jerk

Le générateur de vitesse pour l'application du métro contient une boucle supplémentaire pour le Jerk (dérivée de l'accélération). Dans un premier temps, cette boucle de jerk a aussi été considérée pour le véhicule électrique [Desreaveaux 18]. Limiter le Jerk est important pour éviter d'avoir des accélérations et des décélérations trop brusques qui peuvent nuire aux confort des passagers d'un métro par exemple. Pour la consommation d'un véhicule, les effets liés au Jerk sont moins importants, la boucle de Jerk peut alors être simplifiée. La modélisation de la boucle de Jerk est expliquée dans [Desreaveaux 18]. Pour vérifier l'impact de cette simplification sur la consommation d'énergie, une simulation est réalisée afin de comparer le cas avec boucle de Jerk et sans boucle de Jerk.

L'exemple utilisé précédemment pour expliquer le générateur est réutilisé pour cette comparaison. Le jerk a peu d'impact sur la consommation du véhicule électrique, 0,2 % de différence et pas d'impact sur le temps de parcours (Table G.1). Ainsi la boucle de jerk peut être simplifiée dans notre générateur.

Table G.1 : comparaison avec et sans boucle de Jerk

	Avec Jerk	Sans Jerk
Temps de parcours	3'48	3'48
Erreur (%)	Référence	0
Consommation (kWh)	1,316	1,318
Erreur (%)	Référence	+0,15

Annexe H. Étude de la corrélation sur les données issues du Projet CEVE

Pour compléter l'étude réalisée dans le chapitre II, certaines corrélations sont détaillées par la suite. Cette annexe se découpe en 2 parties : la 1^{ère} est une étude générale, la 2^{ème} est une étude pour les différents segments.

Étude générale

L'étude proposée (Table H.1) est une comparaison de différentes variables avec l'appui sur la pédale d'accélération avec sa valeur moyenne $\overline{\theta_{péd}}$ et son écart-type $\sigma_{\theta_{péd}}$. L'appui moyen représente la vitesse moyenne du véhicule. Les variations de l'angle sont corrélées avec la variation du courant et de l'accélération.

Table H.1 : étude de la corrélation avec l'utilisation de la pédale d'accélération

	$\overline{i_{bat}}$	$\sigma_{i_{bat}}$	$\overline{V}$	σ_V	$\overline{\gamma^+}$	$\overline{\gamma^-}$
$\overline{\theta_{péd}}$	0,67	0,81	0,93	0,86	0,50	-0,54
$\sigma_{\theta_{péd}}$	0,53	0,95	0,58	0,71	0,87	-0,70

La Table H.2 présente des corrélations entre différentes variables et l'écart-type et la moyenne de la puissance mécanique. Il en ressort que la variation de puissance moyenne est proche de la variation de la vitesse du véhicule. Pour l'écart-type de la puissance, il est corrélé avec l'écart-type du courant de la batterie. Cela veut dire que les variations sur le courant proviennent de la traction du véhicule.

Table H.2 : étude de la corrélation avec la puissance mécanique

	$\overline{i_{bat}}$	$\sigma_{i_{bat}}$	$\overline{V}$	σ_V	$\overline{\gamma^+}$	$\overline{\gamma^-}$
$\overline{P_{méca}}$	0,78	0,80	0,89	0,91	0,45	-0,51
$\sigma_{P_{méca}}$	0,51	0,99	0,66	0,73	0,80	-0,69

En conclusion de ces 2 études : les variations du courant dans la batterie sont une image de la variation de l'appui sur la pédale d'accélération, et sont donc corrélées à l'accélération du véhicule. L'appui moyen sur la pédale est l'image de la vitesse moyenne et peut être corrélé à la puissance mécanique moyenne. Ainsi l'accélération et la vitesse sont deux aspects liés au conducteur.

Étude sur différents segments

Le trajet utilisé dans CEVE a été ensuite découpé en 5 tronçons (segments) correspondant à 5 parties de routes différentes (Figure H.1). Une étude sur la corrélation est effectuée sur ces 5 segments.



Figure H.1 : Tronçon sur le parcours de CEVE

La corrélation entre les variables des différents segments est faible, cela montre leur indépendance d'un tronçon par rapport à un autre. Par exemple, les corrélations entre la puissance mécanique moyenne du 1^{er} segment et celles des autres segments sont inférieures à 50 % (Table H.3)

Table H.3 : corrélation inter-segment pour la puissance mécanique moyenne

Variable	$\overline{P_{méca2}}$	$\overline{P_{méca3}}$	$\overline{P_{méca4}}$	$\overline{P_{méca5}}$
$\overline{P_{méca1}}$	0,39	0,27	0,28	0,48

Les corrélations trouvées dans la partie précédente restent valables en grande partie pour les différents segments. Par exemple, la vitesse moyenne a une corrélation comprise entre 78 % et 95 % avec la puissance moyenne.

La corrélation entre la vitesse et l'énergie mécanique pour les différents segments montre une grande disparité (Table H.4). Il est à noter que la corrélation sur le segment autoroutier est forte : 84 %. Quand il n'y a pas de changement de vitesse et pas d'arrêt, l'énergie mécanique consommée est directement une fonction de la vitesse. Ce n'est pas le cas, quand il y a une grande fluctuation au niveau du nombre d'arrêts, comme c'est le cas dans le segment 4.

Table H.4 : corrélation entre l'énergie mécanique et la vitesse moyenne pour chaque segment

Segment	1	2	3	4	5
Vitesse moyenne	0,49	0,19	0,84	-0,04	0,54

Annexe I. Étude de sensibilité à la vitesse et à l'accélération

Sensibilité à la vitesse

Dans cette annexe, les courbes illustrant l'étude de sensibilité de la vitesse sont données. Les limitations de vitesse imposées par le générateur sont comprises entre -20 et + 20 % par rapport à la référence correspondant aux limites réelles sur le trajet.

Pour le cycle Roubaix vers le campus, la variation du temps de parcours en fonction de la vitesse est représentée par la Figure I.1. La variation de la consommation d'énergie est donnée par la Figure I.2.

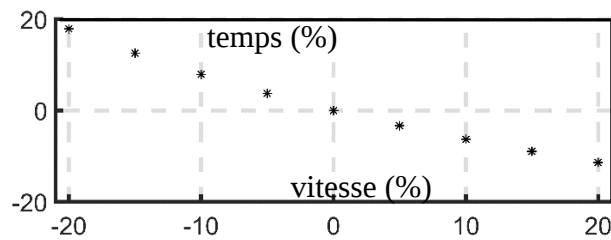


Figure I.1 : temps de parcours en fonction de la limitation de la vitesse pour le cycle Roubaix- campus Cité Scientifique

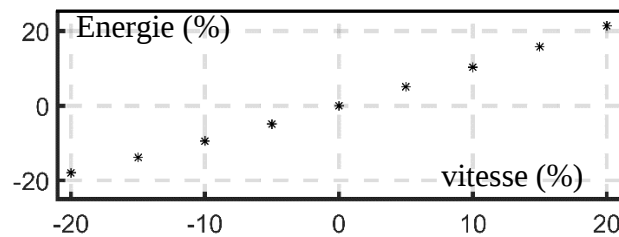


Figure I.2 : consommation d'énergie en fonction de la limitation de la vitesse pour le cycle Roubaix- campus Cité Scientifique

Pour le cycle Orchies vers le campus, la variation du temps de parcours en fonction de la vitesse est représentée par la Figure I.3. La variation de la consommation d'énergie est donnée par la Figure I.4.

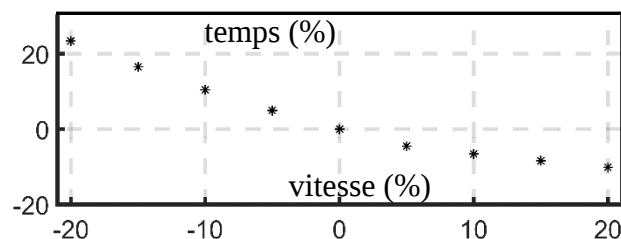


Figure I.3 : temps de parcours en fonction de la limitation de la vitesse pour le cycle Orchies- campus Cité Scientifique

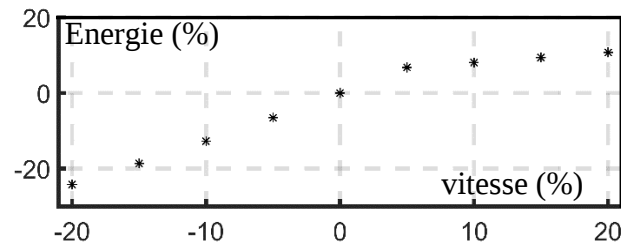


Figure I.4 : consommation d'énergie en fonction de la limitation de la vitesse pour le cycle Orchies- campus Cité Scientifique

Sensibilité à l'accélération

Les courbes donnant la consommation en fonction de la variation de l'accélération sont données pour le cycle Roubaix- Campus par la Figure I.5 et pour le cycle autoroutier par la Figure I.6.

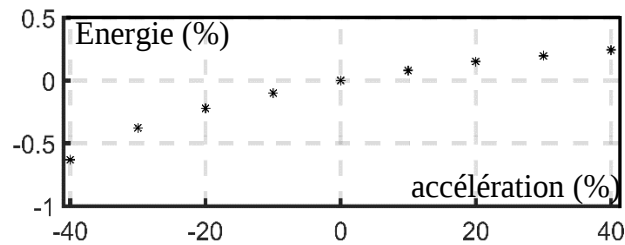


Figure I.5 : consommation d'énergie en fonction de la limitation de l'accélération pour le cycle Roubaix- campus Cité Scientifique

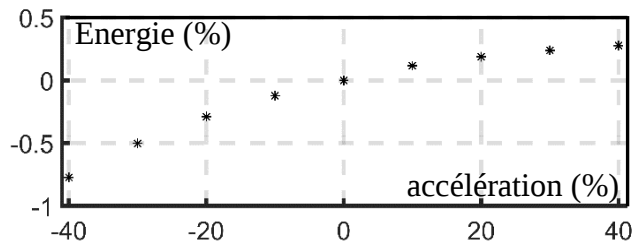


Figure I.6 : consommation d'énergie en fonction de la limitation de l'accélération pour le cycle Orchies- campus Cité Scientifique

Bibliographie

- [Alahmer 12] A. Alahmer, M. Abdelhamid, and M. Omar, "Design for thermal sensation and comfort states in vehicles cabins," *Applied Thermal Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 126–140, 2012.
- [André 04] M. André, "The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions," *Science of The Total Environment*, vol. 334–335, pp. 73–84, Dec. 2004.
- [Andrieu 12] C. Andrieu and G. S. Pierre, "Comparing Effects of Eco-driving Training and Simple Advices on Driving Behavior," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 54, pp. 211–220, Oct. 2012.
- [ANL 16] Argonne National Laboratory, "Assessment of vehicle sizing, energy consumption, and cost through large-scale simulation of advanced vehicle technologies", 2016.
- [ANL 18] Argonne National Laboratory, An Extensive Study on Sizing, Energy Consumption, and Cost of Advanced Vehicle Technologies, 2018.
- [Asamer 16] J. Asamer, A. Graser, B. Heilmann, and M. Ruthmair, "Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 46, pp. 182–199, 2016.
- [ASHRAE 17] ASHRAE, « ASHRAE Handbook Fundamentals 2017 », ASRHAE 2017.
- [AVERE 19] AVERE France, « Baromètre annuel : près de 40 000 véhicules électriques immatriculés en France en 2018 » [en ligne] disponible sur : http://www.aver-france.org/Site/Article/?article_id=7532&from_espace_adherent=0 [consulté le 20/12/2019].
- [Baouche 15] F. Baouche, "Outil pour l'optimisation pour la consommation des véhicules électriques", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Travaux Publics de Lyon, 2015 (en collaboration avec LTE-IFSTTAR).
- [Basso 19] R. Basso, B. Kulcsar, B. Egardt, P. Lindroth, I. Sanchez-Diaz, "Energy consumption estimation integrated into the Electric Vehicle Routing Problem" in *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 69, pp. 141-167, Apr. 2019
- [Bellochi 18] S. Bellocchi, G. Leo Guizzi, M. Manno, M. Salvatori, and A. Zaccagnini, "Reversible heat pump HVAC system with regenerative heat exchanger for electric vehicles: Analysis of its impact on driving range," *Applied Thermal Engineering*, vol. 129, pp. 290–305, Jan. 2018.
- [Ben-Marzouk 18] M. Ben-Marzouk, G. Clerc, S. Pelissier, A. Sari, and P. Venet, "Determination of the electric vehicles driving modes in real life conditions by classification methods," *IEEE-International Conference on Industrial Technology 2018*, Feb. 2018,
- [Boulon 09] L. Boulon, "Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie", Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté et de l'Université Lille1, July 2009 (thèse Cifre avec Nexter Systems dans le cadre du réseau scientifique national MEGEVH sur les véhicules électriques et hybrides)

- [Bouscayrol 12] A. Bouscayrol, J. P. Hautier, B. Lemaire Semail, "Systemic design methodologies for electrical energy systems Analysis, Synthesis and Management", Chapter 3 : Graphic formalisms for the control of multi-physical energetic system: COG and EMR, *ISTE and Wiley*, ISBN 978-1-84821-3888-3, 2012.
- [Bouscayrol 20] A. Bouscayrol, A. Lepoutre, C. Irimia, C. Husar, J. Jaguemont, A. Lievre, C. Martis, D. Zuber, V. Blandow, F. Gao, W. F. van Dorp, G. M. Sirbu, J. Lecoutere, "Power Advanced N-level Digital Architecture for models of electrified vehicles and their components", *TRA2020*, Helsinki (Finland), Apr. 2020, accepted
- [Bracco 17] S. Bracco, M. Brenna, F. Delfmo, F. Foiadelli, and M. Longo, "Preliminary study on electric mobility applied to a University Campus in North Italy," presented at the, 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2017, 2017, pp. 117–121.
- [Braun 18] A. Braun and W. Rid, "Assessing driving pattern factors for the specific energy use of electric vehicles: A factor analysis approach from case study data of the Mitsubishi i–MiEV minicar," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 58, pp. 225–238, 2018.
- [Brenna 16] M. Brenna, A. Dolara, F. Foiadelli, S. Leva, and M. Longo, "E-campus: The 'sustainabilization' of engineering Bovisa Campus," in *IEEE-EEEIC 2016*, 2016.
- [Cappetto 17] A. Cappetto, W. J. Cao, J. F. Luo, M. Hagen, D. Adams, A. Shelikeri, K. Xu, and J. P. Zheng, "Performance of wide temperature range electrolytes for Li-Ion capacitor pouch cells," *Journal of Power Sources*, vol. 359, pp. 205–214, 2017.
- [Castex 12] E. Castex, "Infrastructures de transport dans l'Aire Métropolitaine de Lille," TVES/InteroSTeP, 2012.
- [Castex 19] E. Castex, "Carte de localisation des personnels du campus "Cité Scientifique" de l'Université de Lille," TVES, 2019.
- [CCFA 19] CCFA, Le marché automobile français décembre 2018, Jan. 2019.
- [Cengel 15] Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Refrigerators and Heat pumps," in *Thermodynamics - An Engineering Approach*, 8th ed., Mc Graw Hill Education, 2015.
- [Cevolver 19], "Connected Electric Vehicle Optimized for Life, Value, Efficiency and Range", projet européen H2020, [en ligne] disponible sur : <https://cevolver.eu> [consulté le 20/12/2019]
- [Chan 10] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 2, pp. 589–598, 2010.
- [Chlopek 18] Z. Chłopek, J. Lasocki, P. Wójcik, and A. J. Badyda, "Experimental investigation and comparison of energy consumption of electric and conventional vehicles due to the driving pattern," *International Journal of Green Energy*, vol. 15, no. 13, pp. 773–779, 2018.
- [Chrenko 12] D. Chrenko, I. Garcia Diez, and L. Le Moyne, "Artificial driving cycles for the evaluation of energetic needs of electric vehicles," *IEEE-ITEC 2012*, 2012.

[Chrenko 14] D. Chrenko, A. Ravey, R. Roche, and D. Bouquain, "Autonomy estimation for EV based on road planning software," *IEEE-ITEC 2014*, 2014.

[COMUE 12] COMUE, Diagnostic des émissions de GES de l'Université Lille 1 en 2010, 2012.

[COMUE 15] « Bilan Carbone de l'université Lille1 en 2014 », ComUE Université Lille Nord de France, 2015

[CUMIN 17] A. Bouscayrol, E. Castex, P. Delarue, A. Desrevelaux, O. Ferla, J. Frotey, R. German, J. Klein, W. Lhomme, and J. F. Sergent, "Campus of University with Mobility Based on Innovation and Carbon Neutral," *IEEE-VPCC 2017*, Belfort (France), Dec. 2017

[Debraine 09] L. Debraine, *Les voitures électriques, un futur pour l'automobile*, Favre, Lausanne, 2009

[De Cauwer 17] C. De Cauwer, W. Verbeke, T. Coosemans, S. Faid, and J. Van Mierlo, "A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions," *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017.

[Depature 17] C. Depature, "Commandes par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs" thèse de doctorat de l'Université de Lille et de l'université de Québec-Trois-Rivières, avril 2017

[Desai 19] R. Desai, R. Chen, E. Hittinger, E. Williams, "Heterogeneity in Economic and Carbon Benefits of Electric Technology Vehicles in the US" in *Environmental Science and Technology*, vol. 54, n°2, pp. 1136-1146, Jan. 20

[Desrevelaux 17] A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, and E. Castex, "Comparison of Different Models for Electric Vehicle with Heating System," *IEEE-VPCC'17*, Belfort (France), Dec. 2017.

[Desrevelaux 18] A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, and E. Castex, "Automatic driving cycle generator for electric vehicles," *IEEE-VPCC'18*, Chicago (USA), Aug. 2018.

[Desrevelaux 19a] A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, E. Castex, J. Klein, "Impact of the Traffic Stops on the Energy Consumption of Electric Vehicles", in *32nd Electric Vehicle Symposium*, Lyon (France), May 2019

[Desrevelaux 19b] A. Desrevelaux, M. Ruba, A. Bouscayrol, G. M. Sirbu, C. Martis, "Comparisons of models of electric drives for electric vehicles", *IEEE-VPCC'19*, Hanoi (Vietnam), Oct. 2019

[Desrevelaux 19c] A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, E. Castex, J. Klein "Impact of the Velocity Profile on the Energy Consumption of Electric Vehicle", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol° 68, n° 12, pp. 11420-11426, Dec. 2019

[Diaz Alvarez 14] A. Diaz Alvarez, F. Serradilla Garcia, J. E. Naranjo, J. J. Anaya, and F. Jimenez, "Modeling the driving behavior of electric vehicles using smartphones and neural networks," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 44–53, 2014.

[Dupont 11] DuPont, "Thermodynamic Properties of DuPont Opteon yf." 2011.

- [EEA 19] European Environment Agency, “Overview of electricity production and use in Europe”, [en ligne] disponible sur : <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4> [consulté le 15/12/19]
- [Eisel 16] M. Eisel, I. Nastjuk, and L. M. Kolbe, “Understanding the influence of in-vehicle information systems on range stress – Insights from an electric vehicle field experiment,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 43, pp. 199–211, Nov. 2016.
- [EMR 19] EMR Website [en ligne] disponible sur: <https://www.emrwebsite.org> [consulté le 20/12/2019]
- [Ericsson 01] E. Ericsson, “Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 6, no. 5, pp. 325–345, Sep. 2001.
- [ERTRAC 17] ERTRAC, European Roadmap Electrification of Road Transport, 3rd edition, Jun. 2017.
- [Esqueda Merino 13] D. Esqueda Merino, « Contrôle / Commande avancé pour l’optimisation du confort thermique d’un véhicule électrifié », thèse de doctorat de Supélec, Oct. 2013 (thèse CIFRE avec Renault)
- [Ferreira 15] J. C. Ferreira, J. de Almeida, and A. R. da Silva, “The Impact of Driving Styles on Fuel Consumption: A Data-Warehouse-and-Data-Mining-Based Discovery Process,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 2653–2662, Oct. 2015.
- [Fetene 17] G. M. Fetene, S. Kaplan, S. L. Mabit, A. F. Jensen, and C. G. Prato, “Harnessing big data for estimating the energy consumption and driving range of electric vehicles,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 54, pp. 1–11, 2017.
- [Finlay 13] J. Finlay and J. Massey, “Eco-campus: applying the ecocity model to develop green university and college campuses,” *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Apr. 2013.
- [Fiori 19] C. Fiori, V. Arcidiacono, G. Fontaras, M. Makridis, K. Mattas, V. Marzano, C. Thiel, and B. Ciuffo, “The effect of electrified mobility on the relationship between traffic conditions and energy consumption,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 67, pp. 275–290, 2019.
- [Fontaras 17] G. Fontaras, N.-G. Zacharof, and B. Ciuffo, “Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 60, pp. 97–131, 2017.
- [France Stratégie 18] France Stratégie, Les politiques publiques en faveur des véhicules à très faibles émissions, May 2018.
- [Franke 13] T. Franke and J. F. Krems, “What drives range preferences in electric vehicle users?,” *Transport Policy*, vol. 30, pp. 56–62, Nov. 2013.
- [Freyermuth 19] V. Freyermuth, J. Auld, D. Karbowski, S. Pagerit, and A. Rousseau, “Energy Prediction of the Chicago Metropolitan Area Using Distributed Transportation MBSE Framework,” *IEEE-VPPC’19*, Hanoi (Vietnam), Oct. 2019.

- [Gavanas 13] N. Gavanas, M. Pitsiava-Latinopoulou, and S. Basbas, "Implementation of alternative transport networks in university campuses: The case of the Aristotle University of Thessaloniki, Greece," *International Journal of Sustainability in Higher Education*, vol. 14, no. 3, pp. 310–323, Jul. 2013.
- [German 18] R. German, A. Desreux, and A. Bouscayrol, "Single Cell Electro-Thermal Model for Simulation of an Electric Vehicle," *IEEE-VPFC'18*, Chicago (USA), Aug. 2018
- [German 20] R. German, S. Shili, A. Desreux, A. Sari, P. Venet, A. Bouscayrol, "Dynamical Coupling of a Battery Electro-Thermal Model and the Traction Model of an EV for Driving Range Simulation", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, to be published in 2020
- [Gillet 16] T. Gillet, E. Andrès, A. El-Bakkali, G. Olivier, and V. Lemort, "Modelling Of An Automotive Multi-Evaporator Air-Conditioning System," 2016.
- [Google maps 19] Google maps [en ligne] disponible sur : <https://google.fr/maps> [consulté le 20/12/2019]
- [Gruosso 17] G. Gruosso, "Model Based Approach for Evaluation of Energy Consumption of Electrical Vehicles," *IEEE-VPFC'17*, Belfort (France), 2017.
- [Günther 19] M. Günther, N. Rauh, and J. F. Krems, "How driving experience and consumption related information influences eco-driving with battery electric vehicles – Results from a field study," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 62, pp. 435–450, Apr. 2019.
- [Gutenkust 15] C. Gutenkust, D. Chrenko, R. Kriesten, P. Neugebauer, B. Jäger and T. Giereth, "Route Generating Algorithm Based on OpenSource Data to Predict the Energy Consumption of Different Vehicles", *IEEE-VPFC'15*, Montréal (Canada), Oct. 2015
- [Hannan 17] M.A. Hannan, M.S.H. Lipu, A. Hussain, A. Mohamed, "A review of lithium battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834-854, Oct. 2017
- [Hautier 96] J.P. Hautier, J. Faucher, "Le graphe informationnel causal" *Bulletin de l'union des physiciens*, vol. 90, pp. 167-189, June 1996
- [Hautier 04] J.P. Hautier, P.J. Barre, "The causal ordering graph - A tool for modeling and control law synthesis", *Studies in Informatics and Control Journal*, vol.13, n° 4, pp. 265-283, Dec. 2004
- [Hiti 17] S. Hiti, K. Rahman, "Trends in EV propulsion Components and Systems", in *IEEE Electrification Magazine*, vol°5, n°1, pp. 2-3, Mar. 2017
- [Hooftman 18] N. Hooftman, M. Messagie, J. Van Mierlo, and T. Coosemans, "A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 86, pp. 1–21, 2018.
- [Horrein 15] L. Horrein, 'Gestion d'énergie décomposée d'un véhicule hybride intégrant les aspects thermiques via la Représentation Energétique Macroscopique', Thèse de doctorat de l'Université Lille1, Sep. 2015 (thèse CIFRE avec PSA Peugeot Citroën, dans le cadre du réseau scientifique national MEGEVH sur les véhicules électriques et hybrides).

- [Horrein 17] L. Horrein, A. Bouscayrol, W. Lhomme, and C. Depature, “Impact of Heating System on the Range of an Electric Vehicle,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 6, pp. 4668–4677, 2017.
- [Hosoz 06] M. Hosoz and M. Direk, “Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 5, pp. 545–559, Mar. 2006.
- [Husar 19] C. Husar, M. Grovu, C. Irima, A. Desreveaux, A. Bouscayrol, M. Ponchant, and P. Magin, “Comparison of Energetic Macroscopic Representation and structural representation on EV simulation under Simcenter Amesim,” *IEEE-VPPC’19*, Hanoi (VietNam) Oct. 2019.
- [IEA 16] International Energy Agency, “Global EV outlook 2016: beyond one million electric cars,” 2016.
- [IEA 18a] International Energy Agency, “CO2 Emissions for Fuel Combustion 2018” 2018
- [IEA 18b] International Energy Agency, “Global EV outlook 2018: Towards cross-modal electrification”, 2018
- [Infoclimat 19] données météorologiques en France [en ligne] disponible sur : <https://infoclimat.fr> [consulté le 07/10/2019]
- [INSEE 19] INSEE, définition de l’aire urbaine, [en ligne] disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2070>, [consulté le 20/12/19]
- [Ipsos 18] Ipsos, “le baromètre de la mobilité électrique : vague 4”, Sep. 2018, [en ligne] disponible sur : http://www.averre-france.org/Site/Article/?article_id=7408&from_espace_adherent=0 [consulté le 15/04/2019]
- [ISCN 18] International Sustainable Campus Network, “Sustainable development: educating with purpose” in *World Economic Forum*, Davos (Suisse), Jan. 2018.
- [Iwasaki 94] I. Iwasaki, H. A. Simon, "Causality and model abstraction", *Artificial Intelligence, Elsevier*, vol.67, p. 143-193, May 1994.
- [Jaafar 13] A. Jaafar, B. Sareni, and X. Roboam, “A Systemic Approach Integrating Driving Cycles for the Design of Hybrid Locomotives,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 8, pp. 3541–3550, Oct. 2013.
- [Jafari 15] M. Jafari, A. Gauchia, K. Zhang, and L. Gauchia, “Simulation and Analysis of the Effect of Real-World Driving Styles in an EV Battery Performance and Aging,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 4, pp. 391–401, Dec. 2015.
- [Jaguemont 16a] J. Jaguemont, L. Boulon, and Y. Dubé, “A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures,” *Applied Energy*, vol. 164, pp. 99–114, Feb. 2016.
- [Jaguemont 16b] J. Jaguemont, L. Boulon, P. Venet, Y. Dube, and A. Sari, “Lithium-Ion Battery Aging Experiments at Subzero Temperatures and Model Development for Capacity Fade Estimation,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4328–4343, Jun. 2016.

- [JRC 14] Joint Research Center of the European Commission, Well To Wheels Report Version 4.A: JEC Well To Wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, 2014
- [JRC 18] Joint Research Center of the European Commission, Electric vehicles in Europe from 2010 to 2017 is full-scale commercialisation beginning? : an overview of the evolution of electric vehicles in Europe, 2018.
- [Kambly 15] K. Kambly, T. H Bradley, « Geographical and temporal differences in electric vehicle range due to cabin conditioning energy consumption », in *Journal of Power Sources*, vol. 275, pp 468-475, Feb. 2015
- [Kooijman 15] D. G. Kooijman, A. E. Balau, S. Wilkins, N. Ligterink, and R. Cuelenaere, "WLTP Random Cycle Generator," *IEEE-VPPC'15*, Montréal (Canada), 2015.
- [Letrouvé 10] T. Letrouvé, A. Bouscayrol, W. Lhomme, N. Dollinger, and F. Mercier Calvairac, "Different models of a traction drive for an electric vehicle simulation," *IEEE-VPPC '10*, Lille (France), 2010.
- [Lhomme 07] W. Lhomme, "Gestion d'Énergie de Véhicules Électriques Hybrides basée sur la Représentation Énergétique Macroscopique", thèse de doctorat de l'université de Lille1, Nov. 2007
- [Li 16] W. Li, P. Stanula, P. Egede, S. Kara, and C. Herrmann, "Determining the Main Factors Influencing the Energy Consumption of Electric Vehicles in the Usage Phase," *Procedia CIRP*, 2016, vol. 48, pp. 352–357.
- [Lindgren 16] J. Lindgren and P. D. Lund, "Effect of extreme temperatures on battery charging and performance of electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 328, pp. 37–45, 2016.
- [Liu 16] K. Liu, J. Wang, T. Yamamoto, and T. Morikawa, "Modelling the multilevel structure and mixed effects of the factors influencing the energy consumption of electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 1351–1360, 2016.
- [Liu 17] K. Liu, T. Yamamoto, and T. Morikawa, "Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 54, pp. 74–81, 2017.
- [Luin 19] B. Luin, S. Petelin, and F. Al-Mansour, "Microsimulation of electric vehicle energy consumption," *Energy*, pp. 24–32, 2019.
- [Lutsey 19] N. Lutsey and M. Nicholas, "Update on electric vehicle costs in the United States through 2030," *International Council on Clean Transportation*, 2019.
- [Martinez 18] C. M. Martinez, M. Heucke, F. Wang, B. Gao, and D. Cao, "Driving Style Recognition for Intelligent Vehicle Control and Advanced Driver Assistance: A Survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 666–676, Mar. 2018.
- [Mayet 16] C. Mayet, "Simulation énergétique flexible d'un carrousel de métros basée sur la Représentation Énergétique Macroscopique," Thèse de doctorat de l'Université Lille 1, Mar. 2016.

- [Mayet 18] C. Mayet, A. Bouscayrol, P. Delarue, E. Chattot, and J. N. Verhille, "Electrokinematical Simulation for Flexible Energetic Studies of Railway Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 4, pp. 3592–3600, Apr. 2018.
- [McKinley 08] T. L. McKinley and A. G. Alleyne, "An advanced nonlinear switched heat exchanger model for vapor compression cycles using the moving-boundary method," *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 7, pp. 1253–1264, Nov. 2008.
- [MEGEVH 19] réseau MEGEVH [en ligne] disponible sur : <http://megevh.univ-lille1.fr/> [consulté le 20/12/2019]
- [MEL 17] Métropole Européenne de Lille - Atmo Hauts-de-France "Bilan territoriale, Métropole Européenne de Lille, quelle qualité de l'air en 2017 ?", 2018
- [MEL 19] "Carte de la Métropole Européenne de Lille", [en ligne] disponible sur : <https://opendata.lillemetropole.fr/page/home> [consulté le 20/12/19]
- [Messagie 17] M. Messagie, "Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles", *Transport & Environment*, Oct. 2017
- [MétéoFrance 19] « Fiche climatologique de la station de Lille-Lesquin » [en ligne] disponible sur : <https://donneespubliques.meteofrance.fr> [consulté le 20/12/2019]
- [Moro 18] A. Moro and L. Lonza, "Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 64, pp. 5–14, 2018.
- [Nastjuk 18] I. Nastjuk, J. Werner, M. Marrone, and L. M. Kolbe, "Inaccuracy versus volatility – Which is the lesser evil in battery electric vehicles?," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 58, pp. 855–870, Oct. 2018.
- [Neubauer 13] J. Neubauer and E. Wood, "Accounting for the variation of driver aggression in the simulation of conventional and advanced vehicles," *SAE Technical Papers*, vol. 2, 2013.
- [Neubauer 14a] J. Neubauer and E. Wood, "The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility," *Journal of Power Sources*, vol. 257, pp. 12–20, Jan. 2014.
- [Neubauer 14b] J. Neubauer and E. Wood, "Thru-life impacts of driver aggression, climate, cabin thermal management, and battery thermal management on battery electric vehicle utility," *Journal of Power Sources*, vol. 259, pp. 262–275, Aug. 2014.
- [Noura 18] N. Noura, I. Erradi, A. Desrevelaux, and A. Bouscayrol, "Comparison of the energy consumption of a diesel car and an electric car," presented at the, 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 - Proceedings Chicago (USA), 2018.
- [Nyberg 16] P. Nyberg, E. Frisk, and L. Nielsen, "Using Real-World Driving Databases to Generate Driving Cycles With Equivalence Properties," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4095–4105, Jun. 2016.
- [Opel 17] O. Opel, N. Strodel, K. F. Werner, J. Geffken, A. Tribel, and W. K. L. Ruck, "Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg," *Energy*, vol. 141, pp. 2628–2639, 2017.

- [OpenStreetMaps 19] OpenStreetMap API [en ligne] disponible sur : <https://api.openstreetmap.org> [consulté le 04/11/2019]
- [Optemus 19] “Optimised Energy Management and Use”, projet européen H2020 [en ligne] disponible sur : <http://www.optemus.eu/> [consulté le 05/11/2019]
- [Ozawa-Meida 13] L. Ozawa-Meida, P. Brockway, K. Letten, J. Davies, and P. Fleming, “Measuring carbon performance in a UK University through a consumption-based carbon footprint: De Montfort University case study,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 56, pp. 185–198, 2013.
- [Palmer 18] K. Palmer, J. E. Tate, Z. Wadud, and J. Nellthorp, “Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan,” *Applied Energy*, vol. 209, pp. 108–119, Jan. 2018.
- [Panda 19] "Powerfull Advanced N-Level Digital Architecture for models of electrified vehicles and their components", Projet européen H2020 [en ligne] disponible sur : <https://www.project-panda.eu/> [consulté le 20/12/2019]
- [Papantoniou 19] P. Papantoniou, E. Vlahogianni, G. Yannis, M. Attard, P. Valero Mora, E. Campos Diaz, and M. T. Tormo Lancero, “Investigating mobility gaps in university campuses,” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 879, pp. 378–385, 2019.
- [Pfriem 16] M. Pfriem and F. Gauterin, “Development of real-world driving cycles for battery electric vehicles,” presented at the, EVS 2016 - 29th International Electric Vehicle Symposium, 2016.
- [Politis 12] I. Politis, N. Gavanis, M. Pitsiava-Latinopoulou, P. Papaioannou, and S. Basbas, “Measuring the level of acceptance for sustainable mobility in universities,” in *Transport Research Arena 2012*, vol. 48, pp. 2768–2777, 2012.
- [Poupon 17] L. Poupon, ‘L’acceptation de la voiture électrique : étude d’un processus, de l’acceptabilité à l’acceptation située’, Thèse de l’Université Lumière Lyon 2, en collaboration avec l’IFSTTAR, 2017.
- [Qi 18] X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, and M. J. Barth, “Data-driven decomposition analysis and estimation of link-level electric vehicle energy consumption under real-world traffic conditions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 64, pp. 36–52, 2018.
- [Ramsey 19] D. Ramsey, A. Bouscayrol, L. Boulon, "Impact de la densité de l'air sur l'autonomie d'un véhicule électrique", *JCGE 2019*, Oléron, Jun. 2019
- [Rasmussen 05] B. P. Rasmussen, A. G. Alleyne, and A. B. Musser, “Model-driven system identification of transcritical vapor compression systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 444–451, May 2005.
- [Rauh 15] N. Rauh, T. Franke, and J. F. Krems, “User experience with electric vehicles while driving in a critical range situation – a qualitative approach,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 9, no. 7, pp. 734–739, 2015.
- [Redondo 17] E. Redondo Iglesias, “Étude du vieillissement des batteries lithium-ion dans les applications "véhicule électrique" : combinaison des effets de vieillissement calendaire et de

cyclage. », Thèse de Doctorat de l'université Lyon 1, collaboration entre le laboratoire Ampère et l'IFSTTAR, Nov. 2017

[Ruz 17] M. L. Ruz, J. Garrido, F. Vázquez, and F. Morilla, "A hybrid modeling approach for steady-state optimal operation of vapor compression refrigeration cycles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 120, pp. 74–87, Jun. 2017.

[Schwarzer 13] V. Schwarzer and R. Ghorbani, "Drive Cycle Generation for Design Optimization of Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 1, pp. 89–97, Jan. 2013.

[Sechilariu 17] M. Sechilariu, F. Locment, H. Martell-Flores, N. Molines, J. Baert, G. Richard, C. Henriot, C. Pronello, " Smart Microgrid and Urban Planning for Better Electromobility", *IEEE-VPPC 17*, Belfort (France), Dec. 2017

[Shahar 09] A. Shahar, "Self-reported driving behaviors as a function of trait anxiety," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 41, no. 2, pp. 241–245, Mar. 2009.

[Steinhauser 18] K. Steinhauser, F. Leist, K. Maier, V. Michel, N. Pärsch, P. Rigley, F. Wurm, and M. Steinhauser, "Effects of emotions on driving behavior," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 59, pp. 150–163, Nov. 2018.

[Suh 15] I.-S. Suh, M. Lee, J. Kim, S. T. Oh, and J.-P. Won, "Design and experimental analysis of an efficient HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system on an electric bus with dynamic on-road wireless charging," *Energy*, vol. 81, pp. 262–273, Mar. 2015.

[Tagliaferri 16] C. Tagliaferri, S. Evangelisti, F. Acconcia, T. Domenech, P. Ekins, D. Barletta, and P. Lettieri, "Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 112, pp. 298–309, Aug. 2016.

[Thuez 17] J. L. Thuez, "Climatisation automobile," *Techniques de l'ingénieur*, pp. 1–40, Dec. 2017.

[Torque 19] Torque application [en ligne] disponible sur : <https://torque-bhp.com/> [consulté le 15/12/2019]

[Torregrosa 15] B. Torregrosa-Jaime, F. Bjurling, J. M. Corberán, F. Di Sciullo, and J. Payá, "Transient thermal model of a vehicle's cabin validated under variable ambient conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, pp. 45–53, 2015.

[Trigui 15] R. Trigui, B. Jeanneret, E. Vinot, and E. R. Eglesias, "Eco-Driving Rules Extraction from a Model Based Optimization for a New Generation EV," *IEEE-VPPC'15*, Montréal (Canada), 2015.

[Trigui 18] R. Trigui. "Map consumption of a diesel motor k9k 1.5 dci", IFSTTAR, 2018.

[U-MOB 19] U-MOB, "U-MOB LIFE - European Network for Sustainable Mobility at Universities" [en ligne] disponible sur : [from https://u-mob.eu/](https://u-mob.eu/) [consulté le 20/12/2019].

[Van Mierlo 17] J. Van Mierlo, M. Messagie, and S. Rangaraju, "Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment," *Transportation Research Procedia*, vol. 25, pp. 3439–3449, Dec. 2017.

- [Varga 19] B. O. Varga, A. Sagoian, and F. Mariasiu, “Prediction of Electric Vehicle Range: A Comprehensive Review of Current Issues and Challenges,” *Energies*, vol. 12, no. 5, p. 946, Jan. 2019.
- [Vásquez 15] L. Vásquez, A. Iriarte, M. Almeida, and P. Villalobos, “Evaluation of greenhouse gas emissions and proposals for their reduction at a university campus in Chile,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, pp. 924–930, 2015.
- [Vatanparvar 19] K. Vatanparvar, S. Faezi, I. Burago, M. Levorato, and M. A. A. Faruque, “Extended Range Electric Vehicle With Driving Behavior Estimation in Energy Management,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2959–2968, May 2019.
- [Verhille 07] J. N. Verhille, “Représentation Energétique Macroscopique du métro VAL 206 et structures de commande déduites par inversion,” Thèse de doctorat de l’ENSAM, 2007.
- [Verhille 10] J. N. Verhille, R. Béarée, and A. Bouscayrol, “Causal-based generation of velocity reference for automatic subways,” *IEEE-VPPC’10*, Lille (France), 2010
- [Vlahogianni 18] E. Vlahogianni, P. Papantoniou, G. Yannis, M. Attard, A. Regatteri, F. Piana, F. Pilati, « Analysis of mobility patterns in selected university campus areas » in *CSUM 2018*, Skiathos Island (Greece), May 2018
- [Waldmann 14] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, and M. Wohlfahrt-Mehrens, “Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries - A Post-Mortem study,” *Journal of Power Sources*, vol. 262, pp. 129–135, 2014.
- [Wiryadinata 19] S. Wiryadinata, J. Morejohn, and K. Kornbluth, “Pathways to carbon neutral energy systems at the University of California, Davis,” *Renewable Energy*, vol. 130, pp. 853–866, 2019.
- [WHO 16] World Health Organization, “Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease”, *WHO Library Cataloguing in Publication Data*, ISBN: 978 92 4 151 135 3, 2016
- [Woo 17] J. Woo, H. Choi, and J. Ahn, “Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 51, pp. 340–350, 2017.
- [Wu 15] X. Wu, D. Freese, A. Cabrera, and W. A. Kitch, “Electric vehicles’ energy consumption measurement and estimation,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, pp. 52–67, 2015.
- [WWO 19] World Weather Online, données météorologiques [en ligne] disponible sur: <https://worldweatheronline.com> [consulté le 20/12/2019]
- [Yan 18] X. Yan, J. Fleming, and R. Lot, “A/C Energy Management and Vehicle Cabin Thermal Comfort Control,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 11238–11242, Nov. 2018.
- [Yi 13] J. Yi, U. S. Kim, C. B. Shin, T. Han, and S. Park, “Modeling the temperature dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery in low environmental temperature,” *Journal of Power Sources*, vol. 244, pp. 143–148, 2013.

- [Yi 17a] Z. Yi and P. H. Bauer, "Adaptive Multiresolution Energy Consumption Prediction for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 10515–10525, Nov. 2017.
- [Yi 17b] Z. Yi and P. H. Bauer, "Effects of environmental factors on electric vehicle energy consumption: A sensitivity analysis," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 7, no. 1, pp. 3–13, Mar. 2017.
- [Yi 19] Z. Yi and P. H. Bauer, "Energy Aware Driving: Optimal Electric Vehicle Speed Profiles for Sustainability in Transportation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1137–1148, Mar. 2019.
- [Younes 13] Z. Younes, L. Boudet, F. Suard, M. Gerard, and R. Rioux, "Analysis of the main factors influencing the energy consumption of electric vehicles," *IEEE-IEMDC 2013*, 2013
- [Yue 19] M. Yue, S. Jemei, R. Gouriveau, N. Zerhouni, " Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol° 44, n° 13, pp. 6844-6861, Mar. 2019
- [Yuksel 15] T. Yuksel and J. J. Michalek, "Effects of regional temperature on electric vehicle efficiency, range, and emissions in the united states," *Environmental Science and Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 3974–3980, 2015.
- [Zhang 16] Q. Zhang, S. Stockar, and M. Canova, "Energy-Optimal Control of an Automotive Air Conditioning System for Ancillary Load Reduction," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 67–80, Jan. 2016.
- [Zhang 19] R. Zhang, E. Yao, "Mesoscopic model framework for estimating electric vehicles' energy consumption", *Sustainable Cities and Society*, vol.47, May 2019

Liste des publications

Revue internationale

A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, E. Castex, J. Klein “ Impact of the Velocity Profile on the Energy Consumption of Electric Vehicle”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol° 68, n° 12, pp. 11420-11426, Dec. 2019

R. German, S. Shili, A. Desrevelaux, A; Sari, P. Venet, A. Bouscayrol, “Dynamical Coupling of a Battery Electro-Thermal Model and the Traction Model of an EV for Driving Range Simulation”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, accepted for publication

Conférences internationales

A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, and E. Castex, “Comparison of Different Models for Electric Vehicle with Heating System,” *IEEE-VPPC'17*, Belfort (France), Dec. 2017.

A. Bouscayrol, E. Castex, P. Delarue, A. Desrevelaux, O. Ferla, J. Froty, R. German, J. Klein, W. Lhomme, and J. F. Sergeant, " Campus of University with Mobility Based on Innovation and Carbon Neutral", in *IEEE-VPPC'17*, Belfort (France), Dec. 2017.

A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, and E. Castex, “Automatic driving cycle generator for electric vehicles,” *IEEE –VPPC'18*, Chicago (USA), Aug. 2018.

R. German, A. Desrevelaux, and A. Bouscayrol, “Single Cell Electro-Thermal Model for Simulation of an Electric Vehicle,” *IEEE-VPPC'18*, Chicago (USA), Aug. 2018

N. Noura, I. Erradi, A. Desrevelaux, and A. Bouscayrol, “Comparison of the energy consumption of a diesel car and an electric car,” *IEEE-VPPC'18*, Chicago (USA), Aug. 2018

A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, R. Trigui, E. Castex, J. Klein, “Impact of the Traffic Stops on the Energy Consumption of Electric Vehicles”, *32nd Electric Vehicle Symposium*, Lyon (France), May 2019

A. Desrevelaux, M. Ruba, A. Bouscayrol, G. M. Sirbu, C. Martis, “Comparisons of models of electric drives for electric vehicles”, *IEEE-VPPC'19*, Hanoi (Vietnam), Oct. 2019

C. Husar, M. Grovu, C. Irima, A. Desrevelaux, A. Bouscayrol, M. Ponchant, P. Magin, "Comparison of Energetic Macroscopic Representation and structural representation on EV simulation under Simcenter Amesim", *IEEE-VPPC'19*, Hanoi (Vietnam), Oct. 2019