



HAL
open science

Conception optimale d'un vélo à architecture hybride série et à base de supercondensateurs

Edgar Tournon

► **To cite this version:**

Edgar Tournon. Conception optimale d'un vélo à architecture hybride série et à base de supercondensateurs. Energie électrique. Université Claude Bernard Lyon 1, 2020. Français. NNT: . tel-03120708

HAL Id: tel-03120708

<https://hal.science/tel-03120708v1>

Submitted on 25 Jan 2021

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

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



N°d'ordre NNT : 2020LYSE1304

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale N° 160
Electronique Electrotechnique Automatique (EEA)

Spécialité de doctorat :
Discipline : Génie Electrique

Soutenue publiquement le 10/12/2020, par :
TOURNON Edgar

**Conception optimale d'un vélo à
architecture hybride série et à base de
supercondensateurs**

Devant le jury composé de :

VINASSA Jean Michel, Professeur, INP Bordeaux	Président
CHRENKO Daniela, Maître de Conférences HdR, UT Belfort-Montbéliard	Rapporteur
HOANG Emmanuel, Professeur Agrégé HdR, ENS Paris Saclay	Rapporteur
CHEZE Laurence, Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1	Examineur
EL GHOSEIN Nagham, Maître de Conférences, ECAM	Examineur
VENET Pascal, Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1	Directeur de Thèse
BARBEDETTE Bertrand, Maître de Conférences, ESTACA	Co-encadrant
SARI Ali, Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1	Co-encadrant
AUBRY Judicaël, Professeur Agrégé, IUT Rennes	Co-encadrant
PELISSIER Serge, Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel	Invité
LELIEVRE Adrien, PDG, Veloci Industries	Encadrant industriel

À Alice, Adèle, Marie-Laure et Chantal,

À Odette,

À Émile, Bruno et Lucien,

À toutes les personnes qui m'inspirent au quotidien.

RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur un vélo autonome en énergie, à architecture hybride série (VHS) avec comme système de stockage des supercondensateurs.

Le VHS dispose d'une transmission 100% électrique qui permet un contrôle découplé entre le mouvement de pédalage et l'avancement du cycle. Il est constitué d'un ensemble générateur qui convertit la puissance mécanique humaine sous forme électrique ainsi que d'un moteur qui assure la traction du vélo. En parallèle, le système de stockage à base de supercondensateurs permet d'envisager un véhicule plus respectueux de l'environnement.

La pertinence de l'utilisation de supercondensateurs en remplacement des batteries a nécessité un comparatif multicritère des deux technologies. Il a été complété par des tests de vieillissement à usage énergétique équivalent.

Les conversions successives de puissance induisent des pertes qui peuvent rendre le vélo inutilisable. Une estimation du rendement minimum à atteindre est présentée. Le réalisme du résultat est appuyé par une modélisation et des essais du véhicule.

Le degré de liberté du système (pas de lien entre le pédalage et le mouvement du vélo) doit être contrôlé. La synthétisation d'une stratégie de commande par observation de comportements optimaux a permis d'obtenir des résultats en simulation puis en pratique.

Cette étude a été enrichie par des recherches concernant l'impact du VHS sur le cycliste. La première réflexion a consisté à reproduire un mouvement de pédalage fluide sur une génératrice à faible inertie. La seconde propose une analyse de l'effort d'un utilisateur sur le VHS comparée au vélo traditionnel. Ces deux approches ont permis de conclure sur l'avantage du découplage pour le cycliste.

Mots Clés

Vélo, hybride, hybride série, batterie, supercondensateur, vieillissement, modélisation, machine électrique, convertisseur, simulation, recherche d'optimaux, optimisation bi-objectif, base de données, gestion d'énergie, programmation temps réel, banc de test, fatigue, effort, mouvement de pédalage, prototypes.

ABSTRACT

This thesis presents, analyses and solves several scientific problems related to the hybrid series bicycle.

Initially introduced in the car industry, this architecture type features a 100% electrical (chainless) transmission. This allows the decoupling of user effort from the bicycle dynamics.

The transmission is equipped with a generator subsystem that converts the user's mechanical power into electricity as well as a motor subsystem that converts electricity back to mechanical power in order to propel the bicycle. In addition, this project foresees the implementation of an energy storage system based on supercapacitors, which are more respectful of the environment than batteries. The challenge was to propose a bicycle with this new storage system that provides the same comfort as e-bikes.

Associating supercapacitors with a hybrid series structure for light mobility purposes is an original approach. It raises several scientific problems that are discussed in this work.

Firstly, the use of a supercapacitor as the main energy source was analysed, considering the small embedded energy amount stored compared to batteries. A multicriteria approach was used and aging tests were carried out in order to determine the relative lifespan of batteries and supercapacitors for an energy equivalent usage.

Secondly, the hybrid series architecture was modelled and analysed. Indeed, energy is transferred through several energy conversions, and losses occur at each stage. If energy losses are too significant, the system may not be able to work correctly. Therefore, simulations were undertaken in order to compare the travel capacity of both the normal bicycle and hybrid series bicycle, taking into account the efficiency of both architectural types. Minimum efficiency requirements could be extracted from the results. Finally, a more detailed efficiency computation was undertaken using component databases in order to validate the feasibility of the desired efficiency.

The management of energy within the hybrid series architecture was then examined. The hybrid series architecture decouples input and output effort and therefore offers a degree of freedom to the system. This degree needs to be controlled in order to run the bicycle. A control strategy was established by reproducing optimal control solutions using fuzzy logic tools. Simulation results were found. Practical tests were undertaken on a homemade laboratory test bench. The results pave the way for further testing and energy management strategies.

Finally, the impact of cycling on a hybrid structure was analysed. Two major topics are discussed. The first concerns pedalling effort and the associated user movement, which may be uncomfortable due to very low generator inertia. The second consists in proposing a model and

Abstract

measurements concerning cyclist effort and fatigue on a hybrid bicycle compared to the traditional bicycle. On the basis of these analyses, this thesis provides conclusions on the advantages of decoupling for the cyclist.

Keyword

Bicycle, hybrid, series hybrid, battery, supercapacitor, energy storage system aging, modelling, electrical machines, DCDC and ACDC converts, simulation, optimal seek, bi-objective, data base, energy management, online real-time programming, test bench, fatigue, user stress, cycling dynamics, prototypes.

REMERCIEMENTS

Remerciements

À l'issue de trois ans de recherches et d'expérimentations, le chemin parcouru semble important. Tout ce savoir n'aurait pas pu être mobilisé sans les contacts réguliers que j'ai pu entretenir avec de nombreuses personnes au cours de cette période.

Je tiens premièrement à remercier les membres du jury qui prennent le temps d'évaluer mon travail et le fruit d'une réflexion commune entre toutes les personnes citées ci-dessous.

Les travaux présentés dans ce manuscrit ne sont pas le condensé d'une seule vision, mais bien la convergence de nombreuses discussions, présentations, débats ayant eu lieu durant toutes les phases du doctorat. Toute ma gratitude va à Pascal Venet et Bertrand Barbedette pour leur présence indéfectible, leur rigueur scientifique qui m'a parfois fait défaut ainsi que pour leur bienveillance. Je tiens, évidemment, à remercier Ali Sari et Judicaël Aubry, co-encadrants du projet qui ont été très présents et ont su diversifier les points de vue et les centres d'intérêt avec leurs regards novateurs. Tous les quatre sont la première pierre d'un travail qui se veut d'excellence.

Passer d'un projet de recherche à la concrétisation des résultats sous forme matérielle et répétable a nécessité, là encore, le travail conjoint de plusieurs univers, personnes. Le contexte industriel de la thèse au sein d'une PME a encore accentué mon implication. Ce tissu particulier à l'équilibre fragile entre recherche et industrie a été mon cadre de vie pendant trois ans et je souhaite tout particulièrement remercier Adrien Lelièvre pour son implication, professionnelle et personnelle, dans le projet. Je crois que nous partageons une certaine vision de la mobilité du futur qui nous a permis d'avancer conjointement et efficacement malgré la distance géographique, les aléas sanitaires et politiques ainsi que les moyens parfois limités.

Je tiens à remercier la communauté scientifique qui a toujours répondu présente à mes différentes sollicitations. Je pense notamment à Bruno Jeanneret et Pierre-Olivier Vandanjon de l'université Gustave Eiffel mais aussi à mes anciens professeurs, maintenant collègues du département génie électrique de l'INSA, avec qui j'entretiens de bonnes relations. J'ai aussi une pensée pour tous les contacts qui n'ont pas données lieu à de véritables travaux, mais où l'échange me fût bénéfique, je pense notamment à Ali Makki ainsi que David Grossoleil, dont la thèse fût riche en apprentissages.

Le poste de contractuel à l'université, mais aussi mon rôle d'encadrant de stage m'a aussi permis de nouer des liens avec de formidables étudiants qui ont aussi grandement fait progresser ce travail. Ils se cachent derrière certaines lignes. Merci à Alioune, Jean-François et Felix!

Afin de clôturer les remerciements des nombreux contacts professionnels qui ont structuré cette thèse, je souhaite bien sûr remercier l'ensemble du personnel ainsi que mes collègues des deux laboratoires et de l'entreprise STEE qui m'ont accueilli pendant cette période. Leur soutien, technique, administratif, amical a parfois été très bénéfique au projet.

À l'angle du monde de la recherche et du projet de vie personnel intense des trois dernières années, je souhaite saluer mes collègues doctorants (parfois déjà diplômés), Nagham, William, Alexandre, Étienne, Mohammed... qui ont tour à tour été soutiens scientifiques et amis.

Trois ans sur trois villes, ponctuées de nombreux impératifs industriels et académiques a parfois donné lieu à des semaines chaotiques où le TGV fût mon bureau le plus stable... J'imagine difficilement comment j'aurais traversé cette période sans le soutien de différentes personnes et différents foyers.

J'adresse toute mon affection à la famille Rouvière, où Eric est aussi mon collègue et collaborateur pour leur accueil chaleureux, indéfectible. Aussi, je souhaite remercier la famille Barbedette-Rave pour ces nombreuses soirées passées à l'ombre de leur charmante demeure, petit havre de paix, paisiblement située en Mayenne...

Je salue et embrasse l'ensemble de mes colocataires d'Orléans qui ont toujours été chaleureux, drôles et accueillant avec ma petite chambre gardée aux petits soins pour moi, même plus de deux ans après avoir résilié mon bail dans cette maison...

Je souhaite aussi remercier ceux qui ont eu la gentillesse de relire ce document... Ils se cachent quasiment déjà tous dans ces lignes à l'exception de Julie et de Cécile.

Finalement, je souhaite diriger toute mon attention, mon affection et ma gratitude envers ma famille qui m'a toujours soutenu et qui est une vraie source de richesse humaine et sociale. Et, la plus vaillante pour la fin, Alice, qui m'a soutenu malgré un nombre croissant d'heures supplémentaires, de sacrifices personnels, qui me permettent aujourd'hui de présenter ce document.

TABLE DES MATIERES

<i>RESUME</i>	5
Mots Clés	5
<i>ABSTRACT</i>	7
Keyword	8
<i>REMERCIEMENTS</i>	10
<i>TABLE DES MATIERES</i>	13
<i>VARIABLES</i>	19
Mécanique, dynamique et bilan des forces extérieures du vélo	20
Energétique	20
Machines électriques, paramètres de commande et multiplicateur de vitesse	21
Electronique	21
Composants de stockage : paramètres électriques, physiques	21
Biomécanique	22
Maths, Optimisation, Physique, Chimie, Divers	23
Coûts	23
<i>INTRODUCTION</i>	25
<i>CHAPITRE 1. Le Vélo Hybride Série comme élément de réponse aux enjeux de la mobilité moderne</i>	29
1.1 Les enjeux de la mobilité moderne : introduction au rôle du vélo	30
1.1.1 Santé et environnement : les bénéfices du cycle	31
1.1.1.1 Une meilleure santé	31
1.1.1.2 Un moyen de déplacement écoresponsable et économique	32
1.1.2 Analyse des freins à l'achat et au développement	33
1.1.2.1 Le développement de l'infrastructure	34
1.1.2.2 Considérer les besoins des utilisateurs	35
1.1.3 Le cadre législatif	36
1.2 Objectifs industriels	36

1.3 Les différentes architectures hybrides	37
1.3.1.1 Stratégie d'assistance d'un VAE	40
1.4 Le vélo hybride série comme solution et élément d'étude	41
1.4.1 L'Architecture hybride série pour le cycle, un nombre de projets existants restreint	41
1.4.2 Les supercondensateurs pour la mobilité	42
1.4.3 Idée de design : illustration de la liberté de conception	42
1.5 Le cas d'étude	44
1.6 Le vélo, un modèle extérieur des forces et son bilan	45
1.6.1 Le modèle du cycle	45
1.6.1.1 Bilan des actions extérieures	45
1.6.1.2 L'énergie cinétique et l'inertie d'un cycle	46
1.6.1.3 Le couple à la roue	48
1.6.1.4 Irrégularité du parcours	48
1.6.2 Le freinage régénératif	49
1.6.2.1 Exemple de performance du freinage régénératif	50
1.6.2.2 Le cas spécifique des VAE standards	51
1.6.3 Performances d'un vélo à chaîne	51
1.7 Les axes de travail de l'architecture hybride série	52
1.7.1 Supercondensateurs et batteries : enjeux	52
1.7.2 Le rendement, un problème majeur pour l'architecture hybride série	53
1.7.3 Contrôler le degré de liberté du système	53
1.7.4 Fatigue et gain physiologique pour l'utilisateur	53
1.8 Parcours et cycles de conduite représentatifs	54
1.8.1.1 Étude statistique : le cycle de conduite «Devie»	54
1.8.1.2 Par chaîne de Markov	56
1.9 Conclusion de chapitre	58
<i>CHAPITRE 2. Les supercondensateurs en application pour la mobilité douce</i>	59
2.1 Introduction	60
2.2 Batteries ou supercondensateurs ?	60
2.2.1 Les supercondensateurs : description du composant	61
2.2.1.1 Structure d'un supercondensateur	61
2.2.1.2 Variables de bases	62
2.2.1.3 Durée de vie des supercondensateurs	64
2.2.1.4 Composants industriels	64
2.2.1.5 Les supercondensateurs pour la mobilité douce	65
2.2.2 Les batteries : description du composant	66
2.2.2.1 Les batteries plomb	67
2.2.2.2 Les batteries lithium-ion	68
2.2.2.3 Grandeurs et modèle de travail	69
2.2.2.4 Composants industriels	70
2.2.2.5 Rendement d'une batterie	70
2.3 Méthodologie de comparaison des packs	71
2.3.1 Choix des packs	71
2.3.2 Comparaison des performances	74

2.3.3 Usage et définition d'un profil type de test	75
2.4 Les différents cycles	75
2.4.1 Essais pour identifier la durée de vie des supercondensateurs	76
2.4.1.1 Cycle standard	76
2.4.1.2 Cycle de caractérisation	76
2.4.2 Essais pour identifier la durée de vie des batteries sollicitées par des microcycles	77
2.4.2.1 Cycle standard	77
2.4.2.2 La problématique du centrage	77
2.4.2.3 Cycle de caractérisation	78
2.4.3 Essais pour identifier la durée de vie des batteries sollicitées avec des cycles complets	78
2.4.3.1 Cycle de caractérisation	79
2.4.4 Température et accélération des vieillissements	79
2.5 Résultats expérimentaux	81
2.5.1 Méthodes de mesure	81
2.5.1.1 Le matériel	81
2.5.1.2 Les méthodes de mesure	82
2.5.2 Mise en œuvre des tests	83
2.5.3 Résultats de la caractérisation initiale	84
2.5.4 Résultats du vieillissement	85
2.5.4.1 Vieillissement en cycle complet	85
2.5.4.2 Cellules de batterie et supercondensateurs, les essais en microcycles	87
2.5.4.3 Évolution de la résistance interne	88
2.5.4.4 Caractérisation fréquentielle finale	89
2.5.5 Interprétation des résultats	90
2.5.5.1 Le nombre de cycles équivalent	92
2.6 Conclusion de chapitre	93
<i>CHAPITRE 3. L'architecture hybride série : les conditions d'une efficience suffisante</i>	95
3.1 Le rendement, un verrou majeur de l'architecture hybride série	96
3.2 Les sous-éléments du vélo à architecture hybride série	96
3.2.1 Machine électrique	96
3.2.1.1 Les moteurs : choix de la typologie	97
3.2.1.2 Le rendement : expliciter les pertes et mesures	97
3.2.1.3 Les moteurs pour cycle, une catégorie spécifique	99
3.2.1.4 Modélisation de moteurs du commerce	100
3.2.2 Mécanique	101
3.2.3 Convertisseurs et électronique de contrôle	102
3.2.4 Modèle de cycliste	103
3.2.5 Définition du rendement	104
3.3 Comment est-il possible d'estimer le rendement minimum : cadre de pensée	105
3.3.1 La programmation dynamique comme outil de réponse	106
3.3.2 Mise en équation du problème	108
3.3.2.1 Mise en équation	108
3.3.2.2 Parcours	109
3.3.2.3 Méthode	110

3.3.3 Description des résultats	111
3.3.3.1 La programmation dynamique : solutions optimales	111
3.3.3.2 Résultats : Temps de parcours estimés par la programmation dynamique pour différents trajets.	113
3.3.3.3 Résultats concernant un parcours avec du dénivelé	114
3.3.3.4 Le rendement des sous-ensembles	115
3.3.4 Conclusion concernant le rendement objectif minimum	115
3.4 Est-il possible d'atteindre ce rendement ?	116
3.4.1 Problématique de base	116
3.4.2 Description de la base de données utilisée pour le calcul	116
3.4.3 Modèle utilisé (VEHLIB)	117
3.4.4 Méthode d'optimisation : NSGA II	118
3.4.4.1 Le NSGA II	118
3.4.4.2 Formulation du problème	119
3.4.5 Une simulation unique	121
3.4.6 Optimisation et critique des résultats	122
3.5 Conclusion	125
<i>CHAPITRE 4. Gestion de l'énergie embarquée en temps réel pour un vélo hybride série à base de supercondensateurs</i>	127
4.1 Introduction à la gestion d'énergie	128
4.1.1 L'équilibre énergétique	128
4.1.2 Mode de Contrôle	130
4.1.2.1 Définition des règles à respecter	130
4.1.2.2 Différentes stratégies de pilotage possibles	131
4.1.3 Verrous du problème et solution envisagée	132
4.2 Étude comportementale des solutions par programmation dynamique	134
4.2.1.1 Quelques parcours simulés sur trajets réels	134
4.2.1.2 Le cas théorique d'une côte de 50 m.	136
4.2.1.3 Cas spécifiques et constatations alternatives	137
4.2.1.4 Conclusion concernant la synthétisation de stratégies à base de la programmation dynamique	138
4.3 La logique floue : un outil de construction de la commande	138
4.3.1.1 La logique floue : concepts et intérêts	138
4.3.1.2 Le cas du VHS	139
4.3.1.3 Critères de pilotage	140
4.4 Détermination de la variation de la consigne de vitesse	142
4.4.1 Les différentes dimensions	143
4.4.1.1 L'état de charge	143
4.4.1.2 La pente	144
4.4.2 Résultats numériques	144
4.4.3 Robustesse et sensibilité des algorithmes	146
4.5 La plateforme de test	148
4.5.1 Une plateforme intérieure gérée par Dspace	148
4.5.2 Des outils de mesure universels communicants sous le format ANT+	149

4.6 Résultats typiques et validation du modèle de vélo	150
4.6.1.1 Le vélo hybride série : un véhicule répétable	151
4.7 Mise en situation et mesure de stratégies autonomes	152
4.7.1.1 La stratégie « rule based »	152
4.7.1.2 Comparaison des performances des solutions	154
4.8 Conclusion	156
CHAPITRE 5. L'humain au centre du bénéfice : Usage et notion d'effort sur un véhicule hybride série	157
5.1 Introduction	158
5.2 Construction de critères physiologiques pour évaluer la pertinence d'une hybridation série	158
5.2.1 Objectif principal de l'hybride série : diminuer l'impact des pics d'effort.	158
5.2.2 Définition de critères physiologiques	159
5.2.2.1 Quelques définitions	159
5.2.2.2 Performances standard d'un utilisateur	161
5.2.2.3 Le rendement du corps humain	163
5.2.3 Modèle retenu et pertinence	164
5.2.3.1 Le rythme cardiaque comme critère de performance	164
5.2.3.2 Un modèle pour simuler la réponse cardiaque	165
5.2.4 Rythme cardiaque, fatigue et énergie métabolique	167
5.3 Pilotage d'une machine électrique à faible inertie en générateur adapté au mouvement de pédalage	168
5.3.1 Problématique et illustration de base	168
5.3.2 Résolution du problème	Erreur ! Signet non défini.
5.3.2.1 Le pilotage en couple	Erreur ! Signet non défini.
5.3.2.2 Le pilotage en vitesse	Erreur ! Signet non défini.
5.3.2.3 Le pilotage mixte en puissance	Erreur ! Signet non défini.
5.3.3 Comparaison des pilotages : performances constatées	Erreur ! Signet non défini.
5.4 Impacts comparés d'un effort énergétiquement équivalent entre le vélo hybride série et un vélo traditionnel	170
5.4.1 Caractéristiques des sujets testés	171
5.4.2 Test en intérieur à énergie équivalente constante	172
5.4.3 Les essais en extérieurs	175
5.4.3.1 Parcours 1 : mise en pratique du cycle Devie	175
5.4.3.2 Parcours 2 : un cycle légèrement vallonné	176
5.5 Mesure de l'impact du rendement du vélo hybride série	178
5.6 Conclusion de chapitre	180
CONCLUSION GÉNÉRALE	182
BIBLIOGRAPHIE	188
ANNEXES : COMPLEMENTS D'ESSAIS ET NOTES DE SYNTHESSES	202
A. Les Supercondensateurs, complément d'essais du Chapitre II	203

A.1 Des supercondensateurs plus optimaux existent	203
A.2 Variation de capacitance	204
<i>B. Démonstrateurs</i>	<i>205</i>
B.1 Le premier démonstrateur	205
B.2 Le second démonstrateur	206
B.3 Le vélo triporteur	208
B.4 Le vélo «Suntrip»	212
B.5 Conception et assemblage de la troisième génération de vélos	215
<i>C. Note générale concernant la conception de véhicules hybrides et l'intégration de la traction animale dans le calcul</i>	<i>218</i>
C.1 Les différentes sources	218
C.2 Concevoir un véhicule hybride	219
C.3 Élément de modélisation des systèmes multiphysiques	220
C.4 Eléments de modélisation	220
C.5 Vers l'intégration d'un humain dans la boucle d'optimisation	222
<i>D. Analyse d'un convertisseur DCDC buck-boost bidirectionnel en courant</i>	<i>224</i>
D.1 Cadre général	224
D.2 Pertes dans les interrupteurs de puissance	224
D.3 Les pertes dans l'inductance	226
<i>E. Le solaire, un vrai outil à échelle humaine</i>	<i>228</i>
E.1 Eléments de compréhension du potentiel solaire	228
<i>F. Bases de données</i>	<i>229</i>
F.1 Les supercondensateurs	229
F.2 Les interrupteurs de puissance	230
<i>G. Cas de l'analyse d'un signal sinusoïdal par chaîne de Markov</i>	<i>232</i>
<i>H. Critique des résultats du Chapitre III : une seconde formulation</i>	<i>236</i>
H.1 Nouvelle formulation de la variation d'état de charge	236
H.2 Résultats obtenus	236
H.3 Conclusion	237

VARIABLES

Mécanique, dynamique et bilan des forces extérieures du vélo

t	Temps	s
v	Vitesse du véhicule	$m \cdot s^{-1}$
a	Accélération du véhicule	$m \cdot s^{-2}$
ω_{roue}	Vitesse angulaire de la roue	$rad \cdot s^{-1}$
M_v	Masse totale du véhicule (vélo)	kg
$M_{cycliste}$	Masse du cycliste	kg
M_{roue}	Masse de la roue	kg
M_{velo}	Masse du vélo (sans l'utilisateur)	kg
F_p	Pesanteur (force induite)	N
P_p	Puissance nécessaire pour vaincre la pesanteur	W
F_r	Roulement (force induite)	N
P_r	Puissance nécessaire pour vaincre le roulement	W
F_a	Frottements de l'air (force induite)	N
F	Bilan des forces	N
E_v	Energie cinétique	J
E_p	Energie potentielle	J
α	Inclinaison de la route	rad
Δz	Élévation de la route	m
C_r	Coefficient de roulement	
SC_x	Coefficient de frottement (aérodynamisme)	m^2
R_{roue}	Rayon de la roue motrice	m
D_{roue}	Diamètre de la roue motrice	m
J_{roue}	Inertie d'une roue de vélo	$kg \cdot m^2$
T_{roue}	Couple à la roue	$N \cdot m$
$\alpha_{chaîne}$	Rapport de transmission de la chaîne	
J_{velo}	Inertie complète du vélo ramené au pédaler	$kg \cdot m^2$
$J_{trainer}$	Inertie d'un home trainer	$kg \cdot m^2$

Energétique

η_{VHS}	Rendement du vélo Hybride série (rendement énergétique)	
η_{VSC}	Rendement du vélo standard a chaîne	
η_{mach}	Rendement du moteur et de sa mécanique associée	
η_{gen}	Rendement du générateur et de sa mécanique associée	
r_{KERS}	Pourcentage de récupération de l'énergie	
E_{mach}	Energie dépensée par la machine	J
P_{mach}	Puissance de la machine	W
η_{SSE}	Rendement du système de stockage	
η_{VHS}^e	Rendement énergétique image d'un rendement moyen	
η_{DCDC}	Rendement du convertisseur DCDC	
v_{eq}	Vitesse d'équilibre énergétique du vélo	$m \cdot s^{-1}$

h	Coefficient de variation de la vitesse d'équilibre	
v_{csg}	Vitesse de consigne pour la vitesse d'équilibre	$m.s^{-1}$
O	Variation du temps de parcours par rapport à l'optimal	%

Machines électriques, paramètres de commande et multiplicateur de vitesse

T_{cmd}	Couple de commande du moteur	$N.m$
T_{mach}	Couple de la machine	$N.m$
K_m	Constante idéale de couplage	$N.m.A^{-1}$
I_m	Courant phase équivalent DC (moteur Brushless)	A
ω_m	Vitesse de rotation moteur	$ras.s^{-1}$
$Pertes_{mach}$	Pertes Joules et fer et de frottement de la machine	W
a_m	Constante de pertes de type sec	$W.s.rad^{-1}$
b_m	Constante de pertes de type visqueux	$W.s^2.rad^{-2}$
D_{mach}	Diamètre de la machine au rotor	m
k_{bv}	Rapport mécanique de la boîte de vitesse	
k_{stage}	Rapport mécanique d'un étage mécanique	
η_{bv}	Rendement du multiplicateur de vitesse	
Nb_{stage}	Nombre d'étage du multiplicateur	

Electronique

U_{bus}	Tension du bus	V
U_{csg}	Tension de consigne du bus	V
C_{bus}	Condensateurs présents sur le bus	F
P_{aux}	Consommation auxiliaire de l'électronique	W

Composants de stockage : paramètres électriques, physiques

ω	Fréquence électrique	$rad.s^{-1}$
Z	Impédance électrique	Ω
C_{cell}	Capacité d'une cellule de supercondensateur	F
S	Surface des électrodes des supercondensateurs	m^2
e	Distance entre les électrodes	m
i_{pack}	Courant traversant le pack, respectivement la cellule (SC ou batterie)	A
I	Courant générique pour explication didactique	A
V_{cell}	Tension du composant (SC ou batterie)	V
V_{pack}	Tension du pack (SC ou batterie)	V
E_{cell}	Energie contenue dans la cellule (SC ou batterie)	J
E_{pack}	Energie contenue dans le pack (SC ou batterie)	J
γ	Rapport entre le minimum et le maximum de tension	
M_{cell}	Masse de la cellule (SC ou batterie)	kg

R_{cell}	Resistance interne de la cellule (SC ou batterie)	Ω
N_{ser}	Nombre de cellule en série dans le pack	
N_{par}	Nombre de cellule en parallèle dans le pack	
SOH	Etat de santé des cellules/du pack	
η_{SC}	Rendement des supercondensateurs	
V_{nom}	Tension nominale	V
Es	Densité d'énergie (SC ou batterie)	$J.kg^{-1}$
M_{batt}	Masse d'une batterie	kg
R_{pack}	Résistance du pack (SC ou batterie)	Ω
SOC	State of Charge (Etat de charge)	
SOE	State of Energy (Etat d'énergie)	
η_{batt}	Rendement de la batterie	
C_L	Perte de capacité	F ou Ah
$C_{initiale}$	Capacité initiale de la cellule de batterie	Ah
P_{cell}	Puissance maximum de décharge d'une cellule	$W.kg^{-1}$
Vol	Volume d'une cellule	L
E_{vol}	Energie volumique des cellules	$Wh.L^{-1}$
m_{vol}	Masse volumique des cellules	$kg.L^{-1}$
ΔE	Variation d'énergie dans la cellule au cours d'un (micro)cycle	J
d	Dérive de l'état de charge au cours d'un cycle	$Wh.cycle^{-1}$
Nb_{cycles}	Nombre de cycles effectuées (cycles ou microcycles)	

Biomécanique

T_H	Couple du cycliste	$N.m$
ω_H	Cadence de pédalage du cycliste	$rad.s^{-1}$
θ_H	Position de la pédale	rad
ω_{csg}	Cadence de consigne	$rad.s^{-1}$
P_H	Puissance fournie par le cycliste	W
E_H	Energie fournie par l'utilisateur	J
P_{FTP}	Niveau de puissance maximum indicatif de la forme d'un sujet	W
HR	Rythme cardiaque	bpm, Hz
η_{GE}	« Gross efficiency » ou « rendement » métabolique	
VO_2	Quantité d'oxygène absorbée par minute	$mL.min^{-1}$
EE	Consommation énergétique instantanée du corps humain	$J.min^{-1}$
EE_{tot}	Energie métabolique totale dépensée	J
φ	Coefficient de consommation énergétique	J
τ_R	Taux de récupération du rythme cardiaque d'un individu	$\%$
G_{HR}	Image du gain en énergie	J

Maths, Optimisation, Physique, Chimie, Divers

g	Accélération de la pesanteur : $9.81m. s^{-2}$	$m. s^{-2}$
ρ_{air}	Densité de l'air	$kg. m^{-3}$
s	Etat du système (vitesse, accélération, pente) pour Markov	
ΔX	Pas de discrétisation du parcours	m
Δt	Intervalle de temps entre deux étapes	
J_k	Fonction coût à minimiser	
ϵ	Permittivité diélectrique	$F. m^{-1}$
R	Constante des gaz parfait	$J. mol^{-1}. K^{-1}$
k_B	Constante de Boltzmann	$J. K^{-1}$
T	Température	K
E_a	Energie d'activation	eV
k	Coefficient de vitesse de la réaction	
N_{iter}	Nombre d'itération de la boucle d'optimisation NSGA II	
N_{pop}	Taille de la population de l'algorithme d'optimisation	

Coûts

Ct_{mot}	Coût d'une machine	€
Ct_{bv}	Coût d'une boite de vitesse	€
β_{bv}	Cout d'un étage multiplicateur	€. $etage^{-1}$
Ct_{SSE}	Coût du système de stockage	€
β_{SSE}	Coût faradique d'un supercondensateur	€. F^{-1}
Ct_{VHS}	Coût total du VHS	€

INTRODUCTION

L'augmentation de la part modale du vélo à l'échelle mondiale depuis le début des années 2010 souligne une tendance générale à la modification des modes de transports. Par ailleurs, le changement est entretenu et soutenu par une action associative et politique forte. De nombreux événements, telle que la crise sanitaire due à la covid, la convention citoyenne pour le climat, les élections municipales de 2020 ont renforcé, témoigné de la volonté commune de revoir nos modes de vie et de déplacement en France... Des exemples similaires peuvent être évoqués au niveau européen et mondial.

À l'échelle de la ville, le vélo est un outil puissant permettant de se déplacer rapidement, d'améliorer la santé du cycliste et de rendre la ville plus respirable en réduisant le taux de pollution. Autant d'avantages qui peuvent expliquer son essor. De plus, la (micro) mobilité électrique se démocratise grâce à l'apparition et au développement de nombreux véhicules et notamment à celles du vélo à assistance électrique (VAE). Ces derniers sont équipés d'une chaîne de traction à base d'une batterie et d'un moteur qui assistent énergétiquement l'utilisateur. L'énergie supplémentaire apportée permet la mobilité pour tous. De nombreux usages, portés par une croissance économique forte ont vu le jour et les VAE se sont aujourd'hui diversifiés et ne couvrent plus uniquement les déplacements urbains monopersonnels, mais aussi le transport de charge, le déplacement de plusieurs personnes et de personnes à mobilité réduite. Il devient donc un moyen de déplacement accessible, ouvert et pratique.

L'apport d'énergie de la batterie d'un VAE est une aide majeure permettant de garantir à l'utilisateur confort de pédalage et capacité d'emport. Aujourd'hui en plein essor, le vélo à assistance électrique n'est pourtant pas encore la solution optimale pour l'environnement. En raison des problématiques de recyclage et d'obsolescence rapide qu'elles soulèvent, les batteries au lithium dont sont équipés les vélos sont le point faible de ce type de véhicule. Nous abordons ce mémoire avec plusieurs questions :

D'autres technologies de stockage que les batteries ne répondraient-elles pas à l'usage de la micro-électromobilité ?

Une gestion intelligente de l'énergie humaine seule ne pourrait-elle pas couvrir nos besoins de déplacement tout en maintenant un niveau d'effort modéré ?

L'architecture de propulsion par transmission mécanique de type chaîne, présente-t-elle assez de flexibilité pour aider le cycliste à gérer son énergie ?

Dans l'objectif de comprendre et approfondir ces questionnements, le sujet de recherche présenté dans ce document explore, analyse et ouvre des perspectives concernant le développement d'une nouvelle architecture hybride dédiée au vélo électrique.

L'architecture hybride est au cœur de la recherche automobile, notamment chez Toyota, qui commercialise des modèles hybrides depuis plus de 20 ans et utilise actuellement cette technologie pour intégrer des sources d'énergies différenciantes comme l'hydrogène. Le vélo hybride série est une architecture novatrice, peu répandue, dans le domaine de la transmission d'énergie pour le cycle. L'objectif d'une telle architecture est de retirer la chaîne mécanique, qui est l'élément transmettant la puissance sur les vélos que nous connaissons, et de la remplacer par une chaîne de transmission 100 % électrique. Cette opération a pour objectif de découpler le mouvement de pédalage de l'avancement du vélo et ainsi de pouvoir garantir un effort contrôlé à l'utilisateur. Le second axe de ce projet s'articule autour du remplacement de la batterie par des supercondensateurs, un système de stockage plus propre et plus efficient, mais stockant moins d'énergie

que les batteries de technologie lithium-ion. Ainsi, le sujet de ce mémoire s'intitule : conception optimale d'un vélo à architecture hybride série et à base de supercondensateurs.

La découverte, l'analyse et la mise en pratique des problématiques de thèse ont pu être effectuées avec le concours des trois structures d'accueil qui ont soutenu, enrichi et orienté le projet grâce à leurs spécificités et à leur complémentarité.

L'entreprise STEE, située dans le Loiret est porteuse du projet avec un objectif d'industrialisation. Les travaux réalisés en son sein, principalement présentés en annexe, ont rapidement permis d'identifier les principaux verrous scientifiques du projet. Ce travail a pour ambition de fournir à l'entreprise les moyens de développer de nouvelles solutions de mobilité répondant à de nouveaux usages.

Le laboratoire Ampère est une Unité Mixte de Recherche (UMR) situé dans l'agglomération lyonnaise. Il a été le laboratoire principal d'accueil et nous a permis de bénéficier des multiples compétences présentes au sein du laboratoire dans le domaine de l'électronique, de l'électrotechnique et de l'automatique. La réflexion, sociétale, de la transition énergétique et des systèmes de stockage d'énergie fait partie des priorités du laboratoire qui accompagne donc naturellement ce travail.

Finalement, l'ESTACA, école d'ingénieurs spécialisée dans le monde des transports, avec son laboratoire ESTACA'LAB/S2ET, situé à Laval, a permis d'aborder plus en profondeur les questions d'optimisation et de progresser dans la réflexion sur l'analyse physiologique des cyclistes en situation d'effort sur une structure comme le vélo hybride série. Le travail d'approfondissement vise à développer des nouveaux axes de réflexions concernant la sobriété électrique et les mobilités futures.

Avant de présenter des analyses détaillées concernant les différentes problématiques de recherches identifiées sur le vélo, un premier chapitre explorera l'historique du projet et notamment les raisons qui justifient la mise en place d'une thèse scientifique. Cette analyse permettra de réaliser un état de l'art des différentes architectures et des projets similaires. Ce premier chapitre sera aussi l'occasion de poser les bases scientifiques et mathématiques communes à tous les éléments de réflexion ainsi que de présenter quelques travaux utiles à la compréhension du système et de l'usage du vélo hybride série.

Le second chapitre s'attache à analyser et présenter les verrous liés au remplacement de la batterie par des supercondensateurs dans un véhicule électrique. L'analyse a ici été conçue au sens d'une comparaison stricte et générique des deux technologies. Ainsi, les démarches approfondies dans ce chapitre ne sont pas uniquement valables dans le cas d'étude du vélo, mais ont été conçues pour apporter une vision novatrice au choix du système de stockage dans des applications nécessitant une énergie modérée, associée à une puissance significative.

Dans un troisième chapitre, le cœur de la transmission d'énergie sans chaîne est étudié. La problématique du rendement de transmission a été analysée en mettant en œuvre des techniques de simulation et de contrôle optimal du véhicule. Ce chapitre a également permis de critiquer les premiers résultats obtenus concernant les rendements en se posant la question de leur validité et de leur coût sur une architecture réelle.

La gestion d'énergie joue un rôle crucial dans le cadre du vélo hybride série à base de supercondensateurs. En effet, la quantité d'énergie embarquée est faible et ne permet pas d'assister l'utilisateur pendant de longues durées. Ainsi, le contrôle du moteur doit prendre en compte, dans la limite des connaissances portées à l'organe de décision, la pérennité de la commande et être capable de générer des solutions stables, même aux cas limites. Les bases de la réflexion ainsi que des stratégies seront présentées au chapitre IV afin d'apporter une solution à ces problèmes.

Enfin, un dernier aspect évoquera le confort, l'effort et la potentielle fatigue associés à la pratique du vélo hybride série et du vélo classique. Un focus sur le cas de l'hybride série sera réalisé par la réflexion autour de deux grands axes. Le premier concerne le mouvement de pédalage et la reproduction d'un mouvement fluide. Les notions de pilotage et de contrôle du mouvement sont abordées. Dans un second temps, une comparaison de différentes situations d'efforts physiques a été effectuée. Des mesures physiques sur le cycliste, notamment de son rythme cardiaque, ont permis, en première approximation, d'analyser les différences de comportement du corps humain en fonction du type d'effort et donc du type de vélo sur lequel le cycliste serait le plus à l'aise.

CHAPITRE 1. Le Vélo Hybride Série comme élément de réponse aux enjeux de la mobilité moderne

1.1 Les enjeux de la mobilité moderne : introduction au rôle du vélo	30
1.1.1 Santé et environnement : les bénéfices du cycle	31
1.1.2 Analyse des freins à l'achat et au développement	33
1.1.3 Le cadre législatif	36
1.2 Objectifs industriels	36
1.3 Les différentes architectures hybrides	37
1.4 Le vélo hybride série comme solution et élément d'étude	41
1.4.1 L'Architecture hybride Série pour le cycle, un nombre de projets existants restreint	41
1.4.2 Les supercondensateurs pour la mobilité	42
1.4.3 Idée de design : illustration de la liberté de conception	42
1.5 Le cas d'étude	44
1.6 Le vélo, un modèle extérieur des forces et son bilan	45
1.6.1 Le modèle du cycle	45
1.6.2 La question du freinage régénératif	49
1.6.3 Performances d'un vélo à chaîne	51
1.7 Les axes de travail de l'architecture hybride série	52
1.7.1 Supercondensateurs et Batterie : enjeux	52
1.7.2 Le rendement, un problème majeur pour l'architecture hybride série	53
1.7.3 Bénéficier et contrôler le degré de liberté du système	53
1.7.4 Fatigue et gain physiologique pour l'utilisateur	53
1.8 Parcours et cycles de conduite représentatifs	54
1.9 Conclusion de chapitre	58

1.1 Les enjeux de la mobilité moderne : introduction au rôle du vélo

Bien que les temps de déplacement quotidiens aient peu évolué au cours des dernières décennies (ils occupent entre une à deux heures par jour), la distance parcourue a, elle, considérablement augmenté jusqu'au début du XX^e siècle [1]. Ce phénomène était couplé à une forte croissance des déplacements motorisés et notamment à l'utilisation de la voiture personnelle qui reste majoritaire, loin devant les transports en commun, le vélo ou même la marche à pied [2], [3] (voir Tableau 1-1).

Un nombre conséquent de nuisances associées à l'utilisation de la voiture tels que la pollution, le bruit, mais aussi le stress ou encore le coût total à l'usage, conduisent les collectivités publiques, les associations et certaines entreprises à œuvrer pour privilégier les modes dits « doux ». Par exemple, l'indemnité kilométrique vélo (IKV), instaurée en février 2016, est une mesure qui propose d'indemniser les utilisateurs du vélo sur leur trajets domicile-travail et ainsi incite à modifier les habitudes de mobilités sur ces trajets pendulaires [4].

	Marche	Vélo	Transport collectif	Deux-roues motorisé	Voiture
1982	34,1	4,5	8,6	4,2	48,8
1994	23,2	2,9	9,0	1,4	63,5
2008	22,3	2,7	8,4	1,7	64,9

Tableau 1-1 : Répartition des déplacements locaux en semaine selon le mode de transport principal (part modale en %) [3].

Remplacer la voiture en ville est un défi colossal, et de nombreuses associations et collectivités travaillent dans cette optique. Il est d'ores et déjà possible de constater que la quantité de déplacement motorisé à l'intérieur de certaines agglomérations diminue de manière conséquente ces dernières années, synonyme d'un report modal progressif [4], [5]. Cette constatation devrait continuer à s'accroître, notamment sous l'effet des politiques publiques comme préconisé par la convention citoyenne pour le climat [7].

Dans l'optique de réorganiser nos cités, le vélo pourra avoir un rôle important [6], [7]. En effet, c'est un mode doux très pratiqué et de nombreuses initiatives ont été mises en place de manière à faciliter les déplacements à vélo. Les infrastructures exceptionnelles (autoroutes pour vélo, parkings gardés de 10 000 places, etc.) aménagées pour les vélos et leurs usagers dans les pays du nord de l'Europe témoignent de l'intérêt du cycle dans la ville et la société du XXI^e siècle [10]. La France est aussi innovatrice dans le domaine en tant que pionnière des vélos en libre-service [11], [12]. Ces derniers ont un impact fort sur les modes de déplacements dans les ultra-centres. Ils y représentent près de 10% du partage modal [13]. Les Figure 1-1 et Figure 1-2 soulignent par ailleurs que le vélo reste un objet de déplacement majoritairement urbain avec une proportion décroissante de l'usage du vélo au profit de la voiture avec l'éloignement des centres villes.

Le retour du vélo dans nos modes de vie adresse d'autres problématiques sociétales que la mobilité. En effet, les risques liés à la sous-activité physique pourraient être soulagés grâce à une pratique étendue de la bicyclette et d'autres moyens de déplacement utilisant l'humain comme source principale d'énergie [10].

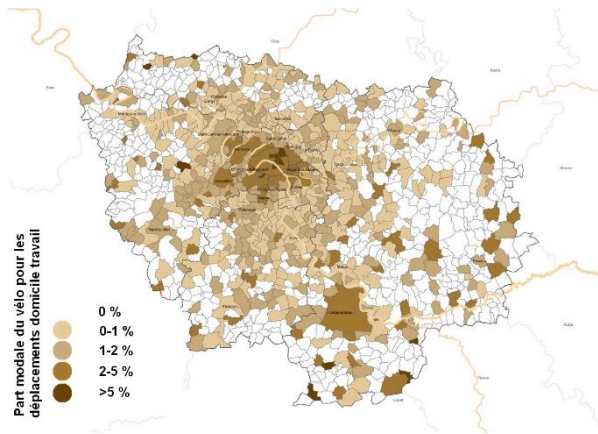


Figure 1-1 : Part modale du vélo en Ile de France pour les déplacements domicile-travail en 2017 (de 0% : blanc à 5% : marron foncé) [15].

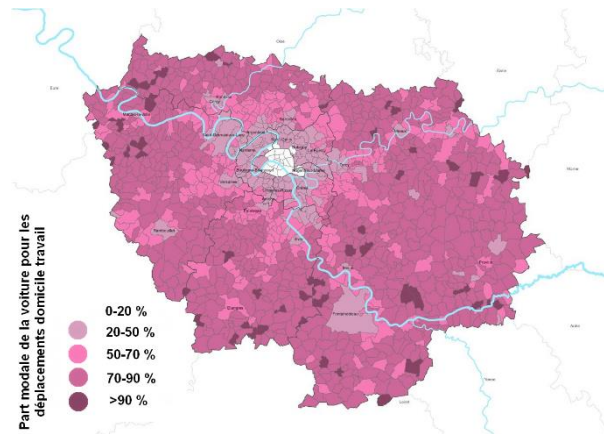


Figure 1-2 : Part modale de la voiture en Ile de France pour les déplacements domicile-travail en 2017 (de moins de 20% : blanc à plus de 70% : violet foncé) [15].

L'essor du vélo dans nos sociétés à l'orée du XXI^e siècle s'accompagne d'évolutions techniques qui permettent à certains de découvrir ou de continuer à pratiquer la mobilité douce. Les vélos à assistance électrique (VAE) sont les fers de lance de cette nouvelle donne et se déclinent pour répondre à de nombreux enjeux de l'écocité future :

- Diminution du temps de transport domicile-travail (les « commutants » ; « velotaffeur ») ;
- Transport de charge personnelles (course, enfants...) : les vélos cargos ;
- Stockage, compacité et transport multimodal : les vélos pliants ;
- Transport de marchandises : les triporteurs cargos et vélos spéciaux.

Le développement de cet ensemble de nouvelles solutions de mobilité implique d'analyser les besoins humains et sociétaux associés afin de créer un écosystème cohérent (voir paragraphes 1.1.1 et 1.1.2).

1.1.1 Santé et environnement : les bénéfices du cycle

1.1.1.1 Une meilleure santé

En plus de sa capacité à réduire le stress, les embouteillages ou encore à augmenter le pouvoir d'achat des ménages, le vélo est un formidable atout pour améliorer la santé de ses pratiquants [2], [11]. Il est en effet démontré que la vulnérabilité des sujets aux pathologies diminue avec le nombre de kilomètres quotidiens parcourus.

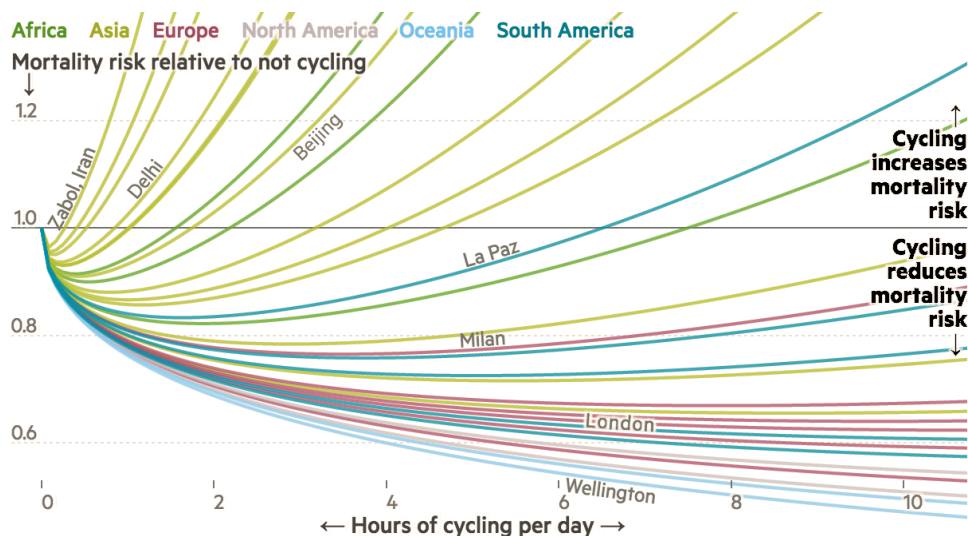


Figure 1-3 : Illustration du risque relatif de mortalité entre des personnes ne pratiquant pas le vélo et celles utilisant ce moyen de locomotion en fonction du temps d'exercice quotidien et de la ville associée à son taux de pollution ($PM_{2,5}$) [17].

Comme le montre la Figure 1-3 ci-dessus, le taux de mortalité décroît avec la pratique du vélo dans les villes occidentales. La figure illustre également la complexité d'une telle affirmation car les villes polluées ne permettent pas de réaliser un constat identique. En effet, on assiste à l'apparition d'un temps maximal d'exercice au-delà duquel le gain induit est inférieur aux dommages engendrés par la pollution sur la santé. Afin de pouvoir estimer l'impact sur la santé des utilisateurs, la Figure 1-3 a été créée sur la base de l'outil HEAT (Health Economic Assessment Tool) qui regroupe de nombreuses études et résultats scientifiques avec pour objectif de proposer un modèle simple, transparent et universel concernant l'impact sur la santé de la pratique du vélo et de la marche [18].

La littérature, en grande partie européenne, confirme que les gains attendus liés à une croissance de l'usage du vélo sont supérieurs aux désagréments engendrés par l'augmentation des risques (exposition aux accidents physiques, exposition à la pollution, ...) [19], [20].

De la même manière, l'utilisation d'un vélo à assistance électrique, qui réduit l'effort que doit fournir un cycliste, a démontré des vertus similaires concernant la santé des utilisateurs [14]. Cette donnée incite à développer cette technologie pour le plus grand nombre.

1.1.1.2 Un moyen de déplacement écoresponsable et économique

Le pétrole, grâce à sa forte densité énergétique (environ 10 kWh/L soit environ $0,1 \text{ €/kWh}$ à l'échelle mondiale)¹ ainsi que l'électricité ($0,12 \text{ €/kWh}$ à l'échelle mondiale)², démultiplient les capacités humaines et ont progressivement remplacé ou assisté l'effort physique dans le quotidien.

¹ Prix du diesel constaté sur [22] à l'échelle mondiale. Pour information, le prix constaté TTC grand public du diesel en France au 1^{er} janvier 2020 est équivalent à $0,15 \text{ €/kWh}$

² Prix du kWh électrique sur [22] à l'échelle mondiale. Pour information, le tarif réglementé particulier EDF en France en janvier 2020 s'établit à $0,16 \text{ €/kWh}$.

Les ordres de grandeur montrent qu'un litre de pétrole contient l'énergie produite par un homme pendant un mois de travail physique (500 Wh/jour) [15]. Au-delà de ce constat, le pétrole est une ressource énergétique finie, responsable, pour partie, des émissions carbonées et il convient de réduire son utilisation de manière forte afin de minimiser son impact sur le réchauffement climatique. C'est dans ce cadre que la communauté mondiale a décidé de tenter de réduire ses émissions de manière à limiter l'élévation moyenne de température mondiale à 2°C d'ici à 2050 [24], [25]. La littérature renseigne qu'un vélo émet environ 20 fois moins de gaz à effet de serre qu'une voiture par kilomètre (en tenant compte des émissions liées à la fabrication et du cycle de vie des véhicules) [2]. Ainsi, une automobile produit en moyenne 250 $gCO_2 eq/km$ alors que le vélo ne produit que 14 $gCO_2 eq/km$.

La mobilité électrique, nouveau fer-de-lance de la transition énergétique, pose également le problème de la provenance de l'énergie (issue de centrales nucléaires, au charbon, solaires, hydrauliques, ...) ainsi que du temps de charge et reste une solution qui fait régulièrement polémique.

Le vélo dispose d'atouts majeurs dans l'objectif de sobriété énergétique que la société est en train de se fixer. Ce sont des structures peu onéreuses, légères, fortement recyclables et facilement réparables qui peuvent couvrir de nombreux usages. L'apparition des VAE joue aussi un rôle important dans la démocratisation du vélo.

En effet, les vélos à assistance électrique consomment environ 4-10 Wh/km (soit ~0,15 €/100km) à la prise [16], [17] à comparer aux 100-200 Wh/km d'une voiture électrique (soit ~2 €/100km) (voir le Tableau 1-2 pour un comparatif plus détaillé). Pour les voitures et pour les VAE, la problématique des batteries, de leur production et de leur recyclage est un sujet important et contraignant pour le secteur de la mobilité [26], [27].

Le vélo (classique ou le VAE) est également un véhicule économique, car il permet de se déplacer en utilisant peu d'énergie, est peu onéreux à l'achat ou à la réparation. Le Tableau 1-2 apporte une vision chiffrée du gain monétaire et montre qu'il est possible de réduire les coûts de transport par un facteur 9 dans certaines configurations et au moins par 2 dans la majorité des cas, en utilisant le vélo à la place de la voiture. Cependant, les usages des différents modes présentés dans le tableau diffèrent et ne sont, par conséquent, pas forcément directement comparables en l'état. La notion de coût annuel total du véhicule montre par exemple avec évidence que le vélo coûte moins cher que la voiture, mais l'automobile permet d'effectuer de nombreux kilomètres et s'amortit ainsi plus vite, permettant de proposer un coût au kilomètre compétitif vis-à-vis des autres moyens de transport.

Moyen de Transport	Coût du transport (€/km)	Coût du transport (€/an)
Voiture	0,3 – 0,45 €/km	4000-9000 €/an
Transport en commun	0,10 – 0,15 €/km	~300-1500 €/an
Vélo	0,05 – 0,20 €/km	50-900 €/an

Tableau 1-2 : Coûts moyens du déplacement modal selon plusieurs études [2], [28]–[32].

1.1.2 Analyse des freins à l'achat et au développement

Se déplacer en vélo est donc sain, écologique et économique [33]. Il est encouragé sur le territoire français par un important tissu d'associations ainsi que par des initiatives publiques (prime à l'achat d'un VAE, indemnisation forfaitaire de l'employeur pour les déplacements domicile

travail à vélo...). L'ensemble de ces facteurs corroborent l'augmentation des ventes de VAE en France qui suivent une croissance annuelle de près de 40% (voir

Figure 1-4) [22].

L'importante croissance de la vente des VAE est un bon indicateur du dynamisme du secteur. Afin d'augmenter encore plus l'attractivité de la mobilité douce et pallier aux craintes des usagers, de nombreux investissements d'infrastructure sont prévus et vont jouer un rôle essentiel dans le plan d'urbanisme des décennies à venir (par exemple : fermeture temporaire aux voitures de la rue de Rivoli à Paris, un axe automobile majeur [35]).

Les indicateurs de croissances sont également positifs au niveau français (voir la Figure 1-4), européen ainsi que mondial avec une multiplication par 5 des ventes entre 2009 et 2018 en Europe [36], [37].

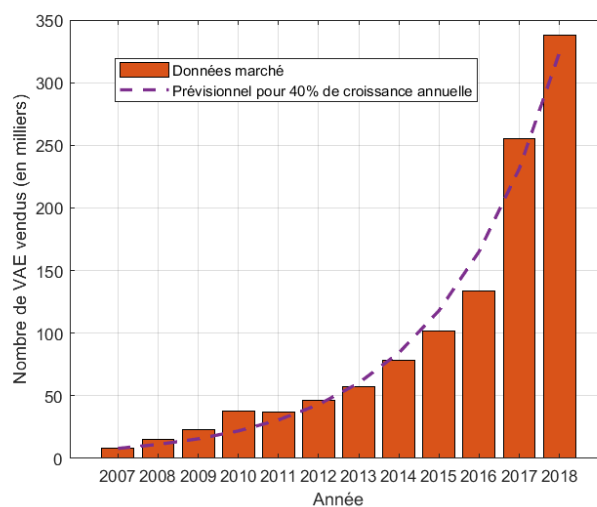


Figure 1-4 : Vente de vélos à assistance électrique (VAE) comparée à l'évolution estimée, en France de 2007 à 2018 [38].

1.1.2.1 Le développement de l'infrastructure

En plus d'être dangereux, le partage à vélo d'une même chaussée avec les véhicules motorisés est une vraie source de mécontentement de la part des cyclistes comme des automobilistes. L'importance des infrastructures a, par ailleurs, été analysée comme un tremplin à l'augmentation de la pratique du vélo [39]–[42].

Ces études soulignent la nécessité pour la sécurité et le sentiment de sécurité à vélo de :

- ❖ Réserver une partie de la chaussée pour les vélos uniquement, améliorer la continuité des pistes ;
- ❖ Séparer les zones automobiles et cyclistes de manière physique dès que la vitesse des véhicules traditionnels peut atteindre 50 km/h ;
- ❖ Améliorer la signalisation de trafic pour les vélos ;
- ❖ Proposer plus de places de parking à vélo sur le territoire et sécuriser ces lieux.

Certaines métropoles, comme Copenhague, sont précurseurs dans la déconstruction des aménagements routiers des années 50-60, et le vélo prend généralement une part importante dans la réorganisation de la cité [43], [44].

1.1.2.2 Considérer les besoins des utilisateurs

Malgré tout, la part modale du vélo en ville reste faible en France (voir le Tableau 1-1). C'est donc qu'il ne répond pas à toutes les exigences des utilisateurs potentiels. Ci-dessous, un graphique issu d'une étude sur la mobilité à vélo en France tente d'analyser les freins à l'utilisation du cycle (voir Figure 1-5).

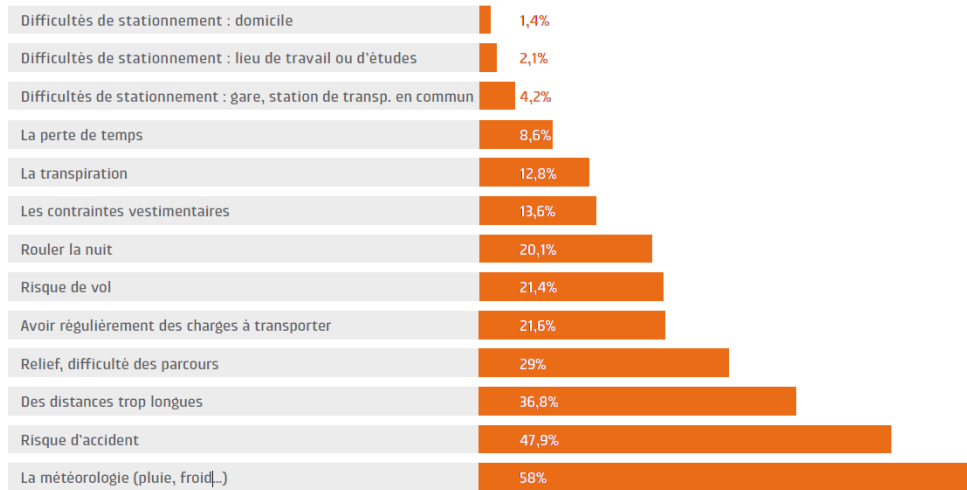


Figure 1-5 : Résultat d'une étude statistique effectuée par Cyclable concernant les principaux freins à l'utilisation du vélo [45].

Cette étude montre bien la diversité des facteurs qui peuvent influencer le choix du mode de transport. Notamment, la météorologie, l'accidentologie et la difficulté du parcours représentent trois domaines critiques à prendre en compte pour améliorer la perception du vélo par la société. Par ailleurs, de nombreux projets industriels existent et se développent afin de proposer de nouvelles solutions de mobilité résolvant une partie de ces contraintes :

- ❖ Les vélomobiles, cycles carénés permettant de réduire la prise au vent et atteindre des vitesses supérieures à celle d'un vélo classique sans aide extérieure. Cette solution présente des avantages de rapidité sur le plat et de couverture météorologique. Elle est cependant onéreuse et peu adaptée aux terrains avec du dénivelé [46] ;
- ❖ Les vélos à assistance électrique permettent de réduire la transpiration, augmentent le rayon d'action de l'utilisateur. La durée de vie des batteries, le prix d'achat (1000-4000€) ou encore le poids (15-30 kg) de ces véhicules restent des freins à son développement [47] ;
- ❖ Les vélos cargos : vraie tendance aux multiples variations qui permet de transporter courses, enfants, colis... L'objectif du vélo cargo est bel et bien de remplacer complètement la voiture en ville ;
- ❖ Les projets accessoires : signalisation, clignotants, amélioration des antivols, ...

Ainsi, de nombreux projets naissent, portés par la forte croissance du marché et les usages très divers du cycle (récréation, sport, « vélotaf », outil de travail, transport de biens, ...).

Parmi toutes ces évolutions, certains problèmes subsistent ou ne sont jamais adressés de manière conjointe, par exemple, la notion de transpiration ou de relief du parcours est actuellement associée à l'insertion d'une batterie qu'il faut recharger. La recharge des véhicules électriques et

donc des VAE est un vrai problème d'usage à laquelle ce manuscrit tente d'apporter une alternative.

La naissance de certaines technologies nécessite déjà de considérer des évolutions, des améliorations, par exemple : le transport de charge est inadapté à la morphologie humaine qui ne peut pas tracter plusieurs centaines de kilogrammes seule grâce à un vélo. L'assistance électrique ne parvient pas forcément à couvrir le déficit de couple qui est source de fatigue pour l'utilisateur. Ce déficit est dû à des limitations législatives concernant les vélos électriques (voir le paragraphe 1.1.3).

1.1.3 Le cadre législatif

Le cadre législatif sur la mobilité douce a initialement été créé de manière à marquer la différence entre les vélos (inclus les VAE) et les cyclomoteurs [48].

Une contrainte de puissance et de vitesse a été imposée aux VAE pour pouvoir rentrer dans la catégorie des vélos, véhicules qui ne nécessitent ni assurance ni permis particulier :

- ❖ Une puissance maximale de 250 W continus mécaniques (contre 4 kW pour les cyclomoteurs) ;
- ❖ Une vitesse maximum de 25 km/h (contre 45 km/h pour les cyclomoteurs) ;
- ❖ Une assistance conditionnée au pédalage (contrairement aux cyclomoteurs qui n'imposent aucune conditions d'effort humain).

Certains vélos, dit S -pedelecs, pouvant atteindre la vitesse de 45 km/h, ne sont donc pas légalement considérés comme des vélos, mais bien comme des cyclomoteurs et nécessitent une immatriculation.

Récemment, le cadre législatif a évolué pour venir intégrer l'ensemble des véhicules mode doux (trottinettes, hoverboards, ...) dans un texte plus cohérent [48].

La norme proposée comporte quelques lacunes. Elle n'est pas très précise sur les conditions de mesure des 250 W puisque l'intervalle de temps de mesure n'est pas précisé. De plus, l'objectif de cette norme est de différencier les catégories de véhicules (typiquement VAE et scooters) pour des questions de classification, d'assurance, ... De nouveaux types de véhicules tentent de s'insérer dans ce cadre normatif en proposant des solutions hors champs comme les vélo cargo qui sont potentiellement des véhicules lents possédant un moteur fort en couple pour pouvoir franchir les côtes. Certains véhicules ne correspondent pas aux définitions des textes et peinent donc à être classés correctement, ce qui limite leur développement et leurs usages.

1.2 Objectifs industriels

L'analyse des freins au développement du vélo, de ses atouts pour la santé publique ainsi que de sa contribution à la décarbonisation de notre environnement a permis de mettre en évidence des usages et des besoins non adressés par les solutions existantes actuelles. L'objectif de cette thèse est d'introduire une nouvelle solution de mobilité répondant à une partie des enjeux exposés ci-dessus.

Le projet est issu de deux visions antagonistes : permettre à l'utilisateur de pédaler « sans se fatiguer » et remplacer la batterie par des supercondensateurs pour « réaliser des véhicules plus durables ». Voici le cahier des charges initial :

- ❖ Intégrer la notion d'effort au sein même des réflexions de recherche afin d'analyser la performance d'un vélo, non pas sur un critère de vitesse, mais bien sur le confort et la fatigue.
- ❖ La sobriété énergétique. Utiliser des supercondensateurs à la place des batteries, notamment pour des raisons écologiques (voir le Chapitre II).
- ❖ La notion de véhicule « unplugged » : ce vélo devra être complètement autonome et ne devra par conséquent pas être rechargé par le réseau électrique. Ainsi, la source d'énergie sera uniquement humaine.

Le projet est porté par une entreprise (STEE, Olivet (45)) et deux laboratoires (Ampère, Lyon et ESTACA, Laval), le lecteur pourra trouver des renseignements approfondis concernant les prototypes développés en Annexe B.

Permettre à l'utilisateur de pédaler avec peu d'effort et donc avec un minimum d'apport énergétique est une question de minimisation et donc d'optimisation du système. Contrôler un système nécessite de pouvoir le piloter (voir Chapitre IV). Le lissage en puissance des sources (solution détaillée dans ce chapitre et aux Chapitres III, IV et V) est uniquement réalisable sur un véhicule hybride. Les paragraphes suivants aborderont les différentes architectures hybrides avant d'exposer la solution retenue pour ces travaux.

1.3 Les différentes architectures hybrides

Il existe de nombreux types d'architectures hybrides. En effet, la nature même de l'hybridation est d'associer plusieurs sources et systèmes de stockage de l'énergie de manière à se compléter et se soulager mutuellement (par exemple : un couplage batterie/supercondensateurs afin d'allier la densité énergétique élevée des batteries et la capacité en puissance des supercondensateurs). L'objectif de l'hybridation est de réduire le dimensionnement de certains composants ou bien encore d'améliorer les performances (efficacité, coût...) du système.

La définition des sources d'énergie intégrables sur un vélo va permettre de mieux classifier les vélos hybrides. En effet, ces derniers, parfois appelés vélos à assistance électrique (VAE) pour leur forme la plus commune sont généralement constitués des éléments suivants :

- ❖ un homme, produisant une puissance mécanique grâce au pédalage ;
- ❖ un système de stockage permettant d'assister l'utilisateur. Il est généralement constitué à partir de batteries. L'énergie électrique est alors systématiquement restituée sous forme mécanique par un moteur.

Cette configuration est typique des VAE, cependant, de nombreuses variantes existent :

- ❖ l'utilisation de panneaux solaires ou piles à combustible non réversible comme sources supplémentaires d'énergie [49] ;
- ❖ le remplacement des batteries par des supercondensateurs ou des roues d'inertie a aussi été expérimenté en laboratoire.

Les piles à combustible et les panneaux solaires étant des sources extérieures d'énergie, celles-ci ne seront pas considérées dans le cadre principal de ce manuscrit, qui a pour objectif de réaliser un vélo à source d'énergie 100% humaine. L'ensemble des vélos à architecture hybride série construits pendant le doctorat ont été présentés en annexe B. Les résultats expérimentaux s'appuient sur des relevés effectués sur ces structures. L'annexe C détaille quelques étapes clés de la conception d'un véhicule hybride.

Le stockage effectué grâce à une roue d'inertie dispose d'une énergie massique trop faible ($\approx 0.2 \text{ Wh/kg}$) dans le cas d'application du vélo pour être intéressante [50].

1.3.1.1 Les différentes architectures hybrides

Les architectures présentées ci-dessous sont donc constituées d'un cycliste, d'un système de stockage et d'une machine électrique. Deux grands types de structures peuvent être dégagées :

- ❖ Les architectures hybrides parallèles où la puissance humaine mécanique est transmise par une chaîne et l'énergie de la batterie s'ajoute à celle de l'utilisateur grâce à une machine électrique qui transforme l'énergie. On distingue deux cas : avec ou sans la possibilité de régénération.
- ❖ L'architecture hybride série où l'énergie transite totalement sous forme électrique. Dans cette architecture, la machine convertit la totalité de l'énergie (utilisateur + assistance) et est donc le seul à propulser le vélo, il n'y a plus de chaîne. Le cycliste ne transmet plus directement sa puissance à la route, mais transmet la totalité de son énergie mécanique sous forme électrique grâce à un convertisseur. Le vélo hybride série agit alors comme un variateur de vitesse continu puisque aucun lien mécanique ne relie la cadence de pédalage et la vitesse du vélo. Une telle architecture peut être dotée d'un système de stockage permettant de gérer ou d'augmenter l'énergie humaine produite.

Les principes de ces architectures sont résumés grâce à la Figure 1-6.

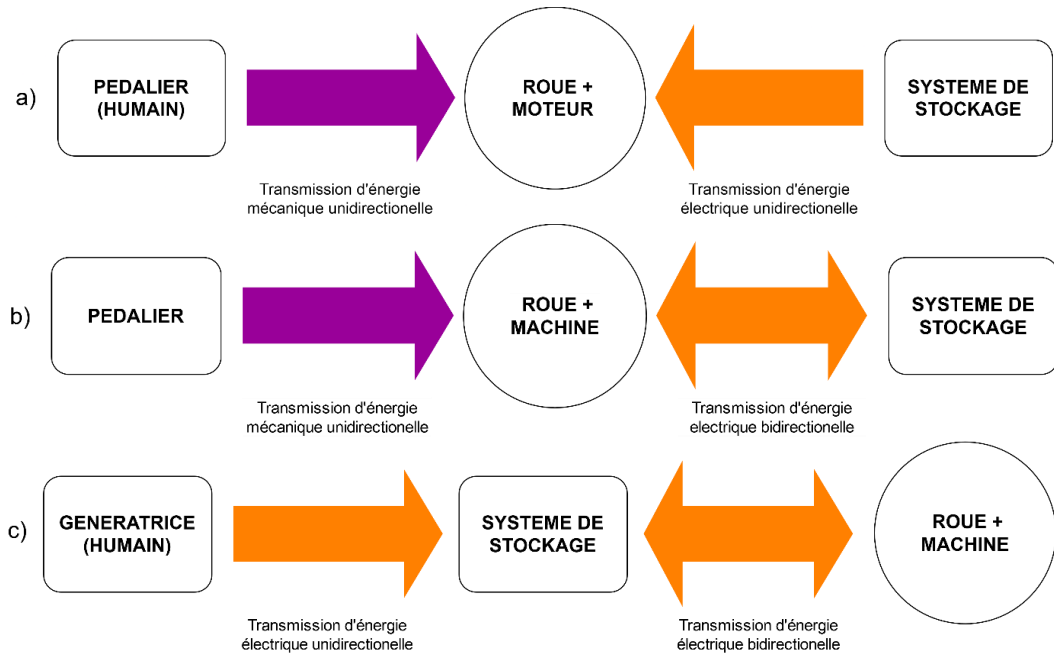


Figure 1-6 : Schémas explicatifs des différentes hybridations (a) : Hybride parallèle sans régénération (b) : Hybride parallèle avec régénération (c) Hybride série.

1.3.1.2 L'architecture hybride parallèle pour le VAE

L'architecture hybride parallèle est actuellement très majoritaire sur le marché et dispose de nombreux exemples d'application qui peuvent différer dans la mise en œuvre comme en témoigne la Figure 1-7 :

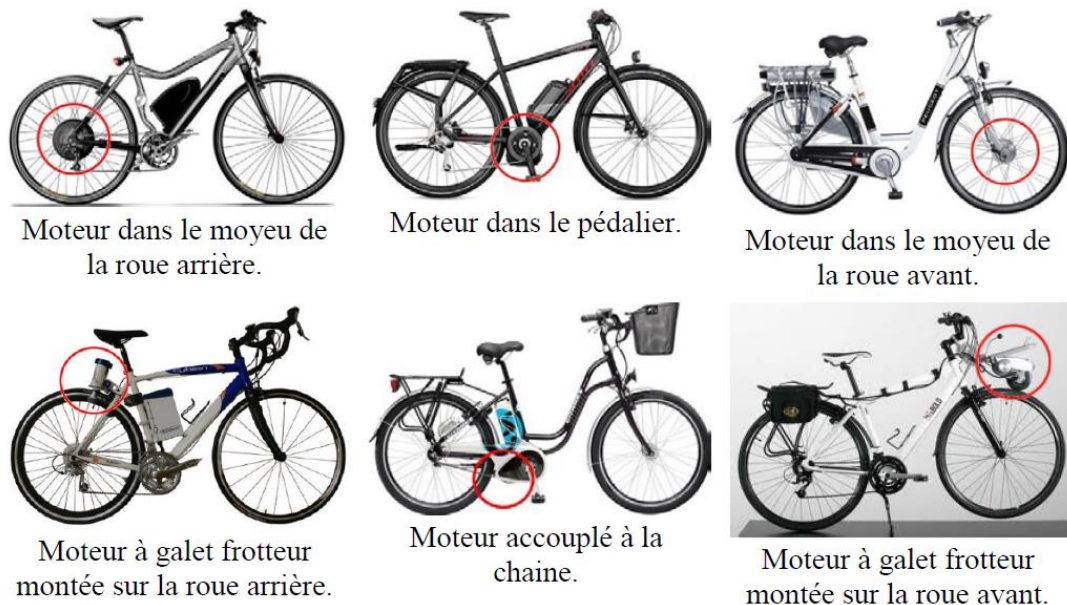


Figure 1-7 : Les différentes architectures hybrides parallèles de VAE [51].

Les données récoltées par Arnaud Devie [52], présentées au *paragraphe 1.8*, ont permis d'analyser les performances de deux vélos électriques distincts.

La consommation d'un vélo électrique a ainsi pu être examinée (voir Tableau 1-3) et est cohérente avec le besoin énergétique d'un VAE décrit dans la littérature : 4-10 Wh/km [53]–[55] :

	VAE 1	VAE 2
Consommation d'assistance (Wh/km)	4.8 Wh/km	6.56 Wh/km

Tableau 1-3 : Mesure de la consommation de deux VAE distincts.

Ainsi, en considérant une consommation moyenne de 6 Wh/km (dépendant du niveau d'assistance) et une batterie neuve de 300 Wh, l'autonomie estimée est de 50 km.

1.3.1.3 Stratégie d'assistance d'un VAE

Les VAE sont limités en puissance et en vitesse par la législation européenne [48]. Ainsi, l'assistance doit s'arrêter lorsque le véhicule atteint 25 km/h. De plus, le niveau d'assistance nominal (<25km/h) ne doit pas dépasser les 250 W mécaniques continus. Le niveau d'assistance en puissance (P_{assist}) ou en couple (T_{assist}) peut souvent être modulé par l'utilisateur.

Selon le type de VAE, l'assistance peut être à consigne fixe (par exemple : $P_{assist} = 100, 200, 250 W$, $T_{assist} = 10, 20, 40 Nm$) ou bien encore proportionnelle au couple du cycliste T_H si un capteur est installé (par exemple : $T_{assist} = \beta T_H$ avec β coefficient d'assistance dans la limite des 250 W d'assistance réglementaire). Justin Lemire de Grin technologies propose une revue des différentes stratégies du marché dans [56]. L'assistance est, de plus, souvent diminuée progressivement de manière à éviter les transitions discontinues d'assistance à 25 km/h (voir Figure 1-8).

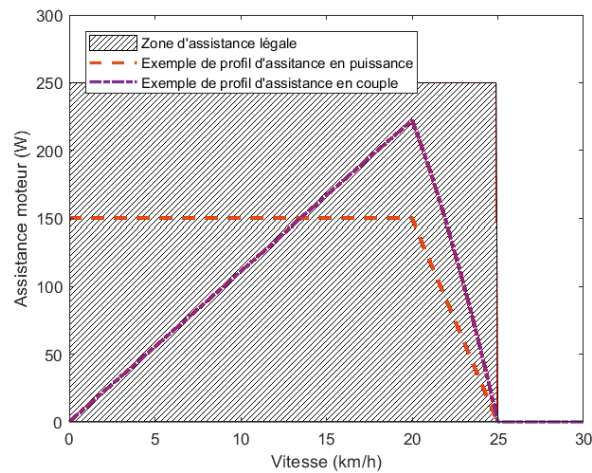


Figure 1-8 : Zone d'assistance autorisée et exemples arbitraires de profils d'assistance en puissance et en couple pour un VAE.

1.4 Le vélo hybride série comme solution et élément d'étude

Le projet sur lequel porte ce manuscrit s'inscrit dans la promotion du vélo en tant que mode de transport, et ce, à travers l'analyse, l'optimisation et la conception d'une nouvelle génération de VAE dédiée aux trajets quotidiens et récréatifs. Le choix d'une hybridation de type série devrait être avantageux par rapport à une architecture hybride parallèle pour répondre aux enjeux exposés au paragraphe 1.2 (confort/fatigue, sobriété, autonomie énergétique). En effet :

- ❖ Il n'y a plus de liaison mécanique entre le pédalage et l'avancement du vélo. Il est donc possible de découpler la sensation et la puissance du cycliste de l'effort à fournir à la route. L'absence de lien permet de contrôler la fatigue de l'utilisateur en lui permettant de pédaler à puissance fixe (et quand il le souhaite).
- ❖ C'est aussi l'opportunité de stocker l'énergie électrique sur des phases normalement exemptes d'effort (freinage, descente, arrêt). La récupération se fait par freinage régénératif et par la réserve de l'énergie non consommée produite par l'utilisateur.
- ❖ La possibilité de créer un vélo sans chaîne permet de se questionner avec de nouvelles contraintes sur le design avec un axe fort concernant le confort et l'usage.

Le système a donc pour objectif de lisser l'effort de l'utilisateur sur un trajet donné. Ce lissage ne nécessite que quelques Wh pour les usages les plus courants (faible dénivelé notamment). Ainsi, le remplacement des batteries traditionnelles par des supercondensateurs est envisageable et sera analysé (voir Chapitre II).

Avec une architecture sans couplage mécanique, une phase d'appropriation de l'utilisateur est aussi nécessaire. Il peut en effet alors pédaler dans les descentes avec la même intensité que dans les montées. Pour une architecture mécanique à trois roues (stable), le cycliste peut même pédaler sur place, à l'arrêt.

L'état de l'art concernant les vélos à architecture hybride série est restreint. En effet, seuls quelques projets similaires ont été identifiés.

1.4.1 L'Architecture hybride série pour le cycle, un nombre de projets existants restreint

L'univers de l'architecture hybride série pour le vélo (VHS) est petit et une synthèse a été proposée par Fuchs [57]. Il identifie, dans les années 2000, l'ensemble des avantages et des freins liés à la réalisation d'un vélo hybride série. La majorité de ses travaux seront approfondis dans ce manuscrit. Il conclut notamment quant à la nécessité d'un apport permanent d'énergie sur les VHS dû au rendement global de transmission inférieur à celui d'une chaîne. Une estimation plus détaillée du rendement et de la faisabilité de réduire l'énergie embarquée sera au cœur des réflexions (voir Chapitre III). En addition à l'état de l'art de [55], plusieurs autres projets, plus récents, ont été identifiés :

- ❖ Le projet SenZA, piloté par l'université de Milan, traite du VHS sous l'angle du contrôle commande. Leur force est de s'appuyer sur leurs propres travaux réalisés sur le Bike+, un système autonome hybride parallèle avec une batterie dédiée au vélo [40]–[43]. Les essais de contrôle-commande effectués semblent pertinent mais tentent de

reproduire le fonctionnement d'un vélo à chaîne et mettent donc de côté la possibilité de découplage entre la fréquence de pédalage et la vitesse du vélo.

- ❖ Le projet Mandofootloose est le seul projet industriel de vélo hybride série existant sur le marché. Le vélo est un VAE puisqu'il est équipé d'une batterie à recharger. Le Mandofootloose tente aussi de réaliser un pilotage autonome du moteur sur le mode d'un vélo traditionnel avec une appréciation des médias mitigée à cause d'un moteur peu puissant ainsi que d'une sensation de pédalage et d'un bruit à l'usage peu satisfaisants [62], [63]. La conception de ce vélo a été plus orientée par une volonté de réaliser un vélo pliant, que d'exploiter les potentialités offertes par l'hybridation série. Ainsi le générateur au niveau du pédalier, peut-être plus qualifié d'un prolongateur d'autonomie, plutôt que d'une source exclusive d'énergie humaine.
- ❖ Le projet bike² présente un générateur pédalier intégré de type Brose ainsi que la possibilité de reproduire le fonctionnement d'un vélo à chaîne, mais avec une transmission électrique de type hybride série. Leur positionnement est similaire à celui du Mandofootloose mais avec un degré technique plus abouti.

1.4.2 Les supercondensateurs pour la mobilité

Tous les projets de vélo hybride série connus à ce jour ont été constitués avec un système de stockage à base de batteries. Intégrer des supercondensateurs sur ce type d'architecture nécessite de lever des verrous détaillés au paragraphe 1.7. Les supercondensateurs ont cependant déjà intéressé le milieu universitaire concernant la mobilité douce et notamment le vélo selon deux axes :

- ❖ La mise en parallèle de batteries et de supercondensateurs afin de valider, à petite puissance et petite échelle, le lissage de puissance sur la batterie. L'objectif est de prolonger l'autonomie et la durée de vie du véhicule [64]–[66].
- ❖ La création de vélo électrique à architecture parallèle avec un remplacement complet du pack batterie par un pack supercondensateurs. Les résultats de ces tests ont permis de mettre en évidence la pertinence du vélo à base de supercondensateurs dans des milieux contrôlés (parcours connus) grâce à la présence de la recharge rapide ainsi que de faibles distances de déplacement. Ces études ont aussi permis de pousser les réflexions concernant la consommation énergétique des véhicules de type vélo et émis des hypothèses sur de nouveaux types de contrôle commande de la machine à évaluer afin d'assister moins pour consommer moins [67], [68].

1.4.3 Idée de design : illustration de la liberté de conception

Le système hybride série permet, grâce à son découplage, de pédaler dans n'importe quelle condition, et ce, même à l'arrêt. Cette possibilité, qui peut être déroutante au premier abord, permet d'envisager des structures mécaniques originales. Par ailleurs, le pédalage à l'arrêt a imposé la stabilité du véhicule et ainsi fixé le design sur la base d'un tricycle. Le tricycle est l'architecture qui permet donc de maximiser le temps de pédalage du cycliste et donc à énergie totale identique, de minimiser la puissance à produire. De plus, les tricycles existent sous de nombreuses formes permettant d'avoir des positions ergonomiques, confortables et performantes pour le corps

humain. Dans l'objectif d'optimiser le confort de l'utilisateur, la géométrie du cadre a une influence majeure [69]–[72].

Une roue motrice de petit diamètre arrière est utile pour soulager le moteur en réduisant le couple nécessaire (voir paragraphe 1.6.1 et Chapitre III) et est aussi devenue une partie intégrante du design. De plus, un volume de la taille d'une batterie de vélo au minimum doit pouvoir être intégré au vélo et donc disposer d'un espace réservé (voir Chapitre II).

Cette thèse a donc donné lieu à une réflexion sur l'ergonomie des vélos. Nous proposons dans cette partie de visualiser des concepts bikes (voir Figure 1-9 et

Figure 1-10), imaginés sur mesure sur la base de nos contraintes (ergonomie, emplacement pour le système de stockage, petite roue motrice, ...) qui, faisant fi des standards mécaniques génériques des cycles et tirant avantage de l'absence de chaîne, ont des designs novateurs et futuristes.



Figure 1-9 : Concept bike de vélo à architecture hybride série.



Figure 1-10 : Concept bike de vélo à architecture hybride série avec deux roues frontales pour la stabilité (pédalage à l'arrêt).

1.5 Le cas d'étude

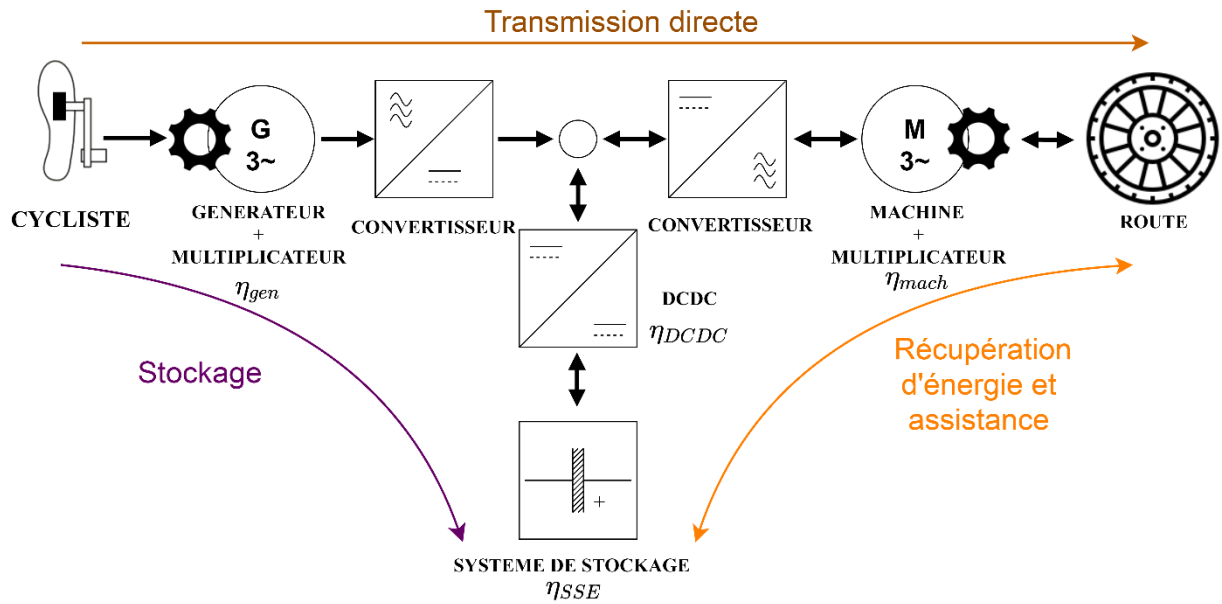


Figure 1-11 : Synoptique du Vélo hybride série et ses différents sous-ensembles.

Le sujet de ce manuscrit concerne la conception optimale d'un vélo à architecture hybride série et à base de supercondensateurs. Le synoptique de l'architecture type d'un tel véhicule est présenté sur la Figure 1-11 (à lire de gauche à droite).

En premier lieu, le cycliste est la source unique d'énergie du système. Un utilisateur moyen pédale à une cadence de 40 à 90 tr/min et fournit une puissance variant entre 50 et 150 W selon les cyclistes (voir Chapitre V). Les cadences sont assez faibles et le couple généré par un utilisateur peut aisément dépasser les 20 Nm [73].

La génératrice est connectée au pédalier et assure la conversion de l'énergie mécanique humaine en énergie électrique. Pour garantir un fonctionnement optimal, un pilotage électronique lui est associé. De même, un réducteur mécanique peut être inséré dans le système de manière à positionner la génératrice à son régime optimal (voir Chapitre III). En effet, le couple générateur nominal est proportionnel au carré du rayon et des contraintes de compacité et de poids peuvent imposer l'usage d'un multiplicateur mécanique (un générateur sans engrenages serait donc d'un grand diamètre) [74].

L'énergie peut ensuite être transférée au système de stockage d'énergie (voir Figure 1-11 : Stockage), ici à base de supercondensateurs. La transmission de l'énergie au système de stockage se fait par un convertisseur DC/DC (voir Chapitre III) qui doit donc être bidirectionnel en courant (pour pouvoir injecter et restituer de l'énergie au système). Ici, le convertisseur est nécessaire, car la tension des supercondensateurs est fortement variable en fonction de l'état de charge de ces derniers (voir Chapitre II).

L'énergie électrique peut aussi être instantanément utilisée par la machine et son électronique associée afin de la reconvertir en énergie mécanique (voir Figure 1-11 : transmission directe). La machine est l'unique propulseur du cycle et c'est donc un élément essentiel de la chaîne de conversion. Il est susceptible de fonctionner sur des points très variables et de récupérer de l'énergie dans les descentes et au freinage.

Le système de stockage d'énergie (SSE) consiste en un assemblage de supercondensateurs. Les supercondensateurs sont des SSE proposant une densité énergétique avoisinant les 5-7 Wh/kg (inférieure à celle des batteries) ainsi qu'une puissance massique d'environ 5-10 kW/kg (des précisions sur le comparatif entre les deux technologies ainsi que sur le besoin de l'application seront apportées au second Chapitre). Ces derniers sont montés en série de manière à maximiser la tension tout en veillant à ne pas dépasser les seuils TBTS (Très Basse Tension de Sécurité) soit 60 V [75]. De plus, la mise en parallèle de supercondensateurs n'est pas nécessaire, car l'assistance est limitée en puissance (250 W compte tenu du cadre législatif comme indiqué au paragraphe 1.1.3).

La notion de rendement (η_{VHS}) est un point essentiel du fonctionnement de ce type d'architecture. En effet, l'énergie est convertie plusieurs fois et l'énergie restituée dépend du nombre de conversions (*i.e.* : est-ce que l'énergie est passée par une phase de stockage dans les supercondensateurs?). *Par exemple* : Un rendement de 0,85 sur l'ensemble convertisseur générateur ainsi que sur l'ensemble convertisseur machine conduit ainsi directement à un rendement véhicule instantané tel que $\eta_{VHS} < 0,72$ ($= 0,85 \cdot 0,85$).

1.6 Le vélo, un modèle extérieur des forces et son bilan

1.6.1 Le modèle du cycle

1.6.1.1 Bilan des actions extérieures

De manière à dimensionner le système de puissance, à simuler le cycle, mais aussi de mieux évaluer les performances des vélos standards, il est nécessaire d'explicitier les actions extérieures mises en jeu lorsque le vélo se déplace à une vitesse v ($m \cdot s^{-1}$) [76]. Le bilan des forces extérieures F (N) ainsi que le bilan de l'énergie cinétique E_v (J) du cycle sont les deux méthodes classiques utilisées pour calculer les variations de vitesse d'un véhicule de masse M_v (kg) et d'accélération a ($m \cdot s^{-2}$) au cours du temps t (s) :

$$\sum F = M_v a \quad \text{et} \quad \Delta E_v = \int_{t=t_1}^{t=t_2} P_{roue} - P_a - P_r - P_p \quad 1.1 \quad 1.2$$

Plusieurs forces et leurs puissances associées ($P = Fv$) peuvent être dégagées de l'analyse des actions extérieures mises en jeu sur le système (voir Figure 1-12) :

- ❖ La force F_p (N) induite par la pesanteur g ($m \cdot s^{-2}$) dans une pente (inclinaison : α) :

$$F_p = M_v g \sin(\alpha) \quad 1.3$$

- ❖ La force F_r (N) due au frottement de roulement entre la route et les pneumatiques (coefficient de roulement : C_r), celle-ci est dépendante des pneumatiques, de leur pression de gonflage et de l'état de surface de la route :

$$F_r = M_v g C_r \tag{1.4}$$

- ❖ La force F_a (N) appliquée par les frottements de l'air sur le cycliste dépend notamment de la densité atmosphérique ρ_{air} (kg/m^3) ainsi que du coefficient aérodynamique SC_x (m^2). Le coefficient SC_x dépend du vélo, de l'utilisateur et de sa position :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_{air} SC_x v^2 \tag{1.5}$$

La Figure 1-13 montre l'influence des actions extérieures pour différents paramètres (inclinaison, coefficient de frottement, ...). Il est alors possible d'évaluer graphiquement que la pente est un facteur prépondérant d'effort. L'action du vent, négligeable à petite vitesse ($v < 3m/s$) devient rapidement significative au-delà. L'effort résultant du roulement, globalement plus faible, est de la même forme que celle de la pente.

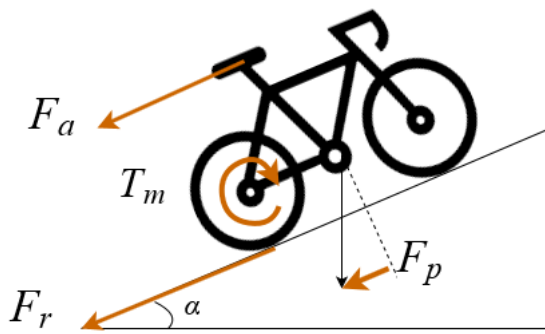


Figure 1-12 : Modélisation des actions extérieures sur un cycle

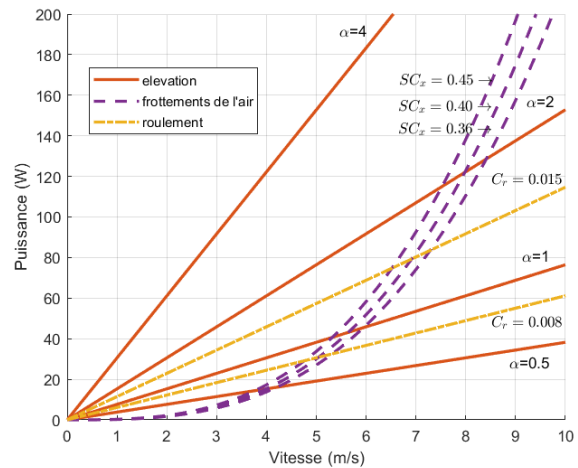


Figure 1-13 : Bilan des forces extérieures pour différentes valeurs de paramètres (la pente en %, le coefficient aérodynamique en m^2 , le coefficient de roulement sans unité).

1.6.1.2 L'énergie cinétique et l'inertie d'un cycle

L'inertie d'un vélo permet de disposer de phases de roue libre (procurée par la masse du vélo M_{velo} (kg), du cycliste $M_{cycliste}$ (kg) et de l'inertie J_{roue} ($kg.m^2$) de chacune des parties tournantes). Elle est un facteur primordial de notre expérience cycliste. En effet, l'inertie limite les variations de vitesse et impose un surplus d'effort lors d'un démarrage. C'est pour vaincre l'inertie et gagner en énergie cinétique qu'un cycliste fournit un pic de couple et donc de puissance de manière à accélérer. La Figure 1-14 illustre un profil type de vitesse sur 250m. Elle illustre également la puissance mesurée de l'utilisateur ainsi que la puissance estimée grâce au modèle présenté dans au paragraphe précédent. La différence peut notamment être imputée à l'erreur de mesure de la vitesse et de la puissance mais aussi aux paramètres de simulation.

Sur un vélo hybride série, le sur-couple initial disparaît pour l'utilisateur. En effet, la différence de puissance est compensée par le système de stockage d'énergie.

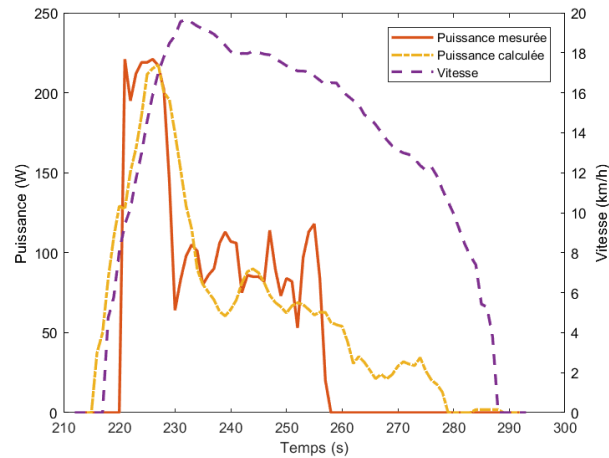


Figure 1-14 : Exemple typique mesuré de séquence entre deux arrêts sur un vélo standard : phases d'accélération, de maintien en vitesse puis de roue libre avec un sur-effort au démarrage. La puissance mesurée est également comparée à celle extrapolée des équations (1.3, 1.4, 1.5, 1.6).

L'énergie cinétique prend la forme suivante, classique, à laquelle les masses tournantes ont été intégrées (roue de diamètre D_{roue} (m), vitesse de rotation ω_{roue} (rad. s⁻¹)) :

$$E_v = \frac{1}{2} M_v v^2 + 2 \frac{1}{2} J_{roue} \omega_{roue}^2 = \frac{1}{2} \left(M_v + \frac{8J_{roue}}{D_{roue}^2} \right) v^2 \quad 1.6$$

avec

$$J_{roue} = \frac{1}{4} M_{roue} D_{roue}^2 \quad 1.7$$

Le tableau 1-4 indique des masses dites tournantes apportées par des paires de roues standards du marché (en considérant la masse des roues et des pneumatiques M_{roue} (kg) concentrées sur la périphérie nominale de la roue et l'influence des rayons et moyeux négligeables).

	Masse d'une roue sans moyeu	Masse tournante équivalente	Masse totale équivalente
Ensemble haut de gamme vélo de course 700C	0,7 kg	1,4 kg	2.1 kg
Ensemble entrée de gamme cyclotourisme 700C	1,6 kg	3,2 kg	4.8 kg

Tableau 1-4 : Exemple de calcul de masses tournantes pour deux roues standards du marché.

Ainsi, la masse tournante des cycles, qui doit être mise en mouvement, « triple » le poids des roues. Cette masse fictive ne rentre en compte que lors des variations de vitesse, ce qui souligne l'importance des parties tournantes et de leur poids surtout si les accélérations sont courantes. Cela explique aussi pourquoi il est préférable d'acquérir un vélo avec des roues légères plutôt qu'un cadre léger pour un même poids total.

1.6.1.3 Le couple à la roue

Le couple à la roue T_{roue} (Nm) est représentatif de la dynamique du vélo puisque c'est ce dernier qui propulse le cycle. Sur un vélo à architecture hybride série, contrairement à un vélo à assistance électrique standard, le couple à la roue est totalement fourni par le moteur. Cela implique d'avoir un moteur suffisamment « puissant », où plus justement avec un couple nominal important, pour franchir les côtes. On rappelle que :

$$P_{roue} = \omega_{roue} T_{roue}. \quad 1.8$$

Le couple nécessaire est également dépendant du diamètre de la roue R_{roue} (m). Plus la roue est petite, plus le couple nécessaire est faible. En régime permanent, on a (extrait de l'équation 1.2) :

$$T_{roue} = R_{roue}(F_a + F_r + F_p) \quad 1.9$$

Le couple moteur sert également à accélérer. Le besoin en couple moteur est exprimé, en négligeant les frottements de l'air et de contact au sol, par la somme de deux composantes (extrait de l'équation 1.1). L'équation 1.10 est utile pour dimensionner les machines électriques et définir le couple minimal nécessaire en fonction de la pente et de l'accélération souhaitées pour mettre le véhicule en mouvement.

$$T_{roue} = R_{roue}F_p + M_v R_{roue}a \quad 1.10$$

1.6.1.4 Irrégularité du parcours

Le vélo hybride série à base de supercondensateurs a été introduit comme un véhicule permettant de lisser les irrégularités du terrain pour son utilisateur sans avoir à modifier les rapports de vitesses. Les irrégularités sont majoritairement constituées de démarrages et de côtes. Dans le premier cas, l'énergie du SSE vient compenser la variation d'énergie cinétique (définie par l'équation 1.6). En considérant une masse totale du véhicule $M_v = 100 \text{ kg}$ et une vitesse de croisière de $v = 20 \text{ km.h}^{-1}$ alors l'énergie cinétique accumulée pendant le démarrage est égale à $E_c = 0,42 \text{ Wh}$ qu'il faut compenser.

Franchir une côte (et l'élévation Δz (m) associée) est équivalent à accumuler de l'énergie potentielle E_p (J) (cf. équation 1.11) (qu'il est partiellement possible de récupérer, voir *paragraphe 1.6.2*). Cette énergie peut être compensée par le SSE à hauteur de l'énergie utile du stockage.

$$E_p = M_v g \Delta z \quad 1.11$$

Ainsi, l'énergie additionnelle nécessaire pour franchir une côte ($\Delta z = 20 \text{ m}$), pour une masse de 100 kg , est de $E_p = 5,55 \text{ Wh}$.

Ces calculs sont bruts et ne comprennent pas la notion de rendement de la chaîne de conversion. Néanmoins, il est possible de remarquer que l'énergie nécessaire pour monter est bien supérieure à celle nécessaire pour accélérer.

Les supercondensateurs installés sur un vélo à architecture hybride série découplent complètement l'effort de l'utilisateur du terrain. Ainsi, l'humain pédale dans une situation en régime établi et permettant de contrôler le couple résistant, ce qui peut lui être profitable physiquement (voir Chapitre V).

1.6.2 Le freinage régénératif

Le freinage régénératif (grâce au système KERS : Kinetical Energy Recovery System) est une possibilité de commande de la machine électrique qui permet, dans certaines conditions, de réinjecter de l'énergie dans le SSE, notamment lors de descentes ou de phases de freinage en faisant fonctionner la machine en mode générateur.

Cette fonctionnalité est intéressante puisqu'elle permet de prolonger l'autonomie des véhicules électriques en récupérant une énergie jusqu'alors perdue sur les véhicules traditionnels à moteur thermique.

L'objectif est de récupérer un maximum de l'énergie cinétique ou de l'énergie potentielle. Ainsi, plus les variations de vitesse sont fréquentes et plus les différences d'altitude sont importantes, plus le véhicule sera en possibilité de récupérer de l'énergie. De même, plus le rendement de la machine électrique³ est élevé, plus le pourcentage d'énergie récupéré pourra être conséquent (voir le Tableau 1-5).

La limite réelle de récupération de l'énergie est fixée par le rendement de la chaîne de transmission électrique. Ainsi si le rendement maximal de la machine, de son électronique et de la transmission associée est caractérisé par η_{mach}^{max} et si le rendement du même système est considéré équivalent en mode générateur [77], alors, le pourcentage maximum de récupération d'énergie r_{KERS}^{max} est le produit de la double transformation électrique-mécanique-électrique tel que :

$$r_{KERS} < \eta_{mach}^{max}{}^2 \quad 1.12$$

En pratique, le pourcentage d'énergie réinjecté dans le système est donc fonction du type de conduite et de terrain. *Ainsi, une formule 1 électrique est soumise à de fortes variations de vitesse sur circuit, ce qui est un réel avantage et permet de récupérer jusqu'à 35% de l'énergie dépensée et conduit à une réduction du dimensionnement de la batterie [78]. Un vélo en ville, avec des arrêts fréquents en distance mais assez éloignés temporellement à cause de la faible vitesse moyenne ne permet pas de récupérer beaucoup d'énergie (mesuré autour de 8%).*

Il est possible de définir l'énergie récupérée E_{KERS}^4 (J) ainsi que son pourcentage r_{KERS} comparée à l'énergie totale dépensée par la machine (énergie E_{mach} (J), puissance P_{mach} (W)) comme suit :

$$E_{KERS} = - \int P_{mach}(P_{mach} < 0)dt \quad \text{et} \quad E_{mach} = \int P_{mach}(P_{mach} > 0)dt \quad 1.13$$

³ Ou bien groupe motopropulseur complet si le moteur est couplé à une boîte de vitesse et/ou un différentiel

⁴ E_{KERS} ne prend pas en compte les pertes dans le système de stockage

$$r_{KERS} = \frac{E_{KERS}}{E_{mach} + E_{KERS}} \quad 1.14$$

La littérature donne des ordres de grandeur assez variables suivant les conditions de conduites. Le Tableau 1-5 propose des valeurs typiques que l'on pourrait mesurer sur des véhicules [78]–[81] :

Type de véhicule	r_{KERS}
Vélo	5-15%
Scooter	8-25%
Voiture	5-35%
Formule 1	15-35%

Tableau 1-5 : Exemple de pourcentage typique de récupération d'énergie selon la littérature [78]–[81].

1.6.2.1 Exemple de performance du freinage régénératif

Une mise en situation du freinage régénératif a pu être effectuée avec le vélo décrit en Annexe B.

Ce vélo lourd (45 kg) est équipé d'un régulateur de vitesse, ce qui explique les phases à vitesse constante sur le graphe des vitesses (voir Figure 1-15). Le régulateur augmente ou diminue la puissance injectée à la machine afin de maintenir la vitesse (freinage automatique en descente). Un parcours franchissant un double col (dénivelé total : 835 m) a été effectué à titre indicatif en limitant les variations de vitesse entre les montées et les descentes. Le trajet est donc favorable au freinage régénératif, car il y a de fortes variations d'énergie potentielle.

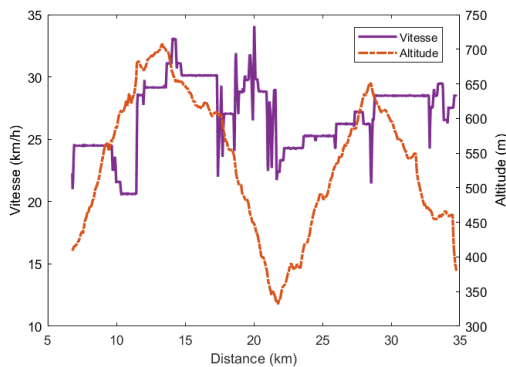


Figure 1-15 : Vitesse et altitude d'un vélo hybride série sur un parcours montagneux 28 km avec régulateur de vitesse intégré (voir Annexe B).

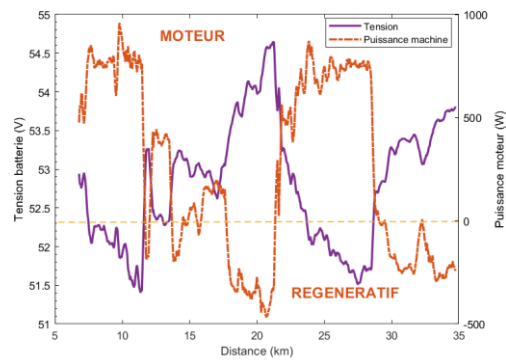


Figure 1-16 : Puissance et tension batterie d'un vélo hybride série sur un parcours montagneux de 28 km.

Les résultats, listés dans le Tableau 1-6, démontrent qu'il est possible d'atteindre des taux de récupération d'énergie importants, même avec un véhicule léger. La consommation finale au kilomètre, n'est pas très éloignée de celle qu'il est courant d'obtenir sur le plat avec ce véhicule (résultat final de 11.4 Wh/km contre 9 Wh/km pour un trajet plat équivalent en distance). Le même trajet vallonné avec freins mécaniques uniquement amènerait à une consommation de 14.9 Wh/km. Ainsi, le frein régénératif couplé à une régulation de vitesse permettrait d'effacer une partie du besoin énergétique supplémentaire due au dénivelé. Ces résultats initiaux doivent

être confirmés, mais sont aussi appuyés par Bernard Cauquil, qui, avec un vélo similaire, a pu effectuer des mesures d'un ordre de grandeur équivalent [49].

Nombre de kilomètres	Énergie dépensée	Énergie récupérée	r_{KERS}	Consommation	Consommation équivalente sur le plat
28 km	417 Wh	97 Wh	29 %	11.4 Wh/km	9 Wh/km

Tableau 1-6 : Résultats pratiques du freinage régénératif dans une situation favorable avec de fortes variations d'énergie potentielle.

L'énergie potentielle (voir paragraphe 1.6.1), accumulée pendant le trajet peut être exprimée comme suit pour ce véhicule de 100 kg environ :

$$E_p = M_v g \Delta z = 227 \text{ Wh} \quad 1.15$$

Ainsi, le système KERS a permis, ici, de récupérer près de 43% de l'énergie potentielle du trajet, ce qui est cohérent avec le rendement maximum de 80% de la machine électrique installée ($r_{KERS}^{max} = 64\%$) sur le véhicule. Ce système permet ici de réduire la consommation de 14.9 Wh/km à 11.4 Wh/km soit un gain de 23%.

1.6.2.2 Le cas spécifique des VAE standards

De nombreux vélos électriques sont dépourvus de cette fonctionnalité⁵. En effet, doter son cycle de la récupération d'énergie implique d'imposer un couple machine T_{mach} (Nm) successivement positif (mode de traction) ou bien négatif (mode freinage). La possibilité d'appliquer un couple négatif implique de disposer d'une prise directe (sans roue libre) entre la machine (et sa mécanique) et la roue.

Lorsque la machine n'est ni en traction ni en mode de freinage, cas d'un VAE avec une vitesse supérieure à 25 km/h ou bien d'une phase de roue libre (voir paragraphe 1.3), un couple résistant subsiste à la roue à cause des frottements internes à la machine (pertes fer etc.). Cela a pour effet de ralentir le vélo. Les phases de descentes, de roue libre et de déplacements à plus de 25 km/h deviennent alors moins performantes et le gain total peut être limité puisque l'énergie régénérée pourrait être dissipée pendant ces phases.

1.6.3 Performances d'un vélo à chaîne

Ce manuscrit traite du vélo hybride série et le compare en plusieurs points avec le vélo standard à chaîne (VSC). Le VSC est une architecture simple où la cadence de pédalage ω_H ($rad. s^{-1}$) est indexée sur la vitesse de la roue ω_{roue} ($rad. s^{-1}$) et le couple à la roue T_{roue} (Nm) est indexé au couple utilisateur T_H (Nm) dans le cas d'une prise directe (soit hors mode roue libre).

L'indexation se fait grâce à une chaîne mécanique reliant un système de pignons où le rapport de vitesse est déterminé par le ratio du nombre de dent $\alpha_{chaîne}$ du plateau et des pignons. De plus, le vélo possède lui-même un rendement de transmission mécanique η_{VSC} , dégradé par la présence de galets tendeurs, du non-alignement de la chaîne, des frottements, ...

⁵ Les moteurs pédaliers et les moteurs avec roue libre intégrée ne permettent pas d'utiliser le frein régénératif.

$$T_{roue} = \eta_{VSC} \alpha_{chaîne} T_H \quad 1.16$$

$$\omega_H = \alpha_{chaîne} \omega_{roue} \quad 1.17$$

La chaîne de vélo est un dispositif éprouvé et bien étudié. Cependant, la notion de transmission de puissance et de son rendement associé est souvent définie sur des vélos haut de gamme pour des efforts élevés. Ainsi, le rendement de transmission dans la littérature est souvent compris entre 82 et 97% [50]. Le rendement de la chaîne est de plus largement dépendant de la puissance de traction et de son état d'entretien, ainsi, il est assez difficile de conclure sur le rendement des vélos à usages quotidiens (les vélos de ville par exemple).

D'autres types de transmission mécaniques existent. La marque Ceramicspeed est notamment pionnière dans la réalisation de transmissions à cardan à base de roulement et annonce un rendement de transmission supérieur à 99%. La société a également effectuée de nombreux tests de rendement sur des chaînes standards avec des résultats recoupant ceux trouvés dans la littérature [84] :

- ❖ Des rendements compris entre 90 et 97% pour des systèmes neufs ;
- ❖ Une augmentation pouvant être de l'ordre de 50% des pertes et plus pour des systèmes usés conduisant à des rendements inférieurs à 90%.

Le rendement sera donc considéré comme un facteur de performance compris dans l'intervalle $\eta_{VSC} = [85 - 95]$ %.

1.7 Les axes de travail de l'architecture hybride série

1.7.1 Supercondensateurs et batteries : enjeux

L'utilisation des supercondensateurs pour la réalisation d'un véhicule soulève plusieurs questions :

- ❖ La faible énergie embarquée par les supercondensateurs est-elle suffisante pour garantir le bon fonctionnement du véhicule ?
- ❖ L'intégration des supercondensateurs dans le système est-elle faisable en tenant compte de la variation importante de tension aux bornes des supercondensateurs ainsi qu'au volume conséquent de ces derniers ?
- ❖ La durée de vie est, avec la recyclabilité, un des arguments majeurs pour la promotion des supercondensateurs. La durée de vie des supercondensateurs est-elle réellement supérieure à celle des batteries pour un usage équivalent ?

La dégradation des supercondensateurs est essentiellement fonction de la température d'utilisation et des courants de charge-décharge. Le Chapitre II étudiera les supercondensateurs. Il proposera d'analyser le vieillissement relatif des supercondensateurs et des batteries à usage identique afin de pouvoir améliorer le choix du système de stockage dans des applications moyenne puissance/moyenne énergie.

Les questions de dimensionnement et d'intégration du pack seront abordées aux Chapitres III et IV.

1.7.2 Le rendement, un problème majeur pour l'architecture hybride série

La question du rendement a premièrement été exposée au paragraphe 0 de ce chapitre et a souligné l'importance de la transmission d'énergie dans le système. À titre d'exemple, un rendement unitaire de 85% sur le moteur et le générateur conduit directement à un rendement global de 72% dans le meilleur des cas.

Afin d'analyser la question du rendement, deux verrous ont été identifiés :

- ❖ Quel est le rendement minimum nécessaire pour pouvoir bénéficier d'un vélo fonctionnel ?
- ❖ Est-il possible d'atteindre ce niveau de rendement et à quel coût ?

L'étude de ces questions a été abordée sous l'angle de la modélisation. Une validation du modèle a aussi été effectuée (voir Chapitre III).

1.7.3 Contrôler le degré de liberté du système

L'hybridation série offre la possibilité de découpler totalement la puissance produite par le cycliste, de l'effort nécessaire à faire avancer le cycle. Ainsi, la variable de contrôle de la machine n'est pas directement corrélée à la puissance fournie par l'utilisateur (comme sur un vélo à chaîne).

L'énergie étant produite au fil du trajet, il faut ensuite la gérer au mieux afin de minimiser le temps de parcours et la fatigue du cycliste. La gestion optimale du trajet et des contraintes peut être réalisée « off line » grâce à des méthodes d'optimisation qui seront présentés au Chapitre III.

Cependant, il est aussi essentiel de réfléchir au contrôle du cycle en usage réel et de reproduire des conditions quasi optimales de contrôle. Le système doit alors être résilient aux aléas pour pouvoir s'adapter à des arrêts inattendus ou des changements de parcours.

Le degré de liberté est obtenu grâce à l'insertion du SSE. Plus ce dernier dispose d'énergie embarquée, plus le découplage est complet. Puisque l'énergie embarquée est limitée, le découplage n'est valable que pour une échelle de temps restreinte ce qui soulève plusieurs interrogations qui seront abordées au Chapitre IV :

- ❖ Quels sont les différents modes de contrôles disponibles ?
- ❖ Quelles sont les bases d'un pilotage « on-line » simple ?
- ❖ Quelle stratégie adopter face aux cas aux limites et aux aléas ?

1.7.4 Fatigue et gain physiologique pour l'utilisateur

La problématique du rendement global du système a été exposée au paragraphe 1.7.2 et doit être complétée en intégrant les gains potentiels du VHS pour le cycliste. Celui-ci pédale à une cadence et puissance optimale, sur le VHS, qui pourrait faire progresser son rendement physiologique. Cette sollicitation est également susceptible de réduire le stress physiologique des individus.

La question de l'humain et du cycliste sur un VHS comprend aussi d'autres aspects que la performance physiologique. En effet, pédaler sur un générateur n'est pas naturel et a nécessité d'analyser celui sur un vélo standard afin de pouvoir déduire une loi de commande reproduisant une sensation normale (voir Chapitre V, paragraphe 5.3).

Pour répondre à ces deux aspects, plusieurs points seront abordés au Chapitre V :

- ❖ Comment définir un mouvement de pédalage performant et agréable? Comment le mettre en œuvre?
- ❖ Comment définir la notion de fatigue, de stress physiologique? Est-il également possible de montrer l'existence de gains expérimentaux?

1.8 Parcours et cycles de conduite représentatifs

Le besoin d'un cadre de référence pour étudier et comparer les vélos entre eux est un point essentiel. En effet, déterminer ce cadre permettra de comparer des structures de manière répétable et à conditions égales.

L'automobile est un secteur où les cycles comparatifs sont devenus cruciaux. Ils sont en effet à la base de l'homologation des véhicules. Ces derniers sont notamment utilisés pour déterminer le taux de polluant émis ainsi que la consommation au 100 km. Les cycles se sont par ailleurs diversifiés (*par exemple* : le New European Driving Cycle [NEDC] et le Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure [WLTP]) au fil du temps pour obtenir des cycles plus représentatifs et mieux segmentés selon les usages (*urbain, extra-urbain, autoroutier*).

Aucun cycle représentatif pour les vélos n'a été identifié et une démarche a été mise en place afin de mieux discerner un usage représentatif pour l'application du vélo. Le cycle proposé sera à la base des estimations réalisées aux Chapitres III et V.

1.8.1.1 Étude statistique : le cycle de conduite « Devie »

La base de données utilisée, mise à disposition par Arnaud Devie [52], dispose de plus de 2000 kilomètres de données de vélo, enregistrés sur des VAE. La Figure 1-17 illustre une décharge de batterie (courant et tension) d'un des vélos instrumentés pour la constitution de la base de données.

Ces données avaient permis l'étude d'un cycle électrique pour la caractérisation du vieillissement des batteries [52]. La base de données présente les caractéristiques suivantes :

- ❖ Des essais effectués par 24 personnes diverses (hommes, femmes, entraînés et non entraînés) ;
- ❖ Une diversité des parcours (urbain, extra urbains) ;
- ❖ Deux vélos électriques distincts.
- ❖ Les données suivantes sont disponibles : vitesse instantanée du vélo, tension du pack batterie et courant de ce dernier.

L'étude a premièrement porté sur l'analyse du profil de vitesse. En effet, le vélo à architecture hybride série tire avantage des discontinuités de parcours comme les arrêts et le temps moyen de ces derniers. Les VHS permettent de récupérer l'énergie au freinage, de continuer à pédaler pendant la décélération et, si l'architecture mécanique est dotée de trois roues, l'utilisateur peut

même pédaler à l'arrêt. Les arrêts et les temps de pause peuvent être extraits du profil de vitesse. Une première approche a permis d'analyser ces données de manière statistique.

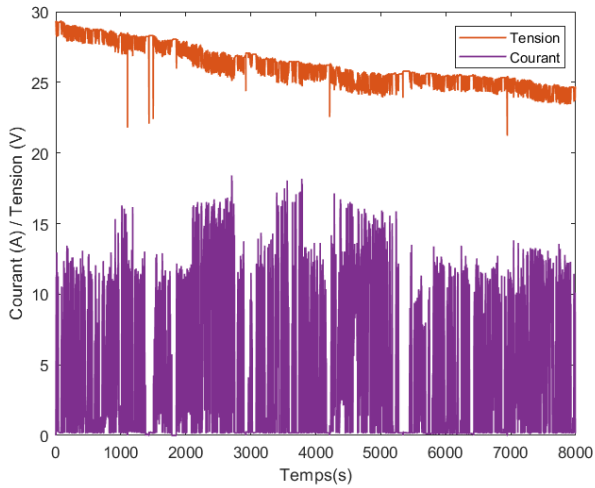


Figure 1-17 : Exemple de mesures de courant et de tension de la batterie des VAE issues de la base de données de Devie.

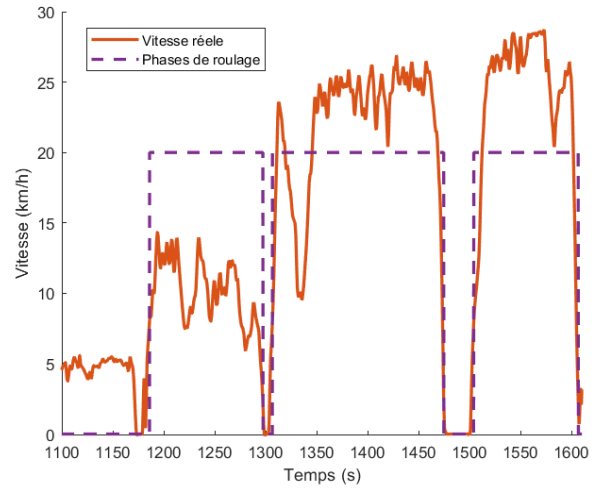


Figure 1-18 : Fenêtrage de la vitesse pour exploiter les phases d'arrêt du vélo.

L'analyse de ces données a été effectuée grâce à un fenêtrage de la vitesse présenté sur la Figure 1-18. Le fenêtrage permet de simplifier le profil de vitesse afin d'en extraire des informations comme les temps d'arrêt et les distances inter-arrêts. Les données principales extraites sont résumées sur le tableau 1.7 :

	Valeur moyenne constatée
Vitesse moyenne	15 $km \cdot h^{-1}$
Distance moyenne entre deux arrêts	250 m
Temps moyen passé à l'arrêt	12 s
Pourcentage du temps en roue libre+arrêt	50 %

Tableau 1-7 : Caractéristiques statistiques d'un parcours de VAE extraits d'utilisation représentatif.

Ainsi, le profil présenté sur la Figure 1-19 a été constitué. Il est composé d'une succession de phases de roulage avec un arrêt tous les 250 mètres. La durée de cet arrêt est de 12 secondes. La vitesse n'y est pas imposée.

Ce cycle admet un certain nombre de limites. Notamment, la base de données n'est pas nécessairement suffisamment représentative. En effet, seulement 24 sujets ont participé aux tests, de plus, tous situés en agglomération lyonnaise et sur des VAE uniquement.

Les données conservées étaient déjà filtrées et ne comportaient que la vitesse. Des informations supplémentaires pourraient influencer ces résultats et intégrer des notions capitales à l'analyse d'un profil d'usage de vélo comme la pente ou le type de parcours.

Finalement, l'analyse proposée est statistique et simple et ne permet pas de différencier des phénomènes comme : les phases urbaines denses (arrêts très fréquents et vitesse faible), les phases

urbaines sur aménagement cyclable (arrêts réguliers, vitesse modérée), les phases extra-urbaines ou sur voie rapide cyclable (arrêt quasi inexistant, vitesse plutôt élevée).

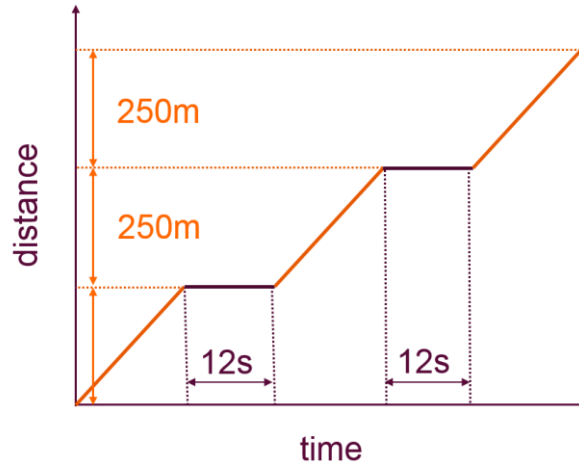


Figure 1-19 : Représentation du profil dans le plan temps/distance. Contrairement à des profils comme le WLTC, la vitesse n'est ici pas fixée.

1.8.1.2 Par chaîne de Markov

La solution statistique initiale présentée au paragraphe 1.8.1.1 n'est donc pas complète, ni dans les données exploitées, ni dans la formulation du profil. Un projet d'analyse de trace GPS a été entrepris de manière à identifier un profil artificiel plus représentatif. Ce projet est basé sur l'utilisation de chaînes de Markov [85], [86].

L'objectif est de construire un profil de test spécifique aux cyclistes incluant la vitesse et la pente sur lesquels le vélo se déplace. Ce profil de vitesse pourrait alors être utilisé pour comparer les performances des VAE entre eux notamment.

Afin de récolter des données suffisantes à l'analyse statistique, une campagne de collecte de données GPS via une application de traçage Android a été mise en place. Le partage des données est effectué sur la base du volontariat. La faible communication mise en place autour du dispositif n'a pas encore permis de récolter une quantité de données suffisante à l'élaboration d'une base de données représentatives.

La construction de la chaîne de Markov a ensuite constitué à identifier l'état du système à chaque point de la trace enregistrée. L'état global du système s est basé sur l'identification de trois sous états : la vitesse (v), l'accélération (a) et la pente (α) à chaque étape de temps (voir équation 1.18), eux-mêmes discrétisés (nombre fini d'états possibles atteignable).

$$s_t = \{v_t, a_t, \alpha_t\} \quad 1.18$$

Les données GPS sont donc discrétisées sous la forme d'une suite d'états :

$$s = [s_0, s_1, \dots, s_{t=tm\max}] \quad 1.19$$

Une matrice de probabilité P de changement d'état est ensuite reconstituée en analysant les transitions de s (voir l'annexe G pour une explication détaillée du processus mathématique de traitement des données). Un exemple de matrice est illustré sous forme graphique sur la Figure

1-20. La probabilité de rester sur la diagonale et donc de rester dans le même état est importante, quel que soit l'état, soulignant les variations lentes d'état du système vis-à-vis du pas de discrétisation du GPS de fréquence d'échantillonnage de 1 Hz.

Reconstruire un cycle est par la suite trivial, puisqu'il s'agit de reconstituer, de manière aléatoire, une suite d'état w tel que la probabilité que le système se retrouve dans l'état s_{t+1} à $t + 1$ est donné par :

$$s_{t+1} = P(s_{t+1}|s_t)s_t \quad 1.20$$

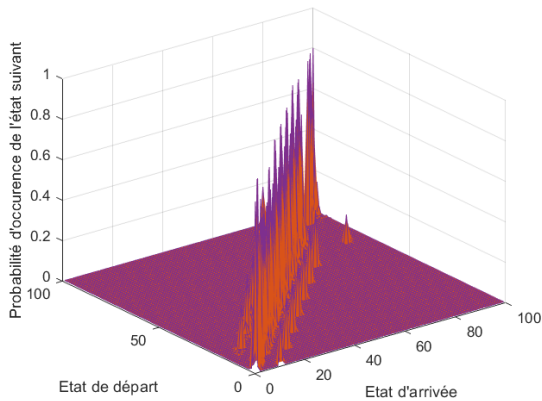


Figure 1-20 : Représentation graphique de la probabilité de changement d'état pour 100 états.

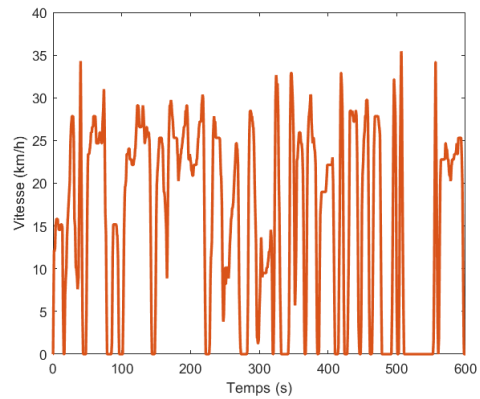


Figure 1-21 : Reproduction d'un cycle en vitesse basé sur la matrice de probabilité de changement d'état.

L'analyse du cycle de 10 min proposé sur la Figure 1-21 est intéressante. Le cycle a été reconstitué à partir de la matrice de transition présentée sur la Figure 1-20. Les données statistiques extraites par chaîne de Markov sont très proches de celles identifiées précédemment par l'analyse statistique simple (vitesse moyenne équivalente : 15.3 km.h^{-1} (écart : 2%), temps d'arrêt moyen de 11 s (écart : 8%), distance inter arrêt : 200 m (écart 20%).

Deux méthodes d'analyse des profils ont été brièvement exposées et ont permis de mener à des résultats similaires, ce qui est un gage de robustesse des résultats. Le profil issu des travaux de Devie (exposé Figure 1-19) sera utilisé dans la suite de ce manuscrit (Chapitre III et IV). Des travaux supplémentaires comprenant la création d'une base de données avec des informations de pente et son analyse permettraient de créer un profil plus représentatif.

1.9 Conclusion de chapitre

Le vélo est donc un moyen de transport qui répond de nouveau aux besoins des citoyens. Un niveau d'investissement public en augmentation ainsi que l'offre diversifiée en termes d'architecture et d'usage permettent d'assurer la croissance du secteur. Les vélos à assistance électrique font partie de cette nouvelle donne et permettent d'assurer le transport de charge ou l'accès à la mobilité à des personnes qui ne le pouvaient plus.

Ce chapitre a aussi souligné les avantages écologiques et sanitaires d'un retour de la pratique du vélo dans nos vies.

Cette introduction a permis de mettre en valeur les objectifs du vélo hybride série à base de supercondensateurs : créer un véhicule autonome en énergie, permettant avec l'énergie humaine uniquement, de se déplacer avec moins de fatigue que sur un vélo standard.

Réaliser un vélo hybride série autonome en énergie soulève un certain nombre de problèmes qui seront adressés dans les chapitres suivants :

- ❖ Du système de stockage à base de supercondensateurs : est-ce une solution adaptée ?
- ❖ Du rendement du véhicule : est-il possible de transmettre suffisamment d'énergie à la roue ?
- ❖ Du pilotage énergétique du vélo : comment utiliser le degré de liberté procuré par les supercondensateurs ?
- ❖ De la fatigue : est-il possible de montrer une maîtrise de la fatigue physiologique grâce au vélo hybride série ? Est-il possible d'avoir un gain ?

CHAPITRE 2. Les supercondensateurs en application pour la mobilité douce

2.1	Introduction	60
2.2	Batteries ou supercondensateurs ?	60
2.2.1	Les supercondensateurs : description du composant	61
2.2.2	Les batteries : description du composant	66
2.3	Méthodologie de comparaison des packs	71
2.3.1	Choix des packs	71
2.3.2	Comparaison des performances	74
2.3.3	Usage et définition d'un profil type de test	75
2.4	Les différents cycles	75
2.4.1	Essais pour identifier la durée de vie des supercondensateurs	76
2.4.2	Essais pour identifier la durée de vie des batteries sollicitées par des microcycles	77
2.4.3	Essais pour identifier la durée de vie des batteries sollicitées avec des cycles complets	78
2.4.4	Température et accélération des vieillissements	79
2.5	Résultats expérimentaux	81
2.5.1	Méthodes de mesure	81
2.5.2	Mise en œuvre des tests	83
2.5.3	Résultats de la caractérisation initiale	84
2.5.4	Résultats du vieillissement	85
2.5.5	Interprétation des résultats	90
2.6	Conclusion de chapitre	93

2.1 Introduction

Le choix du système de stockage pour la réalisation d'un vélo à architecture hybride série soulève de nombreuses interrogations. Dans notre cas, nous avons tenté de minimiser la quantité d'énergie embarquée tout en garantissant un bon fonctionnement du véhicule (voir Chapitre I et Chapitre III). L'utilisation des supercondensateurs peut alors être envisagé, bien que l'énergie emmagasinée par ceux-ci soit faible comparée à celle stockée par des batteries. Dès lors, le choix du type de stockage doit être effectué sur d'autres critères que celui de l'énergie. Les nouveaux critères peuvent par exemple intégrer le rendement, l'aspect écologique ou encore la durée de vie du système.

Sur fond de l'application du vélo hybride série, ce chapitre contribue, par une démarche originale, à aider au choix du système de stockage d'énergie dans des applications moyenne énergie/moyenne puissance. Ce chapitre aborde notamment la question de la durée de vie à usage énergétique identique de deux packs équivalents (l'un avec des batteries et l'autre avec des supercondensateurs).

2.2 Batteries ou supercondensateurs ?

Les batteries sont des systèmes de stockage d'énergie couramment utilisés. Il en existe de nombreux types. En 2020, deux grandes familles de batteries sont majoritaires sur le marché :

- ❖ les batteries au plomb, essentiellement tirées par l'économie du véhicule thermique ;
- ❖ les batteries lithium-ion utilisées dans les systèmes embarqués et/ou les applications où la densité d'énergie est cruciale.

Au regard de certaines de leurs caractéristiques, les batteries peuvent avoir un impact négatif (écologique, durée de vie) et ne représentent pas toujours la solution idéale de stockage d'énergie. Tout d'abord, les batteries posent un problème écologique majeur : elles ne sont toujours pas complètement recyclées et leur conception peut induire l'usage de minerais, parfois complexe à extraire comme le cobalt [87]. De plus, la durée de vie des cellules de batteries est assez limitée puisqu'elle se situe classiquement entre 500 et 2000 cycles ou bien entre 5 et 7 ans de durée de vie calendaire (le vieillissement calendaire correspond à une dégradation autonome de la cellule lorsqu'elle est libérée de toute contrainte, autrement dit, inutilisée) [1], [2], [3].

L'objectif est ici d'étudier le remplacement du système de stockage à base de batteries lithium-ion par un système constitué de supercondensateurs pour le vélo électrique.

Les supercondensateurs sont également des systèmes de stockage d'énergie, mais se situent à mi-chemin entre les condensateurs et les batteries. En effet, ils stockent moins d'énergie, mais ils peuvent délivrer plus de puissance qu'une batterie pour un même poids ou un même volume. La Figure 2-1 montre ainsi un aperçu de la localisation des batteries et des supercondensateurs dans un plan de Ragone représentant la densité de puissance massique en fonction de la densité d'énergie massique.

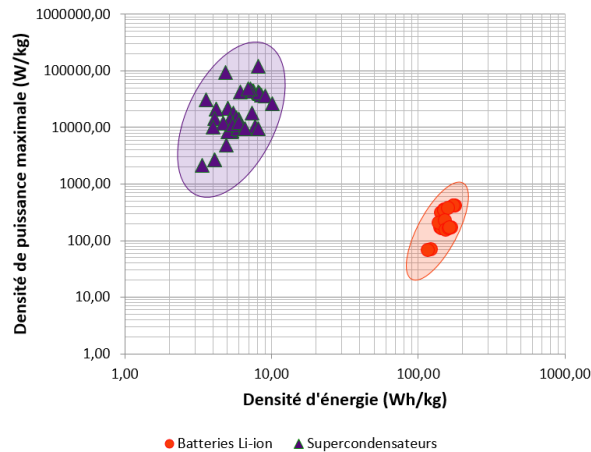


Figure 2-1 : Diagramme des densités massiques d'énergie et de puissance pour les batteries et les supercondensateurs dans un diagramme de Ragone [91].

À l'inverse des batteries lithium-ion, les supercondensateurs sont essentiellement conçus à partir de matériaux abondants. Ainsi, les composants majoritaires sont l'aluminium au niveau des collecteurs de courant, le carbone pour les électrodes et un électrolyte séparant ces deux électrodes. L'électrolyte est un élément déterminant dans la performance des supercondensateurs. Certains électrolytes, un peu moins performants que l'acétonitrile qui est l'électrolyte le plus couramment utilisé, permettent de créer des supercondensateurs 100% recyclables [92]. La durée de vie des supercondensateurs est aussi un avantage pour ces derniers puisque celle-ci se situe entre 500 000 et 1 000 000 de cycles standards, bien au-delà de la limite des batteries [93].

Le but étant de remplacer les batteries par des supercondensateurs, ce chapitre a pour objectif d'évaluer la pertinence de cette approche pour des véhicules modes doux comme le VAE ou le vélo hybride série.

2.2.1 Les supercondensateurs : description du composant

Les supercondensateurs sont des composants dont l'industrialisation et la maîtrise des procédés de fabrication sont relativement récents. En effet, le développement de la technologie a eu lieu dans les années 70 [94].

Aujourd'hui, les domaines d'applications des supercondensateurs se concentrent essentiellement sur l'automobile, les systèmes hybrides, les éoliennes, etc. [95].

2.2.1.1 Structure d'un supercondensateur

Un supercondensateur est composé de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium) recouverts, pendant la phase de fabrication d'une fine épaisseur de carbone actif [96]. Les deux électrodes (positive et négative) ainsi constituées sont alors superposées et séparées par une membrane poreuse : le séparateur.

L'ensemble ainsi obtenu est ensuite enroulé pour former un bobineau (jelly roll) puis inséré dans son boîtier mécanique. Le récipient contenant le bobineau est ensuite rempli d'électrolyte puis refermé de manière étanche [97].

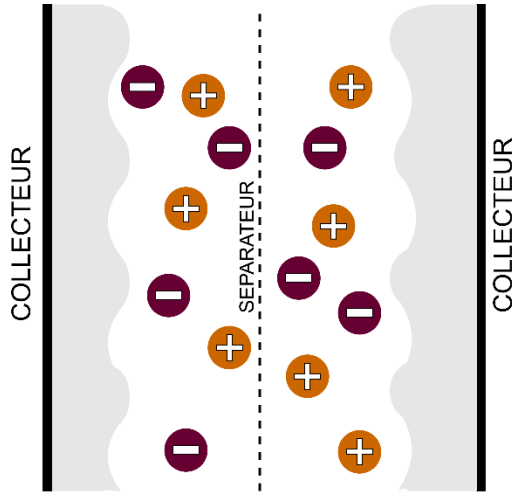


Figure 2-2 : représentation schématique d'un supercondensateur déchargé.

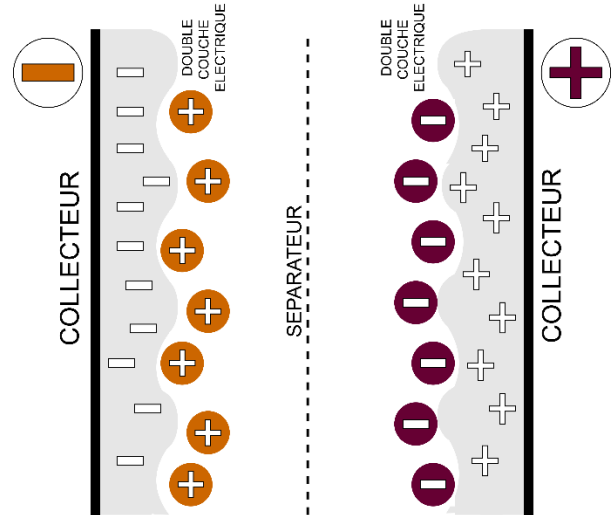


Figure 2-3 : Représentation schématique d'un supercondensateur chargé.

La capacité C_{cell}^{cap} (F) d'un condensateur plan est fonction de la distance entre les électrodes e (m), la permittivité diélectrique ϵ ($F.m^{-1}$) ainsi que de la surface S (m^2) en regard entre ces dernières :

$$C_{cell}^{cap} = \epsilon \frac{S}{e} \quad 2.1$$

Une différence qui caractérise les supercondensateurs, comparée à celle des condensateurs, est la surface de contact obtenue avec l'électrolyte due aux propriétés poreuses du carbone (voir Figure 2-2). Ainsi, un gramme de carbone actif permet d'obtenir plus de $1000 m^2$ de surface équivalente (surface spécifique) [98]. Ceci, combinée avec les faibles épaisseurs constituant les doubles couches électriques [13], explique l'augmentation considérable de capacité des supercondensateurs, pouvant atteindre plusieurs milliers de farads, et ainsi leur capacité à avoir une énergie massique bien plus élevée que celle des condensateurs électrolytiques.

2.2.1.2 Variables de bases

Les supercondensateurs peuvent être caractérisés par un modèle simple : un condensateur parfait de capacité C_{cell}^{SC} (F) en série avec une résistance R_{cell}^{SC} (Ω) (voir Figure 2-4) [99], [100]. Électriquement, ils peuvent être modélisés comme un condensateur : ils sont caractérisés par une impédance complexe Z (Ω) dépendant de la pulsation de travail ω ($rad.s^{-1}$) (valable à basse fréquence).

$$\bar{Z} = \frac{1}{jC_{cell}^{SC}\omega} \quad 2.2$$

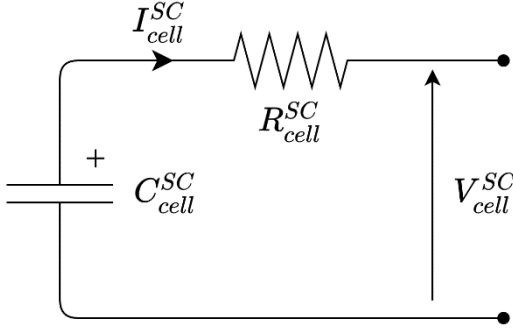


Figure 2-4 : Modèle simple d'un supercondensateur avec uniquement une résistance série.

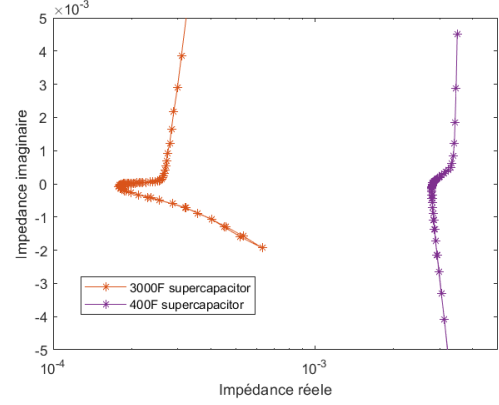


Figure 2-5 : Spectroscopie d'impédance pour deux supercondensateurs de différentes capacités.

La quantité d'énergie E_{cell}^{max} (J) que peut stocker le composant est proportionnelle à la capacité C_{cell}^{SC} (F). Comme pour les condensateurs, les supercondensateurs (SC) ont une limite de tension (tension du composant V_{cell}^{SC} (V)). Cette dernière évolue régulièrement grâce aux progrès de la recherche et des procédés de fabrication et est notamment liée au type d'électrolyte. La limite de tension haute V_{max}^{SC} (V) est généralement située entre 2.7 et 3 V pour les composants industriels modernes.

$$E_{cell}^{max} = \frac{1}{2} C_{cell}^{SC} (V_{max}^{SC})^2 \quad 2.3$$

Bien que les supercondensateurs puissent être totalement déchargés et donc avoir une tension nulle à leurs bornes (tension du composant $V_{cell}^{SC} = 0$), il est courant de ne pas les décharger complètement au cours de leur utilisation. En effet, lorsque le supercondensateur est faiblement chargé, les faibles niveaux de tension ainsi que les forts courants associés (à puissance constante) peuvent complexifier la gestion du pack. Ainsi, une tension minimum d'utilisation est généralement fixée ($V_{min}^{SC} = \gamma V_{max}^{SC}$, avec $0 < \gamma < 1$). Classiquement, la valeur minimale de tension est choisie à $\frac{1}{2} V_{max}^{SC}$ ou bien encore à $\frac{1}{3} V_{max}^{SC}$. L'énergie alors réellement utilisable E_{cell}^{SC} (J) dans le supercondensateur est :

$$E_{cell}^{SC} = \frac{1}{2} C_{cell}^{SC} (V_{max}^{SC})^2 (1 - \gamma^2) \quad 2.4$$

Ainsi, si la tension minimale est définie avec $\gamma = \frac{1}{2}$ ($\frac{V_{max}^{SC}}{2} < V_{cell}^{SC} < V_{max}^{SC}$), l'énergie utilisable est équivalente à 75% de l'énergie totale maximale ($E_{cell}^{SC} = \frac{3}{4} E_{cell}^{max}$).

Le supercondensateur, de masse M_{cell}^{SC} (kg), dispose d'une énergie massique E_s^{SC} ($J \cdot kg^{-1}$) qui est un critère de sélection des composants. Actuellement, les supercondensateurs disposent d'une densité d'énergie d'environ 5 à 7 $Wh \cdot kg^{-1}$ défini par :

$$E_s^{SC} = \frac{E_{cell}^{max}}{M_{cell}^{SC}} \quad 2.5$$

2.2 Batteries ou supercondensateurs ?

Le modèle du supercondensateur dispose d'une résistance série R_{cell}^{SC} (Ω) qui permet de modéliser l'échauffement du composant qui est aussi une cause majeure de dégradation des performances. La résistance interne est également l'élément limitant la puissance du composant. La puissance maximum supportée P_{cell}^{SC} (W) par un composant est donnée par [101] (inférieure à la valeur de court-circuit franc) :

$$P_{cell}^{SC} = \frac{(V_{cell}^{SC})^2}{4R_{cell}^{SC}} \quad 2.6$$

L'assemblage en série (avec N_{ser} le nombre de composants en série) ou en parallèle (avec N_{par} le nombre de composants en parallèle) de cellules de supercondensateurs permet d'augmenter l'énergie E_{pack}^{SC} (J), la tension V_{pack}^{SC} (V) ou encore la puissance P_{pack}^{SC} (W) du pack tel que :

$$E_{pack}^{SC} = E_{cell}^{SC} N_{ser} N_{par} \text{ et } V_{pack}^{SC} = N_{ser} V_{cell}^{SC} \quad 2.7$$

2.2.1.3 Durée de vie des supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des composants bénéficiant d'une durée de vie importante. En effet, ils peuvent subir un grand nombre de cycles électriques complets (classiquement supérieur à 500 000 cycles) [102], [103].

Les supercondensateurs vieillissent aussi de manière calendaire (vieillessement naturel du composant sans être utilisé) et leur durée de vie est communément mesurée entre 10 et 15 ans à température ambiante [104].

Pour ces deux modes de vieillissement (calendaire ou cyclique), la température joue un rôle essentiel dans leurs accélérations. La relation entre la température et le vieillissement est généralement donnée par la loi d'Arrhenius expliquée dans le paragraphe 2.4.4.

La fin de vie d'un supercondensateur est définie arbitrairement, usuellement comme pour les batteries, c'est-à-dire lorsque la capacité à stocker de l'énergie du composant est inférieure à 80% de l'initiale. L'état de santé SOH (State Of Health) désigne le rapport entre l'énergie actuelle E_{cell}^{SC} (J) et l'énergie initiale $E_{cell}^{initiale}$ (J) dans la cellule :

$$SOH_{SC} = \frac{E_{cell}^{SC}}{E_{cell}^{initiale}} \geq 0.8 \quad 2.8$$

2.2.1.4 Composants industriels

Les supercondensateurs sont majoritairement utilisés comme des dispositifs de puissance. Ils sont aussi plébiscités pour des utilisations par grand froid, car ils sont alors plus performants que les batteries qui ont des pertes de performance importantes sur ces zones de fonctionnement. Finalement, les supercondensateurs sont aussi implémentés pour leur grande durée de vie.

Plusieurs formats de supercondensateurs existent et sont associés à différentes gammes de puissance :

- ❖ grande capacité (>500 F) : très forte puissance, des boîtiers à visser sont souvent mis en œuvre (voir Figure 2-7) ;

- ❖ moyenne ou petite capacité (<500F) : des boîtiers « snap-in » à souder sur carte électronique sont généralement proposés (voir Figure 2-6).

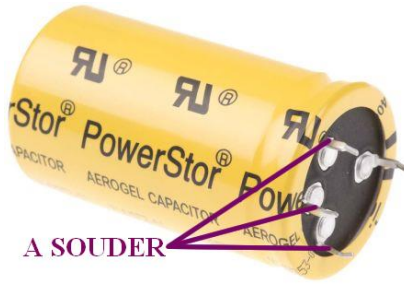


Figure 2-6 : Exemple de supercondensateur a montage sur circuit imprimé (dit « Snap-in »).

Figure 2-7 : Exemple de supercondensateur a montage par vis ou soudure laser.

Une base de données regroupant plusieurs marques de supercondensateurs a été créée et a permis d'identifier les tendances d'évolution des différents paramètres (prix, résistance) des supercondensateurs en fonction de la valeur de leur capacité (Figure 2-8 et Figure 2-9). Avec l'augmentation de la capacité, il est possible d'observer une diminution du prix faradique (€/F) ainsi que de la résistance interne des cellules. La Figure 2-5 illustre la variation d'impédance de deux cellules de capacités différentes et appuie les tendances présentées ici par l'expérience.

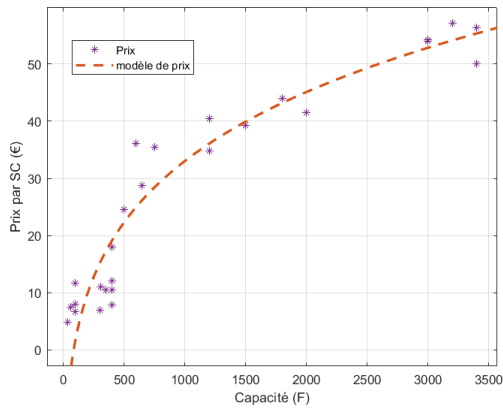


Figure 2-8 : Évolution du prix des supercondensateurs en fonction de la capacité.

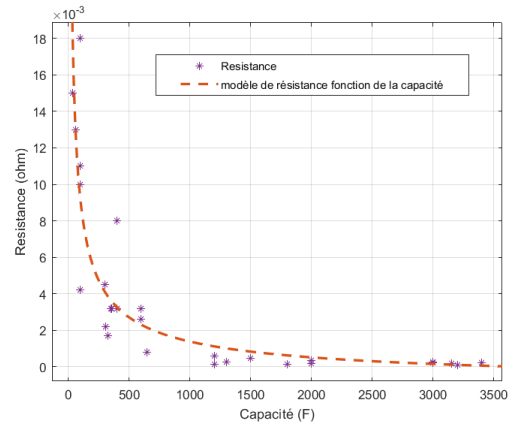


Figure 2-9 : Évolution de la résistance interne des cellules en fonction de la capacité.

2.2.1.5 Les supercondensateurs pour la mobilité douce

Dans le cas du vélo hybride série, le système de stockage à base de supercondensateurs doit permettre d'assister l'utilisateur ponctuellement. La faible quantité d'énergie embarquable sur un vélo avec des supercondensateurs (<30 Wh) ne permet pas au pack d'être utilisé avec la même stratégie d'assistance permanente que celle des VAE standards (à batterie) car 30 Wh induisent une autonomie maximum de 5 km au véhicule (voir le Chapitre I, paragraphe 1.3).

Le système de stockage doit donc être dimensionné selon plusieurs critères qui sont aussi des contraintes :

2.2 Batteries ou supercondensateurs ?

- ❖ avoir suffisamment d'énergie pour pouvoir aider l'utilisateur dans des situations prédéfinies (démarrer, gravir une côte, ...) ;
- ❖ être assemblable en un volume suffisamment restreint de manière à pouvoir être intégré au vélo. Les supercondensateurs ont une densité d'énergie volumique au moins 30 à 40 fois (voir paragraphe 2.3) inférieure à celle des batteries. Ainsi, dans le volume consacré à la batterie de 300 Wh d'un vélo électrique, il est seulement envisageable de stocker 10 Wh maximum ;
- ❖ minimiser les pertes et donc maximiser le rendement, ceci étant un enjeu majeur du vélo hybride série.

La stratégie développée dans ce manuscrit consiste à maximiser la tension afin de minimiser le courant et donc les pertes par effet Joule. De plus, le système (machine et générateur) doit pouvoir fonctionner sous 48 V nominal (avec une plage de tension classique de 35 à 60 V) qui est un des standards dans la conception de véhicules légers tels que les scooters ou les VAE. Imposer une valeur de tension maximale du pack inférieure à 60 V permet alors de réaliser un système conforme à la Très Basse Tension de Sécurité (TBTS) en courant continu [75]. La limite de tension du pack conduit directement à un nombre d'éléments constitutifs en série aux alentours de 20 cellules (20 cellules de 2.7 V impliquent une tension de 54 V maximale pour le pack) et un maximum de 22 cellules (pour une tension de 59,4 V).

Le rendement (η_{SC}) d'un pack dépend de sa résistance R_{pack}^{SC} (Ω), du courant I_{pack} (A) le traversant ainsi que de la puissance de charge ou décharge du pack P_{pack}^{SC} (W). Il peut être exprimé par l'équation suivante à la charge ou à la décharge :

$$\eta_{SC} = 1 - \frac{R_{pack}^{SC} I_{pack}^2}{P_{pack}^{SC}} \quad 2.9$$

En considérant la charge à une puissance de 200 W d'un pack de supercondensateurs de tension égale à 40 V et de résistance de 100 m Ω , le rendement de charge ou de décharge seront tous les deux égaux à 98.75 %, soit un rendement indicatif global (charge et décharge) de 97.5 % à ce point de fonctionnement.

Le dénivelé franchissable par le vélo hybride série avec un pack de supercondensateurs est un critère clé qui est un bon indicateur de son dimensionnement. Le dénivelé Δz (m), dépendant de la masse totale du véhicule M_V (kg), peut être déterminé grâce à l'équation 1.4 et l'équation 1.11 du Chapitre I tel que :

$$\Delta z = \frac{E_{pack}^{SC}}{M_V g} \quad 2.10$$

Ainsi, un pack de 20 supercondensateurs de 1000 F (environ 3 L et 600€, voir Figure 2-8), utilisé jusqu'à mi-tension ($\gamma = \frac{1}{2}$), permet en théorie de monter un véhicule de 100 kg sur 55 mètres (énergie utile $E_{pack}^{SC} = 15 Wh$) en considérant la transformation de l'énergie électrique sous forme mécanique (machine motrice) idéale.

2.2.2 Les batteries : description du composant

Les batteries sont aussi des systèmes de stockage de l'énergie. Leur capacité de stockage fonctionne grâce à la libération (ou la capture) d'électrons lors de réactions chimiques entre les deux électrodes. Il existe de nombreux types de batterie. Cependant, deux grandes familles sont majoritairement utilisées sur le marché en 2016 [105]. La Figure 2-10 montre l'évolution du chiffre d'affaire des batteries au niveau mondial. Les batteries au plomb sont historiquement très utilisées et leur volume continue à croître avec les années. Les batteries lithium-ion, dont l'essor est plus récent, affichent une forte dynamique.

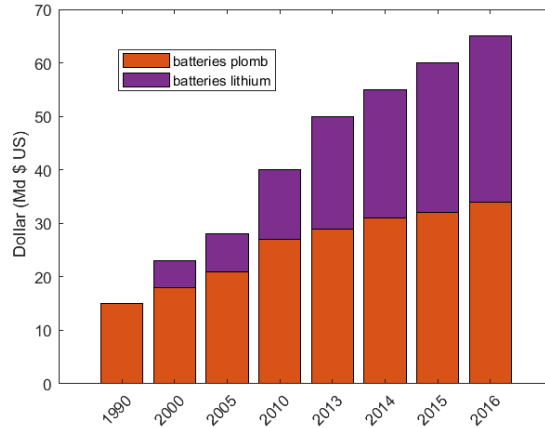


Figure 2-10 : Évolution des transactions commerciales concernant les batteries au plomb et lithium-ion (en Milliards de dollars) de 1990 à 2016 [105].

2.2.2.1 Les batteries plomb

Les batteries plomb sont historiquement développées depuis le XIX^e siècle et sont en usage dans de nombreux systèmes comme l'automobile, les Alimentations Sans Interruption (ASI), etc. La tension nominale V_{nom}^{batt} (V) de 2.1 V par cellule a permis de standardiser les systèmes 12 V (tension de la batterie V_{cell}^{batt} (V)) dans l'automobile en insérant 6 éléments en série.

Les batteries plomb sont même utilisées comme source d'énergie principale sur certains scooters électriques ou véhicules légers électriques dont l'essentiel du marché se situe en Asie [106].

L'énergie spécifique Es^{batt} ($J.kg^{-1}$) des batteries, définie comme le rapport de l'énergie qu'elle contient dans une cellule E_{cell}^{batt} (J) ou un pack E_{pack}^{batt} (J) et de sa masse M_{cell}^{batt} (kg) ou M_{pack}^{batt} (kg), est cependant relativement faible ($35 Wh.kg^{-1}$) dans le cas des batteries plomb [107].

$$Es^{batt} = \frac{E_{cell}^{batt}}{M_{cell}^{batt}} \quad 2.11$$

La capacité des batteries à l'échelle de la cellule C_{cell}^{batt} (Ah) ou du pack C_{pack}^{batt} (Ah) est généralement exprimée comme la quantité de courant que peut fournir une batterie pendant une heure avant que cette dernière ne soit complètement déchargée (l'unité est donc les ampères heures Ah). Par exemple, une batterie 10 Ah peut conceptuellement fournir 20 A pendant une demi-heure ou bien encore 5 A pendant 2 heures.

2.2.2.2 Les batteries lithium-ion

Les batteries lithium-ion sont des composants développés dans les années 70 et disposent d'une énergie spécifique pouvant dépasser les 200 Wh.kg^{-1} . Elles sont aujourd'hui massivement utilisées dans les applications embarquées comme dans les téléphones portables, les ordinateurs ou encore pour l'industrie du véhicule électrique (voiture, vélo, ...). Le lithium présent sur l'électrode positive des batteries est associé à un oxyde métallique qui lui confère sa stabilité chimique. Différents oxydes métalliques existent et forment différentes technologies de batteries lithium possédant chacune des propriétés spécifiques [108]. Les critères de sélection sont généralement l'énergie spécifique, la puissance spécifique, la durée de vie, le prix et enfin la sécurité (les batteries à base de cobalt sont globalement plus dangereuses, car elles peuvent s'enflammer). Un récapitulatif des différentes technologies et de leurs avantages respectifs est illustré sur la Figure 2-12 [109].

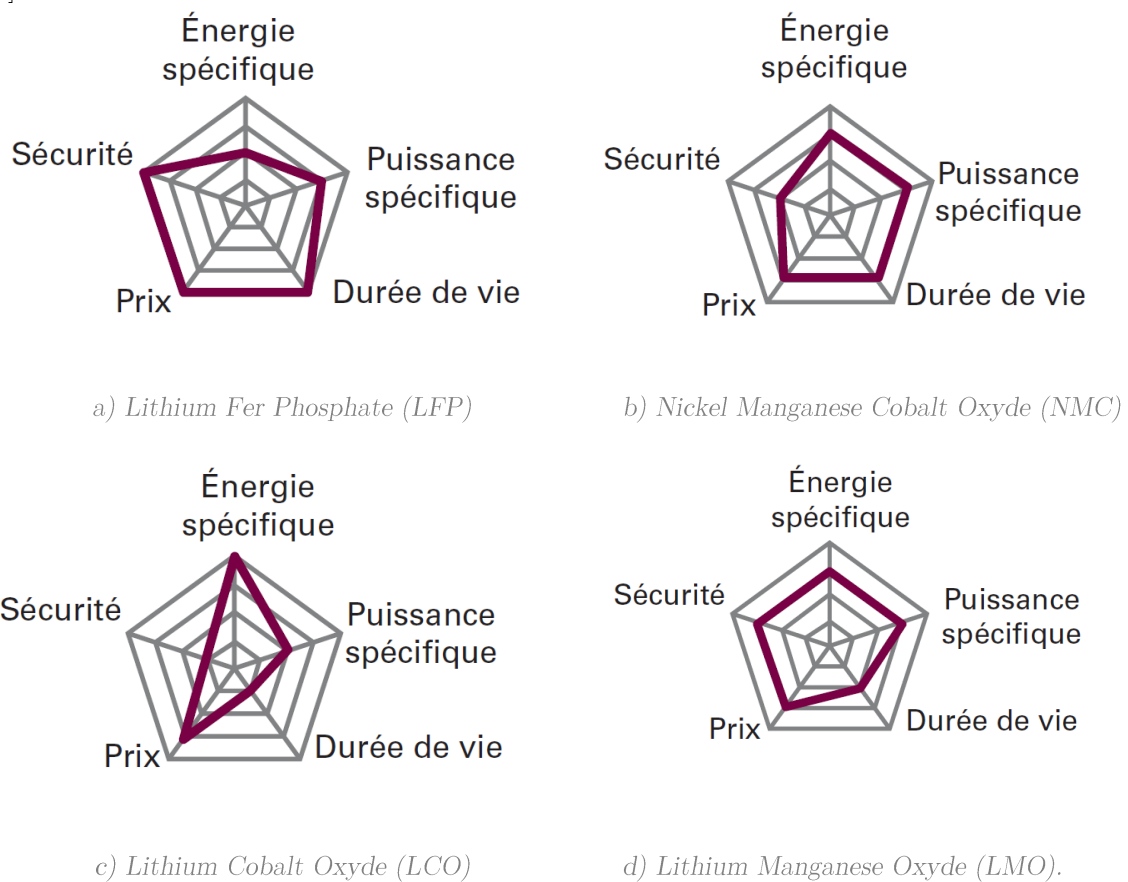
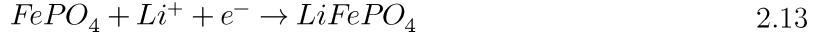


Figure 2-11 : Evaluation comparative des performances de différentes technologies de batteries lithium-ion [109].

Pour toutes les batteries, deux réactions simultanées ont lieu à l'électrode positive (appelée cathode en décharge) ainsi qu'à l'électrode négative (appelée anode en décharge), permettant aux électrons de circuler de l'une à l'autre et donc de créer un courant électrique. Les demi-équations 2.12 et 2.13 montrent le fonctionnement pour une batterie de type LFP (Lithium Fer Phosphate).





Ces réactions sont réversibles et permettent donc aux accumulateurs de se recharger. La capacité d'une batterie, souvent exprimée en Ah , dépend de la capacité des électrodes à libérer (ou attirer) des électrons. De plus, le courant maximum dépend de la vitesse à laquelle ces électrons peuvent être libérés. Celui-ci est directement relié à la surface des électrodes en contact avec l'électrolyte [108].

Cependant, les électrodes sont le siège d'autres réactions, indésirables, qui peuvent venir perturber leur fonctionnement. Il s'ensuit une diminution de la capacité de la batterie ou une augmentation de la résistance interne (diminution de la surface d'échange) qui peuvent mener à une fin de vie de la cellule [110].

2.2.2.3 Grandeurs et modèle de travail

Une des données qu'il est utile de connaître et de pouvoir transmettre à un utilisateur est l'état de charge (SOC_{batt} pour State Of Charge) ou l'état d'énergie (SOE_{batt} pour State Of Energy) de la batterie. Ces paramètres sont des indicateurs permettant de connaître la charge ou l'énergie restante dans la batterie et sont définis à partir de la mesure de courant du pack i_{pack}^{batt} (A) et de la tension batterie du pack V_{pack}^{batt} (V) tels que [109] :

$$SOC_{batt} = 1 - \frac{\int i_{pack}^{batt} dt}{C_{pack}^{batt}} \quad 2.14$$

$$SOE_{batt} = 1 - \frac{\int V_{pack}^{batt} i_{pack}^{batt} dt}{E_{pack}^{batt}} \quad 2.15$$

Le modèle utilisé dans ce document est très simple et est similaire à celui utilisé pour les supercondensateurs (voir Figure 2-4 et Figure 2-12). Cependant, ce modèle n'est pas adapté à la description des variations dynamiques de charge sur la batterie, car des constantes de temps doivent alors apparaître (typiquement modélisé par des branches RC en série, voir exemple de la Figure 2-13). Avec le modèle proposé, les phénomènes transitoires seront donc négligés. Comme pour les supercondensateurs, les batteries sont modélisées par une résistance série R_{cell}^{batt} (Ω) qui limite sa puissance et provoque un échauffement qui accélère le vieillissement. La résistance interne d'une cellule de batterie étant plus élevée que celle d'un supercondensateur, le courant est plus fortement limité et l'échauffement plus important [109].

2.2 Batteries ou supercondensateurs ?

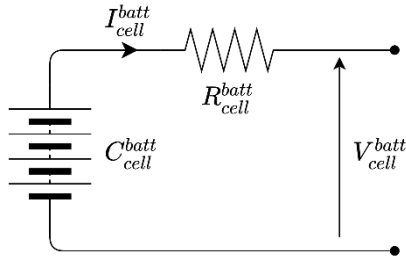


Figure 2-12 : Modèle simple à résistance série uniquement d'une cellule de batterie.

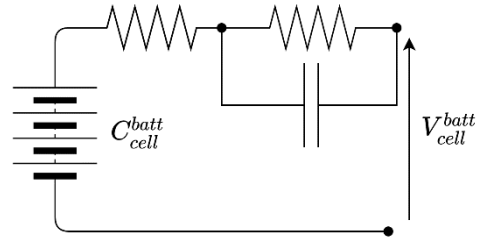


Figure 2-13 : Modèle avec prise en compte d'une constante de temps d'une cellule de batterie.

Un dernier paramètre couramment utilisé est l'état de santé (SOH_{batt} pour State Of Health) d'une batterie. Une batterie perd en capacité en fonction du temps. Les modes de vieillissement se composent d'une partie cyclage ainsi que d'une partie calendaire. Il est possible de définir le SOH comme le ratio de la capacité actuelle C_{cell}^{batt} (Ah) sur la capacité de la batterie à l'état neuf, la capacité initiale $C_{initiale}^{batt}$ (Ah) :

$$SOH_{batt} = \frac{C_{cell}^{batt}}{C_{initiale}^{batt}} \quad 2.16$$

Le seuil à partir duquel une batterie est considérée comme usée est arbitraire et dépendant de l'application. Cependant, il est classiquement proposé une valeur de capacité de $0.8C_{initiale}^{batt}$ pour définir la fin de vie d'une cellule de batterie.

2.2.2.4 Composants industriels

Les batteries lithium-ion sont majoritairement produites en Asie et peuvent se trouver sous trois formats dominants adaptés à divers types d'application :

- ❖ les cellules cylindriques qui sont le format le plus utilisé, comme les cellules de type 18650 (avec un diamètre de 18 mm et une hauteur de 65 mm) ;
- ❖ les cellules poches qui sont utilisées dans les téléphones par exemple ;
- ❖ les cellules prismatiques.

2.2.2.5 Rendement d'une batterie

Le rendement η_{batt} d'un pack dépend de sa résistance R_{pack}^{batt} (Ω) et du courant I_{pack}^{batt} (A) le traversant ainsi que de la puissance de charge ou décharge du pack P_{pack}^{batt} (W). Il peut être exprimé par l'équation suivante à la charge ou à la décharge :

$$\eta_{batt} = 1 - \frac{R_{pack}^{batt} I_{pack}^2}{P_{pack}^{batt}} \quad 2.17$$

En considérant la charge à 200 W d'une batterie de tension nominale égale à 40 V et de résistance 500 m Ω , les rendements de charge ou de décharge seront tous les deux égaux à environ 94 %, soit un rendement indicatif global de 88 %. Ainsi, le rendement d'une batterie lithium-ion est très inférieur à celui d'un pack de supercondensateurs avec une perte de près de 10 % de rendement.

2.3 Méthodologie de comparaison des packs

La comparaison des supercondensateurs avec les batteries est généralement basée sur l'identification des énergies spécifiques ou bien encore des puissances spécifiques en fonction des applications visées.

Il est apparu que cette technique de comparaison pouvait avoir des lacunes, car d'autres critères peuvent aussi être considérés afin d'effectuer un dimensionnement optimal. Le système étudié pendant la thèse a ainsi également mis en avant l'importance de considérer les critères de coût, de masse, de volume, de tension, de rendement ou encore de durée de vie du système en plus de la simple quantité d'énergie embarquée. En effet, considérer l'énergie comme le critère unique consacre forcément les batteries lithium-ion pour les véhicules électriques [111].

L'objectif a donc été de comparer un pack de supercondensateurs et un pack batterie au regard de l'ensemble de ces critères afin de pouvoir conclure sur la pertinence de l'utilisation des supercondensateurs dans une application de type mobilité légère. Cette application exige une énergie moyenne puisque seule l'énergie de l'utilisateur est gérée. De plus, elle nécessite une puissance moyenne ($< 1 \text{ kW}$) puisque les masses à déplacer sont faibles ($\approx 100 \text{ kg}$).

Le choix des packs a été effectué de manière à pouvoir les considérer comme équivalents et interchangeables dans l'application. Les critères et la constitution des packs retenus sont présentés section 2.3.1.

2.3.1 Choix des packs

Le choix des cellules de batterie s'est porté sur des cellules de la marque A123. Ces cellules lithium-ion possèdent des électrodes positives à base de lithium fer phosphate (LiFePO_4). La technologie LFP est cohérente dans le cadre de cette étude. En effet, elle est peu onéreuse et dispose d'une durée de vie importante comparée aux autres familles principales de batteries lithium-ion (voir Figure 2-11). Ce sont de plus des composants avec un bon compromis puissance spécifique/énergie spécifique qui peuvent donc concurrencer les supercondensateurs sur une application moyenne puissance [21]. Le Tableau 2-1 présente les caractéristiques principales des cellules retenues.

Les supercondensateurs sélectionnés ont une capacité de 400 F et sont de la marque Eaton, leurs principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2-2. Ces supercondensateurs sont vendus en boîtier « snap-in ». Ils peuvent donc être soudés sur circuit imprimé, ce qui a l'avantage d'être économique, mais aussi de pouvoir réaliser des montages aux formes variées (voir les Figure 2-14 et Figure 2-15).

Ces supercondensateurs permettent d'obtenir des montages 60 V avec une masse et un encombrement satisfaisant vis-à-vis de l'application (voir le Tableau 2-3).

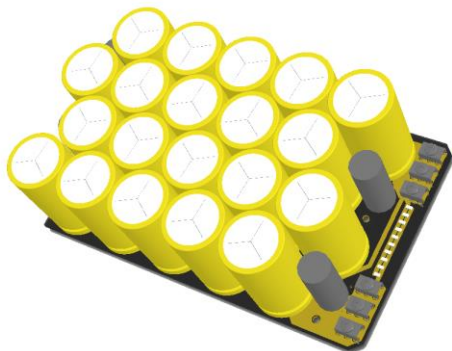


Figure 2-14 : Exemple de forme de pack supercondensateurs pour intégration sur porte-bagage.

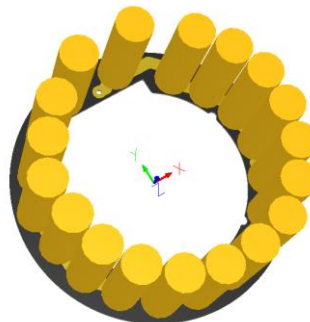


Figure 2-15 : Exemple de forme de pack supercondensateurs pour intégration dans un moteur roue.

Caractéristique	Valeur	Unité
Capacité	1.1	Ah
Résistance	0.06	Ω
Masse	0.039	kg
ES^{batt}	92	Wh.kg ⁻¹
P_{cell}^{batt}	1320	W.kg ⁻¹

Tableau 2-1 : Caractéristiques de la cellule Li-ion A123.

Caractéristique	Valeur	Unité
Capacité	400	F
Résistance	0.0032	Ω
Masse	0.072	kg
ES^{SC}	5.69	Wh.kg ⁻¹
P_{cell}^{SC}	7900	W.kg ⁻¹

Tableau 2-2 : Caractéristiques du supercondensateur Eaton XV450.

Le pack de supercondensateurs sélectionné est finalement constitué de 22 cellules de 400 F. Chaque élément permet d'obtenir une quantité d'énergie embarquée totale de 8.9 Wh et une énergie utilisable de 6.7 Wh pour une utilisation jusqu'à $V_{max}^{SC}/2$, soit 0.3 Wh par cellule. Le détail des caractéristiques du pack est donné dans le Tableau 2-3. L'assemblage de 22 cellules permet de se rapprocher de la tension de 60 V et donc de la maximiser. Le coût du pack a lui été calculé sur la base d'un achat groupé par quantité de 1000 cellules pour un coût de 143 euros/pack [22].

Afin de pouvoir comparer les deux packs, leur constitution doit comporter des similitudes. Les critères de comparaison sélectionnés sont la masse, la tension et le coût du pack, car ce sont des points critiques d'un point de vue industriel.

Pour un coût équivalent au pack supercondensateur, il est possible de constituer un pack de 32 cellules lithium-ion de la marque A123. Il se trouve que la masse est alors assez similaire à celle du pack de supercondensateurs. De plus, en affectant les cellules sur une structure 16s-2p (16 rangées en série de 2 cellules en parallèle) pour le pack batterie, la tension maximum est elle aussi très proche de 60 V. Le Tableau 2-3 présente la configuration obtenue pour ces packs.

Paramètres	Pack SC	Pack Batterie	Unité
Coût	143	141	€
Nb_{ser}	22	16	
Nb_{par}	1	2	
E_{pack}	6.7	116	Wh
Es	5.6	92	Wh. kg ⁻¹
M_{pack}	1.584	1.248	kg
Vol	1.33	0.5	L
E_{vol}	6.7	232	Wh. L ⁻¹
m_{vol}	1.2	2.43	kg. L ⁻¹
V_{max}	59.4	58.4	V
V_{min}	29.7	42.4	V
R_{pack}	0.072	0.480	Ω

Tableau 2-3 : Comparatif chiffré des packs constitués (caractéristiques identiques surlignées).

Il est possible de constater que les deux packs ont des tensions maximales de fonctionnement, ainsi qu'un coût et une masse relativement proches (voir sur le Tableau 2-3 les lignes surlignées).

Le rapport des énergies spécifiques est de 18 et confirme l'importante différence d'énergie embarquable entre les deux composants. Il est intéressant de souligner la similitude des masses des deux packs, mais aussi l'important écart de volume (Vol). Il faut noter que le calcul du volume ne tient pas compte des espaces vides entre les cellules. Il faudrait pour ce faire prendre en compte la compacité du pack qui peut être maximisée à 0.907 (plus de 90% du volume total occupé). La densité volumique m_{vol} (kg. L⁻¹) d'un supercondensateur est environ deux fois plus faible que celle des batteries. Ainsi, l'énergie volumique E_{vol} (Wh. L⁻¹) est un critère à prendre en compte pour une application comme les vélos où le volume est restreint. Le rapport des énergies embarquées à volume fini est de 35 entre ce pack de batterie et de supercondensateurs ce qui peut être une donnée importante lors de l'intégration mécanique du pack.

Les deux packs ainsi constitués sont considérés comme équivalents et interchangeables dans l'application.

2.3.2 Comparaison des performances

L'association de supercondensateurs avec un vélo à architecture hybride série a pour objectif de venir lisser la production d'énergie de l'utilisateur pour lui permettre de pédaler à effort constant (voir le Chapitre I, paragraphe 1.4). Puisque l'utilisateur produit une puissance limitée de l'ordre de 100 W (voir le Chapitre V, paragraphe 5.2.2.2), l'énergie embarquée nécessaire peut être relativement faible et compatible avec celle emmagasinable dans des supercondensateurs. Cependant, un pack batterie pourrait lui aussi remplir ce rôle de stockage tampon. De plus, le pack batterie aurait l'avantage de pouvoir assister l'utilisateur pendant de plus longues périodes, notamment en cas d'ascension prolongée. Un récapitulatif des avantages et inconvénients de chaque solution est présenté dans le Tableau 2-4.

	SUPERCONDENSATEURS	BATTERIES
Durée de vie	+	?
Énergie spécifique	-	+
Puissance spécifique	+	-
Poids (à énergie donnée)	-	+
Coût (à énergie donnée)	-	+
Rendement	+	-
Écologie	+	-
Sécurité	+	-
Autodécharge	-	+
Température	+	-

Tableau 2-4 : Comparatif des avantages des supercondensateurs et des batteries (matrice de pugh) et l'inconnue de la durée de vie des batteries dans l'application.

L'analyse du tableau montre que les supercondensateurs sont avantageux sur plusieurs points comme la sécurité ou encore l'écologie si la faible quantité d'énergie embarquée est jugée suffisante pour l'application (voir le Chapitre IV).

Un dernier avantage majeur régulièrement mis en avant comme un point fort des supercondensateurs est leur durée de vie et leur potentiel de cyclage.

Les deux packs, considérés comme équivalents, pourraient aussi être utilisés de manière équivalente, c'est-à-dire avec la même sollicitation électrique. Puisque l'énergie embarquée dans les supercondensateurs est faible, la quantité d'énergie utilisée sur la batterie serait, à usage équivalent, beaucoup plus faible que son potentiel total. Ainsi, la durée de vie du pack batterie serait augmentée au-delà de sa cyclabilité théorique de 1000 à 2000 cycles complets.

Des tests ont donc été entrepris pour comparer la durée de vie des deux systèmes équivalents et vérifier si les supercondensateurs disposent bien d'une durée de vie supérieure à celle des batteries à usage équivalent.

2.3.3 Usage et définition d'un profil type de test

Le comparatif des deux packs a été entrepris pour le domaine du vélo à assistance électrique qui est réglementé en puissance (voir le Chapitre I, paragraphe 1.3.1.3). Ainsi, un cycle représentatif des 250 W maximum légaux a été établi afin de pouvoir comparer les supercondensateurs et les batteries.

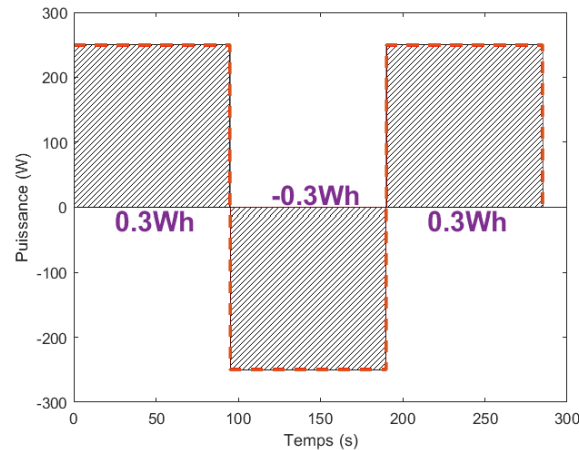


Figure 2-16 : Profil théorique de l'étude sélectionnée.

Les supercondensateurs, dans leur zone d'utilisation standard (jusqu'à $V_{cell}^{SC} = \frac{V_{max}}{2}$), permettent de charger/décharger 0.3 Wh par cycle. Cette même quantité d'énergie a été utilisée pour cycliser les batteries.

Cependant, le banc de cyclage utilisé étant limité en courant à 2 A par voie (voir la description du matériel utilisé dans le paragraphe 2.5.1), un cyclage en courant a été effectué. Ce banc étant donc partiellement limitant vis-à-vis des 250 W (le courant correspondant pouvant être plus important que 2 A), les cycles réels effectués sont présentés dans le paragraphe 2.4.

2.4 Les différents cycles

Les cycles de charge et décharge permettent de tester l'évolution de la capacité des composants en utilisation contrôlée. Les cycles de tests présentés ci-dessous n'étant pas des cycles de caractérisation et ne permettant pas de remonter aux valeurs de capacité des cellules, ils ne permettent donc pas de caractériser les cellules en temps réel. Ainsi, il est nécessaire d'alterner entre les cycles de vieillissement (phases temporellement majoritaires) et les phases de caractérisation (phases temporellement minoritaires) comme indiqué sur la Figure 2-17.

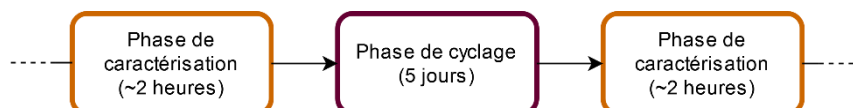


Figure 2-17 : Alternance de phases de cyclage et de caractérisation.

2.4.1 Essais pour identifier la durée de vie des supercondensateurs

Afin de déterminer la durée de vie des supercondensateurs, un cycle de vieillissement, piloté par un profil de courant bien déterminé, a été établi. L'objectif était initialement de cycler les cellules à 250 W, ce qui représentait un courant de 4.2 A au démarrage de la décharge (tension du pack égale à 59.4 V) et de 8.4 A en fin de décharge lorsque le pack est vide (tension du pack égale à 29.7 V).

2.4.1.1 Cycle standard

Compte tenu de la limitation du matériel les charges et décharges des cellules ont dû être limitées à 4 A (2 voies en parallèle). Le cyclage des supercondensateurs a été effectué entre V_{cell}^{SC} et $\gamma V_{cell}^{SC} = \frac{1}{2} V_{cell}^{SC}$, ce qui représente la totalité de l'énergie considérée comme disponible pour notre application (voir le Chapitre III, paragraphe 3.2.3). Ainsi, des cycles de décharge de 0.3 Wh, associés à des charges complètes, ont été entrepris et ont donné le profil suivant (voir la Figure 2-18) :

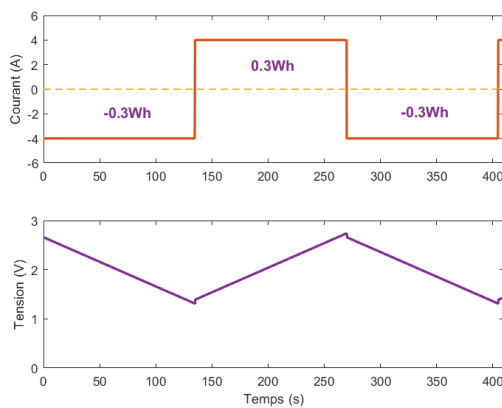


Figure 2-18 : Profil de cyclage d'un supercondensateur.

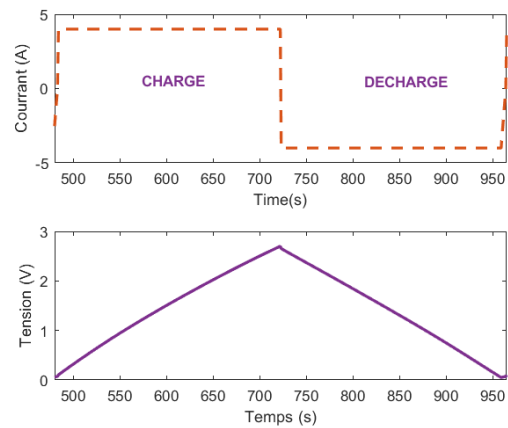


Figure 2-19 : Profil de caractérisation d'un supercondensateur.

2.4.1.2 Cycle de caractérisation

Il a aussi été nécessaire de prévoir des cycles de caractérisation réguliers de manière à pouvoir évaluer la dégradation de la cellule. Pour cela, un cycle complet (jusqu'à 0 V et non jusqu'à $\frac{1}{2} V_{cell}^{max}$) a été mis en place et est présenté sur la Figure 2-19. Sur ce cycle de caractérisation, la fréquence d'échantillonnage est plus élevée et de 1 Hz.

2.4.2 Essais pour identifier la durée de vie des batteries sollicitées par des microcycles

Les cycles de vieillissement de la batterie ont également pour objectif de la solliciter avec des microcycles de 0.3 Wh . En effet, l'objectif est de la solliciter de manière identique aux supercondensateurs. Comme la batterie équivalente dispose de 2 cellules en parallèle (voir le paragraphe 2.3), le cyclage est effectué avec un courant par cellule deux fois plus petit que celui des supercondensateurs, soit 2 A.

Un cyclage de $\Delta E = 0.3 \text{ Wh}$ sur une cellule équivaut à effectuer un cycle avec un delta d'état d'énergie ΔSOE_{batt} tel que :

$$\Delta SOE_{batt} = \frac{\Delta E}{E_{pack}^{batt}} = 8\% \quad 2.18$$

Le cycle s'effectue autour d'un état de charge fixe qu'il convient de fixer au préalable. Un état de charge de 50% moyen a été sélectionné afin d'optimiser la durée de vie de la cellule [114].

2.4.2.1 Cycle standard

Le cycle standard est donc un cycle de 0.3 Wh avec une profondeur de décharge centrée sur 50% de charge. Ce cycle est effectué avec un profil de courant de 2 A en charge et en décharge, comme illustré sur la Figure 2-20.

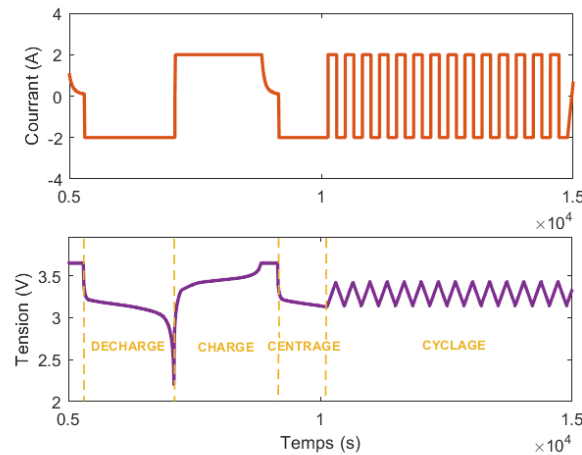


Figure 2-20 : Phase de caractérisation d'une cellule de batterie suivie d'un centrage à un SOC de 50% de la cellule et du cyclage en microcycle de 0.3 Wh .

2.4.2.2 La problématique du centrage

Le temps entre deux phases de caractérisation est de 5 jours. À l'issue d'un cycle de caractérisation, une demi-décharge est effectuée et le cyclage est ensuite lancé à partir d'un $SOC_{batt} \approx 50\%$. L'état de charge pendant les microcycles est censé rester centré autour de 50%.

Cependant, deux facteurs peuvent entraîner la dérive de l'état de charge tout au long des essais :

- ❖ La résistance interne de la cellule. Si la charge injecte 0.3 Wh au même titre que la décharge, les pertes résistives ne sont pas compensées et la dérive d , en $Wh/cycle$, peut être exprimée par :

$$d \approx \frac{2R_{cell}^{batt} I_{cell}^{batt} \Delta E}{V_{SOC=50\%}^{batt}} = 0.02 Wh/cycle \quad 2.19$$

Cette relation considère que le temps de décharge et de charge sont identiques. Les pertes joules $P_J (W)$, exprimées par $P_J = R_{cell}^{batt} I_{cell}^{batt^2}$ ainsi que le temps de décharge $t_{decharge} (s)$ exprimé par $t_{decharge} = \frac{\Delta E}{V_{SOC}^{batt} I_{cell}^{batt}}$ permettent de remonter à la formulation de l'équation 2.19 grâce à $d \approx 2P_J t_{decharge}$.

Chaque microcycle apporte alors un décalage d'environ 0.02 Wh. Avec une telle dérive, le seuil de tension minimum serait atteint après environ 90 cycles soit 8 heures. Pour pallier à ce problème, la décharge a été effectuée en Wh et la charge en Ah équivalents. Ainsi les pertes par effet Joule sont automatiquement compensées par cette méthode car les Ah sont indépendants de la tension alors que les Wh sont fonction de la tension de la cellule et donc de la chute ohmique due à la résistance.

- ❖ La deuxième source de dérive possible est due aux erreurs de précision du capteur de courant. Finalement, les essais ont pu montrer que la précision était suffisante pour garantir un bon centrage sur la durée des phases de microcyclage.

2.4.2.3 Cycle de caractérisation

Le cycle de caractérisation est un cycle complet de charge et décharge (voir la Figure 2-20). Il est également représenté plus clairement sur la Figure 2-21. Il permet de mesurer la capacité des batteries testées de manière périodique tout au long des essais de vieillissement.

2.4.3 Essais pour identifier la durée de vie des batteries sollicitées avec des cycles complets

Le dernier test est réalisé dans le but de mesurer la durée de vie standard des cellules lithium-ion sélectionnées. Cette opération permet de comparer les performances des cellules sollicitées avec des microcycles par rapport à celles sollicitées avec des cycles complets. Ainsi, une vérification des données constructeurs peut être réalisée.

Le profil de charge et de décharge des cellules est effectué avec le même courant que celui des batteries sollicitées avec des microcycles, c'est-à-dire avec un courant de charge et de décharge de 2 A. La capacité initiale des batteries étant de 1.1 Ah, le rythme de charge/décharge est alors proche de 2C.

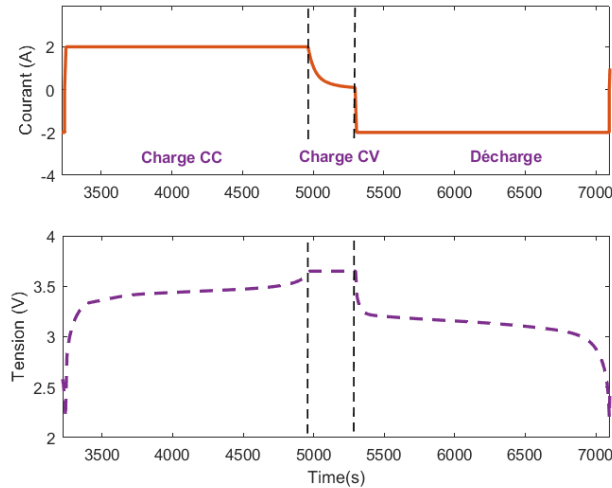


Figure 2-21 : Profil de charge/décharge d'une batterie (cycle complet et cycle de caractérisation).

Les phases de charge sont effectuées selon le protocole de charge CCCV (Constant Current - Constant Voltage) [20].

Ce cycle est donc répété et permet d'obtenir les variations de la capacité entre chaque charge/décharge.

2.4.3.1 Cycle de caractérisation

Pour les cycles complets, le cycle de caractérisation ne diffère pas du cycle standard de cyclage. Ainsi, aucune procédure spécifique n'est insérée lors du cyclage sauf une modification de la fréquence d'échantillonnage, à 0.1 Hz permettant une analyse de la résistance interne (voir le paragraphe 2.5.1).

2.4.4 Température et accélération des vieillissements

Afin de pouvoir obtenir des résultats de vieillissement en un temps assez court (c'est-à-dire inférieur à l'année), les essais ont été réalisés avec une température relativement élevée. L'augmentation de température permet d'accélérer le vieillissement. L'utilisation de cette technique a été abondamment adoptée et dispose ainsi de nombreuses validations expérimentales dans la littérature [114]–[118].

La loi d'Arrhenius est une loi générique modélisant les variations cinétiques d'une réaction chimique en fonction de la température à laquelle cette dernière a lieu. C'est la relation communément utilisée pour estimer les résultats à température ambiante, à partir des données à plus haute température.

Le coefficient de vitesse c , image de celle de la réaction, est défini par l'équation 2.20, faisant intervenir la température T (K), l'énergie d'activation E_a (eV) qui dépend de la réaction chimique, ainsi que de constantes dont la constante de Boltzmann k_B ($eV \cdot K^{-1}$) ou les constantes A_0 :

$$c = A_0 e^{\frac{-E_a}{k_B T}} \quad 2.20$$

La perte de capacité C_L (F) d'une cellule peut ensuite classiquement être exprimée en fonction du temps t (s) comme décrit par l'équation 2.21 (avec A_1 une constante) [116], [119]. La perte de capacité peut être linéaire avec le temps, $z = 1$, ou encore dépendante à la racine carrée du temps, $z = \frac{1}{2}$, ...

$$C_L = A_1 A_0 e^{-\frac{E_a}{k_B T} t^z} = A_1 c t^z \quad 2.21$$

La perte de capacité permet automatiquement de remonter à la valeur du SOH, en prenant en compte la valeur de la capacité initiale $C_{initiale}$ grâce à la relation :

$$SOH = \frac{C_{initiale} - C_L}{C_{initiale}} \quad 2.22$$

Afin de pouvoir identifier la perte de capacité, deux constantes doivent être identifiées : la constante pré exponentielle $A_1 A_0$ et l'énergie d'activation E_a . Pour cela, les essais ont été réalisés à deux températures différentes : 50 et 60°C.

L'énergie d'activation est souvent comprise entre 0.4 et 1.2 eV. En exploitant l'équation 2.21, on peut apercevoir que le coefficient de vitesse c varie en fonction de la température et de l'énergie d'activation. Le Tableau 2-5 présente différents rapports de facteurs d'accélération à différentes températures c_T en fonction de l'énergie d'activation. Par exemple, le rapport $c_{T=30^\circ C} / c_{T=20^\circ C}$ analyse la différence de cinétique pour une même réaction à 30 et à 20°C. Les calculs illustrent la variabilité de l'accélération qui est fortement dépendante de l'énergie d'activation et de la température.

	$c_{T=30^\circ C} / c_{T=20^\circ C}$	$c_{T=60^\circ C} / c_{T=50^\circ C}$
$E_a = 0.5 \text{ eV}$	1.92	1.71
$E_a = 1 \text{ eV}$	3.69	2.93

Tableau 2-5 : Exemple de variation de la cinétique de réaction pour un écart de 10°C.

Les résultats présentés par le Tableau 2-5 permettent d'être critiques vis-à-vis de la règle populaire de la multiplication par 2 de la cinétique d'une réaction tous les 10°C. En effet, l'accélération de la réaction peut varier de manière considérable en fonction de l'énergie d'activation. Afin d'illustrer l'accélération de la cinétique d'une réaction ayant lieu à 60°C comparée à cette même réaction à 20°C, il suffit de calculer le rapport $c_{T=60^\circ C} / c_{T=20^\circ C}$ en connaissant l'énergie d'activation. Pour $E_a = 0.5 \text{ eV}$, on trouve 10.7. Ainsi, le temps de réaction (ou de vieillissement dans le cas de ce chapitre) sera divisé par plus de 10 dans cette configuration.

2.5 Résultats expérimentaux

2.5.1 Méthodes de mesure

2.5.1.1 Le matériel

Le banc de test utilisé pour réaliser le cyclage et les caractérisations est un banc ARBIN BT2000 disposant de 28 voies. Les caractéristiques du banc sont définies dans le Tableau 2-6.

	Caractéristiques
Nombre de voies	28
Courant maximal par voie	2 A
Tension maximale par voie	5 V
Précision sur le courant	0.1 %
Précision sur la tension	0.1 %

Tableau 2-6 : Caractéristiques du banc ARBIN BT2000.

Afin de pouvoir réaliser des spectroscopies d'impédance, un banc de mesure ZAHNER IM6 EIS Workstation est utilisé.

Deux étuves sont utilisées afin de réaliser les essais à température contrôlée de 50 °C et 60 °C. Les Figure 2-22 et Figure 2-23 illustrent le montage réalisé pour le cyclage des supercondensateurs.

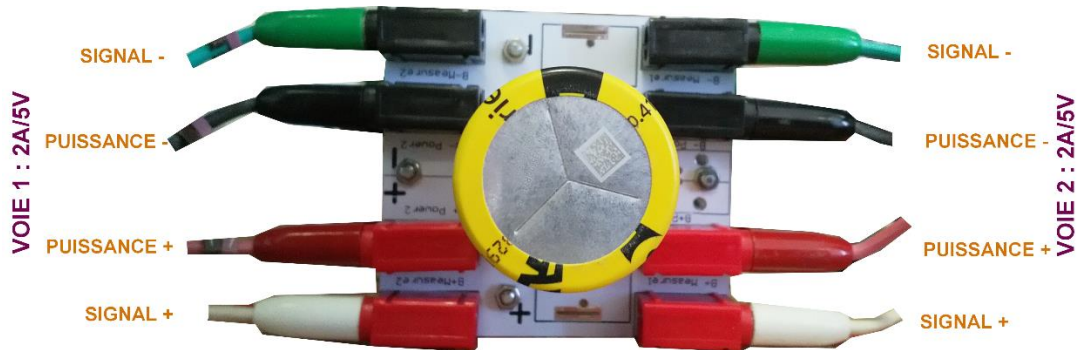


Figure 2-22 : Exemple de câblage d'un supercondensateur avec 2 voies en parallèle.



Figure 2-23 : Dispositif de test avec deux enceintes pour les essais de vieillissement.

2.5.1.2 Les méthodes de mesure

Mesurer la dégradation des cellules peut être effectuée grâce à l'observation du SOH. Les paragraphes 2.2.1 et 2.2.2 expliquent comment calculer le SOH à partir de la chute de capacité de la cellule. Un autre paramètre utile à observer est la résistance série des cellules. En effet, cette dernière augmente avec le vieillissement et peut également être utilisée comme un critère de fin de vie. La fin de vie est alors classiquement définie autour de 200% de la résistance initiale [120], [121].

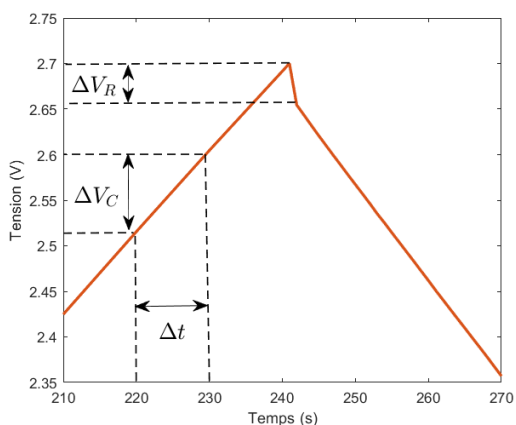


Figure 2-24 : Profil de tension associé à un courant I avec chute de tension ohmique.

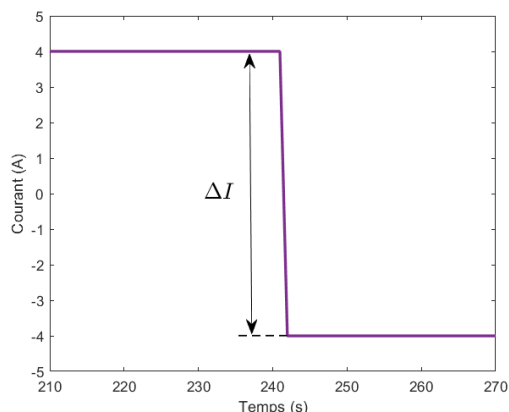


Figure 2-25 : Profil de courant associé à la figure voisine.

La valeur de la résistance interne série (voir Figure 2-4 et Figure 2-12) peut être mesurée de la même manière pour les batteries ou les supercondensateurs grâce à l'équation 2.23 en faisant intervenir la chute de tension instantanée aux bornes de la cellule ΔV_R (V) ainsi que la différence de courant correspondante ΔI (A) (voir les Figure 2-24 et Figure 2-25) :

$$R = \frac{\Delta V_R}{\Delta I} \tag{2.23}$$

Pour les supercondensateurs, la capacité de la cellule peut être mesurée facilement grâce à la formule faisant intervenir le courant de charge constant I (A) et la différence de tension ΔV_C (V) sur un temps Δt (s) :

$$C_{cell}^{SC} = \frac{I\Delta t}{\Delta V_C} \quad 2.24$$

Selon la norme IEC62391, la capacité des supercondensateurs est donnée pour $\Delta V_C = 0.8V_{max}^{SC} - 0.4V_{max}^{SC}$ [101].

La capacité des cellules de batteries peut être déterminée par intégration du courant sur la phase de décharge. Cette méthode est dite coulométrique (ou « Coulomb counting ») :

$$C_{cell}^{batt} = \int_{V=V_{max}^{batt}}^{V=\gamma V_{max}^{batt}} Idt \quad 2.25$$

2.5.2 Mise en œuvre des tests

Afin de réaliser les essais et d'obtenir des résultats robustes et reproductibles, 3 cellules par essai ont été testées. Ainsi, 3 cellules pour chacun des trois tests à deux températures ont été vieilles, soit 18 cellules (3x3x2=18).

Chaque test est effectué à 50 et 60°C afin de pouvoir en extraire l'énergie d'activation et ainsi de pouvoir estimer la durée de vie à 20°C. Chaque cellule a été référencée pour un meilleur suivi durant les essais de vieillissement. L'affectation des cellules au banc Arbin est schématisée et présentée sur la Figure 2-26.

- ❖ Tests en cyclage des supercondensateurs à 50°C (SC1, SC2, SC3)
- ❖ Tests en cyclage des supercondensateurs à 60°C (SC4, SC5, SC6)
- ❖ Tests en cyclage partiel (microcycle) des batteries à 50°C (B4, B5, B6)
- ❖ Tests en cyclage partiel (microcycle) des batteries à 60°C (B10, B11, B12)
- ❖ Tests en cyclage complet des batteries à 50°C (B1, B2, B3)
- ❖ Tests en cyclage complet des batteries à 60°C (B7, B8, B9)

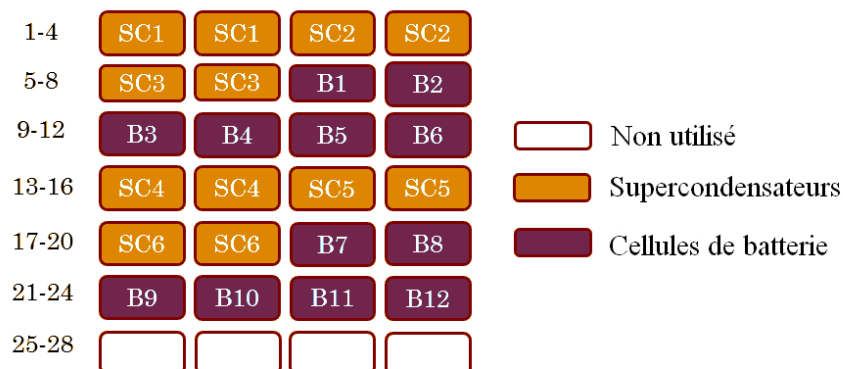


Figure 2-26 : Affectation des 28 voies du banc Arbin avec deux voies par supercondensateur pour permettre le cyclage à 4A.

2.5.3 Résultats de la caractérisation initiale

Une phase de test à température ambiante de 25°C a été réalisée initialement avant le lancement des essais de vieillissement. Celle-ci a permis de mesurer et d'identifier les caractéristiques initiales des cellules.

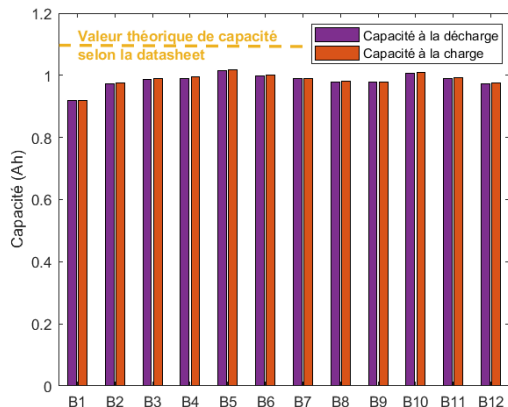


Figure 2-27 : Capacités initiales des 12 cellules de batterie testées.

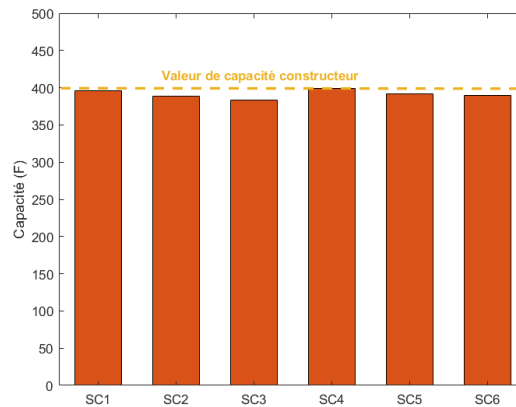


Figure 2-28 : Capacité des 6 supercondensateurs initialement testés.

Les mesures sur les cellules ont donné des valeurs de capacité globalement inférieures aux données constructeurs (voir les Figure 2-27 et Figure 2-28).

Ces données représentent les résultats de la caractérisation initiale de ces cellules. Ainsi, la valeur indiquée pour chaque cellule est considérée comme la capacité initiale de la cellule. C'est cette valeur qui fait référence pour le calcul du SOH.

Des spectroscopies d'impédances (EIS), réalisées pour des fréquences allant de 100 *mHz* à 100 *kHz*, ont également permis de valider les résistances réelles à 1 *kHz* (respectivement 16 *mΩ* et 2.8 *mΩ*, voir Figure 2 29 et Figure 2 30) et de recouper les valeurs constructeurs (respectivement 25 *mΩ* et 3 *mΩ*). En effet la spectroscopie d'impédance permet de mesurer l'impédance et le déphasage d'un composant pour plusieurs fréquence et ainsi tracer ces variations en fonction de la fréquence (diagramme de Nyquist par exemple).

La Figure 2-29 illustre l'ensemble des tracés EIS sur un diagramme de Nyquist pour les 12 cellules $LiFePo_4$ testées (avec un mode galvanostatique, un courant efficace de 0.5 A alternatif, des mesures de 100 *mHz* à 100 *kHz*). La majorité des mesures sur les cellules sont cohérentes (les cellules ont des EIS assez similaires graphiquement). Seule la cellule B1, qui est aussi la cellule avec la plus faible capacité (voir la Figure 2-27) montre un comportement différent des autres avec une partie imaginaire de l'impédance (et donc une capacité) plus importante (plus faible). Les cellules B6 et B11 ont un décalage résistif pur pouvant être imputé à la connectique ou au processus de fabrication.

Les supercondensateurs (voir la Figure 2-30) ont aussi des caractéristiques initiales quasiment identiques. Seule la résistance série semble varier. Cette variation de résistance peut être imputée à la connectique ou encore au processus de fabrication [122].

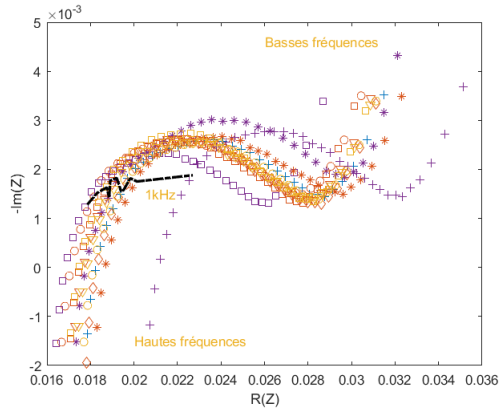


Figure 2-29 : Spectroscopie d'impédance des cellules lithium Fer Phosphate testées (100 mHz-100 kHz) à 3.65 V et 500 mA. Superposition des 12 cellules testées ainsi que de l'identification des résultats à 1 kHz.

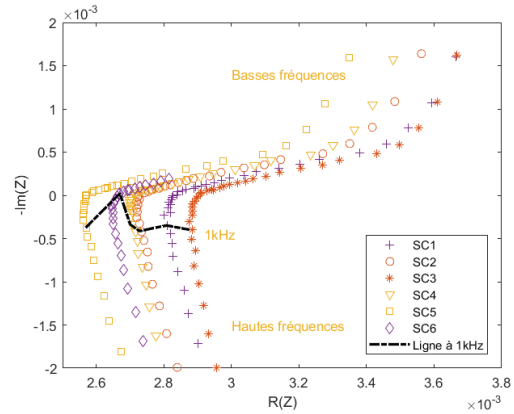


Figure 2-30 : Spectroscopie d'impédance des supercondensateur 400 F en test (100 mHz-100 kHz) à 2.7 V et 500 mA.

2.5.4 Résultats du vieillissement

Les résultats de vieillissement présentés dans ce paragraphe concernent les trois essais décrits dans le paragraphe 2.4. La fin de vie est définie comme la perte de capacité de 20% par rapport à celle initiale. Une analyse comparative des résultats ainsi qu'une estimation de la durée de vie à 20°C sont aussi effectuées.

2.5.4.1 Vieillissement en cycle complet

Les résultats de perte de capacité pour les cellules de batterie testées sollicitées sur des cycles complets sont présentés sur les Figure 2-31 et Figure 2-32.

2.5 Résultats expérimentaux

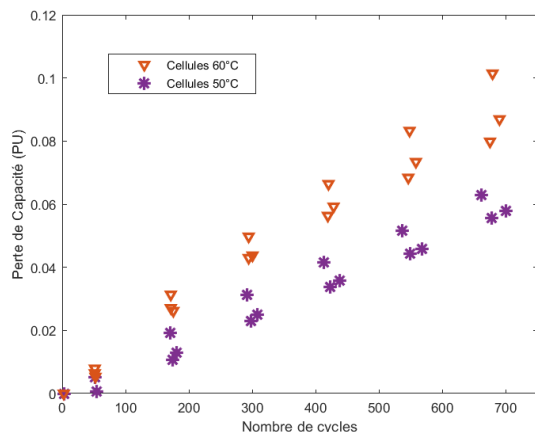


Figure 2-31 : Perte de capacité des cellules de batterie (B1 à B3, et B7 à B9) en cycles complets durant les 700 premiers cycles correspondant à la partie linéaire du vieillissement.

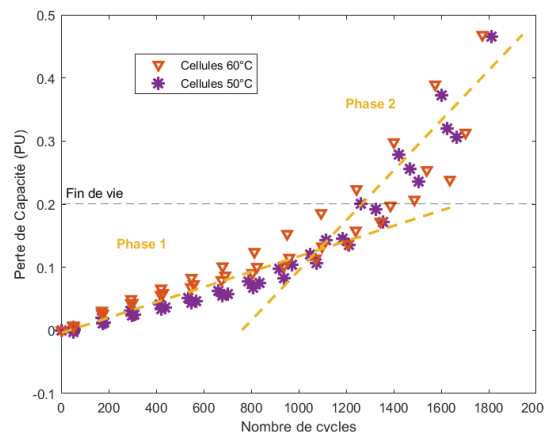


Figure 2-32 : Perte de capacité des cellules de batterie (B1 à B3 et B7 à B9) en cycles complets jusqu'à la fin du test.

Les cycles complets ont pour objectif de mesurer, de définir et de comparer les conditions de vieillissement standard avec les données du constructeur en nombre de cycles.

Il est possible d'observer plusieurs phénomènes dans ces essais :

- ❖ Il peut y avoir un vieillissement différé de quelques cycles au démarrage, en effet, certaines cellules peuvent même avoir un gain de capacité entre le démarrage du test et le deuxième jour (50 cycles environ) [123].
- ❖ Des phases de vieillissement linéaires (voir la Figure 2-32, phase 1) avec une distinction nette du vieillissement entre les deux températures (60°C et 50°C) durant les 700 premiers cycles des cellules. Cette phase est classique et les résultats se trouvent dans le Tableau 2-7 [2], [35].
- ❖ Une dernière phase de vieillissement accéléré comparé à la première phase (voir la Figure 2-32, phase 2). La littérature décrit un phénomène résultant probablement d'un changement de mécanisme de vieillissement (changement de l'électrode limitante) ou d'une accélération brutale de la résistance (dégradation de l'électrode), le phénomène étant souvent observé en lien avec de la charge rapide [110], [125], [126].

	Résultats
Nombre de cycles observés moyen	1300-1500 cycles
Durée de vie constructeur à 5C de décharge, 1C en charge, 25°C, 100% de décharge	1000 cycles
Durée de vie extrapolée (phase 1) à 60°C	1550 cycles
Durée de vie extrapolée (phase 1) à 50°C	2300 cycles

Tableau 2-7 : Nombre de cycles observé et calculé jusqu'à la fin de vie de la cellule (20% de perte de capacité).

Les résultats montrent que la durée de vie des batteries en cycle complet dépasse la durée de vie de 1000 cycles (durée de vie garantie constructeur) à 60°C et à 50°C. Les résultats ne sont pas directement comparables avec ceux données par le constructeur (cellules testées avec un courant de charge (1 A) et décharge (5 A) avec une température ambiante de 25 °C) car les protocoles de test sont différents, cependant, le dépassement des 1000 cycles semble confirmer la bonne performance de ces cellules vis-à-vis des caractéristiques standard de cette technologie (voir paragraphe 2.2.2). L'accélération du rythme de dégradation reste un phénomène à analyser et comprendre pour les batteries. Cependant, ce phénomène survient après près de 800-1200 cycles, soit, quasiment la durée de vie constructeur.

2.5.4.2 Cellules de batterie et supercondensateurs, les essais en microcycles

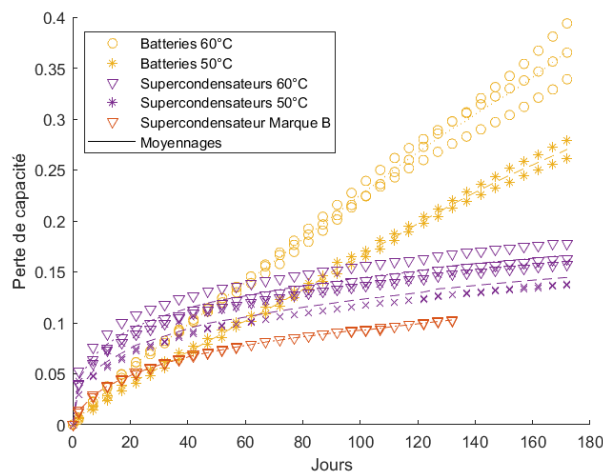


Figure 2-33 : Vieillessement des supercondensateurs et des cellules de batterie en microcycles à 50°C et 60°C. Les batteries vieillissent au rythme de 237 cycles/jour, les supercondensateurs au rythme de 280 cycles/jours.

Les résultats concernant le cyclage comparatif des cellules de batterie et des supercondensateurs à cycles énergétiques équivalents a nécessité 180 jours (voir la Figure 2-33). Plusieurs phénomènes sont apparus lors des tests de vieillissements :

- ❖ Une cellule de batterie installée à 50°C était défailante. Celle-ci a été retirée de l'analyse et des graphes.
- ❖ Les supercondensateurs subissent une forte dégradation initiale de capacité. Cette dernière est nommée phase de brûlage dans la littérature [100], [127]. Des essais sur une autre marque de supercondensateurs ont confirmé l'existence de cette perte initiale de capacité (cf. Supercondensateur Marque B sur la Figure 2-33, voir l'Annexe 5.6A pour plus de résultats de précision concernant les essais complémentaires). De plus, ces essais ont confirmé que la phase de brûlage et le vieillissement pouvait être moins prononcé sur d'autres composants que ceux initialement sélectionnés. Les détails concernant ces essais et les caractéristiques, équivalentes aux caractéristiques des cellules Eaton, sont détaillés en Annexe A.

- ❖ Le rythme de dégradation des supercondensateurs est considérablement ralenti après la phase de brûlage. Le vieillissement des cellules de batterie est quant à lui plutôt linéaire. Initialement (pendant les 50 premiers jours des essais), la dégradation des batteries est plus faible que celle des supercondensateurs. Au-delà, les supercondensateurs vieillissent moins vite que les batteries et confirment leur capacité de cyclage étendues.
- ❖ Les essais à 50°C et 60°C permettent de modéliser le vieillissement à 20°C (voir le paragraphe 2.5.5)

Les résultats de cyclage sur les cellules testées ont finalement été moyennée par catégorie de test (3 cellules moyennées pour chaque essais). Les résultats observés sont reportés dans le Tableau 2-8. Le nombre de jours observé correspond à la durée effective de cyclage intensif 24h/24h avant d'atteindre la fin de vie. Le nombre de microcycles présenté sur la colonne de droite du tableau 2-8 représente les performances en cyclage des cellules sur cette même période.

	Nombre de jours	Nombre de microcycles (Durée de vie)
Microcycles sur cellules de batterie à 50°C	122	28 670
Microcycles sur cellules de batterie à 60°C	87	19 740
Supercondensateurs à 50°C (estimé)	414	116 330
Supercondensateurs à 60°C (estimé)	249	69 970

Tableau 2-8 : Nombre de cycles (microcycles) observés avant la fin de vie définie par une perte de 20% de la capacité initiale. Lorsque les tests n'ont pas permis de mesurer la fin de vie, une estimation selon le paragraphe 2.5.5 a été menée.

2.5.4.3 Évolution de la résistance interne

Comme défini dans le paragraphe 2.5.1, la résistance interne est un indicateur de la dégradation des cellules de batterie ou des supercondensateurs [121], [128], [129]. Une augmentation de la résistance interne porte préjudice aux cellules en augmentant leur échauffement et donc en diminuant leur durée de vie. Les Figure 2-34 et Figure 2-35 montrent l'évolution de la résistance interne normalisée des cellules de batterie et des supercondensateurs lors de vieillissement en microcycles. La méthode de mesure utilisée a été présentée au paragraphe 2.5.1.2. Les mesures montrent une augmentation progressive de la résistance interne. Cependant, les résistances mesurées ne permettent pas de conclure à une fin de vie des cellules car les augmentations ne sont pas assez conséquentes (<200% de la résistance initiale).

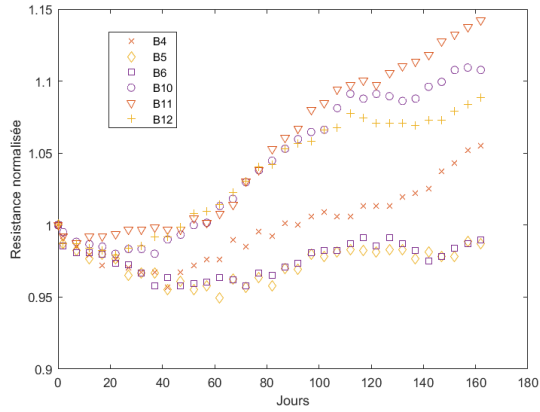


Figure 2-34 : Evolution de la résistance interne des cellules de batterie subissant un vieillissement en microcycles.

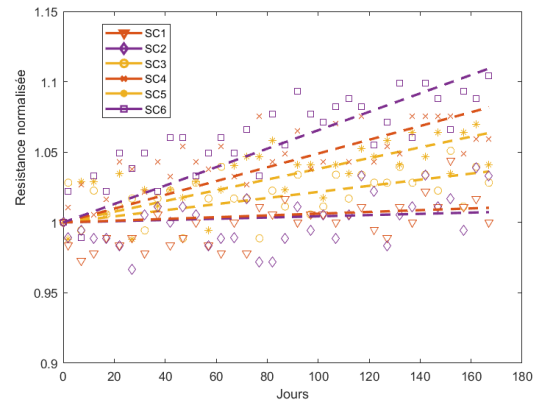


Figure 2-35 : Evolution de la résistance interne série des supercondensateurs subissant un vieillissement avec des modélisations linéaires.

2.5.4.4 Caractérisation fréquentielle finale

La caractérisation fréquentielle finale permet de visualiser le comportement relatif des cellules en les affichant toutes sur le même graphique. Elle permet également de comparer les résultats, ici en fin de vie, par rapport aux résultats lorsque les cellules sont neuves (voir le paragraphe 2.5.3) et ainsi de conclure sur les évolutions des cellules après le vieillissement.

La Figure 2-36 montre l'évolution des 6 cellules de batterie testées en microcycles. Il est possible d'observer une disparité des cellules assez importante avec des résistances ohmiques série R_{cell}^{batt} variant de 21 à 38 $m\Omega$ à 1 kHz (contre 17 à 22 $m\Omega$ à l'état neuf, voir la Figure 2-29). De plus, l'augmentation de l'impédance à basse fréquence témoigne de la dégradation des cellules.

La Figure 2-37 montre des résultats concernant les tests sur les supercondensateurs. Les données sont similaires à celles identifiées à l'initiale avec une augmentation de la disparité et une diminution de la capacité (augmentation de la composante imaginaire à basse fréquence, voir l'équation 2.2).

2.5 Résultats expérimentaux

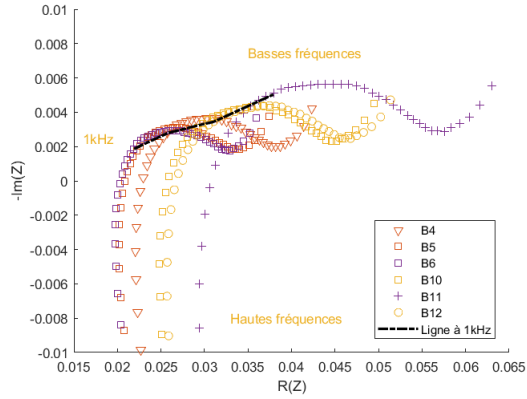


Figure 2-36 : Spectroscopie d'impédance des cellules lithium Fer Phosphate testées en micro-cycles, mode galvanostatique (100 mHz-100 kHz) à 3.65 V et 500 mA.

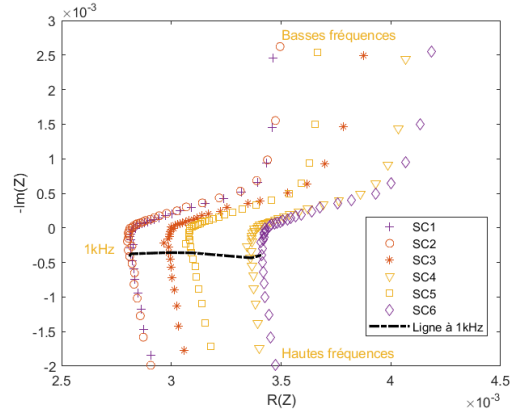


Figure 2-37 : Spectroscopie d'impédance des supercondensateur 400 F en test, mode galvanostatique (100 mHz-100 kHz) à 2.7 V et 500 mA après vieillissement.

2.5.5 Interprétation des résultats

La relation d'Arrhenius permet de modéliser le vieillissement en fonction de la température par le biais de l'énergie d'activation E_a ainsi que de la constante pré exponentielle $A_0 A_1$.

Afin d'extraire l'énergie d'activation, il est nécessaire d'avoir deux séries de données temporelles (t_1, t_2) à deux températures différentes (T_1, T_2). Pour chacune d'entre elles, il est possible de définir la perte de capacité selon l'équation 2.21 qui comporte deux inconnues.

Il est directement possible d'extraire l'énergie d'activation de cette équation, grâce à l'utilisation de l'équation 2.26 :

$$E_a = \frac{\ln t_1^z - \ln (t_2^z)}{\frac{1}{k_B T_1} - \frac{1}{k_B T_2}} \quad 2.26$$

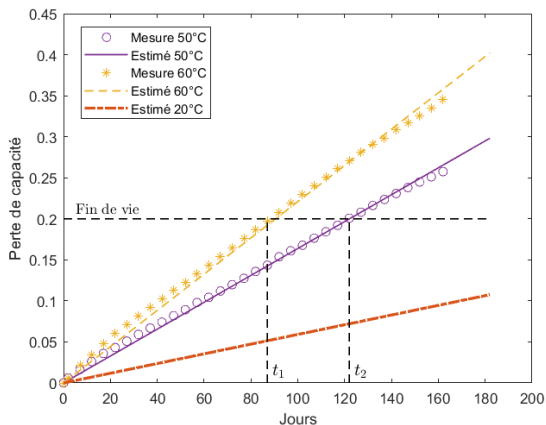


Figure 2-38 : Modélisation temporelle du vieillissement des cellules de batterie en microcycles et extrapolation à température ambiante de 20°C.

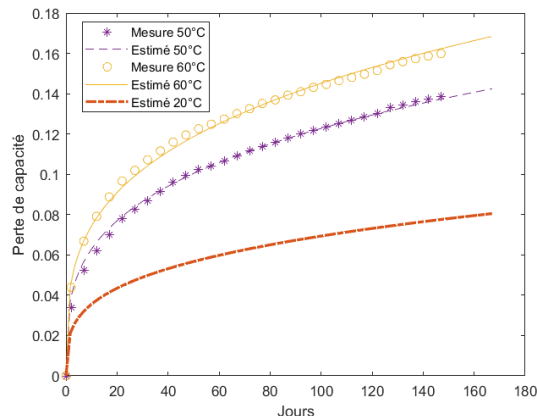


Figure 2-39 : Modélisation temporelle du vieillissement des supercondensateurs et extrapolation à température ambiante de 20°C.

Il est dans un premier temps assez aisé de définir ces paramètres pour le cas des cellules de batterie puisque le vieillissement est linéaire avec le temps ($z = 1$). La qualité de la modélisation est alors satisfaisante avec une erreur quadratique (sur la base du coefficient de détermination [130]) telle que : $R^2 = 0.997$ pour les cellules à 50°C et $R^2 = 0.995$ pour les cellules à 60°C. Grâce à la connaissance de la dépendance au temps, il est possible d’extraire l’énergie d’activation des cellules lithium-ion. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2-9. L’énergie d’activation est extraite grâce à l’équation 2.26. Une estimation du vieillissement à 20°C est ensuite réalisée sur la base de l’équation 2.21 et des constantes identifiées (voir la Figure 2-38).

La même méthode peut être utilisée pour les supercondensateurs afin de modéliser la perte de capacité de la cellule au cours du temps. La dépendance au temps n’est ni linéaire, ni quadratique puisqu’un coefficient $z = \frac{1}{3.4}$ a été identifié et permet de maximiser la représentativité avec une erreur quadratique telle que $R^2 = 0.997$ pour les deux essais à 50 et 60 °C.

	Cellules de batterie	Supercondensateurs
Énergie d’activation (eV)	0.295	0.204
$c_{T=60°C}/c_{T=20°C}$	8.85	4.5
Nombre de jours estimé à 20°C	344	3000
Nombre de (micro)cycles estimés à 20°C	80 840	843 000

Tableau 2-9 : Estimation de la durée de vie à 20°C des cellules.

L’estimation de durée de vie des supercondensateurs à 20°C est estimée à plus de 800 000 cycles, ce qui rejoint les données constructeur (durée de vie entre 500 000 et 1 000 000 de cycles).

Les supercondensateurs présentent donc des performances en cyclage environ 10 fois supérieure à celle des batteries pour un usage énergétique équivalent. Les résultats de l’énergie d’activation proposent un coefficient d’accélération du vieillissement de 8.8 pour les batteries et de 4.5 pour les supercondensateurs entre 20°C et 60°C. Ainsi, on accélère le vieillissement, en moyenne, de

45% par tranche de 10°C pour les supercondensateurs et de 72% pour les cellules de batterie. Le résultat montre un éloignement relatif au principe vulgarisateur de la division par 2 de la durée de vie tous les 10°C d'augmentation de la durée de vie (voir le paragraphe 2.4.4).

2.5.5.1 Le nombre de cycles équivalent

Il est possible de comparer les performances en termes de durée de vie des batteries pour des usages en cycles complets ou en microcycles. La potentielle augmentation de durée de vie d'une batterie si cette dernière est utilisée sur une zone restreinte du SOC peut être alors mise en évidence.

Une manière de pouvoir comparer des cycles complets et des microcycles est de calculer un nombre de cycles complets équivalents. Identifier ce nombre de cycle équivalent Nb_{cycles}^{equi} est possible en divisant le nombre de microcycles effectués $Nb_{microcycles}$ par la profondeur de décharge (ou variation de SOC, ΔSOC) pour trouver le nombre de cycles complets équivalent réalisables [131]:

$$Nb_{cycles}^{equi} = Nb_{microcycles} \Delta SOC \quad 2.27$$

Dans notre application la profondeur de décharge correspond à un $\Delta SOC \approx 8\%$. Compte tenu de l'équation 2.27, cette valeur permettrait théoriquement de réaliser environ 19 000 microcycles avant d'atteindre la fin de vie selon la fiche technique qui indique une valeur standard de 1500 cycles complets. Or, les résultats montrent que le nombre de cycles équivalents est bien supérieur puisqu'un nombre de 80 000 microcycles a pu être estimé à 20°C, soit plus de 6 000 cycles complets équivalents. La durée de vie des batteries a ainsi été multipliée par 4 en l'exploitant sur une plage d'utilisation restreinte autour d'un SOC de 50%.

Les batteries peuvent donc avoir des durées de vie étendues et atteindre des cyclabilité élevées en surdimensionnant la batterie par rapport à son usage. Le choix des supercondensateurs, avec une cyclabilité encore supérieure, doit alors être motivé par un usage intensif. Des calculs d'amortissement et de maintenance (coût d'un remplacement, fréquence de la maintenance) peuvent aussi être effectués pour orienter le choix [132].

En recoupant avec les données de consommation des VAE (majoration à 10 Wh/km) présentés au paragraphe 1.3 du Chapitre I, le potentiel de cyclage des batteries lors d'une utilisation sur un faible pourcentage de l'énergie stockée totale comme présenté dans ce chapitre semble offrir une durée de vie de plus 50 000 kilomètres au vélo en cyclage hors vieillissement calendaire. Ainsi, seul un usage très intensif du véhicule permet de justifier l'usage de supercondensateurs pour leur durée de vie en cyclage.

2.6 Conclusion de chapitre

Ce chapitre a permis de mettre en perspective plusieurs critères de sélection basés sur les caractéristiques des systèmes de stockage. L'application du vélo à assistance électrique ne requiert que peu d'énergie et est donc compatible avec les supercondensateurs. Il a été confirmé que ces derniers possèdent une meilleure durée de vie que les batteries, même à profil énergétique similaire. Le rapport de durée de vie est proche de 10. Cependant, il a aussi été montré que les batteries possèdent une durée de vie plus importante si elles sont utilisées autour d'un état de charge moyen si l'usage le permet. La quantité totale d'énergie exploitable peut alors être multipliée par 4 sur le cycle de vie. Ces constatations confortent l'usage des supercondensateurs dans des applications intensives industrielles et oblige également à se questionner sur l'usage réel des produits vis-à-vis de la cyclabilité lors de la conception (un surdimensionnement de la batterie ou une réduction de la plage d'énergie disponible peut permettre un gain conséquent en durée de vie). En effet, dans le cas de l'application du vélo électrique, la durée de vie de la batterie pourrait dépasser les 50 000 kilomètres, ce qui est conséquent vis-à-vis du kilométrage global que peut atteindre un VAE au cours de sa vie.

Finalement, d'autres avantages peuvent orienter le choix vers des supercondensateurs dans l'application du vélo à assistance électrique. Les aspects écologiques ou la sécurité de fonctionnement sont des éléments majeurs pouvant être considérés. Concernant le vélo à l'architecture hybride série, un point d'amélioration essentiel est le rendement de la chaîne de conversion, ce chapitre a montré que les supercondensateurs pouvaient être déterminants en ce sens avec un gain proche de 10% par rapport aux batteries sur une absorption/restitution d'énergie. L'interface des supercondensateurs, leur intégration dans le système et la notion de rendement global sont des points abordés au chapitre suivant.

CHAPITRE 3. L'architecture hybride série : les conditions d'une efficacité suffisante

3.1 Le rendement, un verrou majeur de l'architecture hybride série	96
3.2 Les sous-éléments du vélo à architecture hybride série	96
3.2.1 Machine électrique	96
3.2.2 Mécanique	101
3.2.3 Convertisseurs et électronique de contrôle	102
3.2.4 Modèle de cycliste	103
3.2.5 Définition du rendement	104
3.3 Comment est-il possible d'estimer le rendement minimum : cadre de pensée	105
3.3.1 La programmation dynamique comme outil de réponse	106
3.3.2 Mise en équation du problème	108
3.3.3 Description des résultats	111
3.3.4 Conclusion concernant le rendement objectif minimum	115
3.4 Est-il possible d'atteindre ce rendement ?	116
3.4.1 Problématique de base	116
3.4.2 Description de la base de données utilisée pour le calcul	116
3.4.3 Modèle utilisé (VEHLIB)	117
3.4.4 Méthode d'optimisation : NSGA II	118
3.4.5 Une simulation unique pour évaluer les performances d'un prototype	121
3.4.6 Optimisation et critique des résultats	122
3.5 Conclusion de chapitre	125

3.1 Le rendement, un verrou majeur de l'architecture hybride série

L'architecture hybride série est actuellement utilisée sur plusieurs types de véhicules. Les bateaux peuvent, par exemple, profiter du fort couple mécanique des moteurs électriques et de la densité énergétique du pétrole grâce à cette technologie [133]. Certaines voitures ou trains utilisent l'architecture hybride série pour améliorer leur consommation. Intégrer une telle structure sur un vélo peut permettre des gains de confort et de fatigue (voir Chapitre I et Chapitre V), mais impose aussi une complexification du système avec l'intégration de deux machines électriques tournantes ainsi que de leur électronique associée. Ces éléments, montés en cascades, provoquent également des pertes successives d'énergie qui ont une influence sur le rendement global du système.

Maximiser le rendement est alors au cœur de l'optimisation de la structure puisqu'un rendement trop faible pourrait engendrer un véhicule difficile à piloter, et finalement moins confortable qu'espéré en amont.

Une des premières problématiques à laquelle ce chapitre apportera une réponse est le rendement minimal de la chaîne de conversion d'énergie nécessaire afin de permettre au vélo de rouler, et ce, de manière aussi rapide qu'un vélo traditionnel sur différents types de parcours.

Dans un second temps, l'analyse détaillée des sous-ensembles du système et la modélisation/simulation de composants du commerce ont permis de mettre en évidence la faisabilité et les compromis à considérer afin de rendre le véhicule viable.

3.2 Les sous-éléments du vélo à architecture hybride série

Le vélo hybride série est composé de plusieurs sous-ensembles qui seront brièvement décrits. L'objectif des paragraphes suivants est de présenter leurs enjeux respectifs ainsi que leurs composantes essentielles de modélisation pour amener à la simulation présentée au paragraphe 3.4.

3.2.1 Machine électrique

Les machines électriques sont au cœur du fonctionnement d'un vélo à architecture hybride série. En effet, l'énergie est convertie deux fois par des machines et il est important de minimiser les pertes de ces dernières afin de transmettre un maximum d'énergie au véhicule.

De plus, les machines et leur pilotage associé sont des éléments maîtrisés qui permettent de créer des lois de contrôle commande novatrices afin d'améliorer les performances du véhicule (voir Chapitre IV et Chapitre V).

Dans le but de fournir un minimum d'éléments au lecteur, quelques points concernant les machines sont présentés dans un premier temps. Cependant, comme la littérature est abondante, le lecteur pourra se référer à la bibliographie [74], [134]–[138] pour plus de renseignements.

Note : le vélo est constitué de deux machines électriques, l'une fonctionnant uniquement en générateur au niveau du pédalier et la seconde au niveau de la roue en moteur ou en générateur

(freinage régénératif) selon les cas. La machine au niveau du pédalier sera nommée générateur dans la suite du document. La machine au niveau de la roue sera généralement appelée machine mais pourra aussi être désignée par moteur dans les cas où elle fonctionne uniquement en mode moteur.

3.2.1.1 Les machines : choix de la typologie

Il existe plusieurs types d'architectures moteur. Les moteurs à courant continu (DC), les moteurs à reluctance variables, la famille des moteurs synchrones (à aimant ou rotor bobiné (induction)) ou asynchrone font partie des moteurs les plus utilisés pour la mobilité.

Le choix d'un type de moteur est complexe car dépendant de nombreux paramètres comme le coût, la densité de puissance, la fiabilité, le rendement, la simplicité de mise en œuvre [139]–[141]. Plusieurs facteurs essentiels au bon fonctionnement d'un véhicule hybride série de petite puissance sont regroupés dans le Tableau 3-1 afin d'orienter le choix vers la bonne technologie.

	Densité de puissance	Rendement	Coûts
Moteur DC	-	--	-
Moteur à induction	-	+	+
Moteur synchrone à aimants permanents	+	++	-

Tableau 3-1 : Comparatif des topologies moteurs et de leurs avantages respectifs dans le cadre du véhicule [139], [141], [142].

Le poids ainsi que la performance peuvent donc être améliorés grâce à l'utilisation de moteur synchrone à aimants permanents (ou BLDC pour « BrushLess DC »). Ce type d'architecture est piloté à l'aide d'un pont triphasé régulé et permet de simuler le fonctionnement d'un moteur DC en enlevant les collecteurs de courant et donc en augmentant la durée de vie, la densité de puissance disponible par rapport à ces derniers. Ces structures permettent aussi de réaliser facilement des moteurs « couple », c'est-à-dire des machines à faible vitesse maximale et fort couple nominal. C'est un élément essentiel pour un cycle où les vitesses de rotation sont faibles.

3.2.1.2 Le rendement : expliciter les pertes et mesures

Une machine électrique est un convertisseur d'énergie mécanique/électrique (ou inversement). Le taux de conversion de l'énergie doit être maximisé pour optimiser le système.

Les machines de type BLDC offrent l'avantage de se comporter comme des machines DC à balais classiques une fois associée à leur électronique de pilotage. En effet, l'électronique joue le rôle de commutateur électrique à la place des commutations mécaniques des balais sur le collecteur des machines DC. Ainsi, les relations fondamentales de fonctionnement d'une machine BLDC sont identiques à celles d'une machine DC. Le couple T_{mach} (Nm), la vitesse ω_m ($rad.s^{-1}$), le courant I_m (A) et la tension (force contreélectromotrice E_m, V) sont reliés par la constante idéale de la machine K_m ($\frac{Vs}{rad}$ ou $\frac{Nm}{A}$) et le rendement η_{mach} de ce dernier tels que :

$$T_{mach} = K_m \eta_{mach} I_m \quad 3.1$$

$$E_m = K_m \omega_m \quad 3.2$$

Les pertes $Pertes_{mach}$ (W) peuvent être modélisées de manière assez fiable grâce à trois constantes : la résistance de bobinage de la machine R_m (Ω), la constante de frottement sec a_m ($W s rad^{-1}$) et de frottement visqueux b_m ($W s^2 rad^{-2}$). Les constantes a_m et b_m incluent les pertes fer.

$$Pertes_{mach} = \frac{3}{2} R_m I_m^2 + a_m \omega_m + b_m \omega_m^2 \quad 3.3$$

Un certain nombre de méthodes sont disponibles afin d'identifier les paramètres des machines et sont décrites par [51], [143], [144]. Ces paramètres, une fois déterminés à partir de quelques points de fonctionnement, permettent de calculer un rendement approché quel que soit le point de fonctionnement de la machine. La Figure 3-1 et la Figure 3-2 mettent en évidence le minimum de consommation d'un véhicule électrique. Ce minimum ne se trouve pas dans à une zone à faible vitesse à cause du faible rendement de la machine (pertes excessives) sur ces points de fonctionnement. La Figure 3-2 montre également les ordres de grandeur des rendements des moteurs pour les vélos électriques disponibles sur le marché : un maximum entre 80 et 90% de rendement [144]. La Figure 3-2 illustre aussi l'importance du choix de la motorisation en fonction de l'application (les moteurs de la Figure 3-2 sont tous des moteurs de type BLDC). En effet, les points optimaux de rendements se trouvent sur des points très différents en fonction des moteurs.

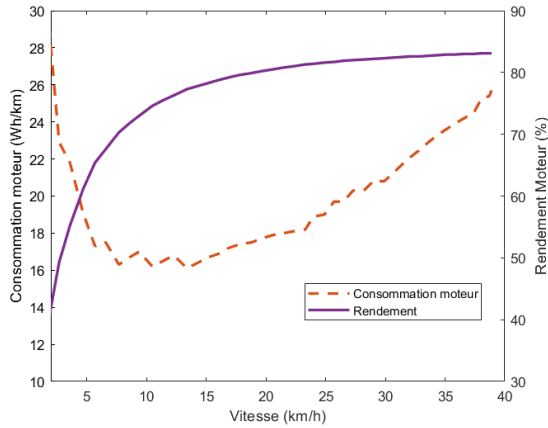


Figure 3-1 : Mise en évidence d'un minimum de consommation énergétique dans une pente à 2% avec une surconsommation due au mauvais rendement à basse vitesse et à l'augmentation des frottements de l'air à haute vitesse.

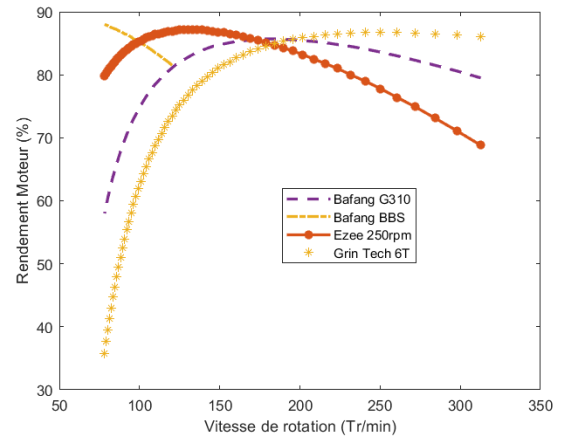


Figure 3-2 : Exemple de rendements estimés pour différentes machines du marché en fonction de la vitesse de rotation (données extraites du simulateur de machines pour vélo à partir de points de fonctionnement remarquables [56]). Grin Tech 6T : moteur roue BLDC direct drive ; Bafang G310 moteur roue réducté BLDC ; Ezee 250 moteur roue réducté BLDC ; Bafang BBS : moteur pédalier réducté BLDC.

3.2.1.3 Les moteurs pour cycle, une catégorie spécifique

Les moteurs de vélo sont généralement des machines BLDC que nous pouvons classer dans la catégorie des machines dits « couple », car ils disposent de vitesses de rotation faible (une roue de taille 700C (28 pouces) lancée à 50 km/h tourne à seulement 400 tr/min) et de couples importants (typiquement 30 à 80 Nm). Cette particularité spécifique génère des machines aux dimensionnements originaux :

- ❖ Un grand nombre de pôles magnétiques ;
- ❖ Des diamètres machines importants comparés à la puissance générée ;
- ❖ Une puissance massique faible comparée à certaines machines BLDC ($200 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ contre près de 2 à 4 $\text{kW} \cdot \text{kg}^{-1}$ sur d'autres topologies [145], [146]).

En effet, le couple nominal T_{mach}^{nom} (Nm) que doit pouvoir fournir une machine est un élément essentiel de son dimensionnement, et est proportionnel au carré du diamètre D_{mach} (m) du rotor pour les machines à flux radiaux [74], [134].

$$T_{mach}^{nom} \propto D_{mach}^2 \quad 3.4$$

De plus la législation impose une limite de 250 W nominal moyen pour les VAE standards (voir le Chapitre I, paragraphe 1.1.3). Ainsi, le point de fonctionnement d'un moteur est souvent situé loin de son point nominal de fonctionnement (voir Figure 3-3) (p. ex. un moteur standard

capable de générer 40 Nm continus et de tourner à 250 tr/min dispose d'une puissance nominale effective de $40 * 250 * \frac{2\pi}{60} \approx 1000 W$, soit bien plus que les 250 W officiels).

Pour pallier au problème de la taille et de la vitesse faible, certains moteurs utilisent une réduction épicycloïdale intégrée dans le boîtier moteur (voir Figure 3-4).

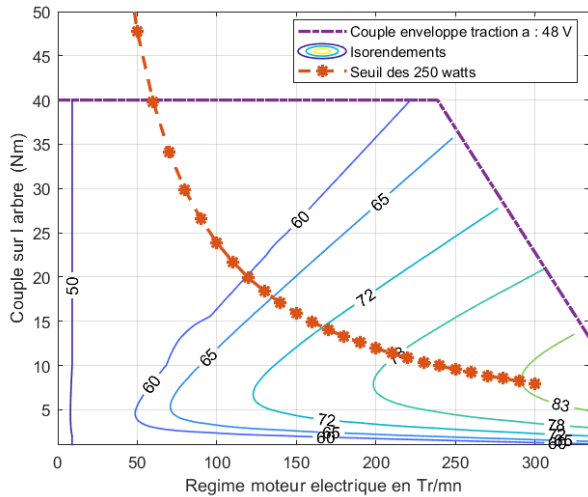


Figure 3-3 : Cartographie de rendement pour un moteur entrée de gamme avec l'illustration de la limite des 250 W.

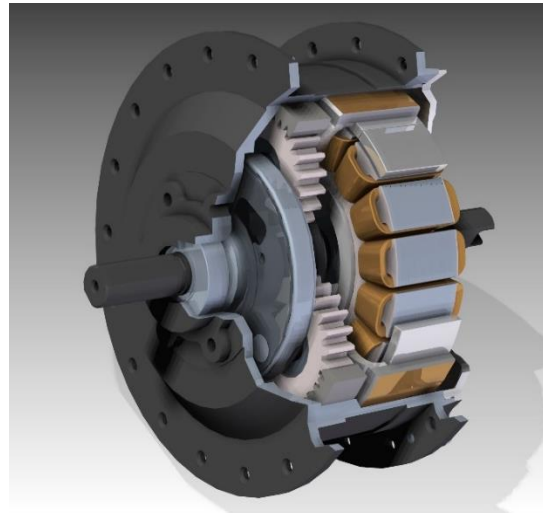


Figure 3-4 : Image de synthèse d'un moteur hub avec son train épicycloïdal [147]

3.2.1.4 Modélisation de moteurs du commerce

Afin de pouvoir réaliser des simulations du vélo hybride série avec des machines du commerce et pouvoir déterminer des optimums vis-à-vis des coûts et de la performance, des machines ont été analysés à partir des documents constructeurs. Le Tableau 3-2 récapitule les éléments majeurs pour 5 modèles :

	EC Flat 160	EC Flat 220	Design spécifique	Machine prise directe	Machine « réducté »
Couple max (Nm)	0.457	0.729	3	50	4
Rendement max(%)	85	85	93	81	86
Coût (€)	121	128	700	180	50
Machines N°	1	2	3	4	5

Tableau 3-2 : Liste des machines utilisées dans la simulation. L'usage peut être à titre de générateur ou de moteur selon l'usage.

Les connaissances sur les machines ont pu être considérablement étendues grâce au soutien de la communauté Internet EndlessSphere et les outils de modélisation en ligne de Grin technologies [144].

3.2.2 Mécanique

Ainsi, une machine seule doit être de grand diamètre afin de pouvoir fournir les couples nécessaires à la mise en mouvement du cycle. Cette contrainte rend la solution sans multiplicateur lourde et assez coûteuse en matières premières. Elle présente cependant de bonnes performances thermiques (inertie et dissipation), un bruit de fonctionnement réduit et la capacité de régénérer de l'énergie au freinage. Ces machines sont dites « direct drive » dans l'univers du cycle.

Une seconde solution consiste à utiliser des machines plus compactes, de puissance équivalente, mais de couple nominal plus faible (et donc de vitesse nominale plus importante) et d'associer cette machine à un réducteur, épicycloïdal, afin de réduire la vitesse et d'augmenter le couple de sortie. Ces machines sont dites « réduites » ou « hub » (solution illustrée sur la Figure 3-4).

Les machines « réduites » peuvent être optimisées grâce à un choix judicieux de réduction. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer le ratio mécanique optimal afin de faire fonctionner la machine sur une zone de rendement privilégiée.

Estimer le rendement d'une chaîne de transmission mécanique est un exercice complexe dépendant de multiples variables [148].

Dans le cas d'une hybridation série, le système complet est potentiellement composé de deux multiplicateurs mécaniques. L'un d'entre eux est en charge d'augmenter la vitesse de pédalage en série avec le générateur tandis que le second amplifie potentiellement le couple machine (couple d'entrée/sortie T_{in}, T_{out}). Afin de réaliser le rapport mécanique désiré, chaque multiplicateur peut être composé de plusieurs étages admettant systématiquement un rapport maximal arbitrairement fixé à 3 pour cet exercice ($k_{etage} \leq 3$). Le nombre d'étage Nb_{etage} influence donc le rapport mécanique de la boîte à vitesses k_{bv} , mais également le rendement (rendement d'un étage η_{etage} , rendement global η_{bv}) ou bien encore les coûts d'achat de la transmission Ct_{bv} .

Le rendement mécanique d'un étage est considéré constant et indépendant de la vitesse ou de la charge. La qualité de réalisation des engrenages n'a pas non plus été intégrée dans les équations ci-dessous [148], [149] :

$$\eta_{etage} = 0.97 \quad 3.5$$

$$T_{out} = k_{bv} T_{in} \eta_{bv} \quad 3.6$$

$$\eta_{bv} = \eta_{etage}^{Nb_{etage}} \quad 3.7$$

$$Nb_{etage} = \text{ceil} \frac{\log k_{bv}}{\log(k_{etage})} \quad 3.8$$

ceil étant la fonction désignant l'arrondi entier supérieur.

L'estimation du coût des réducteurs mécaniques Ct_{bv} a été considérée, de manière simple, en identifiant un coût proportionnel (coefficient β_{bv} , ici fixé à 50 €/étage) au nombre d'étages de la réduction.

$$Ct_{bv} = \beta_{bv} Nb_{etage} \quad 3.9$$

3.2.3 Convertisseurs et électronique de contrôle

Un vélo à architecture hybride série comporte deux convertisseurs AC/DC pour le pilotage des machines (pilotages vectoriels) ainsi qu'un éventuel convertisseur DC/DC entre les supercondensateurs et le bus (voir Figure 3-5). Le bus continu définit ici le potentiel commun aux éléments producteurs et consommateurs d'énergie de l'architecture [150]–[153].

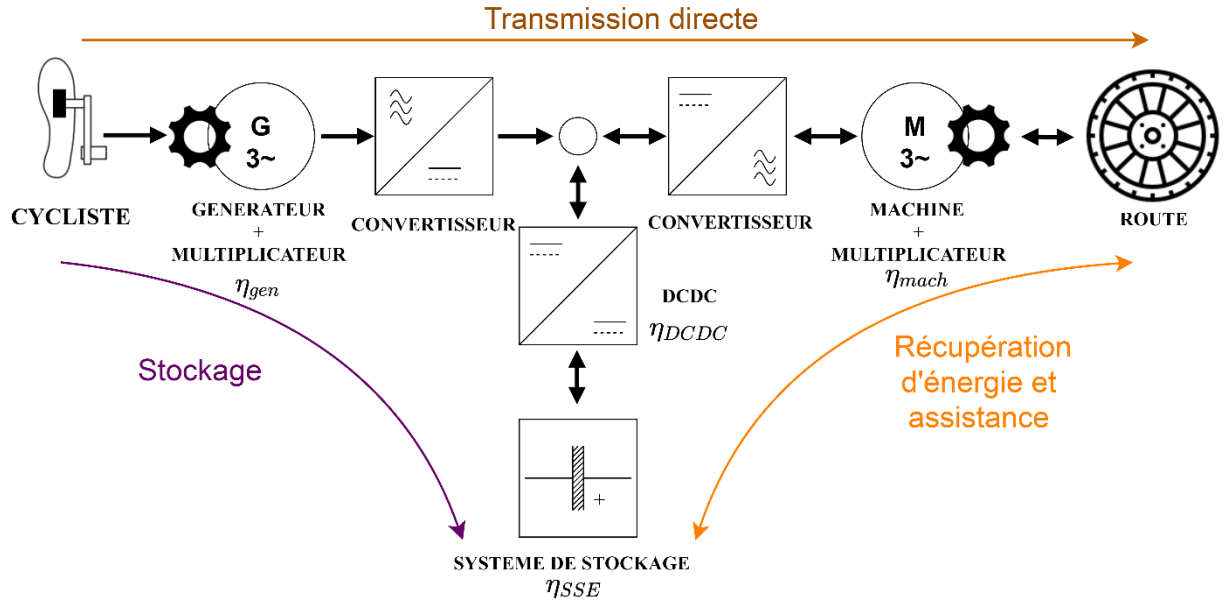


Figure 3-5 : Synoptique du vélo hybride série et de ses différents sous-ensembles.

La tension des supercondensateurs varie fortement avec l'état de charge et la tension peut descendre à 0 V sur ces composants (En pratique limité à γV_{max}^{SC} , voir le chapitre II). Ainsi, il est nécessaire d'avoir le convertisseur DC/DC entre les supercondensateurs et le bus qui garantit une transmission de l'énergie sans interruption du générateur à la machine même s'il n'y a plus d'énergie dans le système de stockageⁱ. La stratégie de pilotage de ce convertisseur DC/DC est de maintenir sur le bus une tension de consigne stable U_{csg} (V).

Le bus est un lien électrique entre l'ensemble des éléments du système pouvant être soit générateurs, soit consommateurs, d'énergie :

- ❖ Générateurs d'énergie : génératrice, supercondensateurs lors de la décharge, machine si freinage régénératif ;
- ❖ Consommateurs d'énergie : machine lors du fonctionnement en moteur, supercondensateurs lors de la charge.

Un bilan des puissances peut être effectué au niveau du bus et ainsi, grâce à la loi des nœuds :

$$\sum P = 0 \leftrightarrow \sum I = 0 \quad 3.10$$

Si cette somme est différente de 0 et égale i (A), ce qui pourrait par exemple être lié à un changement d'état de la machine électrique (passage de moteur à générateur) alors le bus intègre

la différence grâce au faible stockage d'énergie situé à ses bornes (condensateurs des convertisseurs de capacité C_{bus}). Il s'opère alors une variation de tension du bus U_{bus} (V) dépendante du courant de différence i (A) tel que :

$$U_{bus} t = U_{csg} + \frac{1}{C_{bus}} \int i. dt \quad 3.11$$

Limiter les variations de tension de U_{bus} est capital. Cela permet de garantir un fonctionnement stable des algorithmes de contrôle du générateur (voir le paragraphe 5.3 du Chapitre V pour plus de détails concernant ces algorithmes), de maintenir les performances de la machine (une tension trop basse pourrait entraîner une perte de couple disponible, empêcher le moteur d'accélérer et réduire la zone pilotable de la machine) et encore de protéger le système (une tension trop élevée pourrait endommager le système) [150].

En maintenant une tension U_{bus} stable, le convertisseur DC/DC permet également :

- ❖ de recharger les supercondensateurs dans le cas où le bilan de puissance est positif et donc que la tension du système (bus) a tendance à augmenter ;
- ❖ de décharger les supercondensateurs dans le cas inverse.

Les convertisseurs utilisés ont des rendements mesurés supérieurs à 97%. La perte d'énergie associée est prise en compte dans le modèle présenté au paragraphe 3.4.3. De plus, l'électronique de supervision du système peut consommer jusqu'à 5 W au total (majoration des mesures effectuées sur les prototypes présentés dans l'Annexe B). Cette puissance sera également prise en compte dans les calculs d'efficacité (puissance auxiliaire P_{aux} , W).

Pour plus de détails concernant la réalisation et les essais du convertisseur DC/DC, le lecteur peut se référer à l'Annexe D du présent document.

Dans cette étude, le coût du convertisseur a été considéré comme fixe et de valeur égale à $Ct_{DCDC} = 100\text{€}$.

Si le convertisseur DC/DC est retiré du système, c'est-à-dire que les supercondensateurs sont branchés en direct sur le bus continu, la tension du bus U_{bus} est imposée par l'état de charge de ceux-ci. La vitesse maximum de rotation du moteur est alors liée à l'état de charge car dépendante de la tension d'alimentation (voir l'équation 3.2). L'avantage d'un tel montage réside dans la simplicité et la réduction des coûts. Le paragraphe 3.4 évalue numériquement l'avantage de la présence du convertisseur DC/DC.

3.2.4 Modèle de cycliste

Un cycliste peut délivrer un effort variable en fonction de son poids, de son sexe, du niveau de stress de l'effort. Notamment, une personne de niveau modéré est généralement capable de fournir aux alentours de 2.2 W/kg pendant une heure avant épuisement [55]. Ainsi, une personne de 70 kg peut fournir environ 150 W continus. Il est également estimé que la puissance soutenable sans fatigue s'établit aux alentours de 70% de cette valeur de puissance, soit environ 100 W (voir Chapitre V, paragraphe 5.2.2.2 pour plus de détails).

L'utilisateur considéré ici est donc une personne de 70 kg pédalant de manière modérée à la puissance P_H (W) de 100 W, ce qui ne provoque pas de fatigue excessive pour un cycliste non entraîné moyen.

La puissance est définie comme le produit du couple et de la vitesse angulaire de pédalage. Il a été montré qu'un cycliste moyen disposait d'une capacité à fournir un couple T_H (Nm) de l'ordre de $60 Nm$ au maximum [154]. Il a aussi été montré que la cadence de pédalage ω_H ($rad. s^{-1}$) correspond à une vitesse de rotation aux alentours de 80 tr/min de manière naturelle. Une loi de modélisation a donc été proposée afin de modéliser l'effort du cycliste respectant trois conditions :

- ❖ Couple maximal de $60 Nm$;
- ❖ Cadence optimale de 80 tr/min, au-delà la puissance du cycliste peut diminuer (voir Chapitre V) ;
- ❖ Puissance maximale de $100 W$.

La Figure 3-6 illustre une loi couple/cadence pouvant modéliser un cycliste.

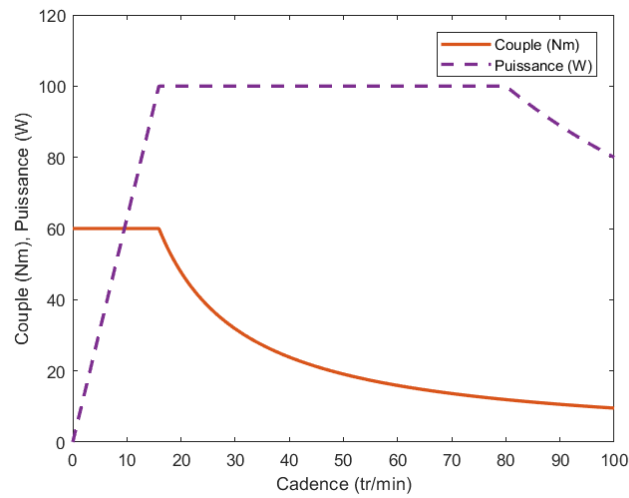


Figure 3-6 : Illustration de la relation puissance couple pour un cycliste moyen.

Le calcul du couple instantané à la roue est lié à la taille de la roue R_{roue} (m) ainsi qu'à la vitesse du vélo. Pour un vélo standard à chaîne (VSC), la transmission de puissance P_H (W) est pondérée par son rendement η_{VSC} grâce à l'équation :

$$T_{mach} = \frac{P_H \eta_{VSC} R_{roue}}{v} \quad 3.12$$

3.2.5 Définition du rendement

Le rendement de l'ensemble de la chaîne de conversion est un point clé de la structure. Dans ce manuscrit, le rendement énergétique η_{VHS}^e est défini comme le rapport de l'énergie mécanique restituée à la roue E_{roue} (J) par rapport à l'énergie produite par le cycliste E_H (J) sur n'importe quel trajet donné. Le rendement énergétique, à la différence du rendement instantané η_{VHS} , permet donc d'avoir une idée de la performance générale de l'utilisateur du vélo hybride série (VHS) :

$$\eta_{VHS}^e = \frac{E_{roue}}{E_H} \quad 3.13$$

Le rendement instantané dépend du chemin d'énergie emprunté. En effet, dans le cas d'une transmission d'énergie directe (voir Figure 3-5 : transmission directe), l'énergie ne passe pas par le système de stockage. En négligeant les convertisseurs et en considérant le rendement de la machine et de sa mécanique associée η_{mach} et celle du générateur et de sa mécanique associée η_{gen} , le rendement du VHS est :

$$\eta_{VHS}^{direct} = \eta_{gen}\eta_{mach} \quad 3.14$$

Dans le cas d'un stockage de l'énergie humaine dans les supercondensateurs (voir Figure 3-5 : stockage), on intègre le rendement du convertisseur η_{DCDC} ainsi que du stockage η_{SSE} au calcul et le rendement de transmission devient :

$$\eta_{VHS}^{stockage} = \eta_{gen}\eta_{DCDC}\eta_{SSE} \quad 3.15$$

Finalement, lors du freinage régénératif (voir Figure 3-5 : Récupération d'énergie et assistance) :

$$\eta_{VHS}^{assistance} = \eta_{mach}\eta_{DCDC}\eta_{SSE} \quad 3.16$$

Le rendement réel énergétique η_{VHS}^e est tributaire des rendements de nombreux éléments intermédiaires et est ainsi une combinaison Γ des équations 3.13, 3.14 et 3.15 en fonction du profil d'utilisation :

$$\eta_{VHS}^e = \Gamma(\eta_{VHS}^{direct}, \eta_{VHS}^{stockage}, \eta_{VHS}^{assistance}) \quad 3.17$$

Le calcul du rendement énergétique (voir équation 3.18) peut être résolu assez simplement via l'intégration de la puissance de la machine, en considérant un cycliste pédalant à puissance fixe et en prenant en compte les écarts d'énergie dans le système de stockage tel que :

$$\eta_{VHS}^e = \frac{\int P_{mach} dt - (SOE_{ini} - SOE_{fin})E_{pack}}{P_H \cdot t_{fin}} \quad 3.18$$

Avec SOE_{ini} , l'état de charge initial du pack de supercondensateurs, SOE_{fin} son état de charge final, E_{pack} l'énergie utile stockée dans le pack et t_{fin} le temps effectif du trajet.

3.3 Comment est-il possible d'estimer le rendement minimum : cadre de pensée

Le chapitre introductif (Chapitre I) a permis d'exposer le rendement de transmission mécanique d'un vélo à chaîne : une transmission de 85 à 95% de l'énergie mécanique à la roue (voir le paragraphe 1.6.3). Les développements exposés dans ce document soulignent la criticité du rendement de la chaîne de traction pour une architecture hybride série. Une démarche a été mise

en place afin d'identifier le rendement minimal à garantir sur la chaîne de traction du vélo hybride série afin que le vélo puisse égaler les performances d'un vélo standard.

Pour analyser les performances du vélo hybride série, la vitesse de déplacement du véhicule a été comparée, en fonction de son rendement, considéré fixe et connu, au temps effectué par un vélo à chaîne sur le même parcours. Toutes les simulations ont considéré un seul et même utilisateur (présenté au paragraphe 3.2.4).

Comparer les vitesses permet, à énergie utilisateur équivalente, de comparer les rendements énergétiques et par conséquent d'évaluer les performances globales du système. L'objectif du VHS dans cette étude n'est pas forcément d'aller plus vite qu'un vélo traditionnel, mais bien de minimiser l'effort et la fatigue du cycliste, le critère temporel est cohérent, car c'est une mesure physique commune aux deux architectures et facilement interprétable.

La dynamique d'un vélo standard a été décrite au Chapitre I et est directement reliée à l'effort fourni par le cycliste. Or, ce n'est pas le cas du vélo hybride série qui découple le mouvement d'effort du cycliste de celui fourni à la roue. Ainsi, le pilotage n'est pas directement relié à la force produite par le cycliste. Ce degré de liberté joue sur l'état de charge du système de stockage qui compense les différences entre l'énergie produite et l'énergie fournie. Se déplacer sur un parcours en minimisant le temps de trajet et en respectant les contraintes liées au cycle (notamment vis-à-vis de l'état de charge) doit alors être lié à la recherche de la commande optimale permettant de minimiser ce temps de parcours.

3.3.1 La programmation dynamique comme outil de réponse

La programmation dynamique (PD) est un outil mathématique, basé sur le principe de Bellman, permettant d'identifier des solutions optimales à un problème en analysant l'optimalité de sous problèmes [22], [23].

Ce théorème de minimisation mathématique permet de réduire de manière importante le temps de calcul et d'identification d'une solution optimale comparé au temps nécessaire en utilisant des solutions d'évaluations exhaustives (par exemple).

La méthode de résolution implique généralement deux phases : la phase ascendante, qui est la plus énergivore en temps, consiste à déterminer l'optimalité de la solution en remontant dans l'arbre des étapes de calcul et en déterminant les solutions optimales de proche en proche pour chaque état. La Figure 3-7 illustre la procédure mathématique de la programmation dynamique et présente une matrice d'état à chaque pas de calcul. L'objectif est alors de minimiser le temps de parcours entre chaque pas de calcul (pour un système à deux états i, j : $t_{i,j}^1$ en secondes). La phase descendante consiste à reparcourir l'arbre des solutions obtenues par le chemin le plus efficace. Le lecteur pourra, pour plus de renseignements, lire les références [155]–[157].

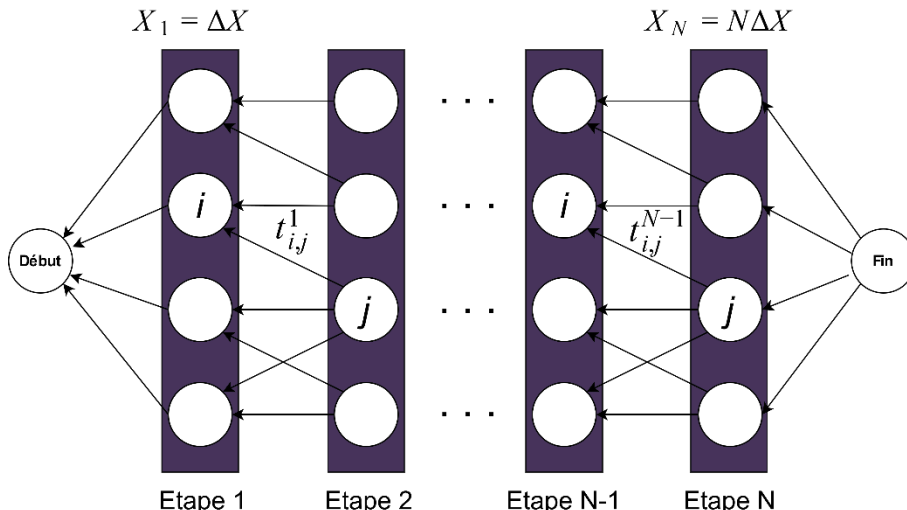


Figure 3-7 : Schématisation de la phase descendante de calcul de la programmation dynamique.

Dans le cas du vélo hybride série, l'objectif est de minimiser le temps de trajet t_{fin} (s) sur le parcours afin de pouvoir le comparer à celui du vélo standard. Minimiser le temps de parcours revient également à minimiser l'énergie dépensée par le cycliste sur le trajet puisque :

$$E_H = P_H t_{fin} \tag{3.19}$$

Le problème prend donc la forme d'une minimisation du temps tel qu'à chaque nouvelle étape de calcul k , la fonction coût J_k est minimisée :

$$J_k = \min \{t_k + J_{k+1}\} \tag{3.20}$$

L'état du vélo est modélisé par deux variables d'états, discrétisées : la vitesse v_k ($m \cdot s^{-1}$) et l'état d'énergie SOE_k . La variable de commande, responsable des variations d'état est le couple de la machine T_{mach} (Nm).

La programmation dynamique explore un ensemble fini de solutions, et donc d'états possibles. Les variables d'état et de contrôle sont discrétisées sur un nombre N fini de valeurs. Plus le nombre de valeurs est important, plus la précision de l'algorithme augmente au détriment de la rapidité d'exécution. En effet, le temps d'exécution est une fonction de N^2 pour cette application [155]. Ainsi un compromis entre la précision et le temps d'exécution doit être déterminé.

Finalement, la programmation dynamique est un outil puissant, qui permet de contraindre les solutions au problème. Ainsi, l'état de charge du SSE devra toujours être compris entre 0 et 100%. L'état de charge initial et final seront eux aussi fixés à l'avance et initialisés à 50% [158]. Cette contrainte impose au VHS de maintenir un niveau d'état de charge du système équivalent en début et fin de parcours et ainsi de garantir l'autonomie énergétique du vélo (sans apport extérieur).

3.3.2 Mise en équation du problème

3.3.2.1 Mise en équation

La programmation dynamique est classiquement utilisée pour optimiser la consommation des moteurs thermiques sur des cycles standards (de type NEDC ou autres) [159], [160].

Ces optimisations sont généralement menées sur un profil en temps. En effet, les cycles sont classiquement constitués d'un profil de vitesse temporelle (qui définit donc les accélérations, les pauses, ...) et ne permettent donc pas d'être plus rapide sur le parcours puisque l'objectif est de tester un véhicule à des vitesses préétablies.

Afin de poser un problème pertinent au sens de la programmation dynamique et répondre à la problématique de maximisation de la vitesse, une discrétisation du parcours en distance a été envisagée à la place de la discrétisation temporelle [132]. Chaque nouvelle étape de calcul (k) actualise la valeur du nouvel état s associé à la commande de la machine (le couple T_{mach}) tel que $s_k = \{v_k, SOE_k\}$, puisque le vélo comporte deux variables d'état.

Grâce à la discrétisation en distance, le temps devient une variable de sortie du calcul qu'il convient de minimiser (c'est-à-dire de maximiser la vitesse). Le comparatif avec un vélo standard induit un état de charge final identique à celui du départ garantissant le non-apport d'énergie extérieure autre que celle du cycliste (c'est l'équilibre énergétique voir le Chapitre IV paragraphe 4.1.1).

Les équations présentées au Chapitre I, paragraphe 1.6.1 (fonction des coefficients C_r , SC_X , de la masse M_v et de la pente α) ont été reprises et ont permis d'identifier les relations suivantes pour le calcul de la vitesse v_k ($m \cdot s^{-1}$) en fonction du pas de discrétisation du parcours ΔX (m).

$$v_{k+1} = \sigma \sqrt{v_k^2 + \frac{2\Delta X}{M_v} H(T_{mach}) - G(SC_X, C_r, \alpha)} \quad 3.21$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{2M_v} \rho SC_X \Delta X\right)^{-\frac{1}{2}} \quad 3.22$$

$$H(T_{mach}) = \frac{T_{mach}}{R_{roue}} \quad 3.23$$

$$G(SC_X, C_r, \alpha) = M_v g (C_r + \sin(\alpha)) + \frac{1}{4} \rho SC_X V_k^2 \quad 3.24$$

avec g ($m \cdot s^{-2}$) l'accélération de la pesanteur, ρ ($kg \cdot m^{-3}$) la densité de l'air et R_{roue} (m) le rayon de la roue.

Ces étapes de calculs sont utilisées pour calculer les variations de vitesse issues de la consigne de couple sur la machine T_{mach} .

Le calcul du temps écoulé à chaque pas de calcul Δt est lui identifié à posteriori grâce à la formule suivante :

$$\Delta t = \frac{2\Delta X}{v_{k+1} + v_k} \quad 3.25$$

Le temps final t_{fin} est enfin calculé par la somme des écarts de temps discret sur le parcours fini.

Le SOE du système de stockage est un état du système représentant le pourcentage d'énergie restant dans le pack d'énergie totale E_{pack} . Les variations d'énergie (puissance du pack P_{SSE} (W)) dans le système sont liées à l'énergie produite par le cycliste ($P_H \Delta t$) sur un intervalle (Δt) ainsi que l'énergie mécanique consommée par la machine de propulsion ($\frac{T_{mach} \Delta X}{R_{roue}}$) associée au rendement global simplifié du vélo η_{VHS} .

$$SOE_k = \frac{E_{pack}^k(t)}{E_{pack}} = SOE_{ini} - \frac{1}{E_{pack}} \int P_{SSE} dt \quad 3.26$$

$$SOE_{k+1} = \frac{1}{E_{pack}} \left(P_H \Delta t - \frac{T_{mach}}{R_{roue} \eta_{VHS}} \Delta X \right) + SOE_k \quad 3.27$$

Le rendement du vélo hybride série est complexe et dépend de nombreux paramètres. Devant la complexité de calcul du rendement et les ressources importantes nécessaires pour résoudre un problème grâce à la programmation dynamique, le rendement est ici considéré comme une valeur fixe (comprise entre 0 et 1), image du rendement énergétique moyen du véhicule. Une formulation différente de l'équation 3.27 est proposé en Annexe H.

3.3.2.2 *Parcours*

Comparer le temps de parcours d'un vélo à chaîne avec celui d'un vélo hybride série nécessite de définir un trajet type représentatif. Ce travail a déjà été exposé au Chapitre I de ce manuscrit. Un parcours urbain alternant des phases de roulage et d'arrêt est proposé avec un arrêt de 12 secondes tous les 250 m (voir Figure 3-9).

Ce profil a pour objectif d'évaluer les déplacements urbains dont il est statistiquement représentatif. Cependant, d'autres types de sollicitations existent d'un point de vue énergétique et seront aussi analysés dans ce chapitre ainsi qu'au Chapitre IV :

- ❖ Le plat sans arrêt, trajet avec un minimum de variations d'énergie potentielle ni cinétique. Ce trajet présente peu d'intérêt pour l'architecture hybride série puisque c'est sur les variations d'énergie que le VHS propose un gain. Cette affirmation sera validée au paragraphe 3.3.3.2.
- ❖ Un parcours vallonné avec au moins une montée et une descente pour illustrer les cas typiques avec des variations d'énergie potentielle (voir Figure 3-8). Ce chapitre propose un parcours vallonné de 5 km intégrant une difficulté de 50 m de dénivelle ($E_p = 13.6 Wh$). Le choix d'intégrer 50 m de dénivelle est cohérent avec l'énergie que pourrait embarquer un vélo à supercondensateurs (voir Chapitre II) ainsi qu'à la constatation arbitraire des dénivelés urbains (altitudes maximale et minimale des villes françaises qui se situe globalement aussi autour de cet ordre de grandeur).

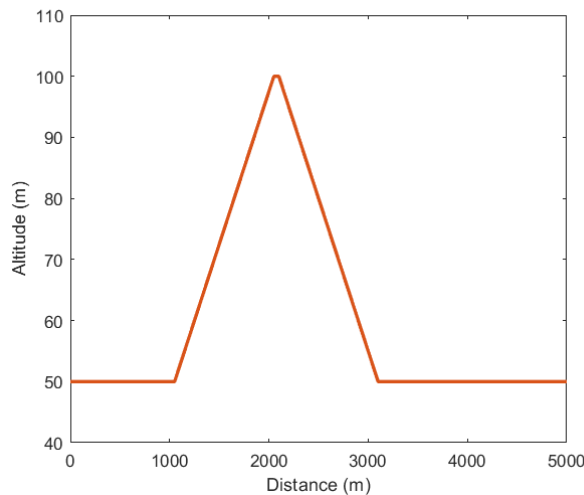


Figure 3-8 : profil du parcours vallonné : une coline de 50 m de dénivelé positif à 5%.

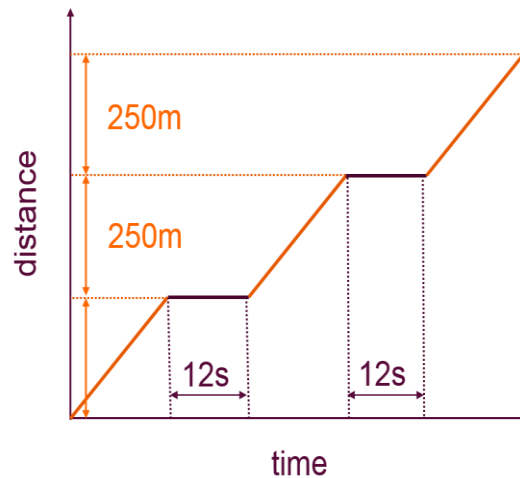


Figure 3-9 : Profil du parcours urbain : pas de profil altimétrique (le parcours est plat), un arrêt de 12 s imposé tous les 250 m.

3.3.2.3 Méthode

La méthode implémentée pour comparer un vélo standard et un vélo hybride série a consisté à évaluer leurs temps de trajet sur un parcours donné. Celui-ci dépend de nombreux paramètres structurels du vélo. Les frottements, le poids ainsi que des paramètres humains, telle que la puissance produite par l'utilisateur ont une influence majeure sur le temps de parcours. Ainsi, les deux vélos et les deux cyclistes sont modélisés de manière strictement identique (même coefficient de roulement, même performance du cycliste) de façon à garantir des temps de parcours identiques à conditions identiques, autrement dit comparables.

Les seuls paramètres qui diffèrent sont les suivants :

- ❖ Le rendement de la chaîne de transmission du vélo hybride série (η_{VHS}) qui est l'objet du problème ;
- ❖ Le rendement de la chaîne de transmission du VSC, compris entre 0.85 et 0.95 ;
- ❖ Le mode de freinage du VSC, en effet, la modélisation du comportement d'un cycliste devant freiner est complexe. Deux modes de freinage (MF) principaux sont retenus : pas de freinage dissipatif (le vélo est en roue libre jusqu'à l'arrêt) ou alors, la puissance de freinage est considérée infinie, idéale (le vélo s'arrête instantanément). Le comportement réel du cycle, avec un comportement utilisateur quel qu'il soit, est alors forcément compris entre ces deux modes.

La Figure 3-10 présente le déroulement algorithmique de la simulation comparée pour les deux vélos. La figure souligne également les variations possibles des paramètres. Le parcours est simulé autant de fois qu'il y a des combinaisons de paramètres. Huit valeurs de rendement du VHS ($\eta_{VHS} = 0.2 ; 0.3 \dots 0.9 ; 1$) sont testées ainsi que deux rendements du VSC, chacun associé à

un mode de freinage (le rendement le plus faible avec le mode de freinage le plus lent et inversement).

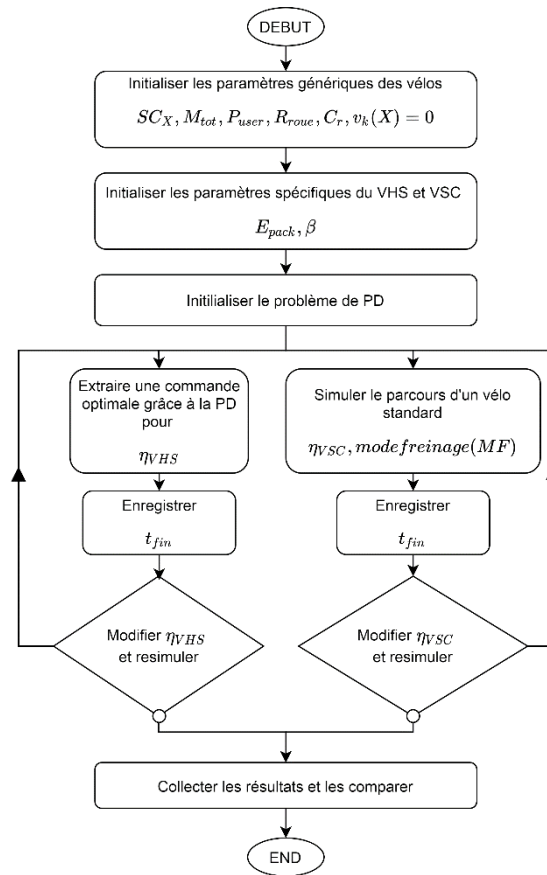


Figure 3-10 : Organigramme schématique du séquençage du programme de calcul des temps de parcours optimaux d'un vélo hybride série fonction de son rendement et d'un vélo traditionnel avec PD : programmation dynamique et β : le ratio de transmission mécanique du VSC.

3.3.3 Description des résultats

3.3.3.1 La programmation dynamique : solutions optimales

La programmation dynamique permet d'optimiser la commande de la machine T_{mach} (Nm) afin d'effectuer le trajet de la manière la plus rapide qu'il soit. Ainsi, le VHS dispose d'un avantage vis-à-vis du vélo standard : la récupération d'énergie. Cette dernière permet de récupérer de l'énergie au freinage et de pouvoir la réutiliser tout de suite après lors du démarrage (voir le Chapitre I, paragraphe 1.6.2 pour une description détaillée du phénomène).

De plus, le vélo hybride série peut bénéficier d'un usage spécifique lié à l'absence de chaîne. Les utilisateurs peuvent pédaler à l'arrêt. En effet, si la structure dispose de trois roues et est stable, rien n'empêche l'utilisateur de pédaler à l'arrêt ce qui offre au VHS un second avantage structurel permettant éventuellement de compenser ses pertes.

Le vélo simulé a été configuré avec les paramètres présentés dans le Tableau 3-3 :

Valeurs numériques	
SC_x	0.5 m^2
C_r	0.01
M_v	100 kg
E_{pack}	8 – 20 Wh
P_{aux}	5 W

Tableau 3-3 : Paramètres de simulation du vélo hybride série et à chaîne permettant de modéliser les cycles et leur dynamique.

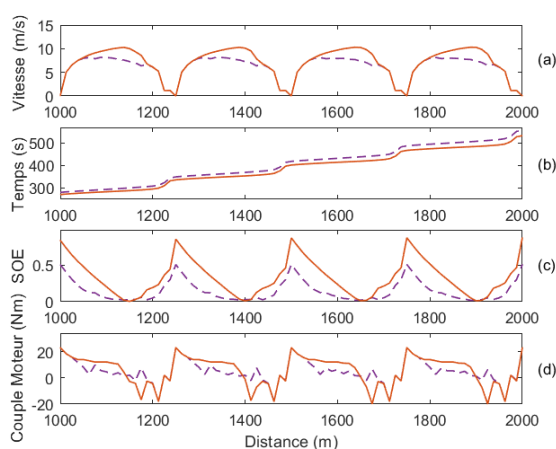


Figure 3-11 : Profil de commande synthétisé par la programmation dynamique (couple machine) et les signaux associés (vitesse du vélo, variation du SOE, temps de parcours) pour un vélo hybride série ($E_{pack} = 8 \text{ Wh}$) avec possibilité de pédaler à l'arrêt (traits continus) ou sans (traits pointillés) pour un trajet en ville avec des arrêts de type « Devie » (voir Chapitre I).

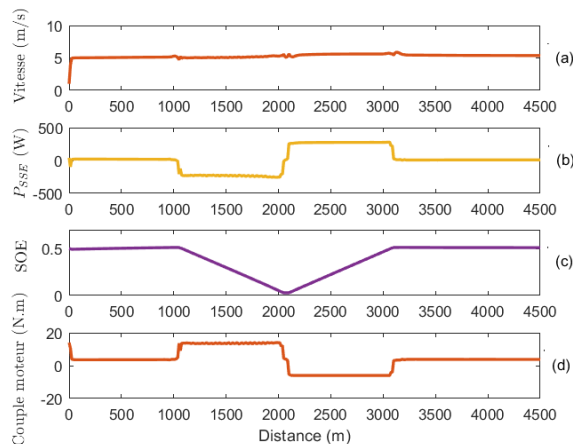


Figure 3-12 : Profil de commande synthétisé par la programmation dynamique (couple machine) et les signaux associés (vitesse du vélo, variation du SOE, puissance délivrée par le système de stockage) pour un vélo hybride série franchissant un dénivelé de 50 m.

La Figure 3-11 et la Figure 3-12 montrent des exemples de résultats de la programmation dynamique. Sur la Figure 3-11 les points d'arrêt imposés sont respectés par l'algorithme puisque la vitesse est nulle tous les 250 m (voir Figure 3-11.(a)). Il est d'ailleurs possible d'observer un saut temporel de 12 secondes lors des arrêts comme prévu par le cycle standard (voir Figure 3-11.(b)). Il est également possible d'observer une vitesse supérieure sur le vélo hybride série avec pédalage à l'arrêt (voir Figure 3-11.(a)), ce qui est normal en considérant le surplus d'énergie produit pendant les pauses. Les variations du couple machine et de SOE du système de stockage sont à l'image de la dynamique du vélo : couple positif et diminution du SOE lors d'une accélération et couple négatif ainsi qu'augmentation du SOE lors de la décélération (voir Figure 3-11.(d)).

La Figure 3-12 met en évidence la solution trouvée par la programmation dynamique concernant le trajet vallonné. La première constatation est le maintien d'une vitesse stable en montée

comme en descente. En effet, le vélo décharge le SSE en montée et profite de la descente pour le recharger. Le SSE compense les variations de puissance de la machine nécessaire pour maintenir la vitesse constante. Ce comportement spécifique optimal sera abordé plus en détail au Chapitre IV, paragraphe 4.2. Chaque parcours est finalement établi en un temps donné t_{fin} qui est enregistré.

3.3.3.2 Résultats : Temps de parcours estimés par la programmation dynamique pour différents trajets.

Finalement, l'extraction automatique des résultats pour différentes valeurs de rendements permet de constituer des courbes comparatives du temps de parcours entre les deux vélos (voir Figure 3-13 et Figure 3-14).

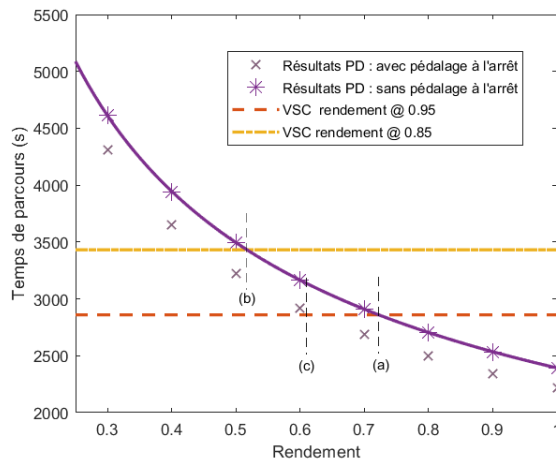


Figure 3-13 : Comparatif des temps de parcours sur un profil urbain pour un vélo hybride série avec ou sans pédalage à l'arrêt ainsi qu'un vélo classique à chaîne avec différents modes de freinage.

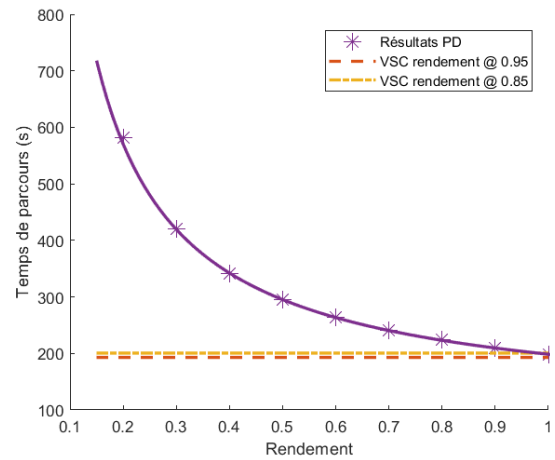


Figure 3-14 : Comparatif des temps de parcours sur un profil plat et sans pauses pour un vélo hybride série à l'arrêt ainsi qu'un vélo classique à chaîne avec différents modes de freinage.

Les résultats numériques sont riches en informations. En effet, les résultats démontrent la capacité du vélo hybride série à mieux performer qu'un vélo à chaîne dès lors que le parcours comporte suffisamment d'aléas et que le rendement de la chaîne électrique est suffisant. La base de ce raisonnement est liée aux résultats sur le plat (voir Figure 3-14).

Le cas du plat montre bien que le vélo hybride série ne peut pas surpasser le VSC puisqu'il n'est jamais plus rapide. Il ne peut que l'égaliser dans le cas idéal d'un rendement de 100%, les temps de parcours sont alors identiques, car, même à 100% de rendement, 5 W sont consommés par l'électronique de contrôle. Le résultat était attendu et renforce l'idée que l'avantage à chercher sur un vélo de type hybride série ne réside pas dans la vitesse, ni dans les parcours plats.

Le cycle «Devie», urbain, contient de nombreux arrêts. Il est donc assez discontinu et profitable au VHS. Les résultats (présentés sur la Figure 3-13) montrent clairement la plage de rendement à atteindre afin de pouvoir égaliser la vitesse du VSC :

- ❖ Dans le cas d'un vélo hybride série où l'on ne pédale pas à l'arrêt : le rendement énergétique doit atteindre au minimum 52% (voir cas (b) Figure 3-13) pour égaliser un VSC sans frein et 72% pour égaliser un VSC avec des freins idéaux (voir cas (a) Figure 3-13).

- ❖ Dans le cas d'un vélo hybride série où l'on peut pédaler à l'arrêt : le rendement énergétique doit dépasser 61% afin d'égaliser la vitesse de n'importe quel VSC (voir cas (c) Figure 3-13).

Le rendement énergétique idéal semble alors être supérieur à 60%. En effet, en considérant que les avantages du vélo hybride série (pédalage à l'arrêt, freinage régénératif) sont exploités au maximum, c'est l'ordre de grandeur minimum à atteindre [158].

Il est important de noter que la quantité d'énergie fournie par le cycliste n'est pas strictement équivalente entre les différents cas. En effet, lorsque le cycliste ne freine pas ou bien encore quand il pédale à l'arrêt, une quantité d'énergie inférieure ou supérieure aux cas standards est produite. Au-delà de la régénération, c'est aussi cette différence d'énergie qui permet de faire la différence ici et de compenser les pertes supplémentaires du système hybride.

3.3.3.3 Résultats concernant un parcours avec du dénivelé

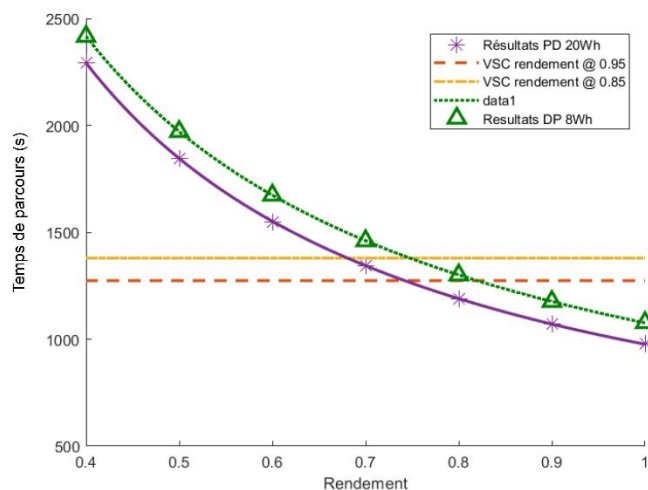


Figure 3-15 : Comparatif des temps de parcours sur un profil vallonné pour un vélo hybride série ainsi qu'un vélo classique à chaîne avec différents rendements pour un SSE de 8 Wh et de 20 Wh.

La Figure 3-12 montre les résultats obtenus pour une simulation unique sur le parcours vallonné avec 50 mètres de dénivelé positif ($E_p = 13.6 Wh$). Comme exposé au paragraphe 3.3.3.1, la stratégie de commande de la machine est de maintenir une vitesse constante si la quantité d'énergie disponible dans le pack de supercondensateurs le permet. La Figure 3-15 montre deux résultats concernant deux vélos identiques avec des packs de capacité différentes (respectivement 8 et 20 Wh). La configuration comprenant 20 Wh permet donc plus facilement de maintenir la vitesse constante, car elle permet de compenser l'énergie potentielle. Le rendement d'équilibre vis-à-vis du vélo traditionnel performant à 95% de rendement (respectivement 85% de rendement) permettant de rouler à la même vitesse entre un VHS et un VSC se déplace alors de 82% (respectivement 75%) (pour le pack à 8 Wh) à 74% (respectivement 68%) (pour le pack à 20 Wh) soulignant ainsi l'importance du système de stockage pour le rendement global de la structure. Ainsi, un meilleur rendement global permet de diminuer la quantité d'énergie embarquée. Ou, à l'inverse, une plus grande quantité d'énergie embarquée autorise à réduire le rendement global du système. Le rendement minimum est donc de 70% pour ce type de situation.

3.3.3.4 Le rendement des sous-ensembles

Le rendement du vélo hybride série est une notion complexe, car celui-ci varie selon le mode de transmission de l'énergie ou bien encore du profil de sollicitation de la machine (voir le paragraphe 3.2).

Les résultats issus de la programmation dynamique considèrent un seul rendement global, image du rendement énergétique.

Quelques hypothèses ont été émises afin de pouvoir conclure quant aux rendements minimaux des sous-ensembles :

- ❖ Le système de stockage a un rendement unitaire : $\eta_{SSE} \approx 1$. Cette hypothèse est valable dans le cas d'un vélo à base de supercondensateurs (voir le Chapitre II, paragraphe 2.2.1.5) ;
- ❖ Le rendement des deux machines électriques (générateur du pédalier et machine sur la roue) est similaire ;
- ❖ Les convertisseurs sont considérés comme idéaux : $\eta_{DCDC} = 1$.

Ces trois hypothèses, couplées à un rendement minimal de 70% permettant d'être suffisamment efficient pour performer sur des parcours vallonnés permettent d'écrire :

$$\eta_{VHS}^e = \eta_{mach}^2 \rightarrow \sqrt{\eta_{VHS}^e} = \eta_{mach} > 0.85 \quad 3.28$$

Ainsi, le rendement des machines doit dépasser les 85% en moyenne afin de pouvoir atteindre un rendement suffisant sur le trajet pour se déplacer aussi rapidement qu'un VSC. Le paragraphe 3.2.1 montre que c'est actuellement le rendement maximal des meilleures machines pour un vélo du marché et non le rendement moyen.

3.3.4 Conclusion concernant le rendement objectif minimum

La programmation dynamique est un outil mathématique qui a permis de comparer et de déterminer le rendement énergétique moyen que devrait avoir l'architecture afin de pouvoir rouler aussi vite qu'un vélo standard à chaîne.

Ce paragraphe a montré que le rendement à atteindre est dépendant du parcours. Il a été ainsi possible de montrer que le vélo hybride série pouvait avoir des avantages comparés à un vélo standard dès que le parcours inclut des discontinuités (pentes, arrêts). En revanche, le VHS ne présente pas d'intérêt sur le plat, sans arrêt.

Le rendement à atteindre semble donc varier entre 60% pour les trajets urbains à 70% pour les trajets vallonnés (des résultats complémentaires sont présentés en Annexe H et appuient cet objectif de rendement). L'intervalle de rendement visé soulève la question de la faisabilité. En effet, le paragraphe 3.2.1 a mis en avant le rendement potentiellement faible des machines électrique pour cycle. De plus, les aspects coût et industrialisation devraient aussi être abordés.

3.4 Est-il possible d'atteindre ce rendement ?

3.4.1 Problématique de base

Le seuil de 60% à 70% de rendement déterminé dans le paragraphe 3.3.3 est un rendement général qui ne prend pas en compte les variations dynamiques d'état du système, les changements de points de fonctionnements associés et donc les rendements variables tout au long du parcours.

Afin d'évaluer la pertinence technique de l'architecture hybride série, la simulation complète puis l'optimisation du véhicule a été menée à l'aide d'un modèle statique des différents composants du système.

L'objectif de cette modélisation est de pouvoir proposer une estimation fiable du rendement du vélo hybride série sur un trajet donné ainsi que de pouvoir orienter les choix d'intégration avec les meilleurs composants. Un dernier objectif a été de modéliser le coût de ces différents composants afin de le mettre en regard de la performance et de proposer des compromis optimaux.

3.4.2 Description de la base de données utilisée pour le calcul

La modélisation d'un VHS comporte de nombreux sous éléments. L'essentiel de la modélisation a déjà été présenté dans les chapitres précédents :

- ❖ La modélisation de la dynamique du cycle a été décrite au Chapitre I, paragraphe 1.6.1. Le VHS va ici se déplacer temporellement sur cycle avec une consigne de couple de la machine prédéterminée (couple calculé par la programmation dynamique par exemple). On peut donc utiliser la formulation temporelle et non la formulation en distance présentée pour la programmation dynamique. L'objectif est bien de déterminer les performances du véhicule sur cycle prédéterminé et non d'optimiser la consigne sur ce cycle. Les paramètres du vélo utilisés sont, sauf mention contraire, identiques à ceux présentés sur le Tableau 3-3.
- ❖ De même, la modélisation des supercondensateurs, incluant une résistance série, a été définie au Chapitre II, paragraphe 2.2.1. La base de données utilisée pour l'optimisation comporte 36 modélisations de supercondensateurs : des composants de différentes marques sont modélisés (Maxwell, Eaton, Skeleton, Ioxus) ainsi qu'une large gamme de capacité : de 100 à 3000 F. Les principaux paramètres modélisés sont les suivants : la capacité, la tension maximale d'utilisation, la résistance série et le coût. Finalement, il est possible de choisir le nombre de cellules en série et en parallèle de manière à constituer le pack. Une modélisation du coût des supercondensateurs Ct_{SSE} (€), dépendant du prix faradique de ces derniers β_{SC} (€/F) ainsi que du nombre de farads du pack a aussi été proposée tel que :

$$Ct_{SSE} = \beta_{SC} N_{ser} C_{cell}^{SC} \quad 3.29$$

avec N_{ser} le nombre de cellules de supercondensateurs en série et C_{cell}^{SC} (F) la capacité de chaque cellule.

- ❖ Les machines sont modélisées comme explicité au paragraphe 3.2.1. La base de données comporte 7 machines qui disposent toutes d'une caractéristique couple/rendement comme illustré sur la Figure 3-4.
- ❖ Les éventuelles boîtes de vitesses sont paramétrées avec les équations présentées au paragraphe 3.2.2. Le rapport de réduction est modifiable en amont de chaque simulation au cours de l'optimisation.
- ❖ Le convertisseur de tension peut aussi être paramétré à l'aide du choix des interrupteurs de puissance (MOSFETs) fort d'une base de données de 37 éléments. Les paramètres modélisés (Résistance interne, fréquence de commutation, ...voir Annexe C) permettent d'estimer les pertes du convertisseur et ainsi d'évaluer la performance de la conversion d'énergie entre le bus et le pack.

3.4.3 Modèle utilisé (VEHLIB)

La mise en forme d'un modèle de simulation quasi statique a été réalisée à l'aide de la bibliothèque VEHLIB⁶. Cet outil de simulation est basé sur des briques de fonctionnement Matlab/Simulink et permet de modéliser des véhicules de tous types (hybride parallèle, hybride série, électrique, thermique, ...) [159]–[161].

La base de fonctionnement de l'ensemble des briques de calcul est basée sur une approche énergétique des flux dans le système. L'énergie de sortie est toujours égale à l'énergie d'entrée moins les éventuelles pertes qui peuvent être calculées ou encore déterminées par la lecture d'un tableau (de pertes) préenregistré.

Le flux de puissance est toujours modélisé par le couple de variables correspondant (Courant, Tension)/(Force, Vitesse), ce qui permet d'avoir une modélisation réaliste et d'appliquer des lois de pertes énergétiques représentatives [162].

La Figure 3-16 montre un aperçu de la modélisation d'un vélo hybride série :

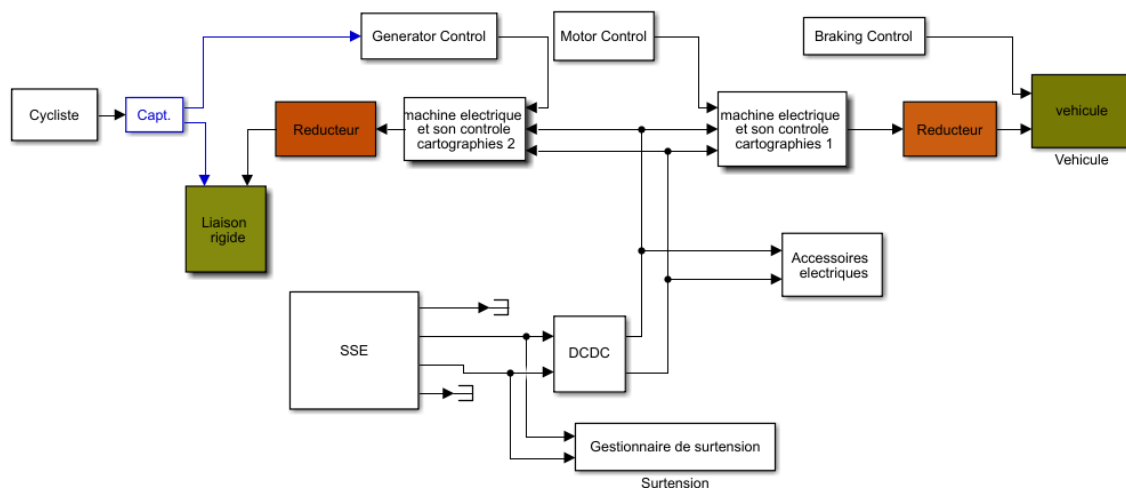


Figure 3-16 : Le vélo hybride série modélisé sous VEHLIB (Matlab/Simulink).

⁶ Ce logiciel a été développé par l'Université Gustave Eiffel (UGE). Il est utilisé dans le cadre de l'ERC GEST entre le laboratoire Ampère et l'UGE.

3.4 Est-il possible d'atteindre ce rendement ?

Il est possible d'apercevoir les mêmes sous-ensembles que sur le synoptique exposé sur la Figure 3-16. Puisque le système simule tous les sous-ensembles, de nombreuses grandeurs sont accessibles pour l'analyse.

- ❖ L'énergie produite par l'utilisateur et véhiculée par toute la chaîne de transmission est modélisée. La modélisation permet d'aborder le contrôle du générateur mais aussi les points de fonctionnement de la machine. L'intégration d'un pilotage type vectoriel dans la simulation permet aussi de tester les algorithmes de pédalage sous l'angle théorique puis pratique (voir le Chapitre V, paragraphe 5.3).
- ❖ Le contrôle-commande de la machine électrique émule le comportement d'un pilotage vectoriel 4 quadrants (2 quadrants en moteur : marche avant et marche arrière et 2 quadrant en générateur : freinage régénératif en marche avant et en marche arrière). Des profils de commandes spécifiques (T_{cmd}) peuvent donc être insérés dans le système de manière à accélérer, freiner ou maintenir le vélo en vitesse. La détermination du couple de commande est liée à l'objectif de la simulation. Il peut faire l'objet d'une réutilisation de signaux calculés comme la programmation dynamique. Afin de piloter le système en temps réel, le couple de commande peut aussi être identifié en temps réel grâce à l'analyse de certains signaux comme présenté au Chapitre IV.
- ❖ Un ensemble de signaux standards tel que l'énergie dépensée, le temps de parcours, les échanges d'énergie avec le SSE sont simulés et peuvent être analysés.

3.4.4 Méthode d'optimisation : NSGA II

Le modèle présenté dans le paragraphe 3.4.3 -permet de simuler le comportement d'un véhicule de manière fine.

L'objectif est de vérifier si le rendement de 60% est atteignable, mais aussi de minimiser les coûts. Le problème peut alors être formulé comme une minimisation bi objectif.

3.4.4.1 Le NSGA II

L'algorithme NSGA (Non-dominating Sorting Genetic Algorithm) est une méthode mathématique permettant de résoudre des problèmes multiobjectifs. La solution d'un problème multiobjectif n'est généralement pas unique, mais prend la forme d'un front de Pareto désignant l'ensemble des solutions « optimales », c'est-à-dire non dominées du problème [163], [164].

L'algorithme peut être formulé sous la forme suivante [165], [166] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) ; f \in R \text{ avec } f \text{ un ensemble de fonctions objectifs} \\ [f_1, f_2, \dots] \\ \text{Telles que les contraintes } h(x) \text{ soient satisfaites} \\ h_j x \leq 0 ; j = 1:m \end{array} \right. \quad 3.30$$

Ainsi, le problème de minimisation prend en considération plusieurs paramètres dont une fonction multi-objectifs qu'il s'agit de minimiser ainsi que des contraintes qui doivent être respectées. Les paramètres x du problème sont les variables à rechercher afin de minimiser l'ensemble de fonctions f .

L'intérêt du NSGA II réside dans la détermination des paramètres x optimaux du problème. Pour cela, l'algorithme génétique détermine des bons candidats potentiels en effectuant plusieurs étapes [167], [168] :

- ❖ La répartition et classification des solutions de l'ensemble (voir Figure 3-17 : R_t) en fronts de solutions non dominés successifs (rang N1, rang N2 dominé uniquement par le rang N1, rang N3 dominé uniquement par le rang N1 et N2, ...)
- ❖ La constitution d'une nouvelle population (voir Figure 3-17 P_{t+1}) en sélectionnant les fronts entiers si possible, puis les meilleurs individus du premier front non complet sur le critère du « crowding distance » (non-agglomération et optimisation de la distance entre les éléments du front).
- ❖ La création d'un ensemble R_t de taille double de la taille de P_t intégrant des solutions filles obtenues par des opérations mathématiques de mutation et de cross-over.

L'algorithme est donc itératif. Il calcule des espaces de solution fils à partir des solutions parentes. Les paramètres de l'algorithme comportent la taille de la population N_{pop} et le nombre d'itérations N_{iter} .

Afin d'éviter les phénomènes de minima locaux, l'algorithme intègre aussi une part d'aléatoire dans le calcul des nouveaux espaces de solution.

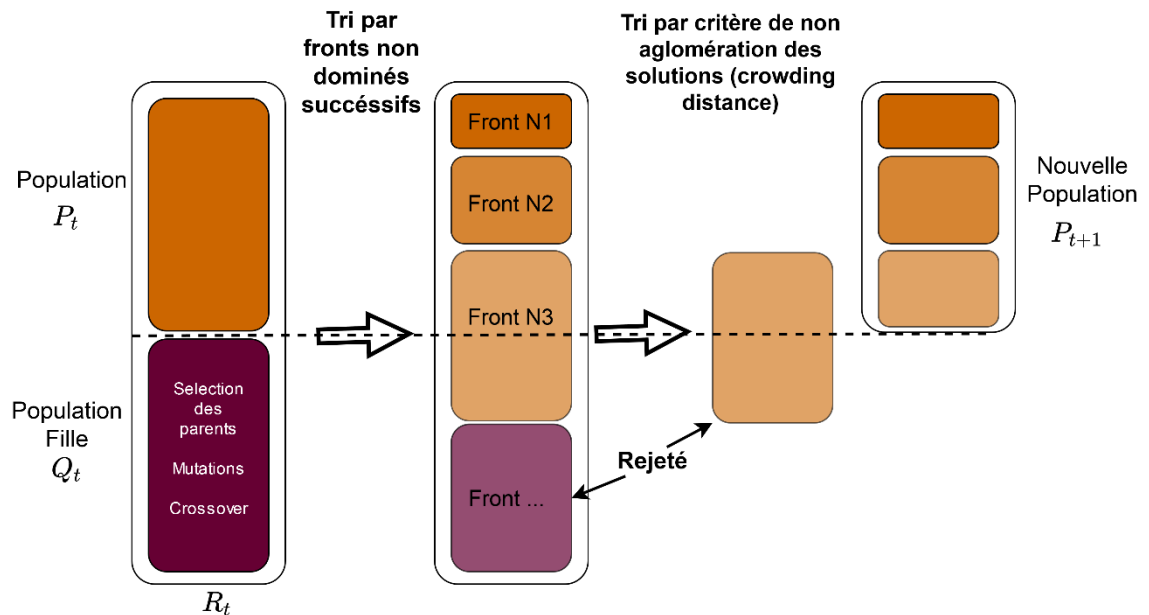


Figure 3-17 : Représentation de l'algorithme NSGA II et de son fonctionnement [166].

3.4.4.2 Formulation du problème

Le problème d'optimisation proposé consiste à maximiser le rendement, mais aussi à minimiser les coûts. Le problème bi objectif, comporte donc deux fonctions (f_1 et f_2) et peut donc s'écrire de la manière suivante [169] :

$$\begin{cases} f_1 = \min \sum C_t \\ f_2 = \max \eta_{VHS} = \min (-\eta_{VHS}) \end{cases} \quad 3.31$$

3.4 Est-il possible d'atteindre ce rendement ?

Les données d'entrée à optimiser sont les variables qui peuvent varier afin d'optimiser le système au sens des fonctions objectifs présentées équation 3.31. Ces données sont listées dans le Tableau 3-4. Les valeurs peuvent être des entiers qui correspondent à une valeur physique (rapport de réduction de la machine et de la génératrice k_{bv}^{mach} et k_{bv}^{gen} , nombre de cellules du pack N_{ser} et leur capacité unitaire C_{cell}). Certains éléments peuvent aussi être sélectionnés dans une base de données de sept machines (machine principale (α_{mach}), générateur (α_{gen})). Par exemple, la machine N°2, présenté au paragraphe 3.2.1.4 est une machine de petite puissance : EC Flat 220 (voir le Tableau 3-2). Finalement, la présence du convertisseur DC/DC (α_{DCDC}) entre le système de stockage et le bus est également une option.

	Description	Inter- valle	Unit
$k_{bv}^{gen}, k_{bv}^{mach}$	Rapport de réduction	[1 ; 50]	
N_{ser}	Nombre de cellules en série	[1 ; 22]	
C_{cell}	Capacité des Supercondensateurs	[60 ; 3500]	F
α_{DCDC}	Présence du DC-DC	[0 ; 1]	
α_{gen}	Choix de la génératrice	[1 : 7]	
α_{mach}	Choix de la machine	[1 : 7]	

Tableau 3-4 : Variables d'étude du modèle à optimiser.

Afin de s'assurer que l'architecture du système est réaliste et fonctionnelle, des contraintes ont été imposées. Parmi ces dernières, certaines concernent le design et sont exposées équation 3.32. Le coût total (Ct_{VHS}) du vélo hybride série doit être encadré. De plus, le couple moyen généré T_H^{moy} par l'utilisateur (respectivement le couple requis par la commande T_{cmd}) ne doit pas excéder le couple maximal que le générateur T_{gen}^{max} (respectivement la machine T_{mach}^{max}) peut supporter pour des raisons thermiques :

$$\left\{ \begin{array}{l} 400 < Ct_{VHS} \leq 2000\text{€} \\ k_{bv}^{gen} T_{gen}^{max} \geq 2T_H^{moy} \\ k_{bv}^{mach} T_{mach}^{max} \geq max T_{cmd} \end{array} \right. \quad 3.32$$

Une condition est également fixée sur les résultats de la simulation. On impose que le vélo simulé arrive à terme, c'est-à-dire que le parcours soit fini après arrêt de la simulation :

$$X_{fin} \geq max Distance \quad 3.33$$

avec $max(Distance)$ la longueur totale du trajet et X_{fin} la distance parcourue à la fin de la simulation.

Avant de déterminer un ensemble de configurations optimales au paragraphe 3.4.6, une simulation unique d'un prototype existant est proposée au paragraphe suivant.

3.4.5 Une simulation unique pour évaluer les performances d'un prototype

Les simulations effectuées sur le logiciel ont permis de valider le fonctionnement ainsi que les différents flux d'énergie circulant dans le système.

La commande de couple optimale déterminée par la programmation dynamique au paragraphe 3.3.3.2 a été réinjectée comme celle du système (T_{cmd}). Grâce à la modélisation, il est possible d'observer la réaction des différents sous-ensembles à la sollicitation de la machine. Différents signaux sont présentés sur la Figure 3-18 et la Figure 3-19. La Figure 3-18 illustre la compensation de la puissance utilisateur par les supercondensateurs. La puissance de type sinusoïdale fournie par l'utilisateur (voir le Chapitre V, paragraphe 5.3) implique de fortes variations de courant dans le système à l'échelle d'un tour du pédalier et provoque une augmentation des pertes (les pertes sont non linéaires avec le courant). Les simulations permettent d'estimer que l'aspect alternatif (comparé à une génération continue) de la puissance provoque une augmentation de plus de 13% des pertes globales dans le système. La Figure 3-19 illustre la variation des pertes dans le système en fonction de l'état de charge des supercondensateurs. Il est possible d'observer une importante augmentation des pertes à faible état de charge (faible tension donc fort courant).

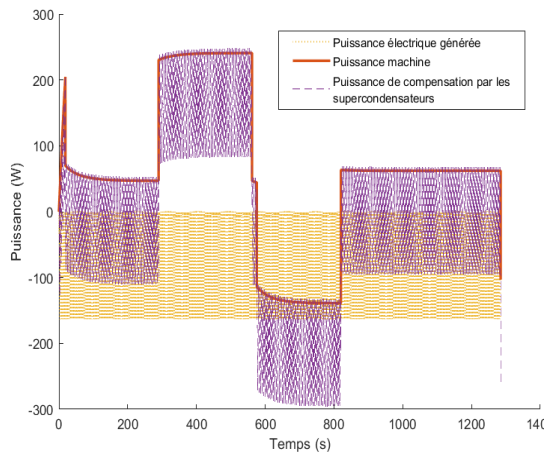


Figure 3-18 : Bilan de puissance sur le bus, les supercondensateurs compensent la puissance de l'utilisateur pour un trajet vallonné (Détail des oscillations présenté aux Chapitres IV et V).

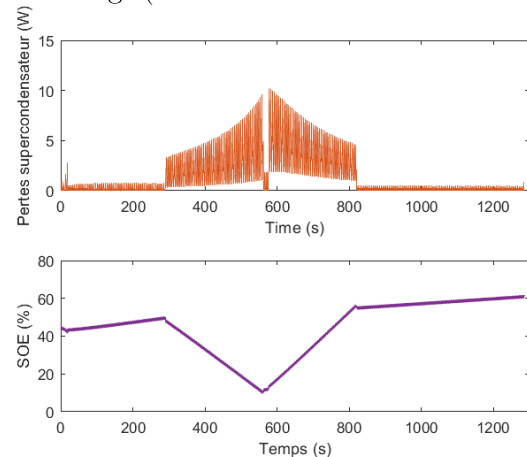


Figure 3-19 : Etat de charge et perte du pack de supercondensateurs pour le trajet vallonné.

L'analyse du détail des pertes dans le système permet de modéliser la répartition de ces dernières dans le système.

Un des prototypes construit pendant le doctorat a été analysé afin d'estimer les performances standard d'un véhicule hybride série non optimisé (voir Annexe B et Figure 3-20). Le prototype a été élaboré sur la base des éléments suivants, majoritairement issus du commerce :

- ❖ Un générateur de puissance nominale de 800 W et de vitesse nominale de 1000 tr/min, $T_{mach}^{max} = 7 Nm$, multiplicateur de vitesse à trois étages.
- ❖ 8 supercondensateurs de 1200 F en série permettant d'avoir une énergie embarquée utile de 7.3 Wh.

3.4 Est-il possible d'atteindre ce rendement ?

- ❖ Une machine électrique « Direct Drive » de puissance nominale de 500 W montée dans une petite roue pour un fonctionnement privilégié sur les hautes vitesses de rotation.

Les sous-systèmes ont tous été dimensionnés de manière séparée (considérations du couple, de l'énergie embarquée, de l'encombrement, ...). Le vélo ainsi constitué a été simulé un parcours vallonné (présenté au paragraphe 3.3.2.2). La machine étant en prise directe avec la roue, il n'y a pas de pertes mécaniques liée à un réducteur dans cet essai (voir le paragraphe 3.2.1).



Figure 3-20 : prototype du vélo hybride à base de supercondensateurs.

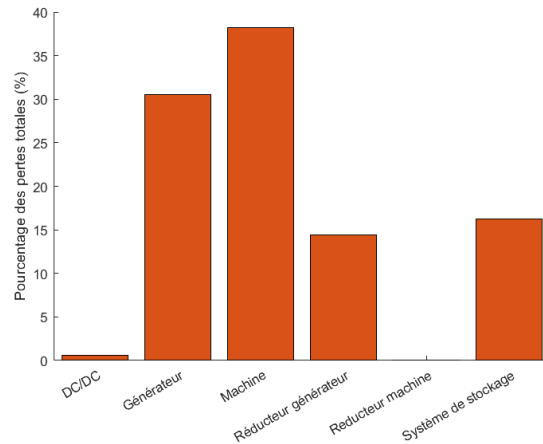


Figure 3-21 : répartition des pertes simulées pour l'architecture d'un vélo prototype sur un parcours vallonné.

Une première conclusion qu'il est possible de porter en analysant la Figure 3-21 est l'importance des pertes mesurées de la machine dans le système. L'analyse montre que la première source de pertes se situe au niveau de la machine puis vient le générateur. Ainsi, les deux machines, avec près de 70% des pertes totales du système, semblent avoir un rôle primordial dans le choix d'une architecture efficace. Les pertes dans le système de stockage ainsi que dans le réducteur du générateur, ici simulées comme générant 15% des pertes du système chacun ne doivent pas non plus être négligées. Les pertes causées par l'électronique de puissance semblent pouvoir être négligées en première approximation.

Le rendement énergétique du vélo simulé tel que présenté est $\eta_{VHS}^e = 0.36$. Le rendement obtenu dans cette configuration est donc largement insuffisant et éloigné du seuil des [60-70] % nécessaires au bon fonctionnement du vélo (voir le paragraphe 3.3.3). L'objectif est de tenter d'optimiser cette structure afin d'évaluer la faisabilité des 60% à 70% de rendement.

3.4.6 Optimisation et critique des résultats

L'évaluation de la performance du premier prototype montre que le choix des composants est critique pour la viabilité du système. La boucle d'optimisation présentée au paragraphe 3.4.4 a été exécutée sur les paramètres listés dans le Tableau 3-4 afin de déterminer le meilleur compromis entre les différents éléments modélisés. Les résultats sont ensuite classés afin de mettre en évidence des fronts de Pareto « optimaux » au sens des fonctions objectifs présentés à l'équation 3.31.

La Figure 3-22 montre les résultats (chaque point est une simulation complète du véhicule sur un parcours donné) pour le trajet vallonné (voir paragraphe 3.3.2). Les coûts limites exprimés sur l'équation 3.32, sont respectés et il est possible d'observer différents compromis coût/performance. De manière similaire, la Figure 3-23 illustre les résultats de l'optimisation pour un parcours plat sans arrêt.

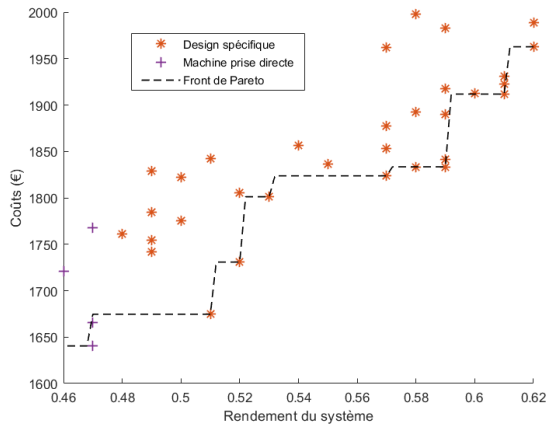


Figure 3-22 : Résultat de l'optimisation par l'algorithme génétique NSGA II pour le terrain vallonné.

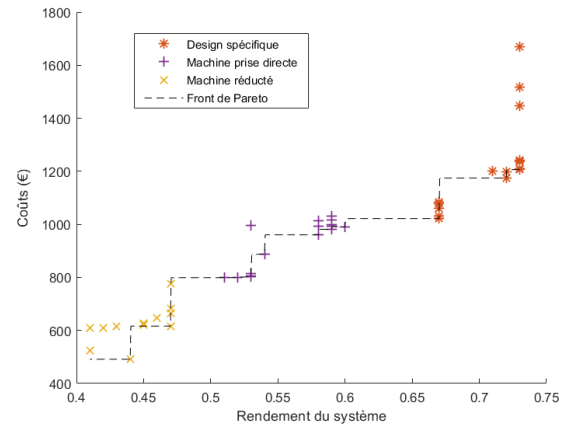


Figure 3-23 : Résultat de l'optimisation par l'algorithme génétique NSGA II pour le terrain plat.

Un front de Pareto délimitant les solutions de rang 1 (solutions non dominées, voir le paragraphe 3.4.4.1) a été identifié sur chacun des deux ensembles de solution (voir la Figure 3-22 et la Figure 3-23).

Le cas du parcours vallonné ne conserve quasiment qu'une seule machine (parmi les sept machines de la base de données) dans les solutions de rang 1. Ainsi, la machine est ici directement désignée comme l'élément critique du dimensionnement. La seule machine retenue (design spécifique) est une machine au design haut de gamme permettant d'assurer un rendement plus élevé que celles utilisées classiquement pour le VAE. Dans le cas du parcours vallonné, le rendement de 60% est difficilement obtenu par quelques combinaisons de paramètres. Les coûts élevés de ces solutions sont dus à la grande quantité de supercondensateurs qu'il faut pouvoir embarquer afin de compenser l'énergie potentielle et limiter les pertes dans le pack (voir Figure 3-19, pour une illustration des pertes dans le système de stockage).

Bien que le résultat comporte une marge d'incertitude le rendement maximum obtenu pour le vélo sur ce parcours dépasse le seuil minimum de 60%, mais n'atteint pas les 70% préconisés par la programmation dynamique. Ce résultat pourrait être amélioré en proposant des éléments plus efficaces, notamment concernant les machines électriques.

La seconde simulation effectuée sur le plat et sans arrêt est nettement moins contraignante pour l'architecture. En effet, le système roule tout le temps à régime constant (pas d'arrêts, pas de variations d'énergie potentielle). La simulation sur le plat maximise le rendement que l'on peut obtenir sur un vélo hybride série avec le jeu de paramètres et de composants modélisés (voir le Tableau 3-4). En effet, le vélo fonctionne quasiment sur un seul point de fonctionnement peu contraint qu'il s'agit d'optimiser. Comme évoqué pour les simulations précédentes, le choix de la machine reste critique dans la performance du cycle. Ainsi, les trois différentes machines retenues

3.4 Est-il possible d'atteindre ce rendement ?

par l'optimisation déterminent les trois principales zones de résultats (voir Figure 3-23). Le rendement maximum qu'il est possible d'obtenir est de 73%, soit au-dessus du rendement minimum déterminé au paragraphe précédent. Il convient de rappeler que dans ce cas-là (terrain plat), le vélo hybride série ne peut pas surpasser les performances d'un vélo standard (voir le paragraphe 3.3.3.2).

3.5 Conclusion de chapitre

Ce chapitre a permis d'analyser en détail les performances des sous-ensembles constituant un vélo à architecture hybride série. La description a pu brièvement rendre compte de la complexité d'une telle architecture avec l'intégration de deux machines, trois convertisseurs de puissance et deux réducteurs.

L'analyse a permis de mettre en évidence que les machines, au cœur de la conversion de l'énergie, représentent le point critique du vélo hybride série à cause de leur rendement maximal faible (<90%) ainsi que de leur dimensionnement atypique (moteurs « couple »).

La première partie d'analyse de ce chapitre a mis en regard les performances temporelles d'un vélo à chaîne standard ainsi qu'un vélo hybride série afin de déterminer laquelle des deux architectures est la plus rapide en fonction du trajet et du rendement de la transmission de puissance. Quelques ordres de grandeur forts ont pu être déterminés. Ainsi, le vélo hybride série n'apporte aucun avantage sur le plat, mais ne requiert que 60% de rendement sur un cycle de conduite urbain afin de pouvoir égaler le vélo standard. Le résultat, similaire, de 70% de rendement est annoncé lors du franchissement d'un dénivelé conséquent (c'est-à-dire 50 m à 5%).

La question de la faisabilité technique d'un véhicule roulant avec un tel rendement a ensuite été abordée. Les résultats ont encore souligné l'importance de la motorisation dans le design du véhicule et ont permis de conclure sur la faisabilité d'un VHS atteignant 60% de rendement énergétique en sélectionnant les composants les plus haut de gamme. Ce critère de choix peut être coûteux et incompatible avec le prix industriel visé pour une telle application.

Les conclusions développées dans ce chapitre sont limitées par le socle de connaissance des produits sur le marché. En effet, la découverte ou la fabrication de machines plus performantes et moins onéreuses serait susceptible de modifier l'analyse et d'affirmer un avantage technique réel du vélo hybride série sur une plus large gamme de cas d'usage.

L'ensemble des résultats obtenus dans ce chapitre ont été simulés en utilisant des profils de contrôle issus de la programmation dynamique. Les rendements obtenus sur des cycles de conduites réels pourraient être très éloignés des chiffres annoncés dans ce chapitre si les points de fonctionnement des différents sous-ensembles sont loin de leurs caractéristiques nominales. La détermination de loi de contrôle du vélo adéquate, quasi optimale et en temps réel est alors une priorité pour le vélo hybride série.

Finalement, le critère visé ici a été le temps de parcours, mais l'intérêt de ce type d'architecture est de privilégier le confort, éventuellement au détriment de la vitesse ce qui est une approche différente de celle évoquée dans ce chapitre, mais permettrait de diminuer les rendements objectifs pour se focaliser sur un véhicule plus lent, mais plus confortable et éventuellement moins fatigant.

CHAPITRE 4. Gestion de l'énergie embarquée en temps réel pour un vélo hybride série à base de supercondensateurs

4.1 Introduction à la gestion d'énergie	128
4.1.1 L'équilibre énergétique	128
4.1.2 Mode de Contrôle	130
4.1.3 Verrous du problème et solution envisagée	132
4.2 Étude comportementale des solutions par programmation dynamique	134
4.3 La logique floue : un outil de construction de la commande	138
4.4 Détermination de la variation de la consigne de vitesse	142
4.4.1 Les différentes dimensions	143
4.4.2 Résultats numériques	144
4.4.3 Robustesse et sensibilité des algorithmes	146
4.5 La plateforme de test	148
4.5.1 Une plateforme intérieure gérée par Dspace	148
4.5.2 Des outils de mesure universels communicants sous le format ANT+	149
4.6 Résultats typiques et validation du modèle de vélo	150
4.7 Mise en situation et mesure de stratégies autonomes	152
4.8 Conclusion de chapitre	156

4.1 Introduction à la gestion d'énergie

La structure du vélo hybride série a été largement abordée dans les chapitres précédents. Les démarches scientifiques ont notamment pu conclure quant à la faisabilité et l'intérêt du vélo hybride série comparé à un vélo traditionnel. La pertinence du choix d'un système de stockage à faible énergie embarquée en implémentant des supercondensateurs en lieu et place des traditionnelles batteries a également été discutée.

Les études ont été menées dans des cas de figure idéaux mettant en scène un VHS fonctionnant au meilleur de ses capacités grâce à des stratégies de pilotage optimales telles que celles identifiées grâce à la programmation dynamique.

Le Chapitre I ainsi que le Chapitre III avaient notamment souligné qu'une des forces principales du VHS résidait dans le découplage du pédalage et de la dynamique du vélo. Autrement formulé, le VHS possède un degré de liberté supplémentaire par rapport aux vélos standards.

Ce chapitre s'attachera à définir et tester des stratégies de pilotage en temps réel pouvant être intégrées dans les systèmes embarqués à faible capacité de calcul d'un vélo. Ces algorithmes doivent ainsi être peu gourmands en mémoire et en temps de calcul afin de pouvoir être intégrés au produit.

Les verrous comme le maintien d'un état de charge suffisant dans le système, la prévision du parcours ou encore les aléas seront abordés. Générer des solutions répondants à ces verrous nécessitera également d'évoquer les notions de robustesse et d'optimalité de la solution.

4.1.1 L'équilibre énergétique

L'équilibre énergétique est un concept important dans le cas du vélo hybride série à base de supercondensateurs. Celui-ci passe localement par une équivalence entre la puissance produite P_H et la puissance consommée P_{mach} :

$$P_H = P_{mach} \quad 4.1$$

C'est idéalement la solution de contrôle souhaité sur un parcours en régime stationnaire à horizon infini, c'est-à-dire sans variations de parcours (arrêts, dénivelé) passés ou futurs. En effet, ce type de situation ne requiert aucune variation d'énergie du pack. Le bilan des puissances locales est alors, après intégration dans le temps, un bilan d'énergie nulle, c'est-à-dire que l'énergie produite et consommée sont identiques : c'est l'équilibre énergétique.

La situation de l'équilibre énergétique est celle que l'on retrouve à tout instant sur un vélo standard à chaîne. En effet, la puissance est totalement et strictement transmise à la roue sur ce type d'architecture. Un algorithme imposant l'équilibre énergétique en toute situation reviendrait donc à supprimer le degré de liberté du système et ainsi à retirer une partie de l'avantage de l'hybride série. En effet, un vélo hybride série sans stockage se comporte comme un système de transmission à variation continue CVT (Continuously Variable Transmission), c'est à dire que le moteur doit consommer strictement la puissance produite par l'utilisateur, mais le découplage entre le mouvement de pédalage et la dynamique du cycle subsiste (voir Chapitre I).

Physiquement et puisque la quantité d'énergie maximale embarquable est faible et de l'ordre de 10 Wh, l'équilibre énergétique doit être satisfait à moyen terme, c'est-à-dire que l'énergie dépensée pour assister ponctuellement l'utilisateur doit être récupérée par le système, impliquant :

$$\overline{P_H} = \overline{P_{mach}} \leftrightarrow \Delta SOE = 0 \quad 4.2$$

Une notion équivalente à l'équilibre des énergies consiste à définir la vitesse d'équilibre [76]. Cette dernière est la vitesse du véhicule à laquelle le vélo hybride série consomme exactement la puissance produite par l'utilisateur. Cette vitesse est dépendante du rendement de l'ensemble machine η_{mach} (machine, électronique plus mécanique éventuelle), du rayon de la roue R_{roue} (m) ainsi que de nombreux paramètres définis au Chapitre I, paragraphe 1.6.1 :

$$v_{eq} = \sqrt{\frac{B}{A}} \quad 4.3$$

Les coefficients A et B sont définis tel que :

$$A = \frac{\rho_{air} SC_x}{2M_v} \quad 4.4$$

$$B = \frac{T_{mach}}{M_v R_{roue}} - g(C_r + \sin(\alpha)) \quad 4.5$$

La puissance électrique consommée en régime stationnaire, tient compte du rendement de la machine et peut alors être définie comme :

$$P_{mach} = \frac{v_{eq} T_{mach}}{\eta_{mach} R_{roue}} \quad 4.6$$

La Figure 4-1 illustre la puissance totale électrique nécessaire ainsi que le couple nécessaire pour faire avancer un vélo sur le plat. Le couple de frottement sec, non nul, apparaît dès que la vitesse est non nulle.

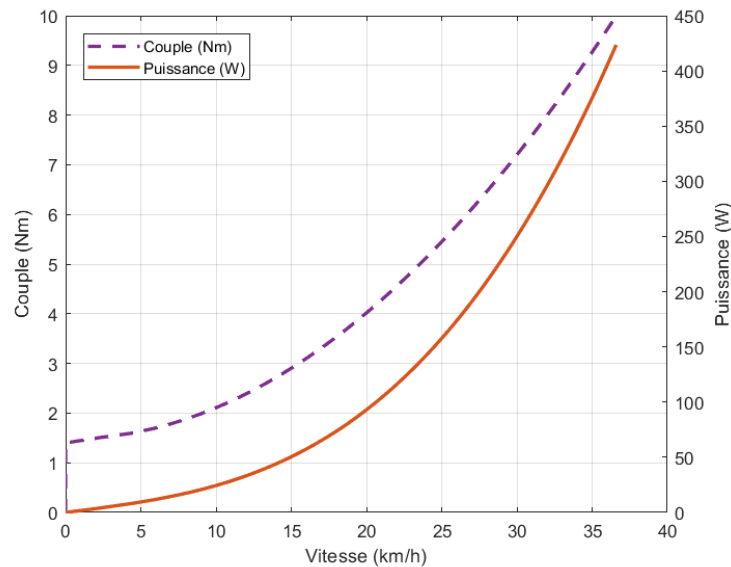


Figure 4-1: Exemple de vitesses d'équilibre pour un véhicule défini pour $SC_x = 0.5m^2$, $M_v = 100kg$, $R_{roue} = 0.35m$, $\eta_{mach} = 0.8$, $C_r = 0.005$.

4.1.2 Mode de Contrôle

4.1.2.1 Définition des règles à respecter

La programmation dynamique utilisée dans le Chapitre III permet d'établir des profils de contrôle optimaux vis-à-vis d'un critère (en l'occurrence le temps), tout en permettant le respect de certaines contraintes (notamment d'état de charge du pack de supercondensateurs). Cependant, cet algorithme est difficilement compatible avec des moyens de calcul temps réel tels que ceux pouvant être installés sur un vélo. En effet, il suppose en premier lieu de connaître (ou à défaut d'anticiper) le futur, ce qui n'est pas toujours envisageable dans un scénario d'utilisation d'un vélo. De plus, la complexité d'un tel algorithme évolue de manière combinatoire avec le nombre de variables d'état et de contrôle. Il suppose donc de traiter des tableaux de dimensions très élevées, nécessitant une capacité de mémoire beaucoup plus importante que celle embarquable de façon classique.

Pour ces raisons, il est important de pouvoir disposer de stratégies de contrôle qui, bien que suboptimales, permettent d'obtenir des performances proches en respectant à la fois les contraintes du problème, mais également celles inhérentes au système embarqué.

Ces stratégies de contrôles doivent donc :

- ❖ Respecter l'équilibre énergétique imposé à la programmation dynamique. Cela signifie que sur un trajet, la puissance moyenne transitant dans le système de stockage doit être nulle. Autrement dit, en considérant des rendements unitaires, la puissance moyenne fournie par le cycliste doit être égale à la puissance moyenne consommée par la machine (voir paragraphe 4.1.1).
- ❖ Permettre de fonctionner à certains moments dans un mode "sans stockage". En effet, il ne peut être exclu que parfois, le système de stockage d'énergie se trouve en limite d'état de charge (haut ou bas). Dans le cas où la limite basse est atteinte, aucune assistance n'est possible, et tant que la vitesse n'atteint pas une valeur suffisante pour espérer récupérer un peu d'énergie par freinage récupératif, l'état de charge restera bloqué à ce niveau. Dans le cas où la limite haute est atteinte, aucun freinage récupératif n'est possible, et la puissance produite doit être intégralement transmise à la machine électrique.
- ❖ Permettre, sans connaître le parcours a priori, de franchir des reliefs présentant une variation d'énergie potentielle plus importante que l'énergie embarquée. Il est important d'éviter un maximum les situations de surcharge ou de sous-charge du système de stockage d'énergie durant ces phases pour conserver la continuité de comportement du véhicule et ne pas avoir à fonctionner en mode dégradé.
- ❖ Présenter un comportement stable vis-à-vis d'aléas de parcours (arrêts inopinés, ralentissements, changements de conditions externes : vent, revêtement, etc.). Comme ces situations ne sont aucunement prévisibles, la stratégie implémentée doit pouvoir s'adapter.

Dans le cas où les limites d'état de charge du système sont atteintes, le vélo doit alors pouvoir temporairement fonctionner en mode hybride série sans stockage. En effet, on ne peut plus avoir d'assistance lorsque le pack est vide de même qu'il devient impossible de stocker de l'énergie quand ce dernier est plein. Dans ces deux situations, le vélo doit se comporter énergétiquement comme une CVT mécanique, c'est-à-dire que la puissance produite doit être consommée par la

machine électrique. L'objectif est également de chercher et analyser des stratégies prévenant ces situations.

4.1.2.2 Différentes stratégies de pilotage possibles

La grandeur de contrôle sur laquelle le système embarqué du vélo peut agir est le couple de la machine. C'est la variable pilotable de base. Toutes les stratégies de commandes envisageables sont donc initialement basées sur le contrôle en couple de la machine [77], [155].

Piloter une situation d'équilibre énergétique peut aussi se faire en pilotant une vitesse, ce qui, le cas échéant, est un pilotage dérivé du pilotage en couple (voir paragraphe 4.1.1). Le pilotage en vitesse est un mode de pilotage qui sera utilisé dans la suite de ce chapitre comme mode de contrôle principal du vélo.

Le degré de liberté associé à la machine est utilisé afin de piloter la dynamique et l'état de charge du véhicule. En fonction du comportement voulu, différentes stratégies peuvent être appliquées. Celles-ci doivent toujours tenter de maintenir le vélo dans un état fonctionnel (c'est-à-dire respecter des contraintes dont une partie est listée ci-dessus). Plusieurs stratégies peuvent être développées [77], [170]. Parmi elles :

- ❖ L'humain comme gestionnaire énergétique : il dispose d'un accélérateur manuel et des indicateurs nécessaires pour connaître l'état de charge du système de stockage et son évolution. Il se charge de piloter le vélo et gère l'état d'énergie du système en étant informé de son propre parcours ainsi que de l'intérêt à maximiser l'état de charge en amont des côtes et des discontinuités. La performance de ce mode de contrôle n'a pas été évaluée, cependant, un utilisateur bien averti et connaissant son chemin est susceptible de prédire de manière efficace la trajectoire du vélo et son besoin ponctuel en assistance.
- ❖ La simulation d'un vélo standard : le moteur consomme instantanément la puissance produite par l'utilisateur et le système de stockage est donc inutile dans ce cas-là. Le vélo avance donc à une vitesse strictement liée à la puissance produite. Dans les pentes, l'utilisateur doit faire en sorte d'éviter les zones de faible rendement du véhicule (faible vitesse par exemple, voir Chapitre III, paragraphe 3.2.1). Ainsi l'utilisateur devra faire en sorte d'arriver à pleine vitesse dans des pentes et donc fournir suffisamment de puissance en amont. L'utilisateur bénéficie tout de même de la CVT du système qui lui permet de découpler son mouvement de la dynamique du cycle.
- ❖ La stratégie « rule based » : cette stratégie intègre des lois de contrôle dépendantes de signaux aisément mesurables comme l'état de charge, la pente ou encore la vitesse. Ces stratégies peuvent être en particulier déduites de l'observation de stratégies optimales déterminées hors ligne. La méthode de contrôle se présente comme une loi de commande prédéfinie à l'avance et n'est donc pas adaptative en dehors du champ prévu à cet effet. Cette méthode de pilotage sera développée plus en profondeur dans ce chapitre.
- ❖ Les stratégies optimales en ligne utilisant des concepts mathématiques tels que, par exemple, le minimum de Pontryagin souvent déclinées dans le secteur automobile afin de minimiser la consommation de carburant sur un véhicule hybride (ECMS Equivalent

Consumption Minimisation Strategy). Ce type de pilotage optimal se base sur la répartition du flux énergétique dans le véhicule et tente de minimiser le flux total [171]–[173].

- ❖ Des stratégies incluant l'utilisation de la programmation dynamique couplée à la connaissance du parcours grâce à un renseignement GPS amont de la part de l'utilisateur. Cette solution n'a pas été approfondie puisque la puissance de calcul nécessaire (voir Chapitre III) n'est pas compatible avec celle disponible. De plus, l'utilisation de la programmation dynamique peut manquer de robustesse (aucune boucle de régulation pour adapter un calcul effectué hors ligne) si les paramètres (le rendement par exemple) du vélo ne sont pas définis correctement [174], [175]. Les stratégies de prédiction comme le Model Predictive Control (MPC), associées à des microcontrôleurs puissants (comme la famille STM32) peuvent être aussi des stratégies employées pour contrôler des systèmes en temps réel de manière quasi optimal en intégrant une partie de prédiction [176]–[180].

4.1.3 Verrous du problème et solution envisagée

Piloter un système embarqué en temps réel n'est pas trivial. En effet, le système doit non seulement fonctionner correctement en régime standard, mais aussi être capable de gérer les modes dégradés, être robuste aux variations (de modèle, de situation, ...). Le système de pilotage implémenté doit aussi pouvoir s'adapter à des systèmes non linéaires comme le vélo. De plus, l'intégration de l'algorithme dans un système aux ressources énergétiques limitées (même vis-à-vis de la puissance consommée par un microcontrôleur), implique de choisir une stratégie performante et sobre. Les différentes règles à respecter ont été présentées au paragraphe 4.1.2.1 tandis que les familles de stratégies l'ont été au paragraphe 4.1.2.2. La Figure 4-2 illustre les avantages et les inconvénients de chacune des solutions de pilotage.

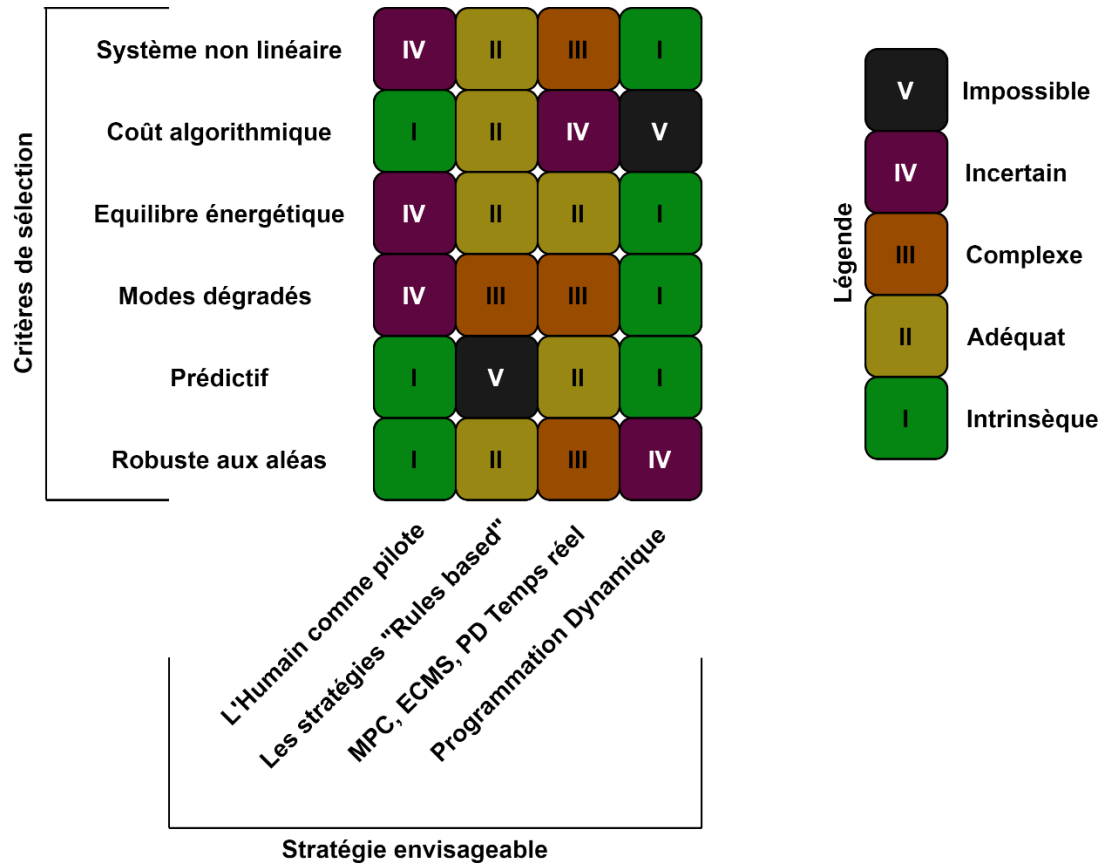


Figure 4-2 : Illustration du « Tetris » des avantages et inconvénients des différentes solutions de pilotage vis-à-vis des différentes solutions envisagées.

À partir de cette analyse, plusieurs grandes tendances se dégagent :

- ❖ La seule stratégie n'incluant pas de prédictif est la stratégie basée sur des règles (rule based). Cet inconvénient (pas de prédiction) est compensé par un coût algorithmique plus modeste que la programmation dynamique, par exemple.
- ❖ La stratégie la plus efficace en milieu contrôlé est la programmation dynamique. Ce chapitre va essayer de s'en inspirer en réduisant le coût algorithmique et en augmentant la robustesse des solutions optimales identifiées hors ligne.

Au regard de l'analyse précédente, l'objectif sera d'implémenter une stratégie à base de règles. Le paragraphe 4.3 présentera, dans un second temps, des solutions construites sur la base de la logique floue qui est une solution économique, peu gourmande en ressource, adaptée aux systèmes non linéaires et complexes. Dans un premier temps, le paragraphe 4.2 tâchera d'analyser des résultats optimaux identifiés sur la base de la programmation dynamique afin de déterminer les grandes règles internes de la logique floue permettant de respecter les critères de réussite énoncés au paragraphe 4.1.2.1.

4.2 Étude comportementale des solutions par programmation dynamique

La première des méthodes utilisées afin de piloter le vélo de manière autonome a été d'observer le comportement optimal du cycle grâce à des simulations numériques sur des parcours prédéfinis. L'objectif est ensuite de pouvoir synthétiser des stratégies de commande par mimétisme. Pour ce faire, les résultats du Chapitre III, calculés grâce à la programmation dynamique, ont été repris, complétés et analysés. L'analyse et la synthèse de stratégies suboptimales est un domaine important qui dispose d'une vaste littérature associée [181]–[184].

Comme explicité dans le Chapitre III au paragraphe 3.3.1, notre algorithme de programmation dynamique modélise le vélo par un unique rendement qui ne prend pas en compte les performances des différents sous-systèmes indépendamment. Afin de corrélérer des résultats pratiques et expérimentaux cohérents, les paramètres suivants ont été choisis pour les simulations (programmation dynamique) :

- ❖ Une puissance électrique produite de 80 W, image d'une puissance utilisateur de 100 W ($P_H = 100$ W) associé à un rendement de conversion de 80%.
- ❖ Un rendement global hors rendement de la génératrice, image de celui de la machine et du système de stockage de 80%, cohérent avec les résultats des simulations du Chapitre III.

4.2.1.1 Quelques parcours simulés sur trajets réels

La Figure 4-3 et la Figure 4-4 illustrent le comportement optimal d'un vélo hybride série sur deux parcours réels, dans le cadre de simulations effectuées avec la programmation dynamique. L'objectif est de pouvoir analyser graphiquement les stratégies optimales identifiées par la programmation dynamique.

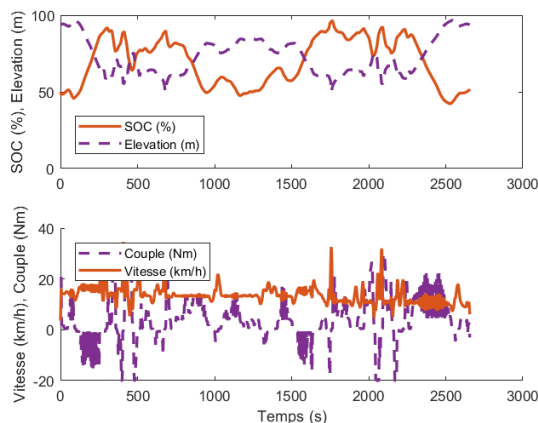


Figure 4-3 : exemple de pilotage optimal pour un trajet vallonné aux alentours de Laval pour un pack de 20 Wh.

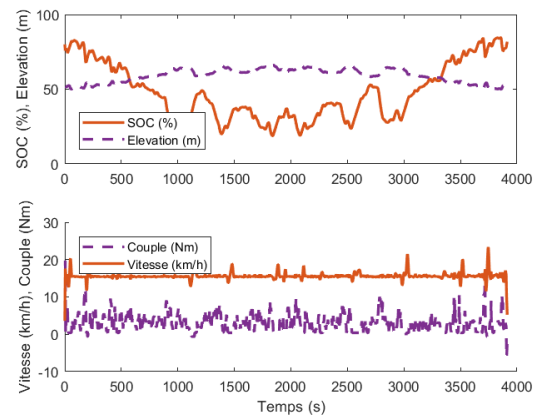


Figure 4-4 : exemple de pilotage optimal pour un trajet vallonné aux alentours de Villard les Dombes pour un pack de 8 Wh.

Le résultat montre une tentative de l'algorithme à maintenir une vitesse constante. En effet, la dépense énergétique d'un vélo étant non linéaire avec la vitesse (le paragraphe 1.6.1.2 du Chapitre I rappelle que la puissance consommée pour vaincre les frottements de l'air est fonction

du cube de la vitesse), l'algorithme a intérêt à maintenir une vitesse constante pour minimiser la consommation. De plus, l'énergie dépensée au cours d'une ascension est partiellement récupérée grâce au freinage régénératif au cours des descentes. Cette capacité a également été validée de manière expérimentale (voir Chapitre I, paragraphe 1.6.2). La condition énergétique imposant un état de charge identique au départ et à l'arrivée implique l'équilibre énergétique dans le système et donc une vitesse moyenne fonction de la puissance utilisateur uniquement. Le couple de la machine varie afin de maintenir la vitesse d'équilibre idéale.

La stratégie simple du maintien à vitesse constante dispose pourtant de limites. La quantité d'énergie embarquée est la limite la plus importante. La capacité du système à gérer les situations de surcharge ou bien encore de pénurie énergétique du pack de supercondensateurs est alors essentielle afin d'obtenir un véhicule fonctionnel. Comme le montrent la Figure 4-5 et la Figure 4-6, la solution de pilotage idéale évolue fortement avec la variation de la quantité d'énergie embarquée. Les deux figures illustrent le franchissement d'un obstacle de 50 m de haut. Si la quantité d'énergie est suffisante, le véhicule passe l'obstacle à vitesse constante. Dans le cas contraire (voir Figure 4-7), l'algorithme doit s'adapter afin d'économiser de l'énergie.

4.2.1.2 Le cas théorique d'une côte de 50 m.

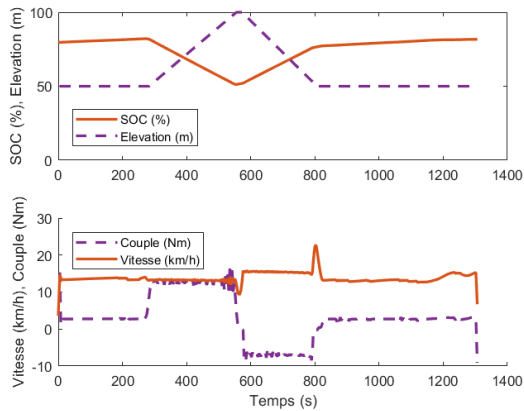


Figure 4-5 : exemple de pilotage optimal simulé sur un parcours vallonné avec un obstacle de 50 m (13.6 Wh) de dénivelé pour un pack de 50 Wh.

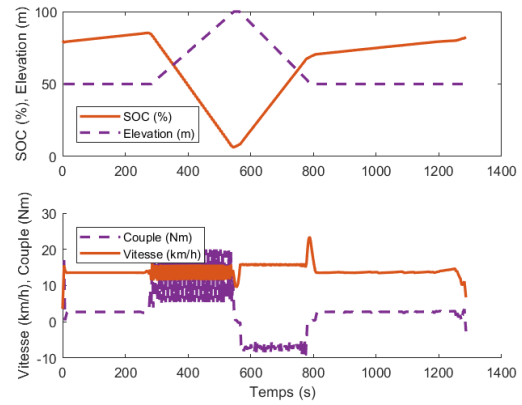


Figure 4-6 : exemple de pilotage optimal simulé sur un parcours vallonné avec un obstacle de 50 m (13.6 Wh) de dénivelé pour un pack de 20 Wh.

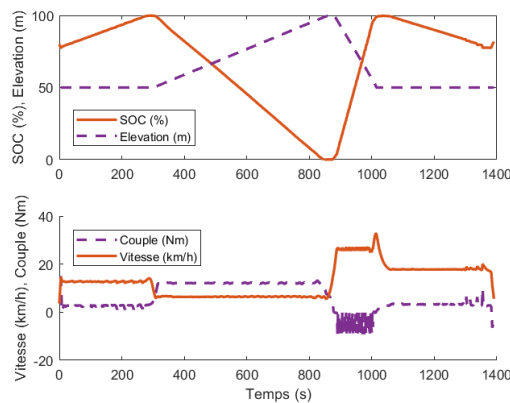


Figure 4-7 : exemple de pilotage optimal simulé sur un parcours vallonné avec un obstacle de 50 m (13.6 Wh) de dénivelé pour un pack de 8 Wh.

La Figure 4-5 et la Figure 4-6 sont des exemples de contrôle du véhicule assez similaires. En effet, les deux stratégies tentent de franchir un obstacle naturel de 50 m de dénivelé avec une énergie embarquée (respectivement de 50 et de 20 Wh) supérieure à l'énergie potentielle de l'obstacle à franchir (13.6 Wh). Les figures illustrent la réponse optimale de contrôle de façon à franchir le dénivelé en compensant l'énergie potentielle par l'énergie stockée dans les supercondensateurs. La Figure 4-5 illustre un cas de figure où la quantité d'énergie est largement supérieure à celle de l'énergie potentielle nécessaire, la vitesse est quasi constante et le profil de couple (rectangulaire) est similaire au cas idéal (énergie embarquée infinie, chaîne de transmission sans pertes). La Figure 4-6 illustre un exemple où la quantité d'énergie disponible ($\eta_{mach}^e * 20Wh = 16Wh > 13.6Wh$) est légèrement supérieure à l'énergie nécessaire. Dans ce cas de figure, on remarque aisément que la quantité d'énergie nécessaire représente quasiment la totalité de l'énergie embarquée qui se traduit par une utilisation de la totalité de la plage d'état de charge du système de stockage. L'algorithme parvient néanmoins à maintenir une vitesse quasi constante tout le

long du parcours. Les déviations de la vitesse constante observées sur la Figure 4-5 et la Figure 4-6 sont expliquées ci-dessous.

4.2.1.3 Cas spécifiques et constatations alternatives

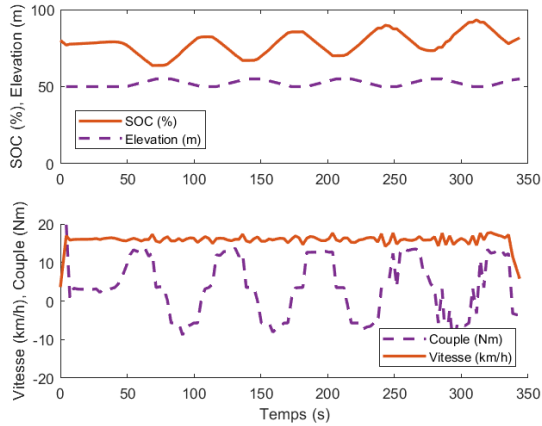


Figure 4-8 : exemple de pilotage optimal pour le franchissement de micro obstacles (typiquement des ponts) de 5m de hauteur pour un vélo hybride série idéal avec un rendement unitaire.

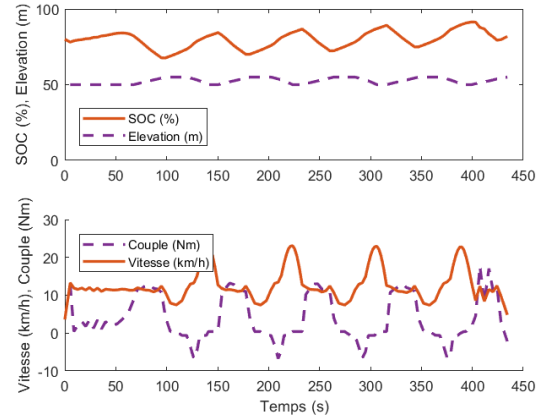


Figure 4-9 : exemple de pilotage optimal pour le franchissement de micro obstacles (typiquement des ponts) de 5m de hauteur pour le vélo considéré avec un rendement de 0.8.

Il existe cependant certains cas où la vitesse constante n'est pas la solution optimale déterminée par l'algorithme. Il est possible d'illustrer deux cas de figure représentatifs des solutions alternatives proposées par l'algorithme :

- ❖ La Figure 4-7 illustre le cas d'un franchissement d'un obstacle avec une quantité d'énergie embarquée trop faible pour espérer pouvoir le franchir en compensant l'énergie potentielle. La stratégie retenue essaye alors de maximiser l'énergie embarquée en amont afin de pouvoir assister l'utilisateur au maximum pendant l'ascension. Puisque la quantité d'énergie est trop faible ($8 Wh * \eta_{mach}^e < 13.6 Wh$), le vélo est obligé de réduire sa vitesse. C'est un point critique, car l'ascension à faible vitesse et fort couple dégrade fortement le rendement de la machine (considéré comme étant fixe dans nos simulations avec la programmation dynamique) et est susceptible d'être une solution non réalisable expérimentalement. Grâce au freinage récupératif, le stockage est complètement rempli au cours de la phase descendante du parcours.
- ❖ La Figure 4-9 illustre le franchissement successif de petits obstacles de quelques mètres de hauteur (5 m) (p. ex. des ponts). La stratégie de pilotage optimale est très instructive puisque le vélo ne compense pas strictement les variations d'énergie potentielle et ne maintient pas une vitesse constante. En effet, la programmation dynamique propose une solution plus efficace : se laisser porter en roue libre sur les derniers mètres afin d'accélérer et d'accumuler de l'énergie cinétique. Ce résultat est imputable au rendement non unitaire de la conversion. En effet, il devient plus intéressant et plus économique énergétiquement de se laisser accélérer plutôt que de stocker pour ensuite dépenser cette même énergie (le rendement de stockage/déstockage étant alors de η_{mach}^2). La Figure 4-8 présente le même parcours effectué avec un rendement unitaire idéal.

Cette simulation confirme l'hypothèse présentée ci-dessus puisque la vitesse est maintenue constante sur ce trajet avec un rendement de 1.

4.2.1.4 Conclusion concernant la synthétisation de stratégies à base de la programmation dynamique

Les résultats de la programmation dynamiques montrent l'intérêt à essayer de maintenir une vitesse constante en tout point sauf dans deux cas :

- ❖ L'énergie embarquée est insuffisante ;
- ❖ La conversion de l'énergie potentielle peut devenir, dans certains cas, plus profitable sous la forme d'énergie cinétique qu'électrique sur les derniers mètres d'une descente.

En éliminant la dernière contrainte dans un premier temps, la formulation d'une loi de commande est assez simple. L'algorithme tente de maintenir une vitesse constante sur tous les parcours. La maximisation de l'énergie embarquée en amont des difficultés est également un point clé de l'utilisation de ce type d'architecture. Une solution pour pallier au manque de connaissance concernant le futur (et donc l'impossibilité de maximiser l'énergie au bon moment) est de fonctionner avec un état de charge moyen élevé (voir le paragraphe 4.4.1).

4.3 La logique floue : un outil de construction de la commande

4.3.1.1 La logique floue : concepts et intérêts

La logique floue est une logique de résolution de problèmes. Une des différences majeures avec la logique binaire classique est la capacité de la logique floue à « raisonner » sur des états intermédiaires et continus en lieu et place d'états discrets [185].

L'objectif de la logique floue est de proposer des solutions évolutives avec la notion de « compromis ». La logique floue est aussi un puissant outil de décision concernant les systèmes non linéaires. Elle peut s'adapter aux théories de la commande comme les PID, ce qui en fait un outil puissant [186].

Cette méthode de décision est adaptée au VHS puisque c'est par définition un système fortement non linéaire (Chapitre I, paragraphe 1.6) et que les stratégies à appliquer varient selon l'état du système. La commande a pour objectif de réguler le flux énergétique dans le vélo et est dépendante de l'état de ce dernier. La logique floue est un outil utilisé par la communauté pour générer des commandes complexes sur des systèmes non linéaires. Les travaux présentés dans ce chapitre s'appuient sur une littérature abondante [163], [187]–[190].

La logique floue se base sur le concept d'appartenance à un ensemble flou (notion de fonction membre). C'est-à-dire que chaque variable évaluée est susceptible d'appartenir à un ensemble d'états (de fonctions) et non à un état fixe. Une fois la répartition des variables dans les différents états effectués, un calcul permet de déterminer la commande résultante. La détermination de cette commande est liée à des implications simples (p. ex. si l'état de charge est bas alors diminuer la vitesse). Un lecteur voulant approfondir ces notions pourra se référer, par exemple, à [191].

4.3.1.2 Le cas du VHS

Le VHS est un système pouvant être décrit, comme présenté au Chapitre III, par deux grandeurs au minimum :

- ❖ La vitesse .
- ❖ L'état de charge.

Ce chapitre a montré l'importance de la gestion de l'état de charge dans le système. Cet état est une variable d'entrée qui peut être analysée grâce à une stratégie de type logique floue. Pour cela, il s'agit de définir des fonctions membres répondant aux différentes situations du système.

- ❖ Le système de stockage est-il à l'équilibre chargé ou déchargé ?
- ❖ La vitesse du vélo est-elle supérieure, égale ou inférieure à la vitesse d'équilibre énergétique ?

De la même manière, des fonctions d'appartenance sont proposées pour quantifier la vitesse du véhicule : la vitesse est-elle plus élevée que celle d'équilibre, moins élevée, ... Comme présenté au paragraphe 4.4.1, d'autres notions que l'état de charge, comme la pente, peuvent être intégrées à la logique de décision. La pente est en effet un élément important pouvant influencer sur la stratégie de pilotage de type logique floue.

La Figure 4-10 illustre la notion de fonction d'appartenance pour l'état de charge. Comme évoqué ci-dessus, l'état de charge peut être considéré comme bas, élevé ou normal. La notion d'équilibre, introduit sur cette figure est développé plus bas (voir ci-dessous et paragraphe 4.4.1). La Figure 4-11 montre les fonctions permettant de générer une réponse de l'algorithme à un état de charge normal, bas ou élevé. Il s'agit de réduire ou d'augmenter la vitesse de consigne afin de tendre vers l'équilibre énergétique. La notion de variation de la vitesse d'équilibre sera abordée plus précisément section 4.3.1.3.

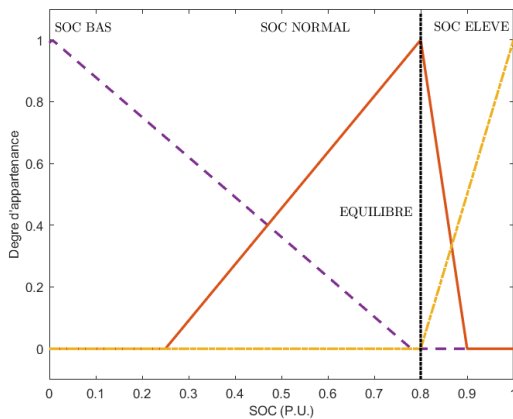


Figure 4-10: Degré d'appartenance du SOC aux différentes fonctions membres.

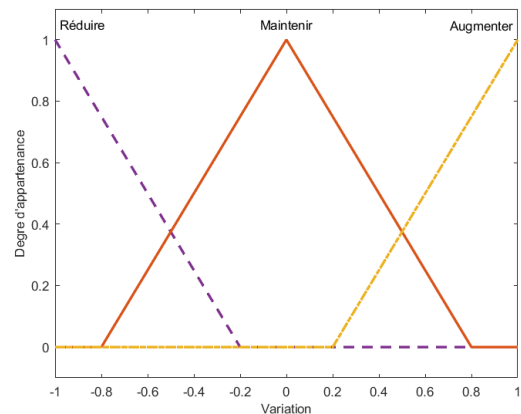


Figure 4-11 : Degré d'appartenance du coefficient de vitesse.

La notion d'appartenance relie le degré de vérité entre une entrée et une sortie. Dans l'exemple proposé, trois propositions sont présentées :

- ❖ Si l'état de charge est équilibré, alors maintenir la vitesse ;
- ❖ Si l'état de charge est bas, alors diminuer la vitesse ;
- ❖ Si l'état de charge est élevé, alors augmenter la vitesse.

Cette proposition binaire est modifiée en logique floue par la possibilité d'avoir un état de charge partiellement équilibré ($SOC=37\%$ implique par exemple à la fois de maintenir et de réduire la vitesse) et donc tendre vers un maintien de la vitesse. La Figure 4-12 illustre par un exemple la correspondance pour chacune des trois fonctions membres. Sur cette figure, le SOC d'entrée est de 0.373, il n'y a donc aucune correspondance avec l'état de sortie ; « augmenter la vitesse ».

Par ailleurs, la valeur finale peut être calculée par plusieurs méthodes de « défuzzification ». Ici, la méthode COG (Center Of Gravity) est utilisée, cette dernière prend comme valeur de sortie le centre de gravité de la somme des résultats de sortie des différentes fonctions membre (sur la Figure 4-22, la somme des surfaces oranges des différentes fonctions de sortie donne la surface finale)[192].

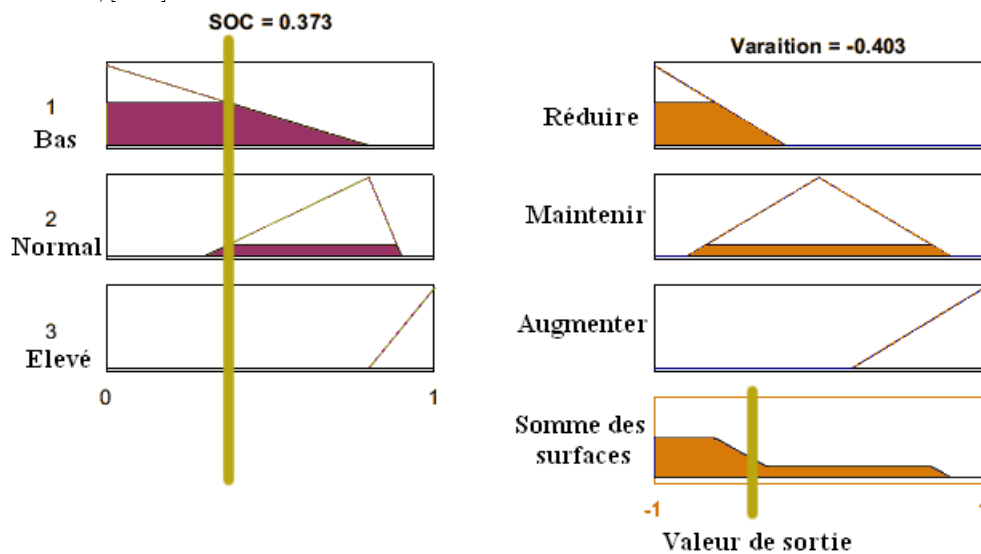


Figure 4-12 : Exemple de calcul en logique floue présentant la correspondance entre les fonctions d'entrée et de sortie et leur degré d'appartenance associé ainsi que la « défuzzification » par la méthode du centre de gravité de la surface de sortie.

4.3.1.3 Critères de pilotage

Le maintien à l'équilibre énergétique du vélo à l'échelle d'un parcours est l'objectif principal de l'algorithme. Le paragraphe 4.2 émet des hypothèses et propose une stratégie globale de gestion de l'énergie consistant à maintenir une vitesse stable et à utiliser l'énergie des supercondensateurs pour compenser l'énergie potentielle. Il a également pu montrer que la programmation dynamique tentait de maximiser la quantité d'énergie dans le pack en amont d'une difficulté liée à une énergie potentielle supérieure à celle embarquée. Comme la stratégie à base de logique floue ne prédit pas le parcours, il est impossible de prévoir le moment auquel l'état de charge devrait être maximisé afin de franchir les cols.

Comme le paragraphe précédent l'a montré, un des paramètres réglables de la logique floue dans la formulation proposée est le point d'équilibre énergétique (exprimé en fonction de l'état de charge d'équilibre SOC_{equi}).

La stratégie proposée consiste à trouver une valeur d'équilibre permettant de réaliser et résister aux situations suivantes :

- ❖ Pouvoir franchir les côtes et donc avoir une quantité d'énergie maximum embarquée permettant de les franchir. Cette considération tend à maximiser l'état de charge d'équilibre vers 100% ;
- ❖ Permettre au vélo d'avoir une quantité d'énergie disponible pour garantir le fonctionnement du frein régénératif. Cette considération nous apprend que tenter de maintenir 100% de SOC en permanence n'est pas une solution viable.

Dans l'objectif d'identifier la valeur fonctionnelle d'équilibre de l'état de charge, des simulations ont été entreprises sur différents types de parcours. La Figure 4-13 illustre l'augmentation relative du temps de parcours en fonction de l'état de charge d'équilibre du système de stockage. Les résultats compilés sont issus de simulations avec la programmation dynamique. Evidemment, les résultats montrent que l'état d'équilibre idéal dépend de la configuration du terrain. Ainsi, un parcours avec une partie initiale descendante nécessite d'avoir un état de charge d'équilibre plutôt bas pour optimiser le temps de parcours. À l'inverse, un parcours initialement montant nécessitera de préférence un état de charge initial élevé.

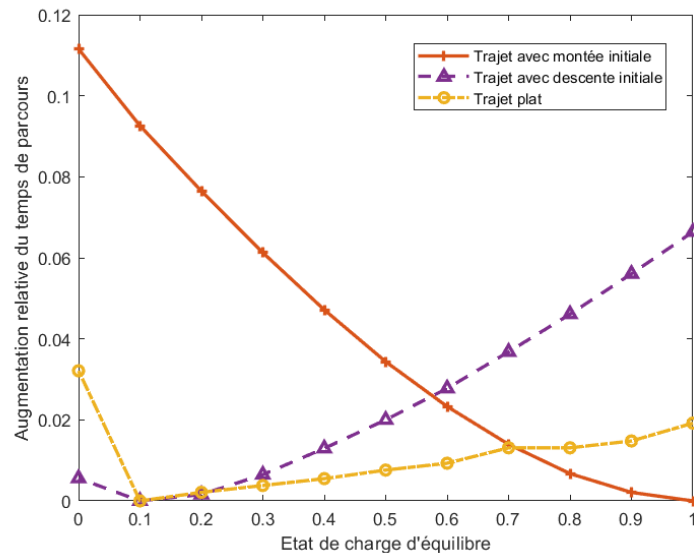


Figure 4-13 : Simulation de l'augmentation du temps de parcours en fonction de l'état de charge d'équilibre du système de stockage. Illustration de la dépendance de l'état de charge d'équilibre au type de parcours (montée initiale, descente initiale, plat).

L'intégration d'une unité prédictive de parcours pourrait permettre de choisir de manière adéquate l'état de charge d'équilibre du système à chaque instant.

Ainsi, une valeur arbitraire de 80% de l'état de charge d'équilibre SOC_{equi} a été choisi. Ce choix laisse 80% de l'état de charge du pack pour monter et 20% pour garantir le fonctionnement régénératif dans un maximum de situations. Ce choix a été jugé cohérent avec la logique globale présentée dans ce chapitre et favorise les situations où le cycliste doit franchir un obstacle.

L'autre point clé du réglage concerne la consigne. L'objectif est le moduler la consigne de vitesse en fonction de l'état de charge et de la vitesse d'équilibre basée sur les équations 4.3 et 4.4 comme présenté dans le paragraphe 4.1.1. La stratégie est de proposer une vitesse de consigne inférieure à la vitesse d'équilibre quand le système doit récupérer de l'énergie et supérieure en cas de dépense trop basse. La fonction d'appartenance liée à cette fonction est présentée sur la Figure 4-11.

4.4 Détermination de la variation de la consigne de vitesse

La vitesse réelle ($v_{csg}, m. s^{-1}$) de pilotage (égale à la consigne) est donné par la formule suivante :

$$v_{csg} = (1 + h)v_{eq} \quad 4.7$$

Dans cette formule, h représente un coefficient sans unité modulant la vitesse en fonction de l'état de charge. Ainsi, un état de charge supérieur à la limite (SOC_{equi}) implique une augmentation de la vitesse ($h > 0$) alors qu'un état de charge inférieure au point d'équilibre implique une diminution de cette même vitesse ($h < 0$).

L'objectif de la logique floue est de déterminer la valeur du coefficient h en temps réel en fonction de l'état du système. Cette valeur sera généralement comprise entre -1 (consigne de vitesse nulle) et 1 (vitesse doublée par rapport à la valeur d'équilibre). Les variations de h sont déduites d'algorithmes basés sur des règles simples et sur les constatations issues de la programmation dynamique. Le graphe présenté sur la Figure 4-12 illustre une étape de calcul de h dans le cadre d'une loi floue à une variable d'entrée (l'état de charge) et une variable de sortie (h). La Figure 4-14 illustre la procédure générale de régulation de la vitesse du vélo en temps réel.

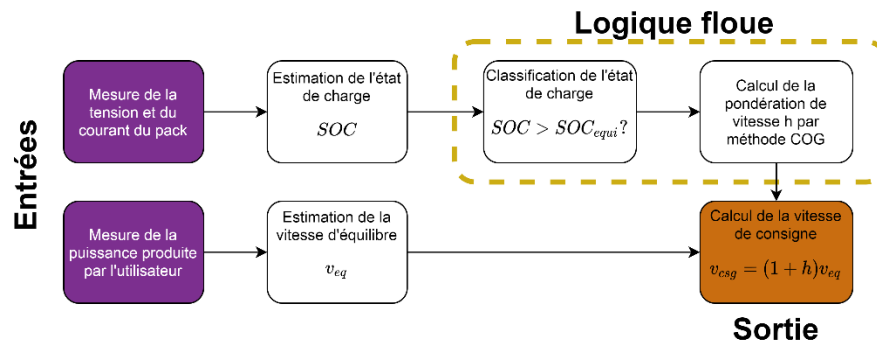


Figure 4-14 : Organigramme des étapes de calculs permettant de piloter le vélo en temps réel.

4.4 Détermination de la variation de la consigne de vitesse

Le paragraphe 4.2 analyse les différentes stratégies de pilotage possible d'un vélo hybride série et propose de retenir la suivante :

- ❖ Piloter le vélo en vitesse. Cette dernière est déterminée en fonction d'un équilibre entre puissance produite et consommée en moyenne ;
- ❖ Moduler la vitesse si l'état de charge n'est pas suffisant pour maintenir cette vitesse.

Cette stratégie simple implique de créer une modulation de la vitesse en fonction des conditions d'opération du système.

La stratégie est basée sur une stratégie figée et non évolutive uniquement dépendante de l'état de charge du système. D'autres dimensions comme la pente pourront également être intégrées à l'algorithme pour améliorer les performances par la suite.

4.4.1 Les différentes dimensions

4.4.1.1 L'état de charge

La stratégie « rule based » consiste à moduler la consigne de vitesse/couple injectée à la machine de façon à tendre vers un système stable au sens de l'équilibre énergétique. Ce paragraphe présente deux essais de stratégies qui ont été évalués de manière théorique puis pratique.

La stratégie consiste dans un premier temps à définir un état de charge objectif d'équilibre (SOC_{equi}). Le choix de cet équilibre est important et a été fixé à 80% de l'état de charge dans le paragraphe précédent. Ce choix crée deux zones de fonctionnement pour le vélo :

- ❖ Une zone de fonctionnement à assistance : lorsque l'état de charge est supérieur à la valeur d'équilibre, la puissance peut être plus importante, ce qui permet d'augmenter la vitesse de croisière. Par ce biais, l'état de charge peut alors diminuer pour revenir à l'état d'équilibre.
- ❖ Une zone de fonctionnement en régénération : lorsque l'état de charge est bas, le système va réduire la puissance de la machine de façon à réduire la vitesse et à augmenter le SOC .

Les deux stratégies ont pour objectif de moduler la vitesse. La première méthode a consisté à utiliser les principes de la logique floue afin de créer une loi de gestion de l'énergie prudente permettant au vélo de maximiser ses chances de franchir un obstacle. La seconde méthode propose une solution plus ambitieuse avec une gestion alternative des modes dégradés. Les deux stratégies sont présentées plus bas dans ce paragraphe.

Dans les deux cas, les mêmes conditions ont été respectées :

- ❖ Si le SOC du SSE est élevé, alors, augmenter la vitesse de consigne ;
- ❖ Si le SOC est à son niveau d'équilibre, alors, garder la vitesse d'équilibre comme consigne principale ;
- ❖ Si le SOC du SSE est bas, alors, diminuer la vitesse.

La Figure 4-15 représente la première stratégie déterminée à l'aide de la logique floue et est ainsi basée sur des règles et des paramètres modifiables au besoin via les fonctions d'appartenance. Cette stratégie, créée à partir des fonctions d'appartenances présentées sur la Figure 4-10 est la stratégie N°1 dite prudente. La Figure 4-16 représente une seconde stratégie construite à l'aide de la logique floue. Cette stratégie est la stratégie N°2 dite ambitieuse. Une des différences majeures est la modification des fonctions d'appartenances de manière à intégrer une zone de fonctionnement non dégradé. En effet dans le cas de la première stratégie dite prudente, tout écart à l'état de charge d'équilibre provoque immédiatement une variation de vitesse qui garantit une meilleure robustesse, mais provoque également un comportement plus discontinu. En effet, une variation d'état de charge se traduira immédiatement en une variation de vitesse. Dans le cas de la stratégie ambitieuse, le comportement du vélo ne change pas sur une plage d'état de charge (Figure 4-16 : de 40 à 80%).

4.4 Détermination de la variation de la consigne de vitesse

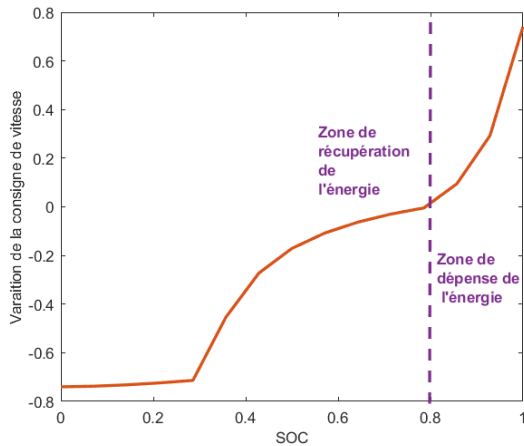


Figure 4-15 : Exemple de stratégie, obtenue grâce à la logique floue, de modulation de la vitesse de consigne du vélo en fonction de l'état de charge du pack (dite stratégie prudente : N°1). Cette stratégie modifie automatiquement la vitesse de consigne du véhicule en fonction de l'état de charge.

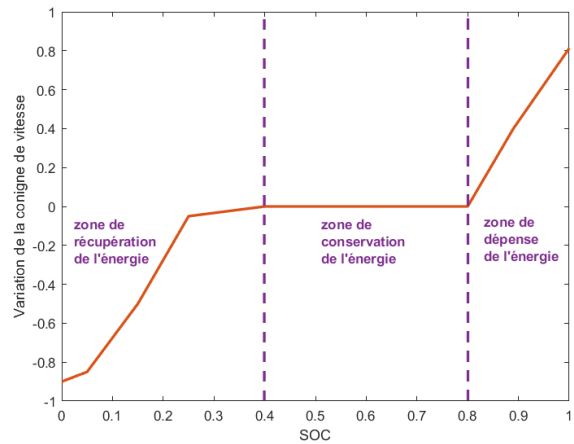


Figure 4-16 : Exemple de stratégie, obtenue grâce à la logique floue, de modulation de la vitesse de consigne du vélo en fonction de l'état de charge du pack (dite stratégie ambitieuse : N°2). Cette stratégie inclue une zone de fonctionnement non différenciante ou aucune action de correction de vitesse n'est entreprise.

4.4.1.2 La pente

Une seconde dimension peut être identifiée et insérée à la réflexion. En effet, la stratégie précédente vise à maintenir un état de charge stable. Cependant, certaines situations peuvent nécessiter une autre lecture des cartographies présentée ci-dessus. Par exemple, le seuil d'équilibre de 80% de SOC ne doit pas opérer dans une pente ascendante importante au risque de rapidement se retrouver dans une situation à faible vitesse et donc à plus faible rendement (voir Chapitre III, paragraphe 3.2.1) et potentiellement inconfortable pour l'utilisateur. Dans ce cas précis, un décalage du seuil d'équilibre vers des valeurs plus faibles peut être préconisé. La même préconisation pourrait être mise en place pour garantir un bon fonctionnement du frein régénératif en descente.

La stratégie ambitieuse apporte un début de solution en permettant une zone complète de fonctionnement sans compensation par la vitesse. En contrepartie, la stratégie ambitieuse propose une modulation de la vitesse très rapide une fois les seuils de SOC (ici 40% ou 80%) atteints.

4.4.2 Résultats numériques

Des simulations numériques à l'aide des outils Matlab/Simulink (présentés au Chapitre III paragraphes 3.3.3.1 et 3.4.3) ont été entreprises dans un premier temps afin de valider la pertinence des stratégies proposées ci-dessus. Le critère de résultat proposé est basé sur le temps nécessaire pour effectuer le parcours. L'écart entre le temps de parcours optimal déterminé par la programmation dynamique ($t_{optimal}$) et le temps de parcours de la solution proposée ($t_{solution}$) est une image de la performance de la solution qui sera notée O . Ainsi, le critère de performance, exprimé comme un pourcentage d'augmentation du temps de parcours, sera défini par :

$$O = \frac{t_{solution} - t_{optimal}}{t_{optimal}} \quad 4.8$$

Les résultats numériques présentés sur la Figure 4-17 et la Figure 4-18 valident la fonctionnalité des stratégies présentées dans ce paragraphe. En effet, les simulations sont complètes puisqu'elles parviennent à arriver au bout du parcours vallonné avec respectivement 20 et 50 Wh d'énergie embarquée. De plus, les commandes en couple dérivées de ces nouvelles stratégies pilotées en vitesse (la vitesse reste la consigne principale) sont visuellement très proches de celles présentées au paragraphe 4.2.

Le Tableau 4-1 présente le critère de performance sur la base d'un pack de 8 Wh et confirme que les stratégies sont fonctionnelles puisque le vélo complète les trajets avec succès. De plus, les résultats confirment que la stratégie prudente (N°1) est plus conservatrice, moins performante que la seconde, car elle affiche des temps supérieurs à ceux obtenus avec la seconde stratégie (voir le Tableau 4-1).

Le trajet légèrement vallonné présenté sur la Figure 4-8 est moins sollicitant pour le pack que la colline de 50 m de dénivelé et permet d'avoir des résultats proches (à 15% près) des résultats optimaux. La Figure 4-20 est représentative de la stratégie ambitieuse (N°2), moins conservatrice et qui n'apporte pas de correction de la consigne sur la zone centrale. Il est possible de noter la différence de *SOC* entre le début et la fin du parcours, l'équilibre n'est pas maintenu sur cette zone. La différence énergétique permet à cette stratégie d'être plus rapide (augmentation de la vitesse moyenne) et de quasiment égaler les résultats de la programmation dynamique (3% d'écart).

	Stratégie 1	Stratégie 2
Colline unique	+35%	+15%
Trajet vallonné	+15%	+3%

Tableau 4-1 : Ecart de temps simulé entre la programmation dynamique et la stratégie « rule based » pour le cas critique d'un petit pack (8 Wh).

4.4 Détermination de la variation de la consigne de vitesse

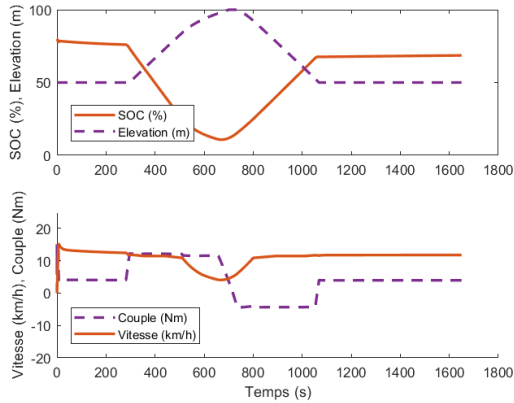


Figure 4-17 : Exemple de résultat simulé sur parcours avec 50 m de dénivelé et un stockage de 20 Wh pour la stratégie de pilotage ambitieuse ($N^{\circ}2$).

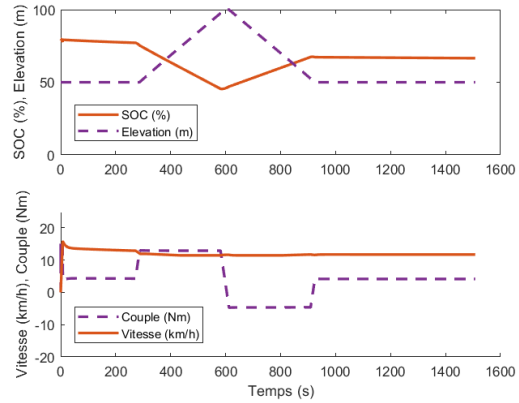


Figure 4-18 : Exemple de résultat simulé sur parcours avec 50 m de dénivelé et un stockage de 50 Wh pour la stratégie de pilotage ambitieuse ($N^{\circ}2$).

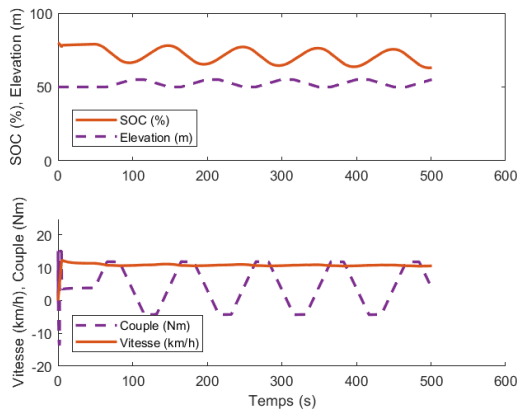


Figure 4-19 : Exemple de résultat simulé sur parcours vallonné pour le profil de gestion d'énergie prudent ($N^{\circ}1$).

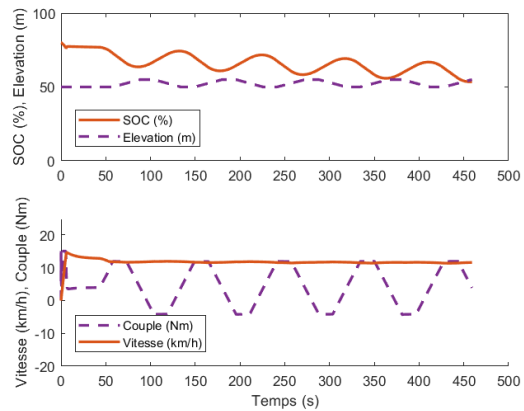


Figure 4-20 : Exemple de résultat simulé sur parcours vallonné pour le profil de gestion d'énergie ambitieux ($N^{\circ}2$) :

4.4.3 Robustesse et sensibilité des algorithmes

La résistance aux aléas est un enjeu qui est important pour le vélo. En effet, il est primordial que le vélo puisse continuer à rouler, même dans les situations défavorables, quel que soit l'état de charge du système. Les stratégies présentées dans ce chapitre tentent de solutionner le problème en présentant un mode de pilotage stable. Ainsi, les stratégies utilisées permettent de revenir à l'équilibre si l'état de charge dérive. Ce phénomène a été décrit plusieurs fois et semble fonctionner puisque plusieurs modes dégradés ont été testés avec succès : énergie potentielle à fournir plus importante que l'énergie embarquée, cas de dérive dû à de mauvais paramètres pour le calcul de la vitesse d'équilibre (voir le paragraphe 4.4.2).

Ce paragraphe va tenter de réaliser une étude de sensibilité de l'algorithme à la variation des paramètres. Plusieurs types de variation peuvent être analysés :

- ❖ Les variations inattendues de parcours, c'est le type d'essais qui a été présenté dans ce chapitre. Le véhicule est alors capable de s'adapter à la nouvelle situation et de franchir l'obstacle, même en cas d'énergie embarquée faible (voir le paragraphe 4.4.2).
- ❖ Une mauvaise estimation de l'état de charge (*SOC*). Aucun paramètre ne garantit alors le fonctionnement stable si l'état de charge dévie, le vélo est susceptible de se retrouver à vitesse minimale et sans assistance car la stratégie présentée ici ne gère pas directement l'estimation du *SOC*. La robustesse sur ce type de variation nécessiterait d'avoir un estimateur dédié.
- ❖ Un mauvais calcul de la vitesse d'équilibre peut avoir des conséquences sur le pilotage. En effet, c'est un point important et complexe à estimer, car les paramètres sont susceptibles de varier pour de nombreuses raisons : changement de cycliste, changement de revêtement, changement de pneus, etc. L'objectif de ce paragraphe est de venir étudier brièvement l'impact d'une modification inattendue des paramètres principaux sur la conduite (coefficient de roulement, poids, coefficient aérodynamique).

La sensibilité (*S*) est définie comme la variation du temps de parcours (Δt) sur une variation de paramètre (variation de masse Δm , variation de l'aérodynamisme ΔSC_x). Par exemple, l'augmentation du temps de parcours due à une augmentation de la masse est définie par la sensibilité telle que :

$$S = \frac{\Delta t}{\Delta m} \quad 4.9$$

Puisque la sensibilité est potentiellement non linéaire, quelques essais de simulations ont été déterminés et présentés pour la stratégie prudente (N°1) sur le parcours légèrement vallonné (voir Tableau 4-2).

Paramètre variant (<i>X</i>)	<i>X</i>	ΔX	$\frac{\Delta X}{X}$	Δt	<i>S_t</i>	ΔSOC	<i>S_{SOC}</i>
Masse (<i>M_v</i>)	100 kg	20 kg	+20 %	+10 %	2.7 s /kg	12 %	0.6 %/kg
Aérodynamisme (<i>SC_x</i>)	0.5 m ²	0.2 m ²	+40 %	0.8 %	20 s /m ²	2 %	0.1 %/m ²
Roulement (<i>C_r</i>)	0.01	0.01	+100 %	15 %		20 %	

Tableau 4-2 : Sensibilité des résultats aux variations de paramètres sur un trajet de 1500m légèrement vallonnés.

Le comparatif des évolutions temporelles et d'état de charge montre que le système peut être partiellement impacté par la modification des paramètres comme le changement de masse ou de coefficient de roulement du système. L'aérodynamisme impacte ici peu les mesures, car le vélo se déplace à une vitesse d'équilibre relativement faible qui minimise l'impact des frottements de l'air dans les conditions de simulations (voir le paragraphe 4.2). Un meilleur calcul de la vitesse d'équilibre intégrant des estimateurs de modèles permettrait d'améliorer les résultats. Cependant, les variations de paramètres modifient le comportement du système sans pour autant diverger.

4.5 La plateforme de test

4.5.1 Une plateforme intérieure gérée par Dspace

Afin de valider les résultats présentés dans ce chapitre, mais aussi de pouvoir effectuer les essais présentés au Chapitre V, une plateforme expérimentale a été assemblée à l'ESTACA. Cette dernière nous a permis, grâce à un outillage spécifique, de pouvoir surveiller l'ensemble de la chaîne de conversion du cycle ainsi que de nombreux signaux images des caractéristiques mécaniques, électriques ou physiologiques. L'objectif a aussi été d'immerger les personnes participant au test au maximum. Pour faire cela, une mise en situation grâce à un vrai vélo et un écran géant interactif a été mis en place.

La plateforme est constituée des éléments listés ci-dessous et illustrées par la Figure 4-21 et la Figure 4-22 :

- ❖ Un ensemble générateur permettant de convertir l'énergie humaine mécanique sous forme électrique. Celui-ci est constitué de :
 - Une machine EC Flat 160 de la marque Maxon Moteur. Elle est utilisée dans le quadrant générateur afin de convertir l'énergie mécanique sous forme électrique.
 - Une multiplication mécanique par 20 (plateau pignon et réducteur épicycloïdal) entre le pédalier et le générateur permettant une cadence de pédalage maximale de 110 tr/min. Le rapport multiplicateur est cohérent avec la zone de fonctionnement optimale du générateur.
 - Un capteur de couple (Sensel Measurement SM200) permettant la mesure du couple mécanique utilisateur en entrée de la génératrice. Cette mesure intermédiaire permet de réaliser un bilan global, étage par étage de la conversion de la génératrice.
 - Un contrôleur générateur associé à la génératrice (génératrice ECflat®) permet le pilotage en couple de la machine (le pilotage en vitesse est lui déporté et calculé par le Dspace). Le contrôleur est un ESCON 70/10 supportant un courant de phase maximum de 70 A.
- ❖ Un pack de supercondensateurs Eaton de 400 F et tension maximale de 54 V. Le pack est composé de 20 cellules en série encapsulées et protégées grâce à un fusible ainsi qu'un arrêt d'urgence. L'énergie totale du pack est donc de 8.1 Wh soit 6 Wh d'énergie utile (voir Chapitre II, paragraphe 2.2.1).
- ❖ Une machine brushless de la marque Golden moteur permet de transformer l'énergie électrique sous forme mécanique et vice versa. Cette machine est de topologie direct drive ce qui autorise l'activation du frein régénératif. Le pilotage est effectué grâce à un contrôleur open source issu du projet VESC [193]. Ces contrôleurs permettent de calibrer et régler la totalité des paramètres de pilotage et de régulation grâce à une interface graphique dédiée [193].

- ❖ Des capteurs de courant/tension réalisés par les soins de l'entreprise STEE. Ces capteurs sont calibrés avec une erreur de $\pm 0.5\%$. Cette gamme de précision permet de garantir une mesure fiable des puissances électriques dans le système.
- ❖ Les consignes de couple pour la génératrice (voir Chapitre V, paragraphe 5.3) et pour la machine, l'acquisition des signaux et la gestion du management de l'énergie est effectuée grâce à une plateforme Dspace associée à l'environnement Matlab Simulink pour la programmation. Cette plateforme permet de faire de l'acquisition et de la génération de signaux, mais aussi de modifier en temps réel des constantes de l'algorithme, ce qui représente un gain de temps considérable.

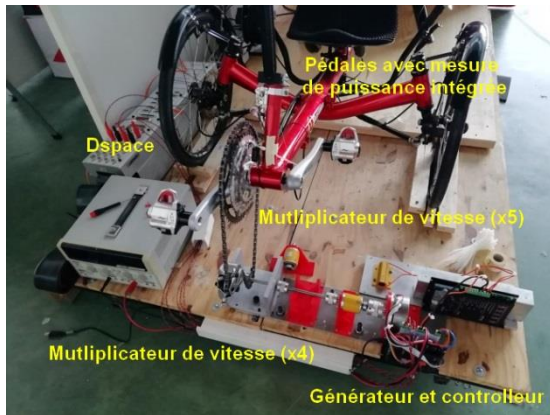


Figure 4-21 : présentation du banc de test : agrandissement sur la partie générateur.



Figure 4-22 : présentation de la plateforme de test, vue globale avec la machine, les supercondensateurs et l'écran pour faire défiler le parcours.

4.5.2 Des outils de mesure universels communicants sous le format ANT+

Le protocole ANT+ est un protocole sans fil opensource démocratisé visant à unifier la transmission sans fils de mesures dans le domaine du sport et du biomédical [194]. Chaque type de capteur dispose de son propre protocole et trame spécifique dédiée au sein de la structure ANT+. Tous les capteurs répondant à la norme ANT+ sont intercompatibles entre émetteurs et récepteurs.

L'instrumentation utilisée pour réaliser la mesure de puissance du cycliste au niveau des pédales, de son rythme cardiaque ainsi que le pilotage du frein électromécanique de la roue motrice utilisée lors de nos essais est piloté grâce au protocole ANT+. Le système est composé :

- ❖ de pédales Look Power® avec capteur de puissance et de cadence intégré. La fréquence d'envois des données est de 2 Hz. Les pédales de mesure de puissance sont pratiques, car elles s'adaptent à toutes les manivelles dotées de filetages standard (soit la majorité des cycles).
- ❖ d'un capteur de fréquence cardiaque, la fréquence d'envoi des données est également de 2 Hz. Il se fixe par bande scratch sur l'avant-bras, ce qui est pratique pour la mise en place de tests avec différentes personnes. La précision de ce capteur n'est

pas fournie par le fabricant, mais des essais utilisateurs montrent un bon niveau de fidélité [195].

- ❖ Un récepteur (Bryton® 410) communiquant via le protocole sans fil ANT+ avec les capteurs et qui se charge de collecter et enregistrer les données. Il est également possible d'enregistrer le signal GPS pour les essais en extérieurs (voir Chapitre V, paragraphe 5.4.3).
- ❖ Une plateforme Tacx® élite (home trainer professionnel), compatible Ant+ permettant de simuler l'effort en fonction de la vitesse du cycle en conditions simulées proches des conditions réelles. L'utilisateur peut par exemple renseigner un profil altimétrique pour s'entraîner. Ce home-trainer a un usage double puisque c'est grâce à lui que les essais seront réalisés sur le vélo hybride série et sur un vélo standard. Cela permet de mettre en place les résultats présentés dans ce chapitre ainsi qu'au Chapitre V.
- ❖ Le logiciel open source Golden Cheetah qui permet d'extraire et de visualiser les données issues du protocole ANT+. Le logiciel est doté de nombreuses fonctionnalités de post traitement des données, mais aussi de puissants outils d'entraînement comme la possibilité de synchroniser la plateforme Tacx avec une vidéo et par conséquent faire défiler cette dernière en fonction de la vitesse de croisière du véhicule comme illustré sur la Figure 4-22 [196].

4.6 Résultats typiques et validation du modèle de vélo

Le vélo hybride série dispose de nombreux signaux à analyser. Un certain nombre d'entre eux ont déjà été présentés dans les chapitres précédents (charge/décharge du système de stockage, vitesse, commande de la machine, ...). La simulation des signaux a permis de comprendre les rôles respectifs des différents sous-ensembles ainsi que les mécanismes d'échange et de conversion d'énergie.

La Figure 4-23 illustre un exemple pratique de mesure de la chaîne de conversion d'énergie au niveau du générateur. L'étude des pertes peut être menée à partir des différentes mesures de puissances successives sur le banc. Le rendement de la chaîne de conversion peut alors être estimé. Les résultats confirment que le rendement est largement dépendant du point de fonctionnement. Notamment, la Figure 4-23 illustre le phénomène de pertes plus importantes à haute puissance dues aux pertes par effet Joule ayant lieu dans la machine. Le rendement de la conversion moyen présenté ici est de 75%.

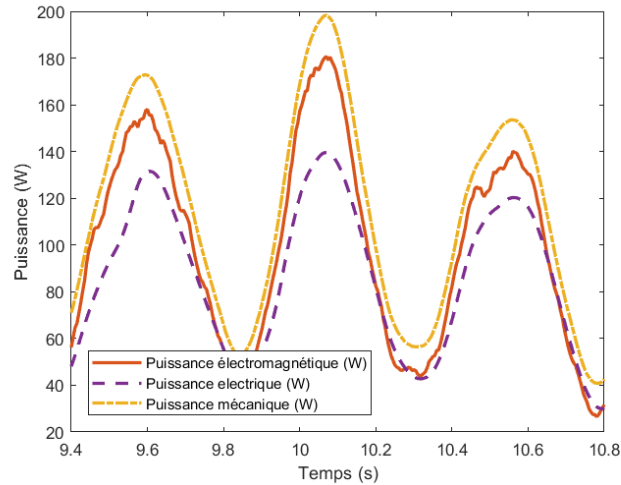


Figure 4-23 : Mesure de la puissance produite par l'utilisateur à différents stades de conversion (la puissance électromagnétique ainsi que la puissance électrique).

La mesure exposée ici sera détaillée plus en détail au Chapitre V, paragraphe 5.3. En effet, l'aspect sinusoïdal de la puissance produite est un élément important du mouvement d'un cycliste qui nécessite d'adapter le pilotage de la génératrice.

4.6.1.1 Le vélo hybride série : un véhicule répétable

Le vélo hybride série est un véhicule répétable, c'est-à-dire que ces performances globales sont prévisibles et modulable grâce au découplage et à l'intelligence embarquée. Ainsi, un même test effectué plusieurs fois doit donner des résultats similaires. La Figure 4-24 présente les résultats obtenus lors d'essais effectués sur le banc de test présenté ci-dessus. La consigne était de produire une puissance fixe de 100W par individu. Les résultats mesurés sont très proches les uns des autres comme attendu. L'influence du poids et de la physiologie du cycliste n'est pas prise en compte sur ce banc qui est statique et pourrait avoir une influence sur les résultats (voir paragraphe 4.4.3). Cependant, chacun des trois essais illustre le découplage entre le mouvement de l'utilisateur ainsi que la puissance transmise au vélo.

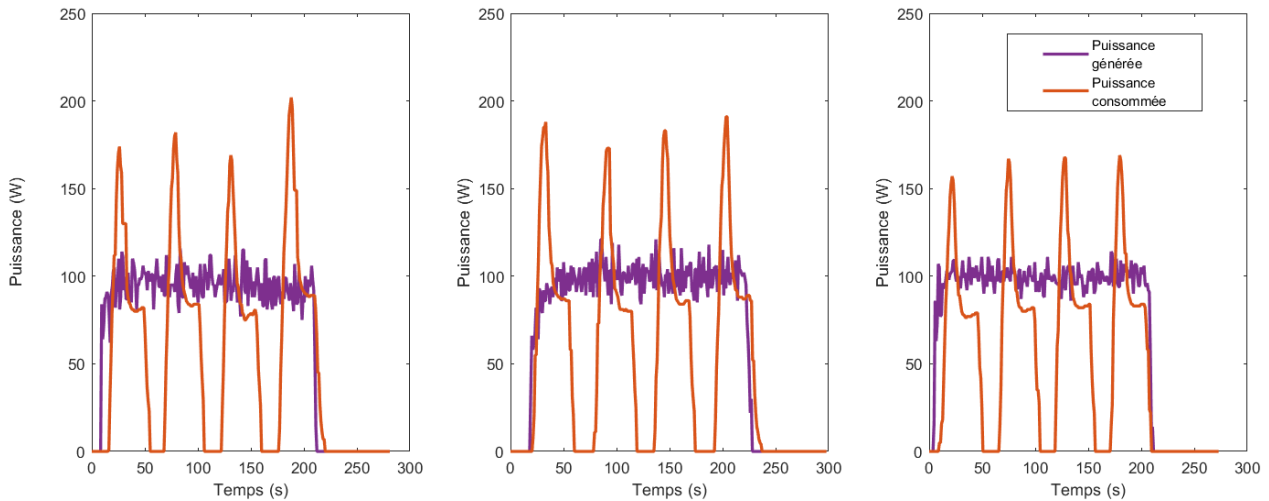


Figure 4-24 : Illustration de trois essais indépendants effectués par trois sujets différents avec la même consigne de puissance générée : 100 W et ainsi qu'une pause obligatoire de 12 s tous les 250 m.

4.7 Mise en situation et mesure de stratégies autonomes

Les stratégies présentées au paragraphe 4.4.1 ont pu être mise en œuvre sur la plateforme présentée au paragraphe 4.5. Les résultats peuvent alors être comparés aux simulations sur la base du temps de parcours comme présenté au paragraphe 4.4.2. Les résultats doivent permettre de valider la stratégie de gestion par modulation de la vitesse d'équilibre sur la base de l'observation du *SOC*.

4.7.1.1 La stratégie « rule based »

La Figure 4-25, la Figure 4-26, la Figure 4-27 et la Figure 4-28 illustrent des résultats représentatifs des solutions de gestion par cartographie présentées dans ce chapitre. La Figure 4-25 et la Figure 4-26 illustrent le maintien en vitesse réalisé par l'algorithme comme stratégie sub-optimale définie au paragraphe 4.2. Les deux stratégies sont fonctionnelles et permettent au vélo d'arriver dans des temps proches à ceux de la simulation (voir Tableau 4-3).

Les signaux présentés sur chacune des figures montrent l'état de charge, l'élévation, le couple de la machine et enfin la vitesse du véhicule. Le comportement réel est très proche du comportement simulé avec une augmentation du couple dans les montées et une diminution de ce couple, parfois négatif, dans les descentes. L'état de charge oscille donc au rythme du dénivelé.

Les essais permettent de mettre en évidence le côté conservateur de la solution prudente (N°1). En effet, les résultats montrent la stabilité de l'état de charge à l'échelle d'un parcours entier pour cette solution. Cette capacité s'explique par la modulation immédiate de la vitesse avec l'éloignement de l'état de charge de référence (La vitesse augmente et diminue légèrement au rythme du dénivelé). À l'inverse, la stratégie ambitieuse (N°2) dispose d'un plateau d'état de charge conséquent où la vitesse n'est pas impactée. C'est ce plateau qui est mis en avant sur la Figure 4-26. En effet, la vitesse d'équilibre est légèrement trop élevée (cas d'une masse véhicule

modifiée par exemple). Cette erreur implique une consommation d'énergie supérieure à celle produite et donc une diminution lente de l'état de charge, sans compensation tant que l'état de charge reste sur la zone centrale sans modulation.

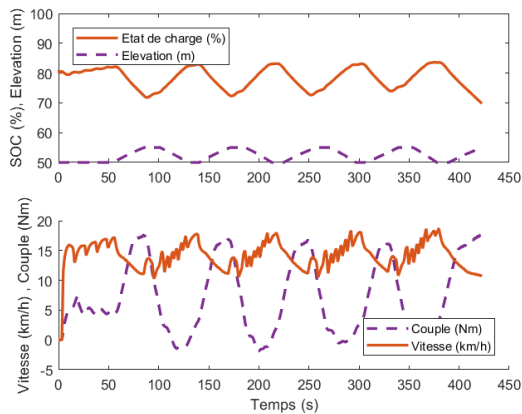


Figure 4-25 : Exemple de résultat sur parcours vallonné pour le profil de gestion d'énergie prudent ($N^{\circ}1$).

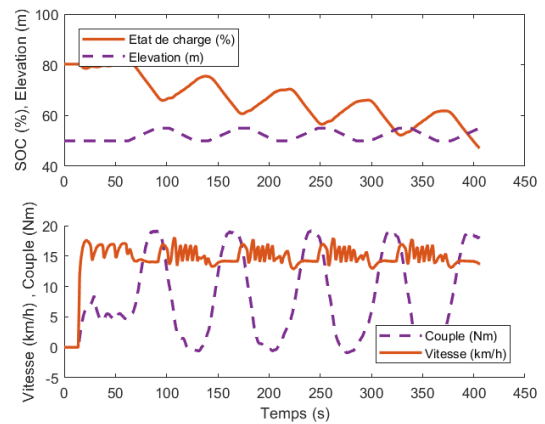


Figure 4-26 : Exemple de résultat sur parcours vallonné pour le profil de gestion d'énergie ambitieux ($N^{\circ}2$).

La Figure 4-27 et la Figure 4-28 illustrent expérimentalement l'influence de la quantité d'énergie embarquée sur la performance du cycle lors d'un franchissement requérant plus d'énergie que le stockage n'en dispose (sur la Figure 4-28). La première des constatations est que le vélo associé aux deux stratégies de pilotage arrive au terme du parcours. Ceci est encourageant, car les machines fonctionnant à basses vitesses ont des mauvais rendements qui auraient pu se traduire par l'incapacité du vélo à cumuler les contraintes d'une ascension et d'un faible état de charge. Les essais ont ici montré que le contrôle a réduit la vitesse afin de garantir une énergie consommée proche de celle produite.

La stratégie 2 à ici été la plus performante sur la base du temps de parcours, car la stratégie prudente diminue rapidement la vitesse afin de garantir un état de charge stable et présente, par conséquent, des résultats moins bons que ceux présentés pour la stratégie ambitieuse.

La Figure 4-27 illustre une situation où un VHS avec une capacité embarquée de 20 Wh à un comportement très proche de la solution identifiée par la programmation dynamique. Les temps de parcours des solutions sont comparés au paragraphe suivant.

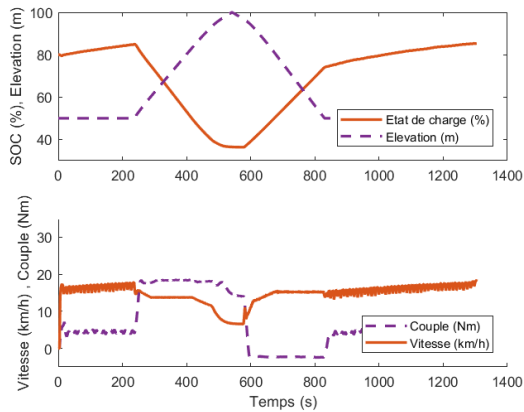


Figure 4-27 : Exemple de résultat sur parcours avec 50 m de dénivelé (13.6 Wh) et un stockage de 20 Wh pour la stratégie de pilotage ambitieuse (N°2).

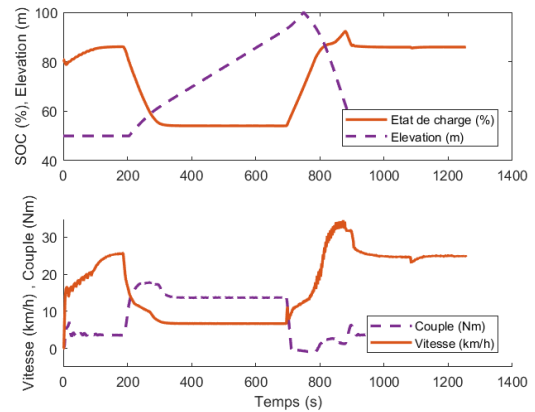


Figure 4-28 : Exemple de résultat sur parcours avec 50 m de dénivelé (13.6 Wh) et un stockage de 8 Wh pour la stratégie de pilotage ambitieuse (N°2).

4.7.1.2 Comparaison des performances des solutions

Le critère de comparaison choisi a été le temps de parcours comme image d'une gestion de l'énergie efficace pour le système. Comme présenté au paragraphe 4.4.2, un pourcentage de la différence de temps a été choisi comme critère de sélection.

Une nouvelle comparaison a été entreprise et les différences temporelles, exprimées en pourcentages, sont explicitées par le Tableau 4-3.

	Stratégie 1	Stratégie 2
Colline unique	+2%	-9%
Trajet vallonné	-5%	-3%

Tableau 4-3 : Comparatif des temps entre les essais pratiques et la programmation dynamique.

Des temps inférieurs à ceux déterminés grâce à la programmation dynamique ont été identifiés. Cette constatation n'a a priori pas de sens puisque la programmation dynamique produit la meilleure commande machine associé au meilleur temps possible (dans les conditions de modélisation et de discrétisation données). Les résultats sont donc encourageants, mais sont à moduler en considérant :

- ❖ qu'un rendement moyen de la machine de 0.8 a été pris en compte sur la programmation dynamique, il est possible que le rendement moyen de la machine soit légèrement supérieur dans le cas de l'essai expérimental effectué.
- ❖ le home-trainer reste une inconnue du système avec un comportement de résistance à l'avancement qui ne peut pas être calibré. Ainsi, il est possible que le home-trainer dysfonctionne, et ce, de manière prononcée sur des zones de faible vitesse et de fort couple (montée). Le contact pneumatique/home-trainer est également sujet à un glissement pouvant détériorer la mesure.

En conclusion, les résultats temporels présentés dans ce paragraphe ne sont pas suffisamment fiables pour permettre de conclure de manière pertinente et précise concernant les mesures temporelles. Cependant, la capacité des vélos à aller jusqu'au bout des parcours est importante et permet d'envisager la modification du banc dans l'objectif de valider définitivement les résultats.

4.8 Conclusion de chapitre

Le degré de liberté du vélo hybride série nécessite un pilotage et des stratégies avancées afin d'exploiter l'ensemble du potentiel de ce dernier. Ce chapitre a visé la synthétisation d'une loi de contrôle basé sur l'observation des résultats de la programmation dynamique. La formalisation d'une stratégie générale a ensuite permis de valider une forme de pilotage se rapprochant d'un contrôle en vitesse. Cependant, la petite quantité d'énergie embarquée ne permet pas d'effectuer un tel pilotage sans prendre en compte, en temps réel, la quantité d'énergie encore disponible dans le système de stockage.

Ainsi, des modulations de la consigne de vitesse ont été introduites afin de trouver le meilleur compromis entre vitesse de parcours et robustesse du contrôle.

Les simulations ont permis d'obtenir des résultats proches de ceux issus de la programmation dynamique. Les résultats expérimentaux ont même fait mieux, pour certains essais en ne respectant pas certaines contraintes, ce qui souligne l'importance de travailler de manière plus approfondie sur le réalisme des essais. Cela reste néanmoins très encourageant.

Des études de sensibilité ont de plus mis en avant l'aspect robuste aux aléas des solutions trouvées.

Les perspectives concernant ces travaux mènent à l'intégration des algorithmes sur une plateforme roulante en extérieur. En effet, les algorithmes seraient alors sollicités en cumulant l'ensemble des aléas que l'on peut rencontrer sur la route et solutionneraient les problèmes d'immersion des sujets testés ainsi que les problèmes de simulation du couple résistant sur home-trainer.

CHAPITRE 5. L'humain au centre du bénéfice : Usage et notion d'effort sur un véhicule hybride série

5.1 Introduction	158
5.2 Construction de critères physiologiques pour évaluer la pertinence d'une hybridation série	158
5.2.1 Objectif principal de l'hybride série : diminuer l'impact des pics d'effort.	158
5.2.2 Définition de critères physiologiques	159
5.2.3 Modèle retenu et pertinence	164
5.2.4 Rythme cardiaque, fatigue et énergie métabolique	167
5.3 Pilotage d'une machine électrique à faible inertie en générateur adapté au mouvement de pédalage	168
5.3.1 Problématique et illustration de base	168
5.3.2 Résolution du problème	Erreur ! Signet non défini.
5.3.3 Comparaison des pilotages : performances constatées	Erreur ! Signet non défini.
5.4 Impacts comparés d'un effort énergétiquement équivalent entre le vélo hybride série et un vélo traditionnel	170
5.4.1 Caractéristiques des sujets testés	171
5.4.2 Test en intérieur à énergie équivalente constante	172
5.4.3 Les essais en extérieurs	175
5.5 Mesure de l'impact du rendement du vélo hybride série	178
5.6 Conclusion de chapitre	180

5.1 Introduction

Les chapitres précédents ont montré et étudié la faisabilité technique de l'architecture hybride série comme véhicule à propulsion 100% humaine. Cependant, au centre de la préoccupation de l'architecture hybride série, un intérêt majeur attendu concerne le gain physiologique pour le cycliste.

En effet, la technologie hybride série permet de lisser l'effort humain fourni et ce chapitre apportera des éléments de compréhension et de réponse à la sollicitation physique du cycliste et à son impact sur sa fatigue comparée à un vélo traditionnel.

Le vélo à architecture hybride série pose également des problèmes d'usage. En effet, le mouvement de pédalage n'est plus relié à la dynamique du vélo. Le mouvement résultant peut être perturbant et des stratégies de commande des machines électriques seront présentées.

5.2 Construction de critères physiologiques pour évaluer la pertinence d'une hybridation série

5.2.1 Objectif principal de l'hybride série : diminuer l'impact des pics d'effort.

Un des objectifs majeurs de l'architecture hybride série est de proposer à l'utilisateur de pédaler, à cadence et/ou puissance indépendamment de la topographie et des aléas du parcours. Puisque le pédalier est découplé du mouvement du vélo grâce à l'absence de chaîne mécanique, le cycliste peut alors pédaler à régime constant, à couple constant ou encore à puissance constante, selon le mode de pilotage, sur toute la durée du trajet.

Ainsi, à énergie fournie équivalente, l'utilisateur fournira cette quantité de manière beaucoup plus régulière sur un vélo hybride série que sur un vélo à chaîne. Cela est d'autant plus vrai que le trajet est vallonné ou comporte des discontinuités (comme des arrêts).

La Figure 5-1 montre un exemple de deux profils de puissance où l'énergie finale fournie est équivalente. Seulement, grâce au découplage, cette puissance discontinue peut être fournie de manière régulière, avec une valeur presque constante, et l'on peut supposer de façon moins fatigante pour le cycliste.

La Figure 5-2 montre la variation typique de puissance d'un cycliste lors d'une phase de mise en mouvement d'un vélo standard entre deux arrêts. Le profil de puissance observé est composé de trois phases : un pic de puissance produit pour accélérer, une phase de maintien en vitesse, puis, une phase de roue libre où le vélo continue d'avancer grâce à son inertie et l'énergie cinétique accumulée. La Figure 5-2 n'est qu'un exemple, mais le phénomène (accélération, maintien, roue libre) peut être observé sur l'ensemble des personnes testées (voir paragraphe 5.4.3).

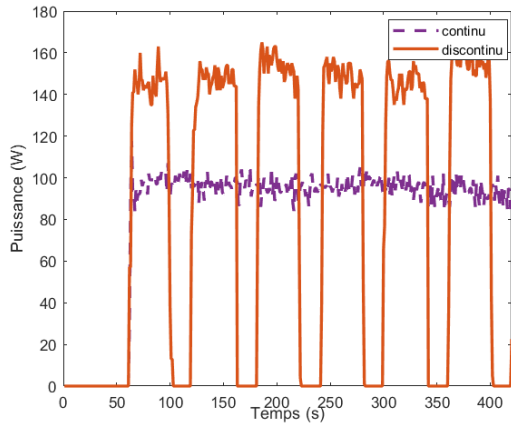


Figure 5-1 : Exemple de deux profils de puissance générés avec une énergie totale fournie équivalente (obtenus par des exercices pratiques en environnement contrôlé).

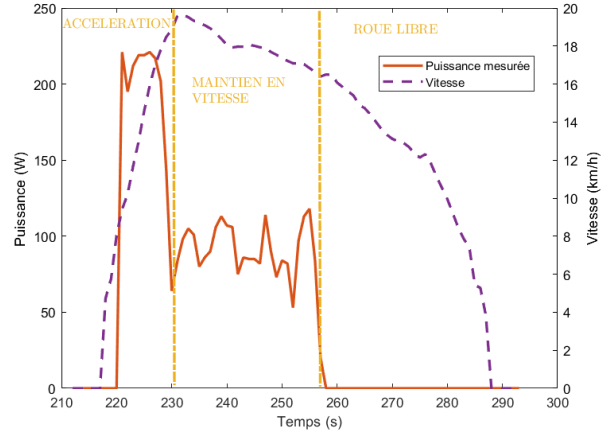


Figure 5-2 : exemple typique de vitesse et de puissance utilisateur sur un parcours entre deux arrêts urbains (obtenu par un exercice pratique en extérieur).

L'objectif du vélo hybride série est de lisser ces pics de puissance. Une partie de ce chapitre tentera de définir et d'orienter une proposition de modèle permettant de quantifier, ou au minimum de qualifier, l'impact sur la forme physique de ces « à-coups » de puissance ainsi que les possibles gains d'un lissage de ces derniers.

5.2.2 Définition de critères physiologiques

La notion de fatigue est une notion complexe dont la définition reste floue et dépendante du domaine d'observation. Les paragraphes de cette section abordent plus en détail la définition de la fatigue. Elles montrent qu'il est difficile de donner une définition exacte et concluent sur les différents indicateurs permettant d'estimer l'état de forme et de sollicitation énergétique du cycliste [197]–[199].

5.2.2.1 Quelques définitions

Un cycliste, et plus généralement un humain, est un convertisseur d'énergie. En effet, ce dernier transforme de l'énergie stockée sous forme organique (lipides, glucides, ...) ainsi que de l'oxygène en effort mécanique résultant P_H (W), qui, comme toute puissance, peut être décrite par la multiplication de deux variables, ici, la vitesse de rotation ω_H ($rad. s^{-1}$) par le couple T_H (Nm) du cycliste [1]. L'être humain admet des limites dans sa capacité à produire un effort (voir plus bas). De nombreuses études scientifiques ont abordé la question des limites physiques concernant les cyclistes de haut niveau [201]–[203]. Certains des paramètres couramment utilisés et définis dans les études sont les suivants :

La FTP (Functionnal Threshold Power) représente la puissance maximale qu'un utilisateur va pouvoir délivrer sur une heure. Celle-ci varie d'environ $70 W$ pour un non-sportif à $450W$ pour les meilleurs cyclistes [204].

La PMA (Puissance Maximale Aérobie) est la puissance maximale à laquelle un utilisateur atteint sa VO_2Max . Elle peut être maintenue environ 5 minutes.

Le VO_2Max est défini comme le volume d'oxygène maximal consommé par un sportif lors d'un effort aérobie à la limite de ses capacités. La VO_2Max peut donc être mesurée pendant un test de PMA [205].

La quantité de VO_2Max est exprimée en $mL \cdot min^{-1}$.

Le **rythme cardiaque (HR ou r)** est exprimé en Hz ou bpm (*battements/minute*). Celui-ci augmente avec l'effort physique et peut dépasser le seuil de 200 bpm . Le rythme cardiaque maximal d'un individu diminue avec l'âge. Un indicateur couramment utilisé par les cyclistes pour connaître son rythme cardiaque maximal est d'appliquer la formule suivante (rythme cardiaque maximum = 220-âge). Sa valeur au repos est également une indication importante de l'état de forme d'un individu [206].

Aérobie et anaérobie, Ces deux modes de fonctionnement de la contraction musculaire font référence à deux manières de libérer l'effort. Le mode aérobie est un mode de fonctionnement des muscles utilisant directement l'oxygène absorbé. Il est le mode de production de la puissance pour les efforts « longs » ou d'endurance ($P_H < \approx P_{FTP}$). Le mode anaérobie est lui un procédé rapide de libération de puissance, les réactions en jeu sont plus puissantes, mais émettent des résidus (lactates) qui peuvent paralyser (crampe, fatigue, ...) les muscles s'ils sont présents en quantité trop importante. Ainsi, il n'est pas possible de fournir des efforts importants ($P_H > P_{FTP}$) pendant une durée importante ou de manière répétée [207].

Il est finalement pertinent de remarquer qu'un cycliste admet une limite de couple, c'est-à-dire une force maximale qu'il peut exercer sur les pédales. L'utilisateur peut théoriquement délivrer ce couple à vitesse nulle. Un utilisateur a aussi une cadence de pédalage maximum où il ne peut plus fournir d'énergie. En considérant que l'évolution du couple maximal est linéairement décroissant en fonction de la vitesse, ce qui a été validé par de multiples études, la puissance (définie comme le produit de la cadence et du couple) fournie par un utilisateur admet un maximum à la moitié de la cadence maximale [201], [208]. Le phénomène est illustré et mesuré sur la Figure 5-3 et la Figure 5-4.

La capacité à fournir un effort a été expliquée par Hills, qui a formulé la variation de la force en fonction de la vitesse [209]. De nombreux travaux s'appuient sur ces modèles musculaires afin de proposer des modélisations simulant la fatigue à l'épuisement (c.à.d. modéliser le muscle sur des efforts intenses et observer la décroissance de force disponible) [198]. Ces modèles dynamiques sont intéressants pour observer les efforts courts et intenses. La notion de fatigue progressive pour des efforts ne conduisant pas à l'épuisement est plus difficilement évaluable et ne conduit pas à un modèle unique et mesurable [210]–[212]. La littérature est malheureusement peu fournie sur ce type d'évaluation de la fatigue dans le cas d'efforts peu intenses de personnes peu ou pas entraînées.

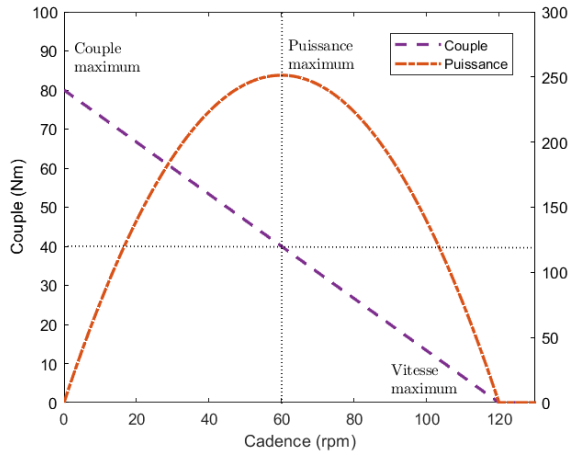


Figure 5-3 : Exemple de limite en couple d'un cycliste et la puissance associée passant par un maximum (Courbe théorique basée sur le modèle musculaire de Hill).

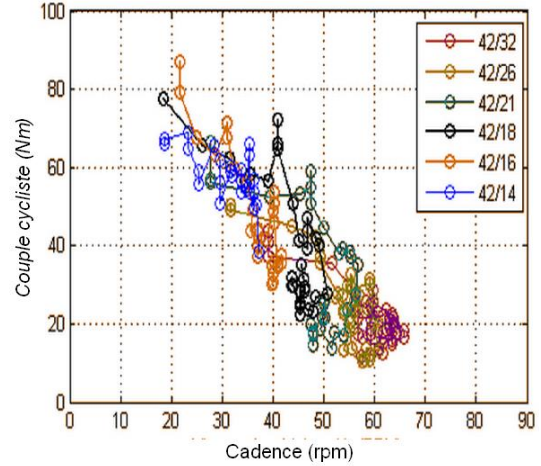


Figure 5-4 : Mesure du couple de fonctionnement cycliste sur plusieurs sujets en fonction de la cadence et du rapport de denture plateau pignon [51].

5.2.2.2 Performances standard d'un utilisateur

Une des questions importantes à laquelle ce manuscrit va tenter d'apporter une réponse est d'identifier la puissance et les limites d'un utilisateur quotidien du cycle. En effet, ces valeurs sont peu définies dans la littérature pour un utilisateur moyen parcourant peu de kilomètres annuels [213]–[215]. La littérature se concentrant majoritairement sur l'étude des sportifs de haut niveau.

Une estimation correcte de la puissance produite par les cyclistes était aussi nécessaire au dimensionnement optimal de la génératrice qui doit convertir l'énergie mécanique en énergie électrique (voir Chapitre III, paragraphe 3.2.1).

De manière à pouvoir comparer les utilisateurs et classer leurs niveaux de performances, une première étape consiste à définir une puissance normalisée P_H^{norm} ($W \cdot kg^{-1}$) en fonction de la masse de l'utilisateur $M_{cycliste}$ (kg) de façon à pouvoir classer les cyclistes :

$$P_H^{norm} = \frac{P_H}{M_{cycliste}} \quad 5.1$$

$W \cdot kg^{-1}$	5s hommes	5min hommes	F'TP hommes	F'TP femmes
Professionnel	19.4-25.18	5.59-7.6	4.8-6.6	4.1-5.69
Entraîné	12.5-16	3.2-4.3	2.6-3.6	2.16-3.08
Moyenne sans entraînement	11.26	2.74	2.22	1.83

Tableau 5-1 : Puissance maximale indicative développée par différentes catégories de cyclistes en W/kg [214], [216].

Ainsi, il est possible de définir la puissance maximale qu'une personne peut fournir pendant une heure en fonction de son poids et de son niveau d'entraînement. Le Tableau 5-1 illustre une partie de la table de lecture permettant d'estimer les performances physiques d'un individu. Par

exemple, une personne de sexe masculin pesant 70 kg pourra, en moyenne, développer 160 W ($2,22 \times 70$) sur une heure s'il est représentatif des personnes non entraînées.

La FTP ne représente cependant pas la puissance qu'un utilisateur peut fournir sans se fatiguer, mais seulement une donnée physique importante de sa capacité maximale à délivrer de l'énergie. Des études ont caractérisé des zones d'effort permettant de classifier l'influence de l'effort sur le corps [216], [217]. Les résultats sont présentés sur le Tableau 5-2.

Zone d'intensité	% FTP	%PMA	Ressenti utilisateur
I1	< 55%	<40%	Accompagnement des pédales, effort non ressenti, récupération active
I2	55 – 75%	40-50%	Effort léger
I3	75 – 90%	50-65%	Concentration nécessaire, effort ressenti
I4	90 – 105%	65-80%	Sensation de fatigue importante
I5	105 – 120%	80-90%	Augmentation de son taux de VO_2Max
I6	120 – 150%	>90-%	Augmentation de la capacité anaérobie,
I7	Non Déf.		Relance, démarrage

Tableau 5-2 : Seuils de puissances fonction de la puissance maximum d'un individu et la fatigue associée [216], [217].

L'étude menée par Coggan, exposée ci-dessus, montre que la gamme de puissance utile avec un effort modéré semble se situer entre 50 et 75% de la FTP. La Figure 5-5 est un travail synthétique présentant les performances en puissance de différents athlètes et catégories de personnes en fonction du temps [216]. Ces résultats illustrent la décroissance de la puissance que peut fournir un sujet dans le temps et appuient les conclusions précédentes.

Ces considérations permettent de déduire la gamme de puissance généralement développée par les cyclistes non entraînés, soit environ de 50 à 150 W pour des cyclistes dont la masse varie de 50 à 90 kg.

Cette estimation a été corrélée par la thèse de David Grossoleil [51], qui a aussi effectué des mesures sur différentes personnes, ou bien encore par celle de David Gordon Wilson [218].

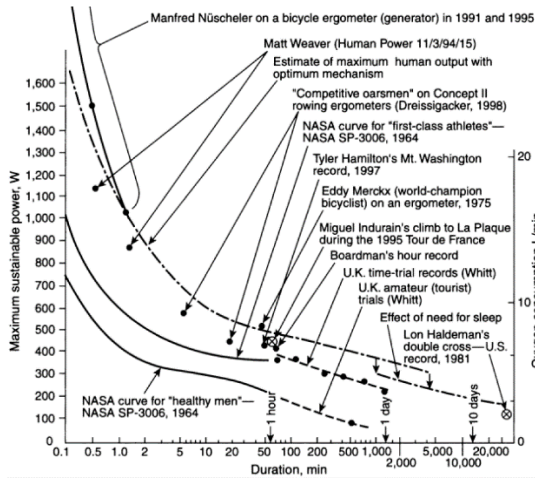


Figure 5-5 : Graphique temps, puissance maximum délivrée pour plusieurs types de profil sportifs. La courbe NASA curve for « healthy men » (sur le bas) indique des performances similaires à celle du Tableau 5-2.

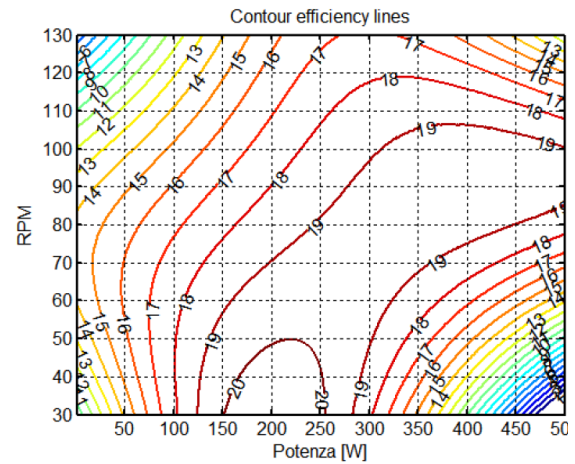


Figure 5-6 : Cartographie d'une « Gross Efficiency Map » [60].

5.2.2.3 Le rendement du corps humain

Être capable de déterminer le rendement du corps humain permettrait de retrouver la puissance d'entrée métabolique réellement nécessaire pour fournir une puissance mécanique de pédalage.

Remonter à l'énergie métabolique consommée par le cycliste permettrait par la suite d'imaginer un système d'optimisation similaire à celui généralement employé sur les véhicules hybrides thermiques [77], [219]. L'objectif serait alors d'optimiser le point de fonctionnement de la source énergétique d'entrée, ici, l'être humain (le lecteur peut se référer à l'annexe C pour plus de renseignement sur les stratégies d'optimisation d'un véhicule hybride).

La puissance d'entrée n'étant pas directement mesurable, les indicateurs de performance du corps humain ne peuvent donc être définis comme un rapport de puissance. Par conséquent, le « rendement » du corps humain ne peut pas être simplement exprimé.

Un indicateur couramment utilisé est l'indicateur nommé Gross Efficiency η_{GE} qui compare la puissance produite P_H (W) à l'absorption d'oxygène VO_2 ($mL \cdot min^{-1}$) [59] :

$$\eta_{GE} = \frac{P_H}{VO_2} \quad 5.2$$

La littérature approxime régulièrement le corps humain comme un système complexe permettant de transformer 15 à 25% de l'énergie métabolique en énergie mécanique au sens de la « Gross Efficiency » [220]. Sur la Figure 5-6, il est aisé de voir que le corps humain dispose d'une zone, ici centrale, où son fonctionnement est plus efficace. Il est donc important, d'essayer de maintenir le point de fonctionnement du corps dans cette zone.

De manière à pouvoir mesurer η_{GE} , un capteur de consommation d'oxygène, généralement un masque associé à un débitmètre, doit être installé sur le patient. L'installation, le calibrage et l'utilisation sont complexes, et doivent être faite par des personnes qualifiées (la réalisation de

tests physiologiques nécessite l'approbation d'un comité d'éthique [221]) : ce type d'essais n'a pas été mis en place dans le cadre de cette thèse, mais reste une perspective intéressante.

5.2.3 Modèle retenu et pertinence

Le paragraphe précédent a permis de mettre en regard la complexité du corps humain, sa diversité et la difficulté à mesurer certains paramètres et à les analyser. Ainsi, parmi l'ensemble des paramètres mesurables, la VO_2 ainsi que l'EMG (ElectroMyoGraphie, technique permettant par exemple de mesurer le potentiel de contraction des muscles) nécessitent du matériel lourd ainsi que des compétences d'analyse et de l'expérience qui n'ont pas pu être réunis pour cette thèse. D'autres paramètres existent, mais nécessitent des procédures encore plus complexes. Le taux de lactate est par exemple un indicateur de la saturation des muscles et de leur état de fatigue, mais nécessite des prélèvements sanguins...

C'est donc pour des raisons techniques (acquisition de matériel et mise en place) et de compétences internes (pas de partenaires physiologue ou médecin physique) que nous avons choisi de surveiller uniquement :

- ❖ La puissance mécanique produite, mesure devenue assez simple avec l'élaboration et la démocratisation de la mesure de puissance cycliste pour les professionnels et les amateurs.
- ❖ Le rythme cardiaque, comme une « image de l'effort » fourni par le cycliste. En effet, la mesure de rythme cardiaque est aisée et de nombreux capteurs sont disponibles sur le marché.

5.2.3.1 *Le rythme cardiaque comme critère de performance*

Le critère de performance choisi pour surveiller la dépense énergétique est par conséquent le rythme cardiaque. Ce dernier est non seulement aisé à mesurer, mais il permet aussi d'avoir une bonne idée générale de l'effort aérobie fourni par un utilisateur.

En effet, de nombreuses études montrent la corrélation du rythme cardiaque et de la quantité d'oxygène absorbée par le corps, cette relation est souvent représentée par une fonction linéaire, mais le coefficient de proportionnalité est dépendant de l'individu (morphologie, sexe, entraînement physique, ...). Le rythme cardiaque est aussi un indicateur permettant de remonter à la « gross efficiency » [222]. Ce dernier est également une image du volume d'oxygène absorbé et de la quantité d'énergie consommée par l'utilisateur (Energy expenditure EE) (voir paragraphe 5.4.2).

La complexité des phénomènes biophysiques, les variations de comportements inter-individus, et même les variations de comportement intra-individuel qui dépendent entre autres de l'état de fatigue ou de la nutrition, ont finalement mené à la conclusion que seul l'étude du rythme cardiaque serait effectuée car il est facilement mesurable et analysable sur de nombreux sujets.

La Figure 5-7 illustre une situation emblématique de la gestion d'effort qui est réalisée sur un vélo hybride série et la réponse typique du rythme cardiaque équivalent. Sur cette figure, les énergies fournies sont équivalentes, pourtant, les rythmes cardiaques ont des profils différents.

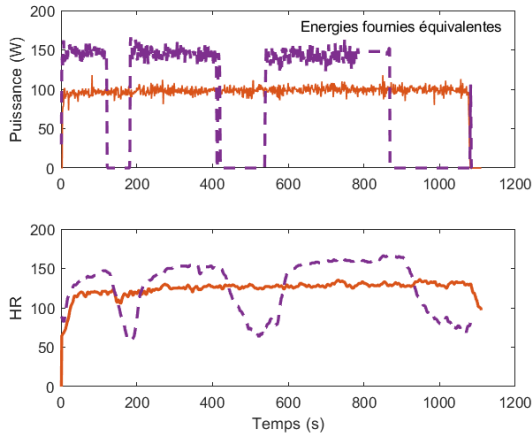


Figure 5-7 : Exemple de deux profils de puissance à énergie fournie équivalente entre eux et le rythme cardiaque associé.

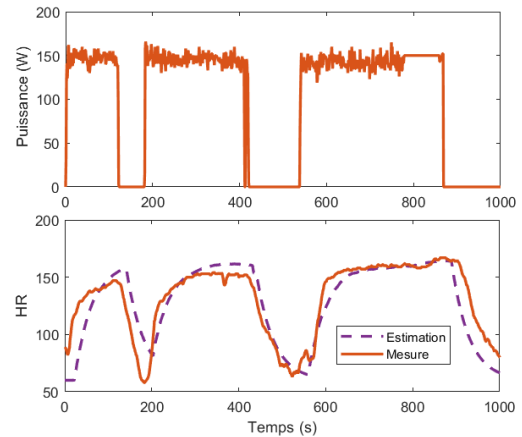


Figure 5-8 : Modélisation du rythme cardiaque par un modèle dynamique du premier ordre.

5.2.3.2 Un modèle pour simuler la réponse cardiaque

Comparer l'évolution du rythme cardiaque d'une personne dans de nombreuses situations s'est vite révélé problématique devant la longueur et le nombre des tests à effectuer. Une première observation du rythme cardiaque pourrait montrer que la dynamique de ce dernier ressemble à une évolution de la réponse temporelle à l'échelon d'une équation différentielle du premier ordre. Un modèle du « premier ordre » n'a pas donné des résultats satisfaisants d'estimation du rythme cardiaque ($R^2 < 0.70$) (voir Figure 5-8). Ainsi, il a été préféré un modèle plus complexe présenté par Mazzoleni [212].

Ce modèle de rythme cardiaque se base sur un ajustement statique de paramètres. En effet, le rythme cardiaque est notamment dépendant de la cadence et de la puissance de pédalage. Ainsi, à une puissance et une cadence de pédalage donnée, une valeur du rythme cardiaque en régime permanent peut être trouvée, $f(P_H, \omega_H)$. Cette dernière comprend, dans cette formulation, des coefficients linéaires (c_0, c_1, c_2), quadratiques (c_3, c_4) et de corrélation (c_5) :

$$f(P_H, \omega_H) = r_0 + c_1 P_H + c_2 \omega_H + c_3 P_H^2 + c_4 \omega_H^2 + c_5 P_H \omega_H \quad 5.3$$

Ensuite, la dynamique de la fréquence cardiaque r est décrite par l'équation différentielle 5.4 du premier ordre qui prend en compte l'écart à la fréquence cardiaque au repos r_0 (bpm), et l'écart à la valeur maximale du rythme cardiaque r_x (bpm). Des constantes sont à identifier dans ce modèle (A, B, α, β).

Le rythme cardiaque d'équilibre instantané D est un paramètre dynamique qui varie en fonction de la valeur du rythme cardiaque en régime permanent f et permet de modéliser un système d'ordre 2 en combinant les équations 5.4 et 5.5. Lors d'un changement d'état du cycliste (P_H, ω_H), le rythme cardiaque d'équilibre instantané (D) tend vers f et le rythme cardiaque simulé (r) tend vers D .

$$\frac{dr}{dt} = A (r - r_0)^\alpha (r_x - r)^\beta (D - r) \quad 5.4$$

$$\frac{dD}{dt} = B(D - f(P_H, \omega_H)) \quad 5.5$$

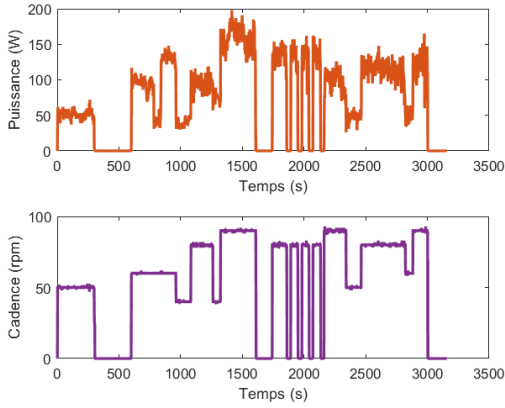


Figure 5-9 : Profil de puissance et de cadence pour l'identification des paramètres.

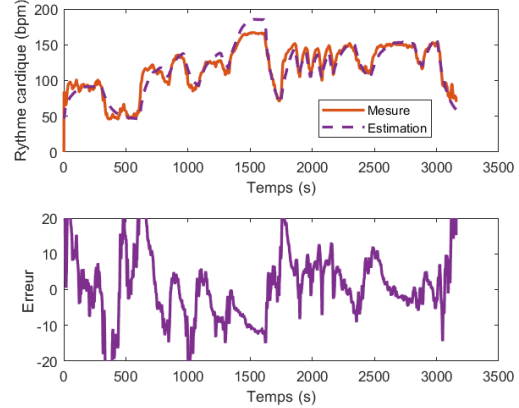


Figure 5-10 : Rythme cardiaque mesuré et estimé ainsi que l'erreur d'estimation (en %).

Ce modèle permet d'obtenir une modélisation des profils de rythme cardiaque pour chaque individu suite à l'identification de paramètres physiques tels que le rythme cardiaque maximal et le rythme cardiaque au repos du sujet.

Le modèle a été estimé sur des essais indépendants présentés sur la Figure 5-9 et la Figure 5-10. Ces tests incluent des cadences et des puissances diverses afin de pouvoir estimer au mieux les paramètres du système. Les estimations sont précises, car tous les profils testés ont une erreur simulée environ égale à $R^2 \approx 0.9$. Le Tableau 5-3 présente les paramètres du modèle pour un sujet (sujet 1, voir paragraphe 5.4.1).

r_0	45 bpm	r_x	192 bpm
A	$4.49 \cdot 10^{-6}$	c_1	$0.67 \text{ bpm}/W$
c_2	$0.1 \text{ bpm} \cdot s/\text{rad}$	c_3	$-0.001 \text{ bpm}/W^2$
c_4	$0.0038 \text{ bpm} \cdot s^2/\text{rad}^2$	c_5	$0.0014 \text{ bpm} \cdot s/(\text{rad} \cdot W)$
B	0.0137	α	1.22
β	1.70		

Tableau 5-3 : Valeurs numériques identifiées pour la modélisation de la réponse cardiaque du sujet 1 à un effort

L'identification des paramètres montre une très forte dépendance du rythme cardiaque à la puissance de pédalage mais une influence moindre vis-à-vis de la cadence de pédalage. L'estimation fournit par ailleurs des résultats de la fréquence cardiaque au repos ($r_0^{reel} \approx 47$) et maximum du sujet ($r_x^{reel} \approx 195$) proche de la mesure réelle.

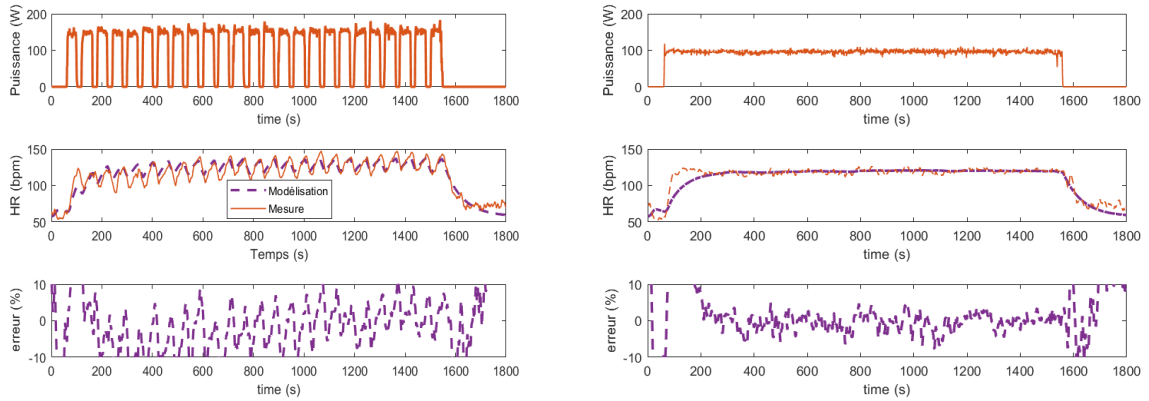


Figure 5-11 : modélisation du rythme cardiaque pour un profil discontinu de puissance et l'erreur de modélisation associée.

Figure 5-12 : modélisation du rythme cardiaque pour un profil continu de puissance et l'erreur de modélisation associée.

La Figure 5-11 et la Figure 5-12 proposent une estimation du rythme cardiaque sur des profils d'effort continus et discontinus. Les résultats sont déduits du modèle présenté par les équations 5.3, 5.4 et 5.5 ainsi que des paramètres exposés dans le Tableau 5-3. L'erreur entre le rythme cardiaque réel et le simulé est faible (inférieur à 10%) et valide la bonne adéquation du modèle.

5.2.4 Rythme cardiaque, fatigue et énergie métabolique

L'objectif de l'expérience présentée dans le paragraphe 5.2.1 est de pouvoir comparer les performances d'un cycliste soumis à des efforts énergétiques mécaniques équivalents. Afin de pouvoir déterminer si l'architecture hybride série apporte un gain, le rythme cardiaque sera analysé comme une mesure de l'intensité de l'activité physique. Ainsi, une activité physique où le rythme cardiaque moyen est inférieur à une autre activité présenterait des avantages, car elle serait moins intense et provoquerait potentiellement moins de fatigue.

La définition de la fatigue reste un point de blocage majeur, car sa définition est floue et dépendante de l'activité. Les moyens de la mesurer ou de la calculer sont donc indéterminés.

L'observation du rythme cardiaque pour qualifier la mesure de la fatigue est cependant une hypothèse raisonnable, car la littérature a pu montrer une forte corrélation linéaire entre le rythme cardiaque, le volume d'oxygène absorbé et l'énergie métabolique réelle dépensée EE (J/min) [27]–[29].

Ainsi une formule empirique (équation 5.6) liant ces indicateurs est donnée dans la littérature [222]–[224]. Les coefficients (rythme cardiaque au repos r_0 , coefficient de relation entre le rythme cardiaque et l'énergie dépensée φ) sont largement dépendants des individus.

$$EE(t) = \varphi(r(t) - r_0) \tag{5.6}$$

Pour déterminer l'énergie dépensée au cours d'un effort, il est donc possible d'intégrer l'équation 5.6 dans le temps. Une série d'essais a été réalisée et exposée au paragraphe 5.4. Les résultats mesurés seront argumentés et diversifiés par l'intégration de simulations au paragraphe 5.5.

5.3 Pilotage d'une machine électrique à faible inertie en générateur adapté au mouvement de pédalage

L'analyse de la notion de fatigue associée à l'énergie et la puissance fournie par le cycliste se base aussi sur l'hypothèse que le mouvement de pédalage soit fluide. Or, il se trouve que pédaler sur un générateur est fondamentalement différent que de pédaler sur un vélo où même sur un « home-trainer ». Ainsi, un des premiers défis relevés a été de comprendre et d'améliorer le confort de pédalage afin de pouvoir évaluer la notion de fatigue ultérieurement.

5.3.1 Problématique et illustration de base

Deux notions complémentaires doivent être illustrées afin d'expliquer le mouvement mécanique de pédalage à l'échelle d'un tour de pédale :

- ❖ La variation du couple instantané de pédalage T_H (Nm) dépendant de la position angulaire θ_H (rad) des pédales. La Figure 5-13 et la Figure 5-14 illustrent le phénomène et la variation de T_H θ_H peut être exprimée par la relation suivante :

$$T_H \theta_H = \frac{T_H^{max} + T_H^{PMH}}{2} - \frac{(T_H^{max} - T_H^{PMH})}{2} \cos 2\theta_H \quad 5.7$$

avec T_H^{PMH} le couple minimum restitué idéalement aux points morts haut et bas des pédales et T_H^{max} le couple maximum, idéalement fourni à $\theta_H = \frac{\pi}{2}$ et $\frac{3\pi}{2}$. La Figure 5-15 illustre des mesures réelles effectuées en milieu contrôlé qui montrent bien que le modèle est approximatif et que les paramètres du modèle changent en fonction de l'environnement [225], [226]. Le mouvement réel d'un cycliste ne suit donc pas le mouvement idéal décrit par l'équation 5.7.

- ❖ La variation de vitesse de pédalage ω_H ($rad.s^{-1}$) est liée aux variations du couple utilisateur et de la charge (frottement de la route, pente, frottement de l'air, voir Chapitre I, paragraphe 1.6.1.1). En considérant le vélo en régime établi (et donc le couple à la roue T_{roue} constant), ainsi qu'une transmission sans pertes et de rapport 1 entre le pédalier et la roue, on trouve :

$$\frac{d\omega_H}{dt} = \frac{T_H - T_{roue}}{J_{velo}} \quad 5.8$$

Ainsi, on peut conclure que plus l'inertie J_{velo} ($kg.m^2$) est importante, ou plus les variations de T_H sont faibles, plus faibles sont les variations de vitesse.

Ce sont bien les variations de vitesse trop importantes qui provoquent une sensation de pédalage non fluide, comme si l'utilisateur était en danseuse dans une côte. La littérature l'indique et des tests ont validé l'hypothèse [58], [59].

Or, la faible inertie d'un générateur ne permet pas de le piloter à couple constant en maintenant des faibles variations de vitesse. En effet, l'amplitude des ondulations de vitesse augmente avec l'augmentation du couple résistant. La sensation de pédalage n'est donc pas fluide lors de la

génération d'une puissance conséquente (voir paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour des résultats).

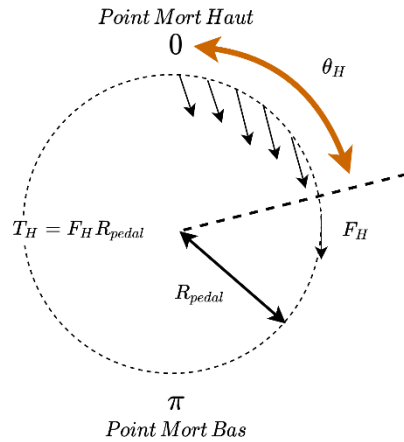


Figure 5-13 : Illustration du mouvement de pédalage autour du pédalier.

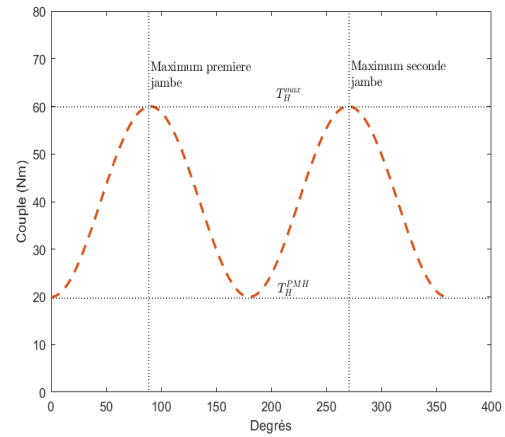


Figure 5-14 : Couple idéal indicatif fourni par un individu en fonction de la position des pédales.

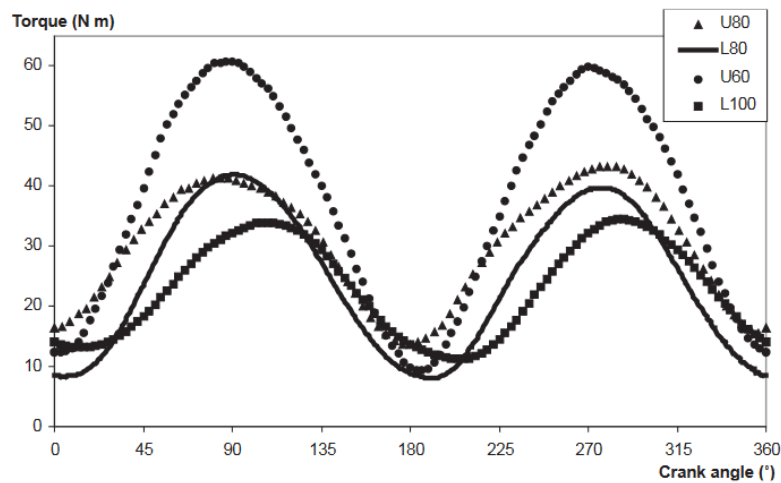


Figure 5-15 : Profil de couple (ordonnée : Nm) en fonction de la position du pédalier (abscisse : angle en degré) mesuré à la PMA pendant l'exercice sur différents terrains et à différentes cadences pour un sujet : L_{80} : plat 80 tr/min ; L_{100} : plat 100 tr/min U_{60} : côte 60 tr/min ; U_{80} : côte 80 tr/min [225].

Note concernant les « home-trainers » fixes à roue d'inertie (vélo d'appartement) : quand le vélo n'est pas en mouvement, une solution pour pallier au manque d'énergie cinétique peut être de rajouter des masses tournantes afin de simuler l'inertie d'un vélo en mouvement, c'est le cas de tous les « home-trainers » fixes. Le démontage d'un « home-trainer » de la marque Décaathlon a par exemple permis d'identifier une roue en fonte de masse $M_{roue} = 4 \text{ kg}$, d'un rayon externe $R_2 = 0.12 \text{ m}$ et de rayon interne $R_1 = 0.1 \text{ m}$. Une multiplication mécanique (rapport de multiplication k_{mult}) de 9 était installée entre le pédalier et la roue, ainsi l'inertie $J_{trainer}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) vue par la cycliste au pédalier est :

$$J_{trainer} = \frac{1}{2} k_{mult}^2 M_{roue} (R_2^2 + R_1^2) = 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad 5.9$$

5.4 Impacts comparés d'un effort énergétiquement équivalent entre le vélo hybride série et un vélo traditionnel

Pour un cycliste pédalant à $\omega_H = 60 \text{ tr/min}$, l'énergie cinétique E_{cin} (J) accumulée est donc :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} J_{trainet} \omega_H^2 = 790 \text{ J} \quad 5.10$$

Ainsi, cette roue permet de bénéficier de la même énergie qu'un utilisateur de 80 kg roulant à environ 16 km/h sur le plat.

PARAGRAPHE CONFIDENTIEL RETIRE DE LA VERSION PUBLIQUE

5.4 Impacts comparés d'un effort énergétiquement équivalent entre le vélo hybride série et un vélo traditionnel

L'analyse du rythme cardiaque pendant des exercices spécifiques doit permettre d'analyser l'impact du lissage effectué par l'architecture hybride série sur la sensation de fatigue du cycliste. Ainsi, une gamme de tests a été envisagée afin de déterminer si le corps était moins sollicité dans le cas d'une architecture hybride série que dans le cas d'un vélo standard.

Deux cas de figure ont été envisagés pour cette étude :

- ❖ Un exercice pratique en intérieur, visant à étudier l'impact d'un effort fractionné par rapport à un effort continu en fonction de la puissance produite. En effet, un cycliste se déplaçant dans un but récréatif pédalera à puissance inférieure à son maximum. Ce test vise à analyser la réponse du corps aux exercices discontinus (voir le Chapitre I, paragraphe 1.8 concernant le cycle de sollicitation de type Devie). Ces tests en intérieur sont facilités par le montage et la prise en main de la plateforme présentée au Chapitre IV, paragraphe 4.5.
- ❖ Deux parcours en extérieur, intégrant des obstacles naturels communs à tout cycliste comme la pente et les arrêts. Des cyclistes effectuent ces parcours. Leurs données sont analysées et ils effectuent ensuite le même parcours en équivalent hybride série sur le vélo de laboratoire présenté au Chapitre IV. Les résultats sont alors comparés.

Les équivalences s'entendent en terme énergétique. Ainsi, dans ce chapitre, un parcours fractionné (vélo standard) ou un parcours continu (vélo hybride série) sont jugés équivalents si l'énergie mécanique fournie par l'utilisateur E_H (J) est équivalente dans les deux cas :

$$E_H = \int P_H dt \quad 5.11$$

L'équivalence implique aussi d'introduire le rendement de la chaîne de conversion. Dans un premier temps, le rendement sera considéré idéal pour les deux types de vélos. Puis, des simulations (voir paragraphe 5.5) permettront d'estimer les performances des utilisateurs sur des vélos de type hybride série pour différents rendements de l'architecture. L'équivalent énergétique sera alors ponctué par le rendement de la chaîne de conversion et permettra de conclure de manière plus réaliste sur l'intérêt du vélo hybride série.

5.4.1 Caractéristiques des sujets testés

L'objectif des tests est donc de pouvoir analyser de manière approfondie l'impact du fractionné sur le rythme cardiaque des cyclistes. Deux types de tests principaux ont été réalisés :

- ❖ Les efforts en intérieur seront imposés en puissance, car les sujets pédalent sur une génératrice permettant ce contrôle. Les consignes de puissance pour les tests en intérieur sont toujours données par rapport aux capacités maximums de l'utilisateur (PMA).
- ❖ Les essais en extérieurs sont laissés libres puisqu'il est difficile d'imposer la cadence ou la puissance sur un vélo en extérieur. Le choix du braquet sur les VSC (Vélo Standard à Chaines) n'est pas imposé à l'utilisateur. La puissance et le temps de parcours sont alors analysés en posttraitement de manière à identifier le profil de puissance à réaliser sur le vélo hybride série menant à un équivalent énergétique.

Un effort fractionné comprend deux variables dominantes qui peuvent influencer le comportement cardiaque :

- ❖ la puissance nominale développée P_H^{nom} , exprimée en pourcentage de la PMA du sujet ;
- ❖ le rapport cyclique α , ou le temps de pause t_{pause} (s) entre deux efforts de durée identique t_{effort} (s).

La PMA des sujets a été déterminée en utilisant le protocole présenté par Vaast [207]. Ce protocole permet de déterminer la PMA (un exemple de test de PMA est illustré sur la Figure 5-16) de tous les individus grâce à un test progressif facilement réalisable :

- ❖ Attendre 2 minutes avant de pédaler afin de stabiliser le rythme cardiaque.
- ❖ Pédaler à 70 W (50 W pour les femmes) pendant 5 min. Cette phase est également une phase d'échauffement.
- ❖ Ensuite, augmenter le niveau de puissance de 30 W (20 W pour les femmes) toutes les 2 minutes.
- ❖ Une fois que le sujet s'arrête, car il ne peut plus pédaler (il a alors atteint sa VO_2max), laisser le sujet au repos encore 3 minutes afin de mesurer le taux de récupération.

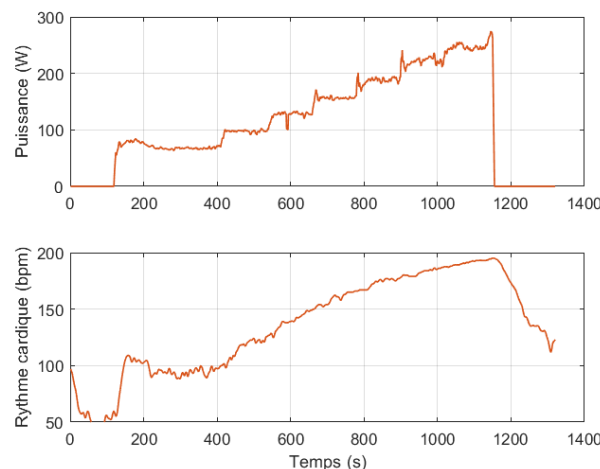


Figure 5-16 : Exemple de mesure de la PMA d'un sujet de 25ans ainsi que la phase de récupération associée.

5.4 Impacts comparés d'un effort énergétiquement équivalent entre le vélo hybride série et un vélo traditionnel

Le taux de récupération τ_R caractérise la capacité du corps à diminuer sa fréquence cardiaque lors d'une phase de repos et est exprimé comme le taux de diminution par rapport à la PMA après 90 secondes, soit (avec r_{PMA} la fréquence cardiaque à la PMA et r_{90s} la fréquence cardiaque 90 secondes après arrêt du test) [207] :

$$\tau_R = \frac{r_{PMA} - r_{90s}}{r_{PMA}} \quad 5.12$$

Les tests ont été effectués par 6 personnes dont les profils sont présentés sur le Tableau 5-4. Les profils sont considérés comme étant représentatifs, car le groupe est composé d'hommes et de femmes de tout âge avec des niveaux de PMA très hétérogènes. Différentes données sont listées dans le tableau dont la taille, l'âge, le poids, le sexe, le rythme cardiaque au repos (mesuré au réveil), la PMA, le taux de récupération (équation 5.12) ainsi que l'indice de masse corporelle (soit la masse sur la taille au carré).

Sujet	1	2	3	4	5	6
Taille (m)	1.68	1.72	1.71	1.81	1.81	1.51
Sexe	H	H	F	H	H	F
Age	25	17	25	57	18	45
Poids (kg)	65	65	78	65	63	80
Indice de Masse Corporelle	23	22	26.7	19.8	19.2	35.0
Rythme cardiaque au repos (bpm)	48	70	68	45	52	80
PMA (W)	250	190	170	280	380	130
τ_R (%)	25	27	37	17	30	24
Nombre de kilomètres annuels à vélo (km)	2 000	100	50	8 000	10 000	0

Tableau 5-4 : Caractéristiques physiques des différents individus ayant effectué le test.

5.4.2 Test en intérieur à énergie équivalente constante

Lors du test statique en intérieur, la problématique du profil de puissance à imposer a été essentielle. L'objectif initial était de réaliser un test représentatif du cycle issu des travaux de Devie avec 50 secondes de pédalage pour une dizaine de secondes d'arrêt (voir Chapitre I). Cependant, une mesure extraite des données présentées au paragraphe 1.8 du Chapitre I, a permis d'identifier qu'un cycliste urbain passait près de 50% de son temps sans pédaler (roue libre, arrêt). C'est donc finalement ce ratio qui a été sélectionné afin d'effectuer des tests fractionnés comme étant la donnée la plus représentative d'un effort cycliste urbain.

La dynamique de variation du rythme cardiaque est globalement lente. Un retard de l'ordre d'une dizaine de secondes peut être observé entre le début de l'effort et les premières variations du rythme cardiaque. Le rythme cardiaque a de plus besoin de plusieurs dizaines de secondes supplémentaires pour se stabiliser. Ainsi, la période de deux minutes a été sélectionnée pour les tests en fractionné. Assez proche du cycle issu des travaux de Devie original (une minute environ), la période de 2 minutes permet une bonne observation des variations de r .

Afin d'avoir des tests plus représentatifs, les niveaux d'efforts imposés ont été indiqués en fonction de la PMA, ainsi, 6 tests, de 22 minutes chacun, ont été effectués par les 6 sujets :

- ❖ Chaque test est précédé d'une minute de pause ;
- ❖ 3 tests fractionnés aux puissances respectives de 60, 80 et 100% de la PMA avec la répartition suivante : une minute d'effort, puis une minute de pause, une minute d'effort, ... ;
- ❖ 3 tests continus, à la moitié de la puissance des test fractionnés de manière à fournir la même énergie globale soit respectivement 30, 40 et 50% de la PMA en continu ;
- ❖ Chaque test se termine par une minute de pause avant d'arrêter l'enregistrement.

La Figure 5-17 et la Figure 5-18 montrent des variations typiques de rythme cardiaque pour les tests effectués. Sur chaque graphique, un test fractionné et un test continu équivalent énergétiquement sont représentés. Il est alors possible de comparer les réponses cardiaques pour différents niveaux d'effort moyen (ici à 100 et 60% de la PMA pour le fractionné).

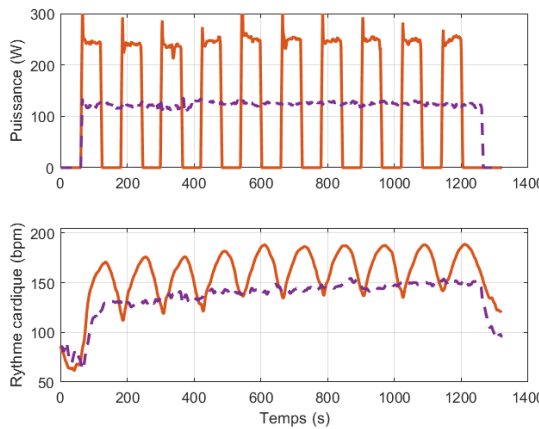


Figure 5-17 : Exemple de profils de puissance et de rythme cardiaque pour 100% de la PMA en fractionné (continu) et 50% en continu (pointillé). Seule la puissance est imposée, la cadence est laissée libre.

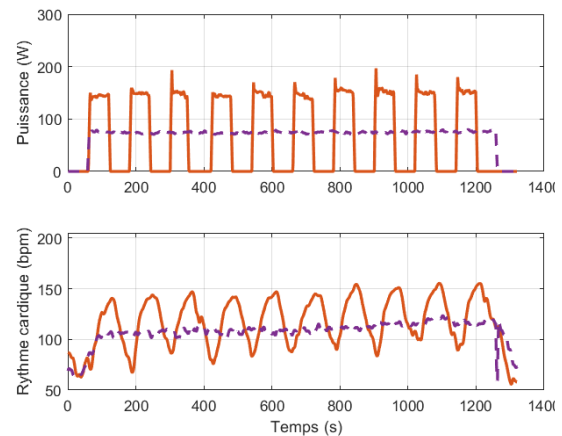


Figure 5-18 : Exemple de profil de puissance et de rythme cardiaque pour 60% de la PMA en fractionné (continu) et 30% en continu (pointillé). Seule la puissance est imposée, la cadence est laissée libre.

Il est possible d'observer que le rythme cardiaque est inférieur lors d'un effort continu, comparé à un effort discontinu. Le phénomène semble s'accroître pour des puissances importantes. De plus, la personne pédalant de manière continue n'est pas sujette aux variations locales oscillatoires de rythme cardiaque que l'on peut observer sur le profil discontinu de puissance.

Afin d'analyser les résultats, la quantité d'énergie dépensée EE_{tot} (J) par le cycliste a été estimée en se basant sur l'équation 5.6 :

$$EE_{tot} \propto \int (r - r_0) dt \quad 5.13$$

avec r_0 le rythme cardiaque au repos.

Cette formulation suppose une dépendance linéaire entre le rythme cardiaque et l'énergie dépensée (voir paragraphe 5.2.2). Ainsi, le gain en énergie G_{HR} (J) peut être exprimé, pour un même temps d'effort et une même énergie mécanique fournie, par une expression dépendante du rythme cardiaque moyen de l'effort fractionné r_{frac} (bpm) et de celui en continu r_{cont} (bpm)

$$G_{HR} \propto (r_{frac} - r_{cont})$$

L'image de l'énergie ainsi exprimée a permis d'étudier le gain en énergie sur cycle en fonction du pourcentage de la PMA, montré sur la Figure 5-19.

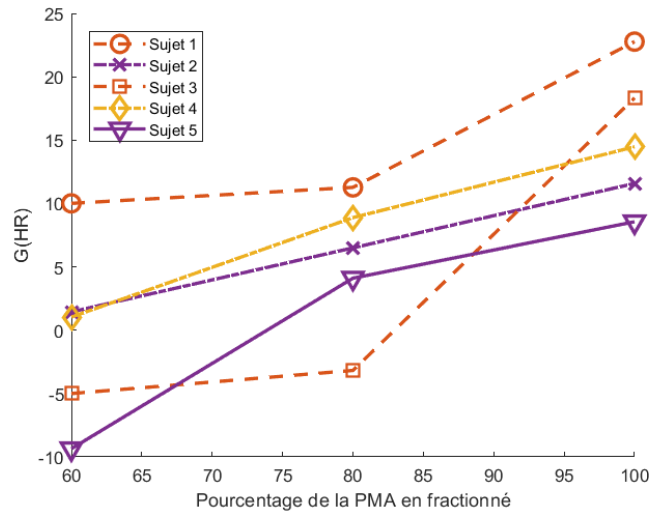


Figure 5-19 : Gain en rythme cardiaque et donc en énergie fonction de la PMA de chaque sujet.

L'analyse des résultats (présentés sur la Figure 5-19) permet d'avancer quelques hypothèses concernant l'avantage de pédaler à rythme constant plutôt que de manière fractionnée, à énergie équivalente :

- ❖ Le rythme cardiaque oscille en dents-de-scie et atteint rapidement son régime moyen de fonctionnement pour les tests fractionnés (voir les Figure 5-17 et Figure 5-18 pour illustration).
- ❖ Les efforts proches de la PMA sont nettement plus significatifs vis-à-vis du gain moyen en rythme cardiaque. Le gain en énergie est donc aussi plus important dans ces situations.
- ❖ Les essais inférieurs au seuil de fatigue (définis sur le Tableau 5-2 comme un seuil situé au environ de 50 à 75% de la PMA) ne semblent pas montrer de gains significatifs aux premiers abords sous l'angle du rythme cardiaque moyen. Certains sujets présentent même des résultats moins performants sur certains exercices (voir sujet 3 et 5 de la Figure 5-19).

Ainsi, les meilleurs bénéficiaires de l'architecture hybride série pourraient être les personnes sujettes à de fortes variations de puissance par rapport à leur capacité. On peut retrouver dans cette catégorie les « hard commuter » qui se déplacent rapidement en ville, les personnes tractant de lourdes charges ou les personnes présentant des déficiences physiques importantes. En effet, l'architecture hybride série permet de contenir les variations de rythme cardiaque et de réduire le rythme cardiaque moyen sur les efforts proche de 100% de la PMA de l'individu (voir Figure 5-19).

Cependant, d'autres phénomènes n'ont pas été abordés par ce protocole. Notamment, l'influence des pics de puissance au démarrage (voir Figure 5-2), bien souvent supérieur à la PMA

et bref ce qui fait que ceux-ci pourraient être fatigants pour le cycliste. Tous les efforts supérieurs à la PMA sont intenses et le rythme cardiaque n'est probablement pas un bon indicateur des efforts anaérobiques auxquels ils appartiennent.

Finalement, l'impact des oscillations du rythme cardiaque a ici été négligé en considérant la dépense énergétique comme proportionnelle au rythme cardiaque moyen (voir équation 5.14). Cependant, les oscillations locales du rythme cardiaque à l'échelle d'une période pour l'effort fractionné peuvent aussi produire de la fatigue et n'a pas donné lieu à des analyses ici. Des passages locaux proches du rythme cardiaque maximal pourraient être un indice de l'utilisation des ressources anaérobiques du sujet [227].

5.4.3 Les essais en extérieurs

5.4.3.1 *Parcours 1 : mise en pratique du cycle Devie*

Au regard des conclusions du paragraphe précédent, la validation du parcours sur un trajet réel est devenue primordiale afin de progresser dans la compréhension de la fatigue et de ses mesures. En effet, les tests réels permettent d'analyser des profils de puissance non imposés à l'utilisateur et ainsi d'obtenir un meilleur comparatif entre vélo hybride série et vélo traditionnel.

Ce manuscrit a déjà référé plusieurs fois à la notion de parcours et deux situations potentielles d'inconfort et de fatigue pour l'utilisateur ont été présentées. La première de ces sources concerne les phases d'accélération, en particulier les démarrages, et la seconde concerne les ascensions, les pentes.

Le paragraphe 1.8 du Chapitre I a présenté le parcours urbain type. C'est ce parcours qui a été imposé aux sujets d'étude et exposé au paragraphe 5.4.2. À la différence des tests en intérieur, le profil de puissance produit par un utilisateur sur un parcours fractionné en extérieur (présenté dans cette section) induit des phases d'accélération, potentiellement anaérobique, et le profil de puissance est donc différent de celui, idéal, illustré en Figure 5-17 et au paragraphe 5.4.2.

Pour tester l'influence d'un tel effort grâce au rythme cardiaque, le protocole suivant a été proposé :

- ❖ tester les sujets avec leur propre vélo ;
- ❖ instrumenter le vélo avec les instruments de mesure présenté au Chapitre IV paragraphe 4.5, c'est à dire les pédales avec capteurs de puissance ainsi que le capteur de fréquence cardiaque ;
- ❖ faire rouler les sujets sur le parcours illustré sur la Figure 5-20 avec l'obligation de s'arrêter tous les 250 mètres ;
- ❖ afin de reproduire une situation similaire à celle présentée dans les chapitres précédents, une pause de 12 secondes est respectée à chaque arrêt ;
- ❖ le cycle est effectué 10 fois avant l'arrêt du protocole.

À la suite de ce premier test, un second test est effectué où les sujets doivent reproduire la même quantité d'énergie, sur la même durée, mais à puissance constante. La valeur de puissance constante est identifiée directement entre les deux essais grâce à une première analyse des résultats sur ordinateur.

5.4 Impacts comparés d'un effort énergétiquement équivalent entre le vélo hybride série et un vélo traditionnel

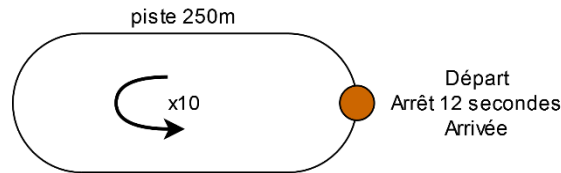


Figure 5-20 : Schéma explicatif du parcours

Les utilisateurs n'avaient pas de consignes particulières concernant l'intensité de l'effort, la consigne a été de rouler comme ils le souhaitaient.

Les résultats présentés sur la Figure 5-21 et la Figure 5-22 illustrent les résultats récupérés à l'issue de ce test. Ils ne sont pas uniformes. En effet, le sujet 1 (Figure 5-21) pédalait à environ 30% de sa PMA en moyenne, et disposait d'un rythme cardiaque plus faible en continu que sur un test fractionné. Le sujet 4 (Figure 5-21) accélérât très fortement ce qui se remarque au profil de vitesse très raide sur les accélérations avec des phases de maintien en vitesse inexistantes. La mesure de puissance visiblement incomplète sur le sujet 4 n'a pas permis de faire un comparatif exact au même titre que les autres sujets.

Concernant les autres sujets, les résultats sont assez variables et ne permettent pas de conclure à un réel bénéfice, et ce même en considérant la transmission série comme idéale.

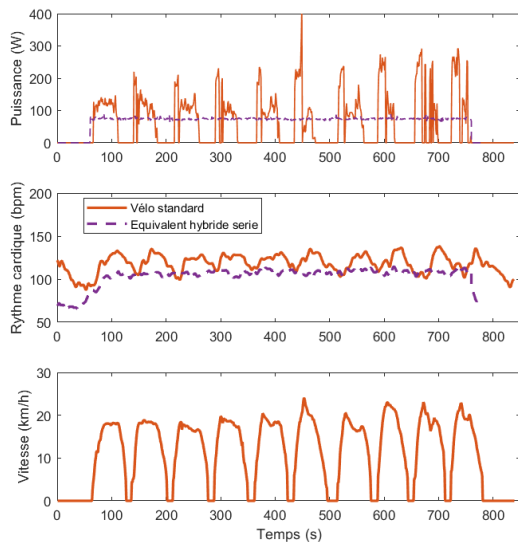


Figure 5-21 : Exemple de profil de puissance et son équivalent hybride série pour un test de type « Devie ».

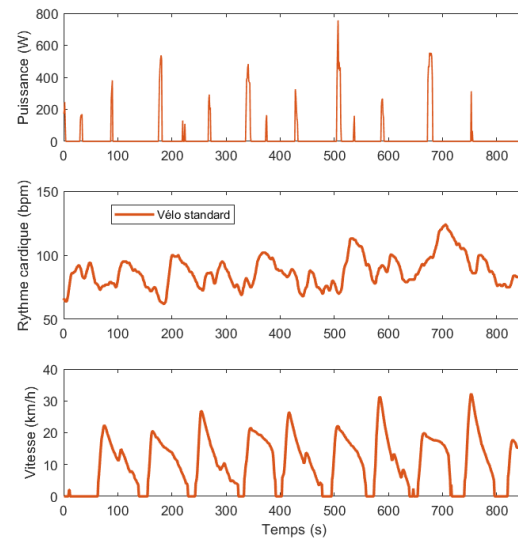


Figure 5-22 : Exemple de profil de puissance pour un test de type « Devie » avec un sujet accélérant de manière très sèche. L'équivalent hybride série n'a pas été réalisé.

5.4.3.2 Parcours 2 : un cycle légèrement vallonné

Un test vallonné présenté sur la Figure 5-23 et la Figure 5-24 a été effectué par les sujets 1, 2, 3 et 4 ainsi que l'équivalent énergétique en mode hybride série. Le protocole est le même que pour le précédent paragraphe. Cependant, le trajet est plus long puisque les sujets devaient effectuer deux fois une boucle de 3 kilomètres ponctués de 4 arrêts ainsi que de 50 mètres de dénivelé.

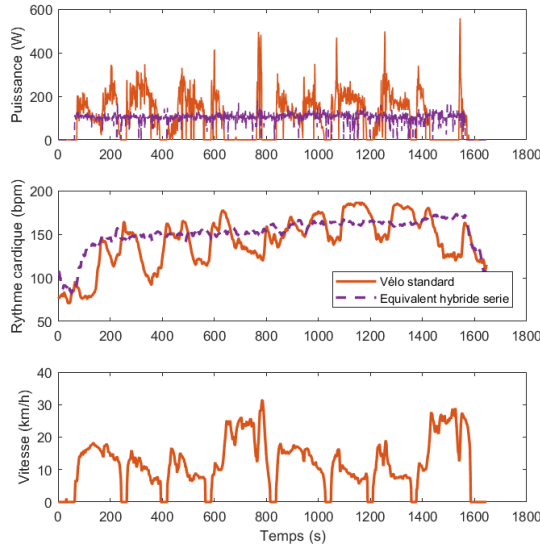


Figure 5-25 : Profil de puissance, de rythme cardiaque et de vitesse pour une double boucle effectuée par le sujet 2.

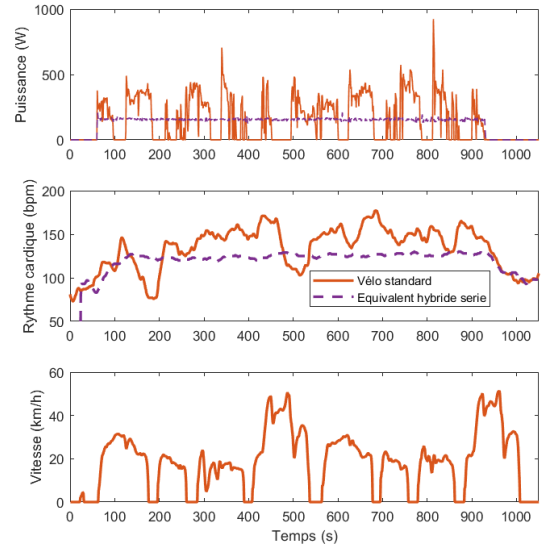


Figure 5-26 : Profil de puissance, de rythme cardiaque et de vitesse pour une double boucle effectué par le sujet 4.

5.5 Mesure de l'impact du rendement du vélo hybride série

Toutes les études menées ci-dessus (voir paragraphe 5.4) ont été basées sur le concept de l'équivalence énergétique. Or, il a été montré que le rendement d'un vélo hybride série peut actuellement atteindre au maximum 70% de rendement (voir Chapitre III, paragraphe 3.3.3).

Il est donc essentiel de connaître l'évolution des résultats présentés au paragraphe 5.4 dans le cas d'un VHS qui aura pour conséquence de forcer l'utilisateur à fournir plus d'énergie pour compenser les pertes.

Ce surplus d'énergie implique de pédaler avec une puissance plus élevée que celle exposée précédemment. Afin d'identifier la modification du comportement cardiaque due à une baisse de rendement de la transmission, des nouveaux relevés de rythme cardiaque ont été simulés grâce au modèle présenté au paragraphe 5.2.3. La Figure 5-28 illustre l'augmentation du rythme cardiaque pour des rendements plus faibles que l'unité.

Les tests présentés dégradent le rendement du VHS comparé à celui des vélos traditionnels. Or ces derniers ne sont eux-mêmes pas parfaits et cumulent une certaine perte d'énergie lors de la transmission quantifiée au Chapitre I paragraphe 1.6.3. La qualification réelle du coefficient n'est donc pas le rendement pur du VHS, mais le rapport suivant :

$$r = \frac{\eta_{VHS}}{\eta_{VSC}} \quad 5.15$$

Ainsi, pour un VSC (Vélo Standard à Chainé) de rendement $\eta_{VSC} = 0.9$ et un rapport tel que $r = 0.7$ alors, le rendement η_{VHS} est équivalent à 0.63.

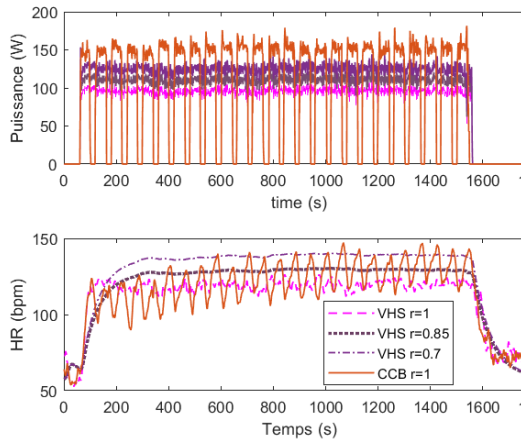


Figure 5-27 : Illustration d'un test d'effort fractionné et son équivalent énergétique en fonction des rendements du vélo hybride série.

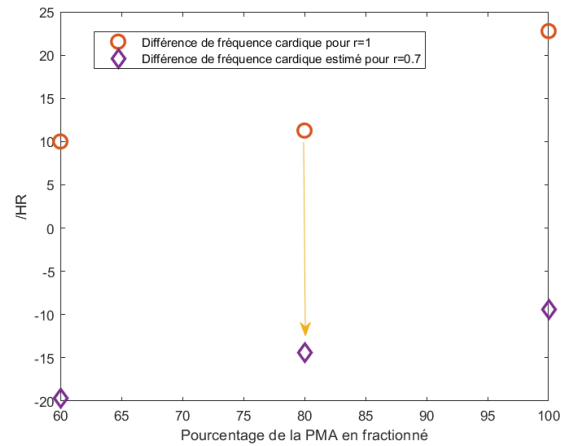


Figure 5-28 : Estimation du shift de performance humaine pour le vélo hybride série dans le cas d'un rendement de 0.7.

Les résultats montrent une augmentation systématique du rythme cardiaque, logique puisqu'il s'agit de fournir plus d'énergie pour compenser les pertes. La Figure 5-28 montre l'évolution du bénéfice sur la base du gain en rythme cardiaque moyen G_{HR} (voir l'équation 5.14) pour le sujet 1 pour un vélo 30% moins efficient qu'un vélo traditionnel. Les résultats semblent appuyer fortement un désavantage du VHS dans ce cas de figure. Cependant un test expérimental en extérieur pourrait être mené afin de mesurer ce phénomène, mais aussi de recueillir les impressions utilisateurs sur les deux architectures.

5.6 Conclusion de chapitre

Ce chapitre a permis d'aborder les questions de fluidité de pédalage, d'usage, mais aussi d'impact physique pour l'utilisateur.

Certaines difficultés techniques et scientifiques sur le mouvement de pédalage ont été levées grâce à une analyse fine du mécanisme de variation de la cadence à l'échelle d'un tour de pédalier et la proposition d'algorithmes simples et implémentables qui ont permis de recueillir la satisfaction des participants ainsi que de générer des résultats positifs selon les critères de qualité de pédalage présentés (minimisation de la variation de cadence).

L'analyse de l'impact physique sur le cycliste s'est révélée plus complexe puisque la définition même de la fatigue a été difficile. Une approche du problème a été présentée par le biais de l'analyse du rythme cardiaque. Les résultats récoltés ont permis d'identifier une relation entre intensité de l'effort et gain pour le cycliste grâce à l'usage d'une structure hybride série. Cette constatation permet déjà de valider, à énergie équivalente, le concept du vélo hybride série comparée au vélo traditionnel pour les parcours sportifs, les cyclistes engagés ou les personnes voulant par exemple limiter et contrôler leur rythme cardiaque maximal comme les personnes déficientes cardiaques. D'autres questions comme l'influence réelle des variations de rythme cardiaque restent à approfondir.

De nombreuses zones non explorées subsistent à l'issue de ce chapitre. Notamment, l'impact des efforts en zone anaérobie a ici été perçu par le prisme du rythme cardiaque, qui n'est pas forcément un outil idéal pour l'analyse.

Toute comparaison au vélo électrique standard n'a pas été entreprise. Il serait judicieux d'analyser l'impact physique sur les deux structures. Si le vélo hybride série, dans la configuration proposée dans cette thèse, ne permet pas d'espérer pouvoir augmenter ni même égaler les performances du VAE en termes de vitesse car il ne dispose pas de source d'énergie extérieure, il pourrait avoir pour ambition d'égaliser ou d'améliorer l'impact physique du pédalage sur l'utilisateur. Une campagne essayant d'évaluer le ressenti réel de l'utilisateur sur plusieurs types de vélos : traditionnel, hybride série, à assistance électrique pourrait alors être envisagée.

Finalement, de nombreux autres usages pourraient être explorés et peuvent être à la base de pistes ambitieuses pour de nouveaux projets. Ainsi, l'insertion d'architecture de type hybride série dans le milieu du handicap et de la rééducation pourrait aussi faire l'objet d'études approfondies. L'architecture hybride série pour l'entraînement des cyclistes sportif ou des usagers du fitness permettrait de réaliser des entraînements contrôlés et cadencés en extérieur. Concernant l'usage quotidien de ce type d'architecture, un gain net ne semble pas se dégager sans une réduction de la vitesse du véhicule sur la base d'une équivalence énergétique. Comme à l'issue de la conclusion du Chapitre III, nous pouvons indiquer qu'une amélioration du rendement global du véhicule permettrait d'augmenter l'intérêt du découplage pour l'ensemble des usages.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La conception optimale d'un vélo à architecture hybride série à base de supercondensateurs a été analysée et détaillée dans ce mémoire. L'expansion de la sensibilité aux causes environnementales de notre société, accentuée par la crise sanitaire récente de la covid19 renforce l'intérêt de ce travail pour tous les bénéficiaires qu'il peut apporter. En effet, le vélo hybride série est susceptible d'être une solution intéressante pour améliorer la santé des utilisateurs tout en contrôlant leur effort, réduire notre empreinte environnementale, proposer une alternative aux déplacements carbonés, construire des véhicules spéciaux, ... Les problématiques de ce projet s'articulent autour de plusieurs grands axes, qui ont formé autant de chapitres, qui sont :

- ❖ L'étude de la viabilité d'un système de stockage de l'énergie plus propre grâce à l'utilisation de supercondensateurs à la place de batteries lithium-ion.
- ❖ La faisabilité d'une architecture hybride série comparée au vélo traditionnel et la définition du rendement minimum.
- ❖ La notion d'assistance au pédalage et les algorithmes de gestion autonome de l'énergie dans le véhicule. Cette partie a donné lieu à la création de stratégies de gestion de l'énergie embarquée.
- ❖ L'étude de la réaction du corps humain sur une telle architecture. Ces travaux ont donné lieu à deux grandes réflexions concernant la reproduction du mouvement de pédalage sur une machine à faible inertie (génératrice) ainsi qu'une réflexion initiale concernant la comparaison de fatigue entre un effort continu et discontinu, image de la comparaison entre un vélo à architecture hybride série et un vélo traditionnel.

La première grande partie de ce manuscrit appuie, par un état de l'art, l'originalité du projet. En effet, les travaux concernant le véhicule hybride série à traction humaine ont actuellement tous cherché à reproduire le fonctionnement du vélo classique à chaîne. Le Chapitre I a décrit l'objectif de découplage entre l'utilisateur et la dynamique du vélo. C'est un élément central pour la compréhension des différents chapitres et des problématiques autour de ce véhicule. Une fois le découplage introduit, ce chapitre a alimenté les réflexions concernant le dimensionnement des différents sous-ensembles du vélo en questionnant les ordres de grandeur, en présentant les autres types d'architectures et l'architecture hybride série montée sur un tricycle, qui permet de pédaler à l'arrêt.

Ce chapitre a également mis en avant, par de brefs exposés scientifiques, quelques spécificités du vélo hybride série. L'avantage du frein régénératif, avec des gains moyens de 8% d'énergie en ville, a été présenté. La nécessité d'utiliser cette technologie sur des parcours vallonnés et/ou saccadés semble claire en raison du potentiel de récupération d'énergie pouvant atteindre près de 30% de récupération sur ce type de parcours. L'introduction à la création d'un cycle standard de tests pour vélo a également été abordée. Les travaux ont permis de conclure, par deux méthodes, à des résultats similaires concernant un cycle représentatif d'un usage citoyen moyen avec une vitesse moyenne d'environ 15 km/h ainsi que des arrêts tous les 250 m. Le travail sur le cycle devra par la suite être étendu en réutilisant les algorithmes mathématiques présentés et en intégrant une base de données plus importante comportant des informations critiques comme la pente, un axe encore non abordé dans le dimensionnement de cycle de tests normatifs, mais crucial pour le vélo. En effet, l'énergie potentielle d'un mètre d'élévation représente autant d'énergie que celle nécessaire pour rouler 50 m sur le plat.

Les objectifs initiaux du projet étaient de valider les conditions de fonctionnement de l'architecture hybride série ainsi que d'évaluer les gains et les pertes des différentes technologies imposées. Le Chapitre III, paragraphe 3.3.3 a pu mettre en avant l'existence de seuils de rendement au-delà desquels, le vélo hybride série était capable de se déplacer aussi vite qu'un vélo traditionnel sans aucun apport d'énergie extérieure. Les seuils sont compris entre 60 et 100% de rendement en fonction du parcours. La réalisation de véhicules permettant d'atteindre ces valeurs de rendement est cependant délicate, bien que possible, avec un maximum de l'ordre de 70% en conditions favorables.

L'analyse des résultats permet de conclure sur plusieurs principes et d'envisager des pistes de travaux futurs. Le vélo hybride série a d'abord été conçu comme un véhicule permettant de contrôler la fatigue de l'utilisateur avant d'être un véhicule rapide. Cette constatation rend possible une diminution du rendement nécessaire dans une proportion non établie dans ce mémoire. Un point clé du développement technique de cette architecture réside dans l'assemblage, la recherche et la conception de machines électriques (moteurs et générateurs) plus performants. En effet, l'analyse menée montre que ce sont ces éléments qui sont actuellement limitants pour le système. Les efforts de recherche concernant les machines haut rendement et petite puissance doivent donc être poursuivis.

Les systèmes de stockage à base de batteries ont été critiqués pour leur chaîne de fabrication, leur taux de recyclage ainsi que pour leur faible durée de vie dans les systèmes embarqués. L'utilisation de supercondensateurs, élément imposé du projet, est envisageable grâce à un changement des stratégies d'assistance du vélo électrique. Comparé à un vélo à assistance électrique classique qui se recharge sur le secteur, il est ici question de lisser l'énergie de l'utilisateur et donc d'avoir l'énergie humaine comme seule source d'énergie du système. La faible énergie embarquée nécessaire pour lisser l'énergie de l'utilisateur et/ou des reliefs de taille moyenne rend possible l'utilisation de supercondensateurs à la place des batteries. En tentant de comparer les batteries et les supercondensateurs sur la base de nombreux critères, il a été mis en évidence que les batteries ont l'avantage de la densité d'énergie et par conséquent, un gain de poids et de volume, là où les supercondensateurs ont l'avantage du rendement, un élément critique du système hybride série, ainsi que celui d'une chaîne de recyclage plus prometteuse.

La contribution de ce mémoire, présentée au Chapitre II, liée au choix du système de stockage est d'apporter un élément de réponse à la comparaison en vieillissement de deux packs équivalents en poids, coût et tension pour une sollicitation énergétique identique. Le comparatif en durée de vie est généralement exprimé pour des cycles complets à l'échelle de la cellule. En considérant une même sollicitation énergétique, les batteries, plus denses, effectuent des microcycles et sont capables d'avoir des durées de vie plus étendues que celles, classiquement mesurées de 500 à 2000 cycles complets. Les résultats ont pu montrer que les batteries pouvaient, dans le cas de l'équivalence, effectuer près de 80 000 microcycles et multiplier ainsi leur durée de vie par un facteur 4. Les supercondensateurs confirment leur excellente durée de vie avec près de 800 000 cycles potentiels estimés. Ainsi, ceux-ci restent une solution de choix concernant la maximisation de la durée de vie, mais l'augmentation de durée de vie constatée sur les batteries est conséquente et pourrait aussi couvrir de nombreux usages. Ainsi, le choix du système de stockage nécessite de réellement évaluer le cycle d'utilisation du système. Il serait possible de pousser l'étude plus loin en comparant la durée de vie à cycle énergétique identique de packs ayant la même énergie embarquée (ce qui induit des cycles complets avec des niveaux de courant élevés ce qui est très

sollicitant pour la batterie) ou encore de changer de technologie lithium afin d'observer la variation des résultats. Dans le cas du vélo, une batterie micro-cyclé peut offrir l'équivalent de 50 000 kilomètres de vélo hors vieillissement calendaire, ce qui est considérable comparé à la durée de vie du produit.

La notion de découplage mécanique abordée en détail au Chapitre IV est un avantage de l'architecture hybride série permettant de pouvoir piloter la génératrice de façon indépendante de l'avancement du vélo. Le pilotage de la machine est alors un problème important, car le piloter sans épuiser l'énergie disponible dans les supercondensateurs nécessite d'appliquer des stratégies intelligentes, fonction de l'état du système. Le parti pris de réaliser des algorithmes peu sollicitant en mémoire, en temps de calcul et non prédictifs a été mis en avant. Ainsi, les stratégies de pilotages sont construites sur des règles simples comme le maintien à vitesse constante. Ces règles sont directement issues d'une analyse par mimétisme des résultats optimaux de la programmation dynamique. De plus, des outils comme la logique floue ont été utilisés afin de synthétiser des stratégies de contrôle temps réel robustes.

Les résultats, théoriques et pratiques, démontrent une bonne adéquation du modèle et du comportement sur la route. De plus, les stratégies proposées obtiennent des résultats très proches de ceux, optimaux, identifiés grâce à la programmation dynamique. Les cas aux limites sont également gérés automatiquement dans la stratégie proposée, ce qui la rend robuste aux aléas. La robustesse a de plus été analysée grâce à une étude de sensibilité qui a confirmé les bonnes performances du système lors des variations de paramètres du modèle. Dans l'objectif de valider le comportement de ces algorithmes dans la rue avec tous les aléas liés, les tests doivent maintenant être implémentés sur un engin roulant en extérieur. L'algorithme pourrait aussi être augmenté afin de faire varier la stratégie de commande en fonction de la pente, par exemple, en plus de l'état de charge du véhicule. Finalement, l'humain pourrait, grâce à sa connaissance du parcours, réaliser de bonnes stratégies de pilotage, car ce dernier peut apporter une partie de pilotage prédictif. Il serait intéressant de pouvoir comparer les performances d'un pilotage humain et de l'algorithme présenté. Cette comparaison pourrait se faire en implémentant les algorithmes à base de logique floue sur un vélo roulant en extérieur.

La dernière partie du mémoire a porté sur l'étude physiologique de l'homme sur un vélo hybride série. En effet, le mouvement de pédalage est apparu comme une problématique majeure imputable au manque d'inertie de la génératrice. Une compréhension fine du mouvement de pédalage ainsi que le développement de stratégies spécifiques a permis de venir compenser l'inertie manquante et procurer une sensation de pédalage fluide et progressive. La stratégie proposée est de plus modulable pour s'adapter aux différents utilisateurs. Un travail approfondi pourrait être mené afin d'adapter ces stratégies dans l'objectif de simuler un programme sportif ou encore de s'adapter à des personnes en incapacité de pédaler sur un vélo standard. Ces programmes pourraient donc convenir pour des personnes à mobilité réduite ou encore à des soins de rééducation.

Dans un second temps, une analyse du rythme cardiaque, image simplifiée de l'énergie dépensée par l'utilisateur, a été entreprise. Le choix du rythme cardiaque est un choix minimal, car c'est une mesure physiologique facilement disponible, et que nous n'avons pas les compétences nécessaires (encadrement, protocole, habilitations) au développement de tests plus complexes comme la mesure du volume d'oxygène absorbé. La notion de fatigue étant mal définie et dépendante de l'effort, seul le gain en énergie dépensée a été ici évoqué. Le test a consisté à faire pédaler des

sujets, alternativement sur des efforts continus ou fractionnés, mais en conservant la même quantité d'énergie totale fournie dans tous les essais comparatifs. Les conditions d'essais sont calibrées en fonction de la puissance maximale aérobie (PMA) du sujet afin de garantir un niveau d'effort raisonnable pour le sujet ainsi que d'obtenir des résultats normalisés. Les résultats montrent que le rythme cardiaque moyen d'un sujet est équivalent en continu et en fractionné si ce dernier fournit une puissance fractionnée (crête) inférieure à 80% de sa PMA. Cependant, bien que ces oscillations de rythme cardiaque n'influencent pas, dans le cadre des essais fractionnés, la valeur moyenne, leur impact sur la fatigue est actuellement inconnu. Un vrai gain apparaît dès que la puissance de pédalage se rapproche de la PMA permettant d'avancer l'hypothèse d'un gain réel pour des phases de pédalage proche des limites de l'utilisateur. Afin de pouvoir avancer encore dans les constatations, de nombreux tests supplémentaires doivent être entrepris. Pour cela, un des objectifs serait de se rapprocher d'un laboratoire universitaire de physiologie de la performance avec des spécialistes en la matière afin de pouvoir progresser. De plus, il serait intéressant, via un protocole, de comparer le vélo hybride série aux vélos à assistance électriques classiques, concurrent du vélo hybride série au sens économique.

Le vélo hybride série a démontré, sous de nombreux angles, être une architecture prometteuse permettant d'imaginer de nombreuses solutions de mobilités. Les enjeux concernant la conversion d'énergie à petite puissance ne concernent pas uniquement le vélo, mais donneront la possibilité de s'allier à de nombreux objets du quotidien qui gagneraient à être plus efficaces. Le gain en confort permet d'envisager l'intégration de l'architecture hybride série sur de nombreux véhicules et notamment les vélos cargo, les vélos bus ou encore pour les personnes en situation de déficience motrice. Finalement, le choix du système de stockage sans batterie, à base de supercondensateurs a été déterminé comme possible, mais prend tout son sens dans un environnement contrôlé (par exemple lorsque le parcours du véhicule est défini à l'avance) où le dimensionnement du pack sera cohérent avec le profil connu d'utilisation et où la recharge rapide pourra suppléer l'énergie de l'humain permettant des usages récréatifs, à l'image du vélo électrique.

Finalement, les perspectives de développement pour ce type d'architecture hybride sont multiples puisqu'il est possible d'imaginer des véhicules hybrides cumulant d'autres sources d'énergie comme le solaire ou bien encore l'hydrogène (voir les annexes B et E). Ces véhicules permettraient de minimiser l'impact du rendement, qui reste un point clé délicat, et ainsi pouvoir focaliser sur la sensation et le confort, qui est déjà une réussite du projet.

BIBLIOGRAPHIE

-
- [1] M. Pappalardo *et al.*, “La mobilité des Français : Panorama issu de l’enquête nationale transports et déplacements 2008,” *Commissariat général au développement durable*, p. 228, 2010.
- [2] T. Courbe, “Impact économique et potentiel de développement des usages du vélo en France,” Les dossiers de la DGE, ADEME, Apr. 2020.
- [3] F. Papon and R. De Solère, “Les modes actifs : marche et vélo de retour en ville,” *Commissariat général au développement durable*, 2009.
- [4] *Loi sur la transition énergétique : Indemnité kilométrique vélo.* .
- [5] Mairie de paris, “Le bilan des déplacements en 2016 à Paris.” L’observatoire des déplacements à paris, 2017.
- [6] D. Caudron, “Transports et déplacements, les chiffres clés 2019.” Agence d’urbanisme de l’aire métropolitaine lyonnaise, Jan. 2020.
- [7] “Convention Citoyenne pour le Climat.” <https://www.conventioncitoyennepourleclimat.fr/> (accessed Jun. 30, 2020).
- [8] R. Buehler and J. Pucher, “Cycling to work in 90 large American cities: new evidence on the role of bike paths and lanes,” *Transportation*, vol. 39, no. 2, pp. 409–432, Mar. 2012, doi: 10.1007/s11116-011-9355-8.
- [9] M. Freudendal-Pedersen, “Cyclists as Part of the City’s Organism: Structural Stories on Cycling in Copenhagen: Cyclists as Part of the City’s Organism: Structural Stories on Cycling in Copenhagen,” *City & Society*, vol. 27, no. 1, pp. 30–50, Apr. 2015, doi: 10.1111/ciso.12051.
- [10] T. A. Casterven and A.-K. Ebert, “Cycling cultures in Northern Europe: from Golden Age to Renaissance,” in *Cycling and Sustainability*, Bingley, 2013, pp. 23–58.
- [11] M. Jean and J. Robert, “Vélo en libre service avec station : de l’étude de faisabilité du service à sa mise en oeuvre,” Cerema, Bron, 2019.
- [12] “Compare and visualize live sharing bicycle status in various cities.” <http://bikesharingatlas.org> (accessed Aug. 23, 2020).
- [13] E. Ravalet and Y. Bussière, “Les systèmes de vélos en libre-service expliquent-ils le retour du vélo en ville ?,” *Springer*, vol. 2012, pp. 15–24, Feb. 2013, doi: 10.1007/s13547-011-0020-6.
- [14] P. Santi and P. Miner, “Le manque d’activité physique, un mal chez les adolescents du monde entier,” *Le Monde*, Nov. 22, 2019.

- [15] D. Riou, “Cartographie: parts modales du vélo, des transports en commun, de la voiture, de la marche et des deux roues motorisés en Ile de France,” Institut Paris Région.
- [16] A. Bornioli, G. Parkhurst, and P. L. Morgan, “Psychological Wellbeing Benefits of Simulated Exposure to Five Urban Settings: an Experimental Study From the Pedestrian’s Perspective,” *Journal of Transport & Health*, vol. 9, pp. 105–116, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jth.2018.02.003.
- [17] M. Tainio *et al.*, “Can air pollution negate the health benefits of cycling and walking?,” *Preventive Medicine*, vol. 87, pp. 233–236, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ypmed.2016.02.002.
- [18] G. Lindsay, A. Macmillan, and A. Woodward, “Moving urban trips from cars to bicycles: impact on health and emissions,” *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, vol. 35, no. 1, pp. 54–60, Feb. 2011, doi: 10.1111/j.1753-6405.2010.00621.x.
- [19] P. Kelly, S. Kahlmeier, T. Götschi, N. Orsini, J. Richards, and N. Roberts, “Systematic review and meta-analysis of reduction in all-cause mortality from walking to cycling and shape of dose response relationship,” *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, vol. 11:132, 2014.
- [20] J. Johan de Hartog, H. Boogaard, H. Nijland, and G. Hoek, “Do the Health Benefits of Cycling Outweigh the Risks,” Netherlands Environmental Assessment, Bilthoven, the Netherlands, Jun. 2010.
- [21] A. Castro *et al.*, “Physical activity of electric bicycle users compared to conventional bicycle users and non-cyclists: Insights based on health and transport data from an online survey in seven European cities,” *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 1, p. 100017, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.trip.2019.100017.
- [22] “Global price for energy.” globalpetrolprices.com (accessed Sep. 01, 2020).
- [23] J. M. Jancovici, *Conférence: CO2 ou PIB, il faut choisir*. Sciences Po, 2019.
- [24] B. Perrissin Fabert, “COP21- Enseignements des ateliers de mobilisation de l’expertise.” Ministère de l’environnement de l’énergie et de la mer, Dec. 2016, [Online]. Available: www.developpement-durable.gouv.fr.
- [25] Club développement durable, “CDDEP - Fiches pratiques - Pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.” Ministère de la transition écologique et solidaire, Jun. 2018.
- [26] L. Gaines, “The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 1–2, pp. 2–7, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.susmat.2014.10.001.
- [27] J. Heelan *et al.*, “Current and Prospective Li-Ion Battery Recycling and Recovery Processes,” *JOM*, vol. 68, no. 10, pp. 2632–2638, Oct. 2016, doi: 10.1007/s11837-016-1994-y.
- [28] S. Dreyer, “Le cout réel des déplacements dans l’agglomération mulhousienne: Voiture, marche, vélo et transport collectif,” Agence d’urbanisme de la région mulhousienne, Dec. 2017.
- [29] L. J.-M. Beauvais, B. Consultants, and C. Dupart, “Le train plus cher que le covoiturage, le car et l’avion à bas coût,” *Fédération nationale des associations d’usagers des transports*, no. 281, p. 12, Apr. 2020.
- [30] R. Arthaut, “Le budget transports des ménages depuis 40 ans,” *INSEE*, no. 1039, p. 4, 2005.
- [31] “L’ACA publie les résultats du Budget de l’Automobiliste © 2018,” Automobile club association, 2019.
- [32] T. Mallet and C. Faucher, “L’Observatoire de la mobilité fait la preuve que nos entreprises œuvrent en faveur d’une mobilité durable pour tous et partout.,” *Union des transports publics et ferroviaires*, p. 50.

- [33] A. Macmillan, J. Connor, K. Witten, R. Kearns, D. Rees, and A. Woodward, “The Societal Costs and Benefits of Commuter Bicycling: Simulating the Effects of Specific Policies Using System Dynamics Modelling,” *Environmental Health Perspectives*, Feb. 2014, doi: 10.1289/ehp.1307250.
- [34] Gouvernement Français, E. Philippe, E. Borne, and F. De Rugy, *Dossier de presse: Plan vélo et mobilité active*. 2018.
- [35] D. Cosnard, “A Paris, la rue de Rivoli bientôt fermée aux voitures,” *Le Monde*, Apr. 30, 2020.
- [36] “Number of e-bikes sold in Europe from 2009 to 2018,” *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/276036/unit-sales-e-bikes-europe/> (accessed Jul. 04, 2020).
- [37] A. Jadhav and S. Baul, “Electric Bikes Market by Product Type (Pedelecs, Throttle on Demand, and Scooter & Motorcycle), Drive Mechanism (Hub Motor, Mid Drive, and Others), Battery Type (Lead-acid, Lithium-ion (Li-ion), Nickel-metal hydride (NiMh), and Others) - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2017-2025,” Allied market research, A04398, 2018. Accessed: Jul. 04, 2020. [Online]. Available: <https://www.alliedmarket-research.com/electric-bikes-market>.
- [38] Observatoire des mobilités actives, “Les Français et le vélo en 2012,” Club des villes et territoires cyclables, Jan. 2013.
- [39] M. Branion-Calles, T. Nelson, D. Fuller, L. Gauvin, and M. Winters, “Associations between individual characteristics, availability of bicycle infrastructure, and city-wide safety perceptions of bicycling: A cross-sectional survey of bicyclists in 6 Canadian and U.S. cities,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 123, pp. 229–239, May 2019, doi: 10.1016/j.tra.2018.10.024.
- [40] A. Hull and C. O’Holleran, “Bicycle infrastructure: can good design encourage cycling?,” *Urban, Planning and Transport Research*, vol. 2, no. 1, pp. 369–406, Jan. 2014, doi: 10.1080/21650020.2014.955210.
- [41] L. Kang and J. D. Fricker, “Bicyclist commuters’ choice of on-street versus off-street route segments,” *Transportation*, vol. 40, no. 5, pp. 887–902, 2013, doi: <http://dx.doi.org.ezpupv.biu-montpellier.fr/10.1007/s11116-013-9453-x>.
- [42] D. Piatkowski and W. E. Marshall, “Not all prospective bicyclists are created equal: The role of attitudes, socio-demographics, and the built environment in bicycle commuting,” *Travel Behaviour and Society*, vol. 2, no. 3, pp. 166–173, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.tbs.2015.02.001.
- [43] D. Philippe, “Comment le vélo redessine la ville,” *Le Monde Diplomatique*, pp. 22–23, Feb. 2020.
- [44] Cerema, “Aménagements cyclables provisoires: tester pour aménager durablement,” Les cahiers du Cerema, 2020.
- [45] Union sport et Cycle, “Présentation et dossier de presse: l’observatoire du cycle 2017,” 2017.
- [46] “Association française de vélomobiles: avantages et inconvénients,” AFV. <https://www.afvelocouche.fr/> (accessed Oct. 21, 2020).
- [47] “Comparatif globl des VAE: Comment choisir son vélo électrique,” *QueChoisir.org*. <https://www.quechoisir.org/guide-d-achat-velo-electrique-n8147/> (accessed Oct. 21, 2020).
- [48] *Cycles - Cycles à assistance électrique - Bicyclettes EPAC: NF EN 15194: 2018, Norme Française*. .
- [49] “Vélo hydrogène: l’année de la bascule pour Pragma.” <https://www.h2-mobile.fr/actus/velo-hydrogene-2020-annee-bascule-pragma/> (accessed Mar. 11, 2020).

- [50] K. Ludlum, “Optimizing Flywheel Design for use as a Kinetic Energy Recovery System for a Bicycle,” Jun. 2013.
- [51] D. Grossoleil, “Etude de l’hybridation d’énergie humaine, synthèse de commandes minimisant l’énergie consommée par un vélo à assistance électrique,” PhD Thesis, Université de Limoges, 2014.
- [52] A. Devie, “Caractérisation de l’usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l’étude du vieillissement et de la fiabilité,” PhD Thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [53] I. Evtimov, R. Ivanov, G. Staneva, and G. Kadikyanov, “A study on electric bicycle energy efficiency,” *Transport Problems*, vol. 10, no. 3, pp. 131–140, 2017, doi: 10.21307/tp-2015-041.
- [54] A. Sivert, F. Betin, B. Vacossin, T. Lequeu, and M. Bosson, “Optimization of the mass for a low-power electric vehicle and consumption estimator (e-bike, e-velomobile and e-car),” *Wseas transactions on advances in engineering education*, vol. 12, p. 10, 2015.
- [55] D. Grossoleil and D. Meizel, “Practical design of minimal energy controls for an electric bicycle,” in *International conference on modelling optimisation and simulation*, Bordeaux, 2012, p. 10.
- [56] J. Lemire, “Pedal assist systems,” *Grin technologies*. <https://www.ebikes.ca/learn/pedal-assist.html> (accessed Jul. 05, 2020).
- [57] D. A. Fuchs, “Principles of Human-Electric Hybrid Drives for Human Powered Vehicles,” in *European seminar on velomobile design*, Copenhagen, 2009, p. 24.
- [58] M. Corno, F. Roselli, and S. M. Savaresi, “Bilateral Control of SeNZA—A Series Hybrid Electric Bicycle,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 864–874, May 2017, doi: 10.1109/TCST.2016.2587243.
- [59] M. Corno, D. Berretta, and S. M. Savaresi, “Human machine interfacing issues in SeNZA, a Series Hybrid Electric Bicycle,” Jul. 2015, pp. 1149–1154, doi: 10.1109/ACC.2015.7170888.
- [60] J. Guanetti, S. Formentin, M. Corno, and S. M. Savaresi, “Optimal energy management in series hybrid electric bicycles,” *Automatica*, vol. 81, pp. 96–106, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.automatica.2017.03.021.
- [61] P. Spagnol, M. Corno, R. Mura, and S. M. Savaresi, “Self-sustaining strategy for a hybrid electric bike,” in *2013 American Control Conference*, Jun. 2013, pp. 3479–3484, doi: 10.1109/ACC.2013.6580369.
- [62] “Mandofootloose review,” *Electricbike review*. <https://electricbikereview.com/mando/footloose/> (accessed Aug. 05, 2020).
- [63] “Mandofootloose review,” *Velo -Design.com*. <http://www.velo-design.com/mando-footloose/> (accessed Aug. 05, 2020).
- [64] E. Manoj, D. Isa, and R. Arelhi, “Supercapacitor/Battery hybrid Powered Electric Bicycle via a Smart Boost Converter,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 280–286, Jun. 2010, doi: 10.3390/wevj4020280.
- [65] D. M. Sousa, P. J. Costa Branco, and J. A. Dente, “Electric bicycle using batteries and supercapacitors,” in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007, pp. 1–10, doi: 10.1109/EPE.2007.4417425.
- [66] M. Machedon-Pisu and P. N. Borza, “Are Personal Electric Vehicles Sustainable? A Hybrid E-Bike Case Study,” *Sustainability*, vol. 12, no. 1, p. 32, Dec. 2019, doi: 10.3390/su12010032.

- [67] J. Capelle, N. Polfliet, M. Jacxsens, and J.-M. Timmermans, “Design of an E-bike with Ultracaps as the only energy source and with regenerative braking,” presented at the EVS24, Stavanger, Norway, May 2019.
- [68] K. Malan, M. Coutlakis, and J. Braid, “Design and development of a prototype super-capacitor powered electric bicycle,” in *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Cavtat, Croatia, May 2014, pp. 1434–1439, doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850611.
- [69] P. H. Sørensen, “velomobile: redefined,” Master Thesis, Université de Stavanger, 2015.
- [70] E. Welbergen and L. P. V. M. Clijsen, “The influence of body position on maximal performance in cycling,” *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 61, no. 1–2, pp. 138–142, Sep. 1990, doi: 10.1007/BF00236708.
- [71] R. F. Reiser, M. L. Peterson, and J. P. Broker, “Anaerobic Cycling Power Output with Variations in Recumbent Body Configuration,” *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 17, no. 3, pp. 204–216, Aug. 2001, doi: 10.1123/jab.17.3.204.
- [72] D. Too, “The effect of seat to pedal distance on anaerobic power and capacity in recumbent cycling,” *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 25, no. Supplement, p. S68, May 1993, doi: 10.1249/00005768-199305001-00380.
- [73] D. C. R. Abbiss, D. J. J. Peiffer, and P. P. B. Laursen, “Optimal cadence selection during cycling,” *International SportMed Journal*, vol. 10, p. 15, 2009.
- [74] D. Martinez, “Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with Non-Overlapping Concentrated Windings for the Shell Eco Marathon Urban Prototype,” Master Thesis, Royal Institut of Technology school of electrical engineering, Stockholm, 2012.
- [75] *Opérations sur véhicules et engins à motorisation thermique, électrique ou hybride ayant une source d’énergie embarquée -Prévention du risque électrique , NF C18-550, Norme Française.* 2015.
- [76] J.-P. Mariot, “Mechanics of cycling,” *Revue de physique appliquée*, vol. 19, no. 4, pp. 349–357, 1984.
- [77] L. Guzzella and A. Sciarretta, *Vehicule Propulsion Systems: Introducing to Modeling and Optimization*, Second Edition. Springer, 2005.
- [78] O. Danielsson *et al.*, “Design of electrical powertrain for Chalmers Formula Student with focus on 4WD versus RWD and regenerative braking,” Master Degree, Chalmers, Göteborg.
- [79] J. V. Roy, N. Leemput, S. D. Breucker, F. Geth, P. Tant, and J. Driesen, “An Availability Analysis and Energy Consumption Model for a Flemish Fleet of Electric Vehicles,” in *EEVC*, Brussels, 2011, p. 12.
- [80] E. Tournon and F. Hildenbrand, “Développement d’un scooter électrique,” Rapport de stage, INSA Lyon, Unu.
- [81] Environmental Protection Agency, “Where the Energy Goes: Electric Cars.” <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml> (accessed Apr. 03, 2019).
- [82] B. Cauquil, “TiltDragonFly: premiers essais « façon Suntrip »,” Feb. 02, 2020. https://www.ecosunriders.com/conception/tilt_dragonfly_first_tests/ (accessed Feb. 03, 2020).
- [83] B. Rohloff and P. Greb, “Efficiency Measurements of Bicycle Transmissions - a neverending Story?,” *Human power*, no. 55, pp. 11–15, 2004.
- [84] “bicycle drivetrains tests,” *CeramicSpeed*. <https://www.ceramicspeed.com/en/cycling/inside/test-data-reports/> (accessed Aug. 04, 2020).

- [85] P. Nyberg, E. Frisk, and L. Nielsen, “Generation of Equivalent Driving Cycles Using Markov Chains and Mean Tractive Force Components,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 8787–8792, 2014, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02239.
- [86] B. Yue, S. Shi, N. Lin, P. Guo, Z. Li, and Z. Zhang, “Study on the Design Method of Driving Cycle with Road Grade Based on Markov Chain Model,” in *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Montreal, QC, Canada, Oct. 2015, pp. 1–5, doi: 10.1109/VPPC.2015.7353026.
- [87] T. Georgi-Maschler, B. Friedrich, R. Weyhe, H. Heegn, and M. Rutz, “Development of a recycling process for Li-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 207, pp. 173–182, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.01.152.
- [88] A123 systems, “A123 APR18650 datasheet.” .
- [89] A. Eddahech, O. Briat, and J.-M. Vinassa, “Performance comparison of four lithium-ion battery technologies under calendar aging,” *Energy*, vol. 84, pp. 542–550, May 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.03.019.
- [90] I. Bloom *et al.*, “An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 101, no. 2, pp. 238–247, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00783-2.
- [91] N. E. Ghossein, “Étude et modélisation du fonctionnement et du vieillissement des ‘ Lithium-Ion Capacitors’ (LiC),” PhD Thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2018.
- [92] S. Jha *et al.*, “Design and synthesis of high performance flexible and green supercapacitors made of manganese-dioxide-decorated alkali lignin,” *Energy Storage*, Jul. 2020, doi: 10.1002/est.2.184.
- [93] C. Zhong, Y. Deng, W. Hu, J. Qiao, L. Zhang, and J. Zhang, “A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors,” *Chemical Society Reviews*, vol. 44, no. 21, pp. 7484–7539, 2015, doi: 10.1039/C5CS00303B.
- [94] C. Atwell, “Supercapacitor, Past, Present and future - Blog post,” Mar. 16, 2018. powerelectronics.com (accessed Jan. 02, 2020).
- [95] “Supercapacitor,” *wikipédia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor> (accessed Jun. 15, 2020).
- [96] M. Vangari, T. Pryor, and L. Jiang, “Supercapacitors: Review of Materials and Fabrication Methods,” *American Society of Civil Engineers*, vol. 139, no. 2, pp. 72–80, Jun. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000102.
- [97] L.-R. Shiue, “Supercapacitor with high energy density,” US 6 762 926 B1, US Patent and Trademark Office.
- [98] C.-M. Wang *et al.*, “The Influence of Specific Surface Area on the Capacitance of the Carbon Electrodes Supercapacitor,” in *The Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Application Engineering 2015*, 2015, pp. 439–442, doi: 10.12792/iciae2015.077.
- [99] R. Chaari, “Evaluation et modélisation du vieillissement des supercondensateurs pour des applications véhicules hybrides,” PhD Thesis, Université Bordeaux 1, 2013.
- [100] R. German, “Etude du vieillissement calendaire des supercondensateurs et impact des ondulations de courant haute fréquence,” PhD Thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2006.
- [101] *International standard IEC 62391-1: Fixed electric double layer capacitors for use in electronic equipment*. 2006.
- [102] MAXWELL, “Maxwell 3500F K2 Serie datasheet.” .
- [103] Skeleton, “Skeleton SC séries datasheet.” .

- [104] P. Kreczanik, C. Martin, P. Venet, G. Clerc, G. Rojat, and Y. Zitouni, “Constant power cycling for accelerated ageing of supercapacitors,” presented at the EPE, Barcelone Spain, 2009.
- [105] M. Sanders, “Lithium-Ion Battery Raw Material Supply and Demand 2016 – 2025,” *Avicenne energy*, 2016.
- [106] “MDS chinese scooters.” <https://mdsscooter.en.made-in-china.com/> (accessed Jun. 16, 2020).
- [107] B. Hariprakash, A. U. Mane, S. K. Martha, S. A. Gaffoor, S. A. Shivashankar, and A. K. Shukla, “A Low-Cost, High Energy-Density Lead/Acid Battery,” *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 7, no. 3, p. A66, 2004, doi: 10.1149/1.1645752.
- [108] Kiehne, *Battery Technology handbook Second edition*, 2nd edition. Marcel Dekker, 2003.
- [109] S. Pelissier, A. Sari, and P. Venet, “Batteries électriques pour applications portables et embarquées - Fondamentaux,” *Techniques de l’ingénieur*, no. E2140 V3, p. 21, 2018.
- [110] P. Gyan *et al.*, “Experimental Assessment of Battery Cycle Life Within the SIMSTOCK Research Program,” *Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Energies nouvelles*, vol. 68, no. 1, pp. 137–147, Jan. 2013, doi: 10.2516/ogst/2013106.
- [111] S. Dial, “Illustration : Densité d’énergie de différents comburants.” https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density#/media/File:Energy_density.svg (accessed Jul. 07, 2020).
- [112] S. Péliissier, A. Sari, and P. Venet, “Batteries électriques pour applications portables et embarquées - Technologies,” *Techniques de l’ingénieur*, no. E2141 V1, p. 20, 2018.
- [113] “eaton 400F; price comparison,” *octopart*. <https://octopart.com/xv3560-2r7407-r-eaton-51192387> (accessed Oct. 09, 2019).
- [114] A. Lièvre, “Développement d’un système de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules “mild hybrid” : détermination des indicateurs d’état (SoC, SoH et SoF),” PhD Thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, 2015.
- [115] D. Dvorak, H. Popp, T. Bäuml, Simic Dragan, and H. Kapeller, “Arrhenius-Equation Based Approach for Modelling Lithium-Ion Battery Aging Effects,” presented at the ITI symposium, Dresden, 2014, doi: 10.13140/2.1.3382.2405.
- [116] E. Redondo-Iglesias, P. Venet, and S. Pelissier, “Eyring acceleration model for predicting calendar ageing of lithium-ion batteries,” *Journal of Energy Storage*, vol. 13, pp. 176–183, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.06.009.
- [117] J. Schmalstieg, S. Kabitz, M. Ecker, and D. U. Sauer, “From accelerated aging tests to a lifetime prediction model: Analyzing lithium-ion batteries,” in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Barcelona, Spain, Nov. 2013, pp. 1–12, doi: 10.1109/EVS.2013.6914753.
- [118] E. Riviere, “Détermination in-situ de l’état de santé de batteries lithium-ion pour un véhicule électrique,” PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [119] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, and F. Suard, “A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications,” *Journal of power sources*, pp. 680–689, 2013.
- [120] M. Mathew, S. Janhunen, M. Rashid, F. Long, and M. Fowler, “Comparative Analysis of Lithium-Ion Battery Resistance Estimation Techniques for Battery Management Systems,” *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1490, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061490.
- [121] M. N. Ramadan, B. A. Pramana, S. A. Widayat, L. K. Amifia, A. Cahyadi, and O. Wahyunggoro, “Comparative Study Between Internal Ohmic Resistance and Capacity for

- Battery State of Health Estimation,” *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 6, no. 2, p. 113, Dec. 2015, doi: 10.14203/j.mev.2015.v6.113-122.
- [122] W. Casler, “Low resistance connector,” US Patent N° 3 259 727 , U.S. Patent Office, Oct. 16, 1963.
- [123] A.-I. Stroe, V. Knap, and D.-I. Stroe, “Comparison of lithium-ion battery performance at beginning-of-life and end-of-life,” *Microelectronics Reliability*, vol. 88–90, pp. 1251–1255, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.microrel.2018.07.077.
- [124] High power cell developement team, “LG HG2 Batterie report.” LG, 2014.
- [125] R. Spotnitz, “Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 113, no. 1, pp. 72–80, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00490-1.
- [126] D. Anseán *et al.*, “Operando lithium plating quantification and early detection of a commercial LiFePO₄ cell cycled under dynamic driving schedule,” *Journal of Power Sources*, vol. 356, pp. 36–46, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.04.072.
- [127] S. Shili, “Contrôle des circuits d’équilibrage des systèmes de stockage d’énergie (supercondensateurs) en vue d’estimer et d’améliorer leur durée de vie,” PhD Thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2016.
- [128] J. Remmlinger, M. Buchholz, M. Meiler, P. Bernreuter, and K. Dietmayer, “State-of-health monitoring of lithium-ion batteries in electric vehicles by on-board internal resistance estimation,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5357–5363, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.08.035.
- [129] G. Pilatowicz, A. Marongiu, J. Drillkens, P. Sinhuber, and D. Uwe Sauer, “A critical overview of definitions and determination techniques of the internal resistance using lithium-ion, lead acid, nickel metal-hybride batteries and electrochemical double-layer capacitors as example,” *Journal of Power Sources*, pp. 365–376, 2015.
- [130] O. Renaud and M.-P. Victoria-Feser, “A robust coefficient of determination for regression,” *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol. 140, no. 7, pp. 1852–1862, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.jspi.2010.01.008.
- [131] T. Guena and P. Leblanc, “How Depth of Discharge Affects the Cycle Life of Lithium-Metal-Polymer Batteries,” in *INTELEC 06 - Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference*, Providence, RI, USA, Sep. 2006, pp. 1–8, doi: 10.1109/INTLEEC.2006.251641.
- [132] J. Aubry, “Optimisation du dimensionnement d’une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs. Application au houlogénérateur SEAREV.,” PhD Thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2011.
- [133] J. F. Hansen, A. K. Adanes, and T. I. Fossen, “Mathematical Modelling of Diesel-Electric Propulsion Systems for Marine Vessels,” *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 323–355, Sep. 2001, doi: 10.1076/mcmd.7.3.323.3641.
- [134] F. Gonzalez, “High efficiency Electric Generator for Chainless Bicycle,” Iniversidad de Oviedo, Master degree, Jul. 2014.
- [135] C. Espanet, “Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à sutructure inversée : Application au moteur-roue,” PhD Thesis, Université de Franche-Comte, 1999.
- [136] H. B. Ahmed, N. Bernard, G. Feld, and B. Multon, “Machines synchrones : Modélisation en régime permanent,” *Techniques de l’ingénieur : D3521 V1*, 2006.

- [137] A. Stening, “Design and optimization of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor for a high cycle industrial cutter,” Master Degree, KTH: Royal institute of Technology, Stockholm, 2006.
- [138] D. C. Hanselman, *Brushless permanent magnet motor design*, 2. ed. Lebanon, Ohio: Magna Physics Publishing, 2006.
- [139] M. Yildirim, M. Polat, and H. Kurum, “A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles,” in *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Antalya, Turkey, Sep. 2014, pp. 218–223, doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715.
- [140] N. Hashernnia and B. Asaei, “Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles,” presented at the Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 2008.
- [141] M. Zeraouia, M. E. H. Benbouzid, and D. Diallo, “Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 6, pp. 1756–1764, Nov. 2006, doi: 10.1109/TVT.2006.878719.
- [142] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, “Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245–254, Oct. 2015, doi: 10.1109/TTE.2015.2470092.
- [143] A. Krings and J. Soulard, “Overview and Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines,” presented at the EVER: Ecologic vehicles renewable energies, Monaco, 2010.
- [144] J. Lemire, “Motor simulator,” *Grin technologies*. www.ebikes.ca/motor-simulator (accessed Jul. 01, 2019).
- [145] “Power to weight ratio.” https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-weight_ratio (accessed Jun. 26, 2020).
- [146] Maxon Motor, “ECX 19L Maxon motor series Datasheet.” .
- [147] “ebibe motor cut,” *3DcontentCentral*. www.3Dcontentcentral.com (accessed Jan. 10, 2020).
- [148] G. Henriot, “Engrenages: usinage, rendements. Trains planétaires,” *Techniques de l’ingénieur: BM5624 V1*, Jan. 2003.
- [149] A. Lundin and P. Mårdestam, “Efficiency Analysis of a Planetary Gearbox,” Bachelor thesis, Linköpings universitet, 2015.
- [150] T. C. Lin, S. A. Amamra, and J. Marco, “Connected-Autonomous Electric Vehicles based on DC-Bus Stabilisation Using Hybrid Storage System,” presented at the EVER: Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monaco.
- [151] D. Vinnikov, I. Roasto, and J. Zakis, “New Bi-Directional DC/DC Converter for Supercapacitor Interfacing in High-Power Applications,” presented at the 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, 2010.
- [152] S. M. D. Dehnavi, G. Sen, O. C. Thomsen, M. A. E. Andersen, and L. Møller, “Isolated Bidirectional DC–DC Converter for SuperCapacitor Applications,” presented at the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2011.
- [153] Q. Guoa, C. Zhang, L. Li, J. Zhang, and M. Wang, “Maximum Efficiency Control of Permanent-Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles,” *ICAE2016*, Department of Electrical Engineering Harbin Institute of Technology, 2016.

- [154] D. Grossoleil and D. Meizel, “Modelling the hybridisation of human and artificial energy applied at an electrical bicycle,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 13, pp. 416–421, 2010, doi: 10.3182/20100831-4-FR-2021.00073.
- [155] O. Sundstrom and L. Guzzella, “A generic dynamic programming Matlab function,” in *2009 IEEE International Conference on Control Applications*, St. Petersburg, Russia, Jul. 2009, pp. 1625–1630, doi: 10.1109/CCA.2009.5281131.
- [156] A. Chauvin, A. Sari, A. Hijazi, and E. Bideaux, “Optimal sizing of an energy storage system for a hybrid vehicle applied to an off-road application,” in *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Besancon, Jul. 2014, pp. 775–780, doi: 10.1109/AIM.2014.6878173.
- [157] L. Godefroy, “Cours Supinfo : la programmation dynamique,” *Supinfo*. <https://www.supinfo.com/cours/2ADS/chapitres/05-programmation-dynamique> (accessed Jun. 02, 2018).
- [158] E. Tournon, P. Venet, B. Barbedette, A. Lelievre, J. Aubry, and A. Sari, “Efficiency comparison between Series Hybrid Bike and Traditional Bike,” in *IEEE International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, Monaco, May 2019, p. 7.
- [159] E. Vinot, J. Scordia, R. Trigui, B. Jeanneret, and F. Badin, “Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius,” *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, vol. 3, no. 3, pp. 139–167, 2008, doi: 10.1504/IJVSMT.2008.023835.
- [160] J. Scordia, R. Trigui, M. Desbois-Renaudin, B. Jeanneret, and F. Badin, “Global Approach for Hybrid Vehicle Optimal Control,” *Journal for Asian Electric Vehicles*, 2009.
- [161] R. Trigui, B. Jeanneret, and F. Badin, “Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques. Construction de la bibliothèque de modèles VEHLIB,” *Recherche - Transports - Sécurité*, vol. 21, no. 83, pp. 129–150, 2004, doi: 10.3166/rts.83.129-150.
- [162] M. Felicitas, “Optimal Energy Utilization in Conventional, Electric and Hybrid Vehicles and its Application to Eco-Driving,” PhD Thesis, INSA - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 2013.
- [163] A. Sari, D. Hissel, and C. Espanet, “Particles swarms optimization applied to the Co-design of the fuel cell air circuit,” *Journal of Power Sources*, vol. 179, no. 1, pp. 121–131, 2008.
- [164] A. Sari, F. Dubas, and C. Espanet, “Multi-Objective Design Optimization of PMSM for PEM Fuel Cell Air-Circuit with PSO Algorithms,” presented at the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, USA, May 2009.
- [165] M. Wahlroos, J. Jaaskelainen, and J. Hirvonen, “Optimisation of an Energy System in Finland Using NSGA-II Evolutionary Algorithm,” in *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Lodz, Jun. 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/EEM.2018.8469957.
- [166] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, and T. Meyarivan, “A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II,” in *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, Berlin, Heidelberg, 2000, vol. 1917, pp. 849–858, doi: 10.1007/3-540-45356-3_83.
- [167] D. Ashlock, *Evolutionary computation for modeling and optimization*. New York: Springer, 2006.

- [168] I. Y. Kim and O. L. de Weck, “Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 29, no. 2, pp. 149–158, Feb. 2005, doi: 10.1007/s00158-004-0465-1.
- [169] E. Tournon, VENET, Pascal, A. Sari, A. Lelievre, J. Aubry, and B. Barbedette, “Unplugged Series Hybrid Bike study: Cost versus Performance Analysis,” presented at the VPPC, Hanoi, Vietnam, 2019.
- [170] M. Debert, “Stratégies optimales multi-criteres, predictives, temps reel de gestion des flux d’énergie thermique et électrique dans un véhicule hybride,” PhD Thesis, Université d’Orleans, 2011.
- [171] V. Gupta, “ECMS Based Hybrid Algorithm for Energy Management in Parallel Hybrid Electric Vehicles,” *Open International Journal of Technology Innovations and Research*, vol. 14, p. 12, 2015.
- [172] L. Serrao, S. Onori, and G. Rizzoni, “ECMS as a realization of Pontryagin’s minimum principle for HEV control,” in *2009 American Control Conference*, St. Louis, MO, USA, 2009, pp. 3964–3969, doi: 10.1109/ACC.2009.5160628.
- [173] N. da F. Ramon, “Optimization of the Sizing and Energy Management Strategy for a Hybrid Fuel Cell Vehicle Including Fuel Cell Dynamics and Durability Constraints,” PhD Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2013.
- [174] Q. Gong and Y. Li, “Computationally efficient optimal power management for plug-in hybrid electric vehicles based on spatial-domain two scale dynamic programming,” in *IEEE international Conference on Vehicular Electronics and Safety*, Columbus, Sep. 2008, pp. 90–95.
- [175] Sze Fong Yau and Y. Bresler, “On the robustness of parameter estimation of superimposed signals by dynamic programming,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 11, pp. 2825–2836, Nov. 1996, doi: 10.1109/78.542440.
- [176] D. T. M. Espindola, “Real-time optimal control of a low consumption electric vehicle,” PhD Thesis, Université de lorraine, 2014.
- [177] P. Chaber and M. Lawrynczuk, “Fast Analytical Model Predictive Controllers and Their Implementation for STM32 ARM Microcontroller,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 8, pp. 4580–4590, Aug. 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2893122.
- [178] A. K. Abbes, F. Bouani, and M. Ksouri, “A Microcontroller Implementation of Constrained Model Predictive Control,” *International Journal of Electrical and Information Engineering*, vol. 5, no. 8, p. 8, 2011.
- [179] I. B. Tolosana, “Commande Prédictive pour le Véhicule Autonome,” PhD Thesis, Université Paris-Saclay, 2018.
- [180] J. Bélanger, “Contrôle de véhicules aériens autonomes avec respect de contraintes terminales,” Master Thesis, Université de Laval, 2010.
- [181] B. Lincoln and A. Rantzer, “Suboptimal dynamic programming with error bounds,” in *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002.*, Las Vegas, NV, USA, 2002, vol. 2, pp. 2354–2359, doi: 10.1109/CDC.2002.1184885.
- [182] D. P. de Farias and B. Van Roy, “On Constraint Sampling in the Linear Programming Approach to Approximate Dynamic Programming,” *Mathematics of Operations Research*, vol. 29, no. 3, pp. 462–478, Aug. 2004, doi: 10.1287/moor.1040.0094.

- [183] M. W. Ulmer, J. C. Goodson, D. C. Mattfeld, and M. Hennig, “Offline–Online Approximate Dynamic Programming for Dynamic Vehicle Routing with Stochastic Requests,” *Transportation Science*, vol. 53, no. 1, pp. 185–202, Feb. 2019, doi: 10.1287/trsc.2017.0767.
- [184] D. P. Bertsekas, “Dynamic Programming and Suboptimal Control: A Survey from ADP to MPCA,” *European Journal of control*, pp. 310–333, 2005.
- [185] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [186] R. Sehab and B. Barbedette, “Fuzzy PID Supervision for an Automotive Application: Design and Implementation,” in *PID Controller Design Approaches - Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*, 1st édition., M. Vagia, Ed. InTech, 2012.
- [187] N. J. Schouten, M. A. Salman, and N. A. Kheir, “Energy Management Strategies for Parallel Hybrid Vehicles Using Fuzzy Logic,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 33, no. 26, pp. 83–88, Sep. 2000, doi: 10.1016/S1474-6670(17)39125-5.
- [188] A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, G. Spiazzi, and L. de Araujo Silva, “Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 107–115, Jan. 2008, doi: 10.1109/TPEL.2007.911799.
- [189] S. G. Li, S. M. Sharkh, F. C. Walsh, and C. N. Zhang, “Energy and Battery Management of a Plug-In Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 8, pp. 3571–3585, Oct. 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2165571.
- [190] J. Solano Martínez, R. I. John, D. Hissel, and M.-C. Péra, “A survey-based type-2 fuzzy logic system for energy management in hybrid electrical vehicles,” *Information Sciences*, vol. 190, pp. 192–207, May 2012, doi: 10.1016/j.ins.2011.12.013.
- [191] H. Nguyen, C. Walker, and E. Walker, *A first course in fuzzy logic*, 4eme ed., 1 vols. CRC press, 2019.
- [192] F. Dernoncourt, “Tutoriel: Introduction à la logique floue,” *Developpez.com*. <https://franck-dernoncourt.developpez.com/tutoriels/algo/introduction-logique-floue/> (accessed Sep. 06, 2020).
- [193] B. Vedder, *Logiciel libre : VESC*. 2020.
- [194] “Protocole de communication médical sans fil libre Ant +,” <https://www.thisisant.com>. <https://www.thisisant.com> (accessed Jun. 24, 2020).
- [195] Nakhan, “Blog: Le brassard cardio Scosche Rhythm 24 testé de fond en comble,” *Nakan.ch*. https://www.nakan.ch/wp/2019/04/29/le-brassard-cardio-scosche-rhythm-24-teste-de-fond-en-comble/#Positionner_son_brassard_cardio_optique (accessed Aug. 14, 2020).
- [196] S. Rhea and M. Liversedge, *Logiciel libre : Golden Cheetah*. 2020.
- [197] R. H. T. Edwards, “Human Muscle Function and Fatigue: physiological mechanism,” in *Pitman Medical (Ciba Foundation Symposium)*, London, 1981, pp. 1–18, doi: 10.1002/9780470715420.ch1.
- [198] N. K. Vollestad, “Measurement of human muscle fatigue,” *Journal of Neuroscience Methods*, pp. 219–227, 1997.
- [199] N. K. Vollestad, J. Wesche, and O. M. Sejersted, “Gradual increase in leg oxygen uptake during repeated submaximal contractions in humans,” *Journal of Applied Physiology*, vol. 68, no. 3, pp. 1150–1156, Mar. 1990, doi: 10.1152/jappl.1990.68.3.1150.
- [200] A. Belli and F. Hintzy, “Influence of pedalling rate on the energy cost of cycling in humans,” *European Journal of Applied Physiology*, vol. 88, no. 1–2, pp. 158–162, Nov. 2002, doi: 10.1007/s00421-002-0674-5.

- [201] C. Abbiss, “Optimal cadence selection during cycling,” *International SportMed Journal*, vol. 10, p. 16, 2009.
- [202] D. Bishop, “Performance changes following active arm up and how to structure the warm up,” *Sports Med.*, vol. 33, pp. 483–498, 2003.
- [203] M. Tokui and K. Hirakoba, “Effect of internal power on muscular efficiency during cycling exercise,” *European Journal of Applied Physiology*, vol. 101, no. 5, pp. 565–570, Oct. 2007, doi: 10.1007/s00421-007-0527-3.
- [204] F. Borszcz, A. Tramontin, A. Bossi, L. Carminatti, and V. Costa, “Functional Threshold Power in Cyclists: Validity of the Concept and Physiological Responses,” *International Journal of Sports Medicine*, vol. 39, no. 10, pp. 737–742, Oct. 2018, doi: 10.1055/s-0044-101546.
- [205] “Vo2 max ou volume maximal d’oxygène.” <http://entrainement-sportif.fr/vo2-max.htm> (accessed Mar. 15, 2018).
- [206] R. Shmerling, “How’s your heart rate and why it matters?,” *Harvard health publishing*. <https://www.health.harvard.edu> (accessed Jun. 26, 2020).
- [207] C. Vaast, *La bible du cyclisme*, 2nd Edition. Amphora, 2018.
- [208] M. Kordi, J. Folland, S. Goodall, P. Barratt, and G. Howatson, “Isovelocity vs. Isoinertial Sprint Cycling Tests for Power- and Torque-cadence Relationships,” *International Journal of Sports Medicine*, vol. 40, no. 14, pp. 897–902, Dec. 2019, doi: 10.1055/a-0989-2387.
- [209] “EMG-Driven Optimal Estimation of Subject-Specific Hill Model Muscle–Tendon Parameters of the Knee Joint Actuators,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 64, no. 9, pp. 2253–2262, Sep. 2017, doi: 10.1109/TBME.2016.2630009.
- [210] N. Wan, S. A. Fayazi, H. Saeidi, and A. Vahidi, “Optimal power management of an electric bicycle based on terrain preview and considering human fatigue dynamics,” in *2014 American Control Conference*, Portland, OR, USA, Jun. 2014, pp. 3462–3467, doi: 10.1109/ACC.2014.6859373.
- [211] J. Z. Liu, R. W. Brown, and G. H. Yue, “A Dynamical Model of Muscle Activation, Fatigue, and Recovery,” *Biophysical Journal*, vol. 82, no. 5, pp. 2344–2359, May 2002, doi: 10.1016/S0006-3495(02)75580-X.
- [212] M. J. Mazzoleni, C. L. Battaglini, K. J. Martin, E. M. Coffman, and B. P. Mann, “Modeling and predicting heart rate dynamics across a broad range of transient exercise intensities during cycling,” *Sports Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 117–127, Jun. 2016, doi: 10.1007/s12283-015-0193-3.
- [213] “Threshold Explained,” *Backbone Performance - Empowering Athletes*. <http://www.backboneperformance.com/backblog/2014/2/15/threshold-explained> (accessed Mar. 30, 2018).
- [214] “Power Training Zones for Cycling,” *TrainingPeaks*, Apr. 29, 2016. <https://www.trainingpeaks.com/blog/power-training-levels/> (accessed Mar. 30, 2018).
- [215] C. Howe and A. Coggan, “The Road Cyclist’s Guide to Training,” *Publication Libre*, Oct. 2001.
- [216] A. Coggan and A. Hunter, *Training and Racing with a Power Meter*, 2nd ed. Velopress, 2010.
- [217] “Calculateur des zones de puissance en cyclisme,” *Le triple effort*. <https://le-triple-effort.fr/outils-du-sportif/en-cyclisme/calculateur-des-zones-de-puissance-en-cyclisme/> (accessed Jun. 26, 2020).
- [218] D. G. Wilson, *Bicycling science*, 3eme ed., vol. 1. 2004.

- [219] K. L. Butler, M. Ehsani, and P. Kamath, “A Matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 6, pp. 1770–1778, Nov. 1999, doi: 10.1109/25.806769.
- [220] G. Erttema and H. W. Lorås, “Efficiency in cycling: a review,” *European Journal of Applied Physiology*, vol. 106, no. 1, pp. 1–14, May 2009, doi: 10.1007/s00421-009-1008-7.
- [221] Comité d’éthique pour la recherche, “Formulaire de soumission au Comité d’Ethique pour la Recherche en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (CERSTAPS).” .
- [222] M. J. Dauncey and W. P. T. James, “Assessment of the heart-rate method for determining energy expenditure in man, using a whole-body calorimeter,” *British Journal of Nutrition*, vol. 42, no. 1, pp. 1–13, Jul. 1979, doi: 10.1079/BJN19790084.
- [223] L. Davidson, G. McNeill, P. Haggarty, J. S. Smith, and M. F. Franklin, “Free-living energy expenditure of adult men assessed by continuous heart-rate monitoring and doubly-labelled water,” *British Journal of Nutrition*, vol. 78, no. 5, pp. 695–708, Nov. 1997, doi: 10.1079/BJN19970188.
- [224] W. R. Leonard, “Measuring human energy expenditure: What have we learned from the flex-heart rate method?,” *American Journal of Human Biology*, vol. 15, no. 4, pp. 479–489, Jun. 2003, doi: 10.1002/ajhb.10187.
- [225] W. Bertucci, F. Grappe, A. Girard, A. Betik, and J. D. Rouillon, “Effects on the crank torque profile when changing pedalling cadence in level ground and uphill road cycling,” *Journal of Biomechanics*, vol. 38, no. 5, pp. 1003–1010, May 2005, doi: 10.1016/j.jbiomech.2004.05.037.
- [226] B. Barbedette, “Pédalage du cycliste et préhension pollicidigitale. Etude biomécanique et identification de stratégies motrices,” PhD Thesis, Université du maine, Le mans, 1999.
- [227] J. Dwyer and R. Bybee, “Heart rate indices of the anaerobic threshold,” *Medicine and science in sport and exercise*, vol. 15, no. 1, pp. 72–76, 1983.
- [228] F. Naseri, E. Farjah, and T. Ghanbari, “An Efficient Regenerative Braking System Based on Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles with BLDC Motor,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1–1, 2016.
- [229] J. Aubry and B. Barbedette, “Evaluation de l’intérêt d’une hybridation série pour un véhicule à propulsion humaine. Pré-dimensionnement d’une génératrice-pédalier,” *Symposium de Genie Electrique*, 2014.
- [230] A. F. Burke, “Hybrid/Electric Vehicle Design Options and Evaluations,” presented at the International Congress & Exposition, Feb. 1992, doi: 10.4271/920447.
- [231] D. Cericola, P. W. Ruch, R. Kötz, P. Novák, and A. Wokaun, “Simulation of a supercapacitor/Li-ion battery hybrid for pulsed applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 9, pp. 2731–2736, May 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.10.104.
- [232] A. Chu, “Comparison of commercial supercapacitors and high-power lithium-ion batteries for power-assist applications in hybrid electric vehicles I. Initial characterization,” *Journal of Power Sources*, vol. 112, no. 1, pp. 236–246, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00364-6.
- [233] Mazen Yassine and Drazen Fabris, “Performance of Commercially Available Supercapacitors,” *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1340, Sep. 2017, doi: 10.3390/en10091340.

**ANNEXES : COMPLEMENTS D'ESSAIS ET
NOTES DE SYNTHESSES**

A. Les Supercondensateurs, complément d'essais du Chapitre II

A.1 Des supercondensateurs plus optimaux existent

Au Chapitre II, la dégradation des supercondensateurs en cyclage a été mise en avant. Notamment, la phase de brûlage (perte de capacité initiale sur quelques cycles) était significative. Une vérification a été entreprise pour comparer ces résultats à une autre cellule, équivalente. L'objectif a été de comparer les vieillissements et ainsi de conforter la solidité des résultats obtenus au Chapitre II.

Caractéristique	Valeur EATON	Valeur MAXWELL	Unité
Capacitance	400	350	F
Resistance	0.0032	0.0032	Ω
Poids	0.072	0.06	kg
Es	5.69	5.9	$Wh.kg^{-1}$
P_{cell}	7900	9500	$W.kg^{-1}$

Figure A-5 : Caractéristiques des cellules comparées

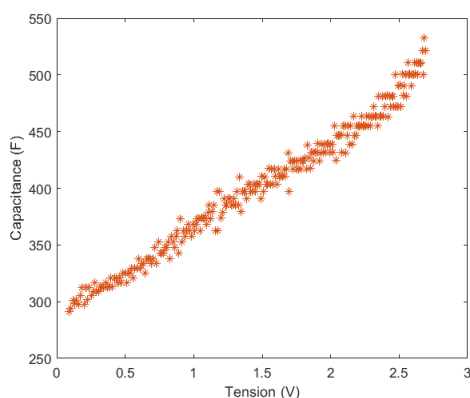


Figure A-1 : Évolution de la capacité pour un supercondensateur Eaton 400 F en fonction de la tension. La capacité est déterminée à chaque instant grâce à l'équation 2.24.

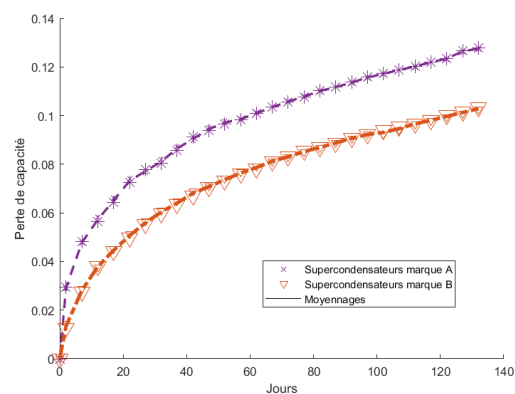


Figure -A-2 : Perte de capacité (P.U.) comparé entre les supercondensateurs Eaton (A) et Maxwell (B).

Les courbes de vieillissement montrent que les supercondensateurs de la marque Maxwell sont nettement plus performants que les supercondensateurs Eaton sur la phase de début de vieillissement. En effet la phase de brûlage est nettement moins prononcée.

Ce résultat conforte nos résultats puisque les supercondensateurs Eaton ont déjà vieilli de manière positive vis-à-vis des batteries. Ce second test affirme cette tendance. Il est rappelé que les cellules de batteries testées ont multiplié leur durée de vie par 4 sous utilisations en micro-cycles (passage de 1 500 cycles complets équivalents à 6 000 cycles complets équivalents). Il est donc important de considérer l'usage avant de sélectionner les batteries ou les supercondensateurs comme choix principal de système de stockage d'énergie.

A.2 Variation de capacitance

La mesure de capacitance en fonction de la tension (voir Figure A-1) a permis de retrouver les variations de capacité décrite dans la littérature [91], [100]. Ce résultat montre que la capacité d'une cellule augmente avec la tension et que la concentration en énergie est plus forte à haut potentiel. Cette constatation s'ajoute à la concentration naturelle de l'énergie sur les hautes tensions (voir Chapitre II).

Pour ce supercondensateur Eaton, il est possible d'écrire, avec C_0 la capacité de base de ces supercondensateurs, V la tension de charge du supercondensateur et γ la constante de régression en F/V :

$$C = C_0 + \gamma V = 300 + 82V \quad \text{A.16}$$

B. Démonstrateurs

B.1 Le premier démonstrateur

Le premier démonstrateur avait un but très industriel : être capable de valider un fonctionnement à minima d'une architecture hybride série. Ce dernier a été construit en un temps record de deux semaines après le début de la thèse et a permis de s'appropriier l'architecture et le choix de solutions technologiques comme les machines BLDC (Brushless DC voir le chapitre III pour une description concise de leur fonctionnement).

L'architecture électrique

L'architecture électrotechnique était simpliste et non optimale. En effet, le contrôle de la génératrice (présenté Chapitre III et V) n'était pas possible puisque le redressement AC vers DC s'effectuait grâce à un pont de diodes. Ainsi, le couple résistant était plus ou moins binaire (nul si vitesse faible, important si vitesse trop haute). En effet, le couple résistif apparaît alors uniquement si la tension entre phases est supérieure à celle du stockage et ce couple est non piloté...

Cette solution technique provoquait une sensation de pédalage non agréable. De plus, le montage par courroie trapézoïdale générait des pertes de transmission supplémentaires (voir Figure B-4).

Le pack de supercondensateur était conséquent avec l'assemblage de 9 supercondensateurs en série de 3000 F pour une énergie totale embarquée de 30 Wh environ.

Quelques illustrations de la réalisation



Figure B-1 : Carte d'électronique de contrôle. On distingue le pont de diode à droite, un banc de condensateurs pour le redressement DC associé, une carte Nucléo pour le contrôle du véhicule ainsi que de la connectique pour les nombreuses entrées sorties de contrôle et de puissance du système.

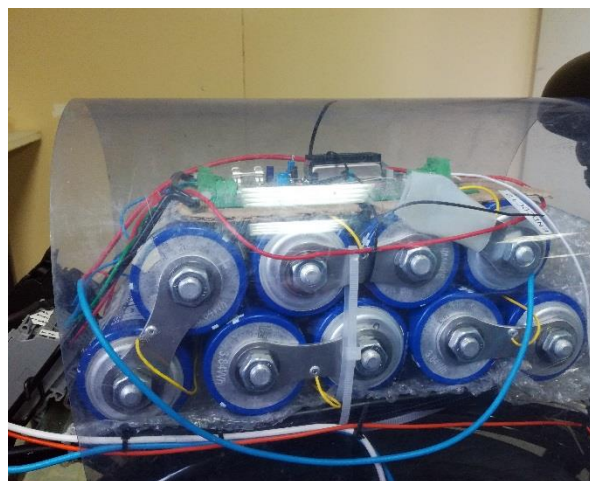


Figure B-2 : Présentation du pack de supercondensateurs composé de 9 supercondensateurs de 3000 F chacun.

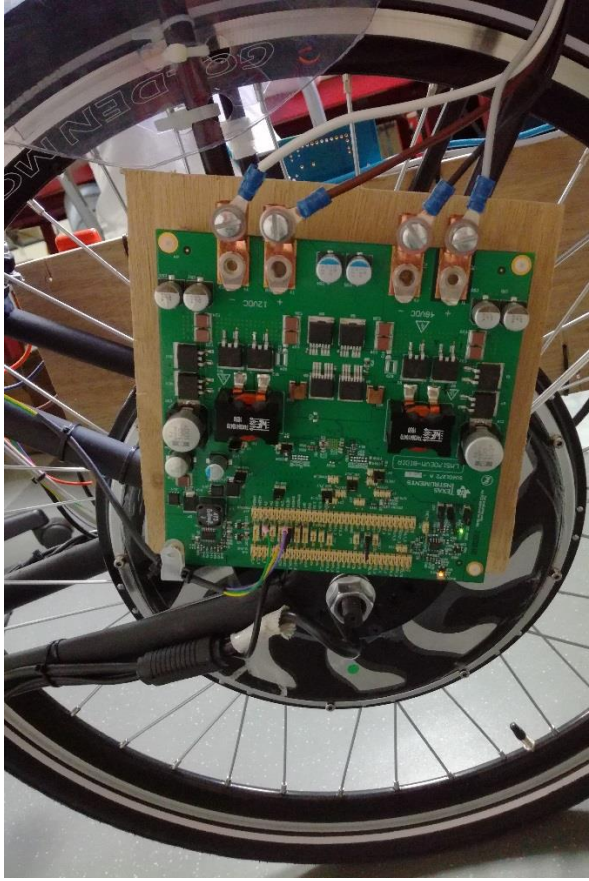


Figure B-3 : Photo du convertisseur DCDC Buck et Boost avec transition non automatique entre les deux fonctions en version d'essai de chez Texas Instrument.

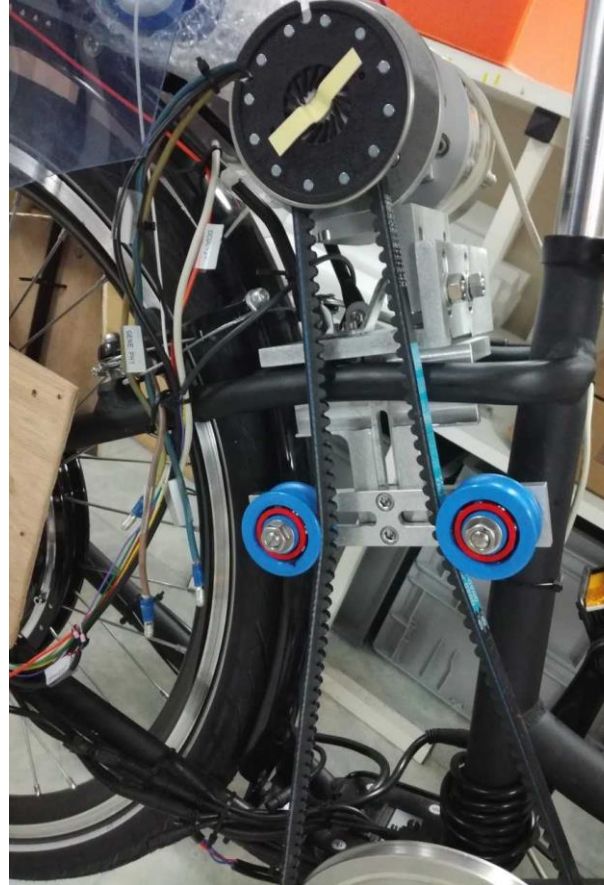


Figure B-4 : Montage générateur avec lien mécanique à courroie entre le pédalier et la génératrice.

Les résultats étaient cependant concluants puisqu'il était possible de se déplacer (au prix de nombreux watts humain), sur sol plat. Ce premier prototype a été l'occasion de commencer à comprendre le fonctionnement d'un pilotage d'une machine brushless dans le détail, de se poser les premières questions concernant le mouvement de pédalage, de faire quelques relevés et de s'approprier l'architecture hybride série dans son ensemble.

B.2 Le second démonstrateur

Le second démonstrateur a été conçu comme une amélioration du premier avec notamment la révision de l'architecture électrique et l'intégration de pilotage vectoriels sur les deux machines. L'utilisation de boîtiers du commerce propriétaires a été un problème dans cette phase, car les boîtiers n'effectuaient pas systématiquement les actions souhaitées (mise en défaut récurrente, calibration complexe).

Un soin particulier avait été apporté au design de la génératrice qui a été intégrée dans l'axe du pédalier malgré la nécessité d'intégrer une multiplication mécanique intermédiaire pour augmenter la vitesse de rotation de la génératrice (voir Figure B-5). La mécanique fut ici encore un élément limitant du système à cause du bruit et d'une transmission aux performances non éva-

luées. L'arrangement spécifique des engrenages avec trois étages provoquait probablement beaucoup de pertes. Cette version a aussi vu l'intégration d'un afficheur permettant de visualiser en temps réel l'état de charge du pack de supercondensateurs ainsi que le déficit ou le gain entre l'énergie produite et consommée à la roue. C'était la première version d'un afficheur permettant à l'utilisateur de réguler son énergie disponible et de moduler sa vitesse en fonction du parcours.

Le contrôle du système, obtenu grâce à la fabrication maison de plusieurs sous-systèmes, a permis d'implémenter notre propre BMS (ou SMS pour Supercap Management System), mais aussi un système embarqué performant à base d'un STM32. Ce système a permis de réaliser nos premiers essais de pilotage spécifique de la génératrice, de se concentrer sur le ressenti utilisateur et de proposer les premiers algorithmes de gestion de l'énergie présentée au Chapitre IV.

Le cadre a été spécifiquement choisi pour incorporer une petite roue à l'arrière, ce qui permet de positionner le moteur sur des zones plus efficaces. Les résultats de ces prototypes ont été encourageants puisque nous pouvions nous déplacer en extérieur et régler l'effort de la génératrice grâce à un bouton situé sur le cintre de direction.

Cependant, le rendement de cette architecture a été évalué à 36% au Chapitre III. Ceci explique le déficit énergétique courant que nous pouvions constater quand les personnes essayaient le vélo.



Figure B-5 : Illustration de la génératrice intégrée au pédalier.



Figure B-6 : Photo du vélo complet, on distingue le bloc générateur, la machine dans la roue ainsi que la boîte/porte-bagages contenant les supercondensateurs.

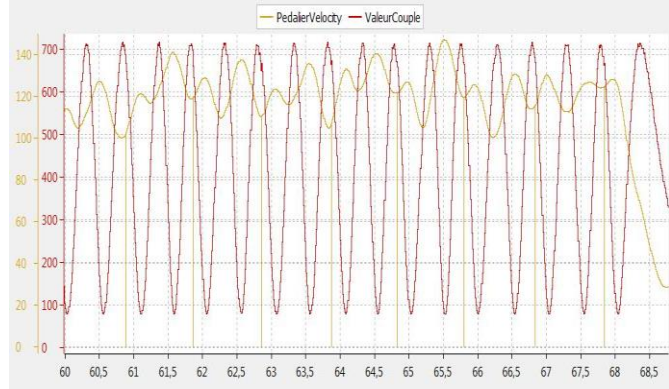


Figure B-7 : Première image des variations de vitesse liées à un pilotage de type couple sinusoïdal sur la machine.

B.3 Le vélo triporteur

Le triporteur a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec un équipementier souhaitant se convertir au déplacement de matériel à vélo. Le cahier des charges du véhicule imposait de pouvoir tracter une masse de plusieurs centaines de kilogrammes dans une pente à 10%.

Le choix de la machine et de la transmission fut une étape critique nécessitant de modéliser le couple de traction nécessaire et la consommation liée. L'ajout d'un panneau solaire promettait la possibilité d'avoir une autonomie accrue voire un véhicule autonome en fonction du trajet effectué. Afin d'assurer une autonomie de plusieurs dizaines de kilomètres, un système batterie + supercondensateur a été installé sur le système.



Figure B-8 : Photo du triporteur décoré vu sur le côté. Mise en évidence de la surface frontale élevée, des roues larges, et de la non-ergonomie du cycle pouvant expliquer en partie la consommation élevée du véhicule.



Figure B-9 : Photo de la transmission mécanique du moteur vers la roue (une seule roue motrice). La chaîne sert à réduire la vitesse de rotation et augmenter le couple à la roue dans l'objectif de tracter le véhicule de 400 kg dans des pentes à 10%.



Figure B-10 : Photo du panneau solaire installé sur le toit du vélo (170 Wc).

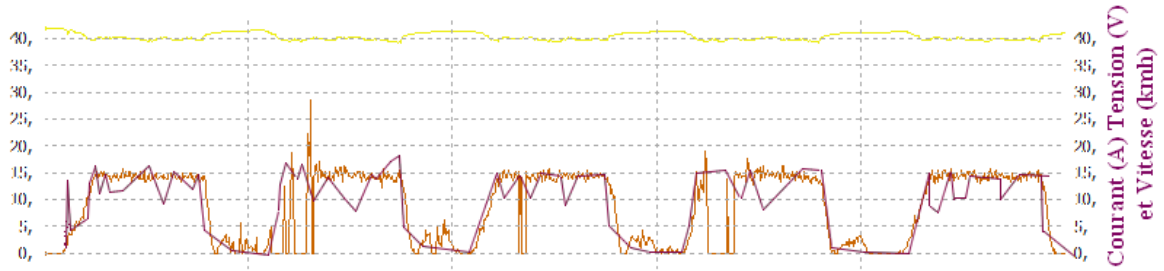


Figure B-11 : Illustration de la mesure des performances du vélo cargo présenté ci-dessus avec la mesure de la tension batterie, du courant et enfin de la vitesse GPS.

Des relevés de consommations ont été effectués et ont mis en évidence une consommation du véhicule aux alentours de 30 Wh/km sur le plat. Cette consommation est importante et bien au-delà des valeurs constatées sur des vélos standards. Cependant, le véhicule est mécaniquement volumineux et constitué de pièces mécaniques de scooter qui peuvent expliquer la consommation accrue du véhicule en plus du poids.

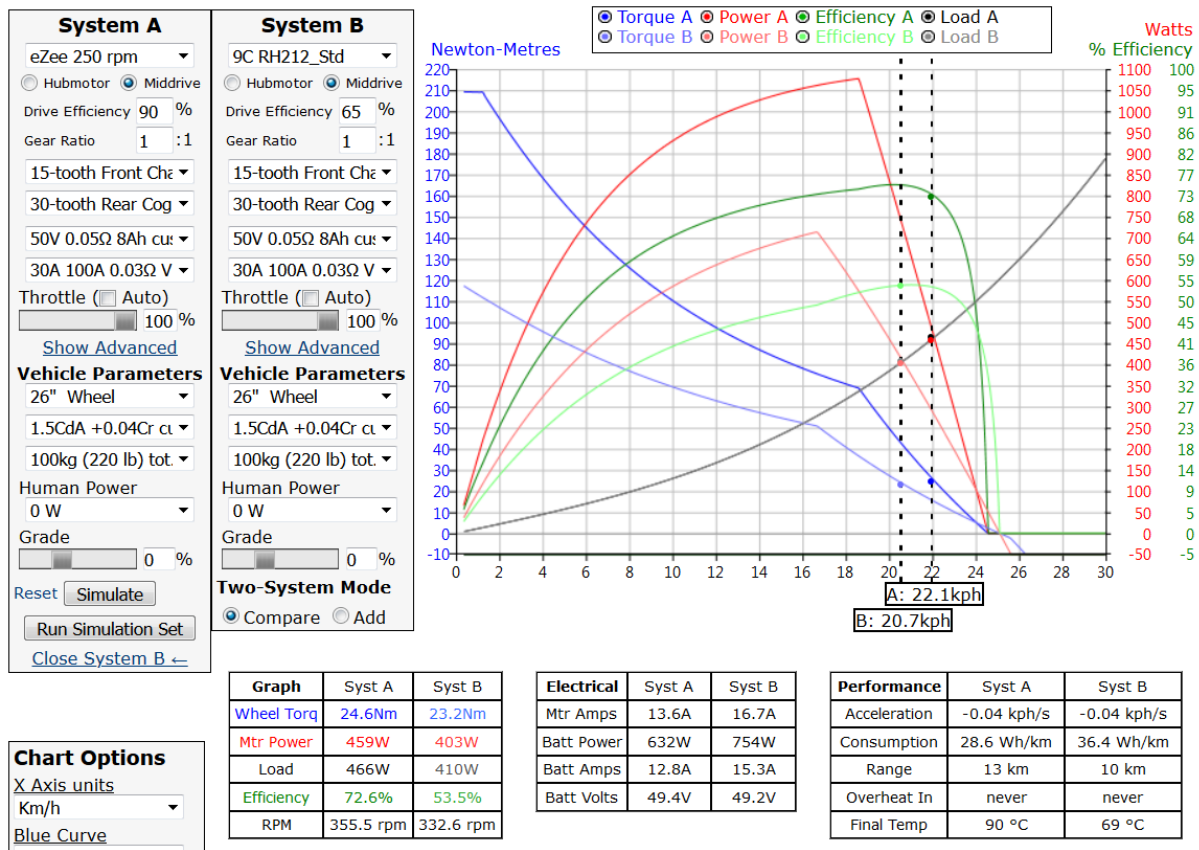


Figure B-12 : Illustration d'un comparatif entre deux machines tractant un véhicule de 100 kg sur le plat pour un système de stockage de tension 50 V et 100 A phase avec un rapport de transmission de 2 (division de la vitesse par 2, voir montage mécanique exposé sur la Figure B-9). Le graphique permet d'observer la puissance consommée, le point d'équilibre du véhicule à terme (aux alentours de 21 km/h) pour les deux machines. Il permet également d'observer le rendement machine (ici 55% pour la machine B et 75% pour la machine A).

Le développement de ce vélo a permis de mettre en place notre première version de générateur agréable à l'usage ainsi que de valider nos cartes DC/DC réalisées en interne dans la société (voir annexe D).

B.4 Le vélo «Suntrip»

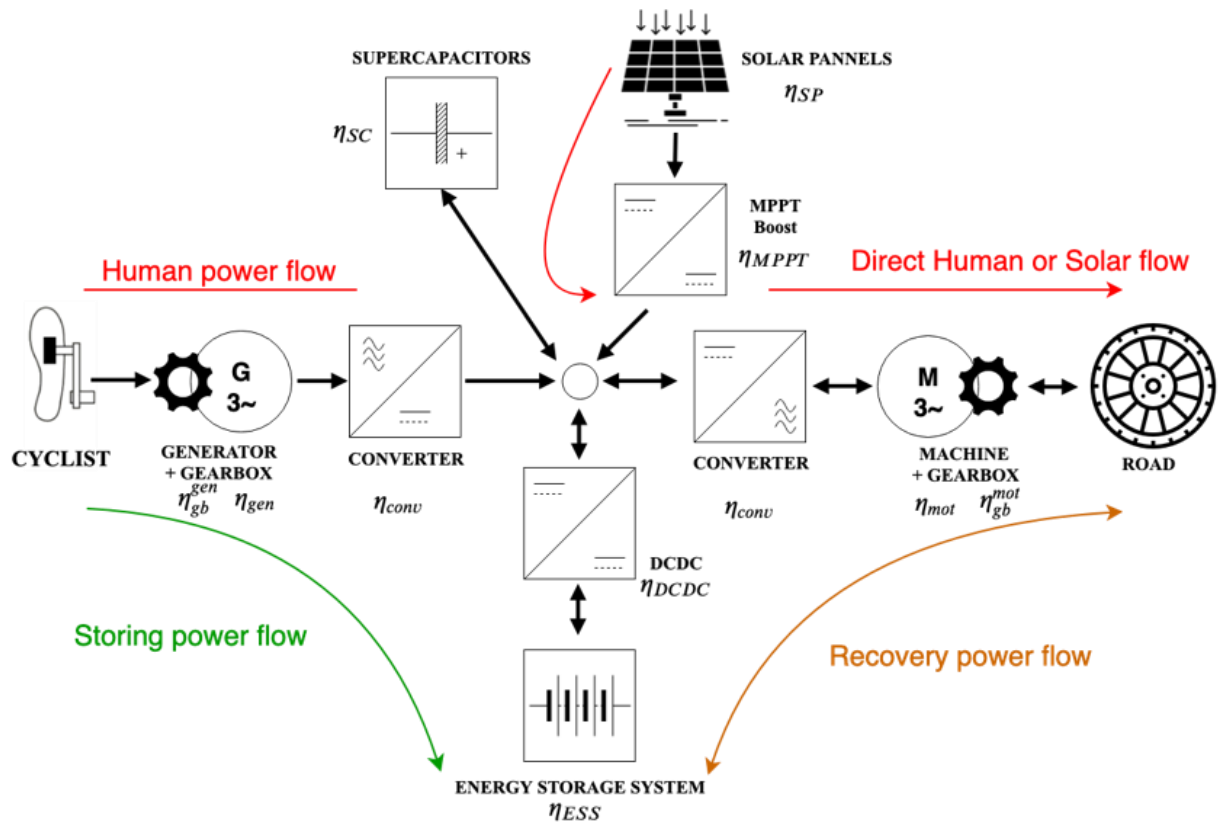


Figure B-13 : Synoptique d'assemblage des différents sous-ensembles du vélo hybride humain-solaire avec système de stockage batterie/supercapaciteurs.

Le vélo dit « suntrip » est un vélo réalisé entre décembre 2019 et février 2020. Initialement, le vélo a été conçu pour rallier la Chine en partance de Lyon dans le cadre de la course : le Suntrip.

Face à la crise sanitaire mondiale de la Covid 19 en 2020. Cette course a été annulée, mais remplacée par un voyage de plus de 3 000 kilomètres à travers la France (Lyon, Blois, Saint Malo, Plouguerneau, Pau, Anduze, Val Cenis, Albertville).

Le vélo est ici constitué sur la base d'un vélo couché tout en acier avec 3 roues, ce qui permet de pédaler à l'arrêt. Le système est monté sur une architecture hybride série tels que :

- ❖ Un toit solaire, inclinable au soleil, de 510 Wc permettant de recharger plusieurs kWh en une seule journée. Un convertisseur Boost MPPT a été associé à chaque panneau.
- ❖ Une génératrice conçue à partir d'une machine pédalier Bafang BBS02 et d'une carte électronique faite maison.
- ❖ Une machine RH212, direct drive pour la robustesse et la possibilité de régénérer dans les descentes. La puissance de cette machine est supérieure à 1 kW. Des ailettes et un fluide ferromagnétique lui ont été ajoutés afin d'améliorer la dissipation de chaleur pour pouvoir franchir les cols.

- ❖ Un système de stockage composé d'une batterie 13s8p disposant d'une énergie de 1.14 kWh de capacité initiale théorique ainsi qu'un pack de supercondensateurs composé de 20 supercondensateurs 3 V,480 F. Le montage des différents éléments de stockage du système est de type supercondensateurs sur le bus et batterie via un DC/DC. Les supercondensateurs agissent comme un filtre passe bas que la batterie doit contrôler via le convertisseur DC/DC [228]. L'association batterie et supercondensateur est un sujet classique de réflexion sur les véhicules hybrides. La littérature associée est abondante [228].



Figure B-14 ; Carte du tour de France à vélo solaire réalisé avec un vélo hybride série à panneaux solaires et énergie humaine.



Figure B-15 : Changement de capteur à effet hall et rayonnage.

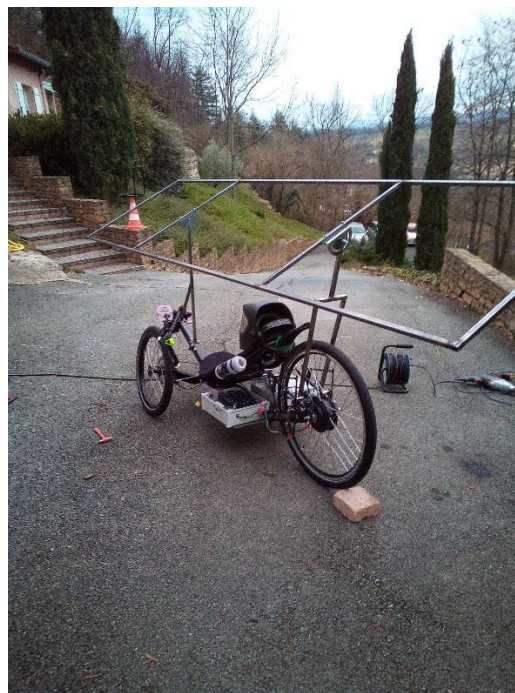


Figure B-16 : Premiers tests structurels pour la mécanique porte-panneau.



Figure B-17 : Assemblage d'une batterie maison à base de 104 cellules NMC LG HG2.



Figure B-18 : Illustration du vélo une fois assemblé dans sa totalité.

Le vélo Suntrip a permis de rouler plus de 5 000 kilomètres en vélo solaire. Ces tests ont permis de valider l'architecture dans sa totalité. Des options particulières comme le régulateur de vitesse ont été installées sur ce véhicule pour la première fois. Le régulateur de vitesse est une option utile qui permet de maintenir la vitesse, même en descente, grâce au freinage régénératif.

La Figure B-19 illustre le trajet réel effectué en 19 jours.



Figure B-19 : Trace du parcours effectué pendant l'été 2020 à vélo solaire hybride série à assistance photovoltaïque.

B.5 Conception et assemblage de la troisième génération de vélos



Figure B-20 : Image du troisième prototype.

Le troisième prototype construit durant cette thèse intègre l'ensemble de nos connaissances présentées dans ce manuscrit de manière à réaliser un système atteignant un peu plus de 50% de rendement en simulation. Ce vélo intègre les éléments suivants :

- ❖ Génératrice prête pour industrialisation au rendement mesuré de 85% ;
- ❖ Machine RH212 direct drive pour le silence de conduite ainsi que la possibilité de roue libre ;
- ❖ Un pack de 20 supercondensateurs offrant l'équivalent d'un kilomètre d'autonomie ;
- ❖ Un display permettant d'afficher la puissance produite, la puissance consommée, l'état de charge des supercondensateurs.

Ce vélo permet de se déplacer en situation d'équilibre énergétique moyennant un effort raisonnable quoi que conséquent vis-à-vis d'un vélo traditionnel. Il a aussi permis de lancer une première campagne d'essais sur ses performances, non abouties à ce jour.

Les profils de puissance et de vitesse associées sont cohérents avec les résultats présentés au Chapitre I et au Chapitre III. La Figure B-22 montre l'évolution de la tension sur le bus flottant au cours de l'accélération. Il est possible de voir que la tension n'est pas stable comme elle le devrait. En effet, la tension chute ici à la place de rester fixe à 50 V. Ceci s'explique grâce à la limitation en puissance du convertisseur DC/DC entre les supercondensateurs et le bus qui limite la puissance de sortie à 350 W soit moins que l'appel du courant machine.

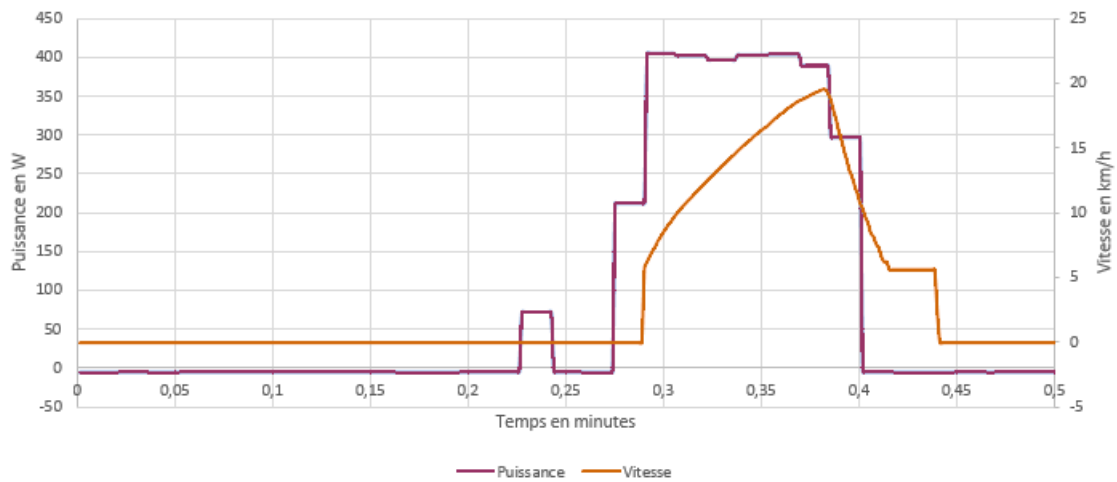


Figure B-21 : Illustration de la montée en vitesse du vélo pour une puissance maximum de 400W

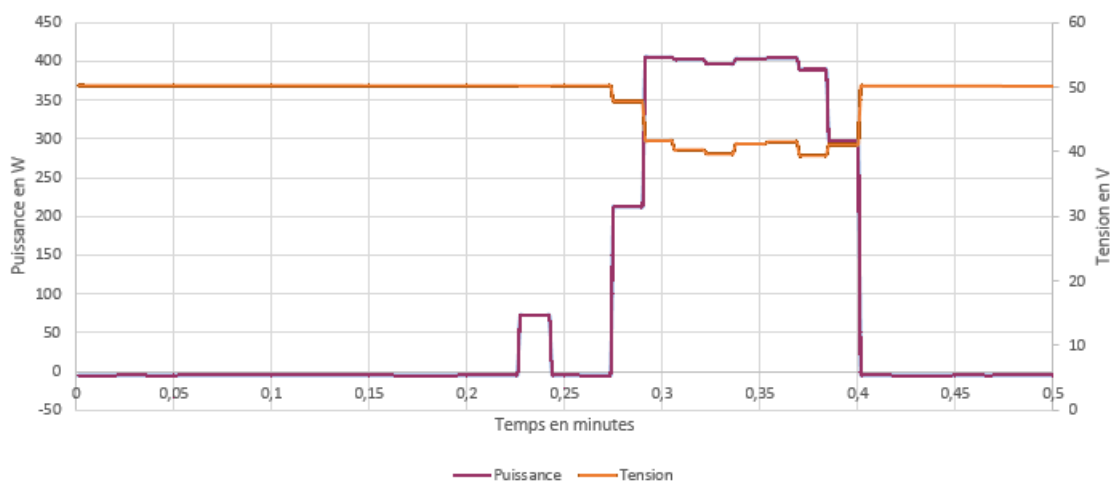


Figure B-22 : Illustration de la tenue en tension du bus lors d'une accélération. Ici, la tension chute à cause de la limitation à 350W du DC/DC (la machine consomme trop).

C. Note générale concernant la conception de véhicules hybrides et l'intégration de la traction humaine dans le calcul

Les véhicules hybrides peuvent admettre plusieurs sources d'énergie et plusieurs machines (fonctionnement moteur ou générateur) pour convertir cette énergie. Leur conception a généralement pour objectif d'optimiser le fonctionnement global du véhicule pour augmenter les performances et en particulier optimiser la consommation d'énergie [77], [162], [219], [229]–[231].

Dans le but de concevoir un véhicule hybride, plusieurs axes de travail doivent être intégrés dans la réflexion :

- ❖ La définition de l'utilisation et du/des cycles standards représentatifs d'un usage (de nombreux exemples existent dont les plus connus sont le NEDC ou le WLTP dans l'industrie automobile).
- ❖ Le choix des composants du système qui permettent d'optimiser certains critères prioritaires comme le poids, le coût ou la performance tout en garantissant un certain niveau de performance : vitesse, accélération, traction, ...
- ❖ La gestion de l'énergie entre les différentes sources.

Ces réflexions mènent directement à la notion d'optimisation du système. Le concepteur définit les critères à optimiser, définit les variables d'ajustement et les contraintes du système. Une vision globale des possibilités (type d'hybridation, sources d'énergie, source de stockage, outils de modélisation) est donnée dans le développement ci-dessous.

C.1 Les différentes sources

Un véhicule hybride peut intégrer toute source d'énergie embarquable dans sa conception. Certaines sources sont plus ou moins pertinentes en fonction des performances requises et de l'énergie nécessaire à la réalisation de ses contraintes. Nous pouvons dans un premier temps distinguer des éléments de production d'énergie avec pas ou très peu de stockage embarqué :

- ❖ Les moteurs thermiques à essence, diesel, biocarburant, etc.
- ❖ Les éoliennes (pas forcément évident à embarquer sur tous les véhicules)
- ❖ Les panneaux solaires
- ❖ Les piles à combustible
- ❖ Les humains et plus généralement la traction animale.

Ces sources d'énergie peuvent être couplées entre elles, mais aussi être couplées à des systèmes de stockage d'énergie qui permettent de lisser le fonctionnement des premières sources et ainsi de diminuer le stress occasionné sur ces dernières. Parmi les systèmes de stockage utilisés, il est possible d'identifier :

- ❖ Les batteries
- ❖ Les supercondensateurs
- ❖ Les volants d'inertie

L'assemblage des sources entre elles est un des enjeux majeurs de la conception de véhicules hybrides. En effet, plusieurs modes de couplage existent et disposent, chacun, de leurs propres avantages et inconvénients. La figure C-1 illustre les différents modes d'interaction entre les sources.

- ❖ Le montage à une seule source : les véhicules traditionnels thermiques ou les voitures électriques actuelles appartiennent à cette catégorie
- ❖ Le montage hybride série : certains groupes propulseurs diesel pour bateaux, le vélo de ce manuscrit, ...
- ❖ Le montage hybride parallèle
- ❖ Le montage hybride Parallèle/Série qui est capable à la fois d'interagir entre les sources, mais aussi d'avoir un lien direct de chaque source avec la machine.

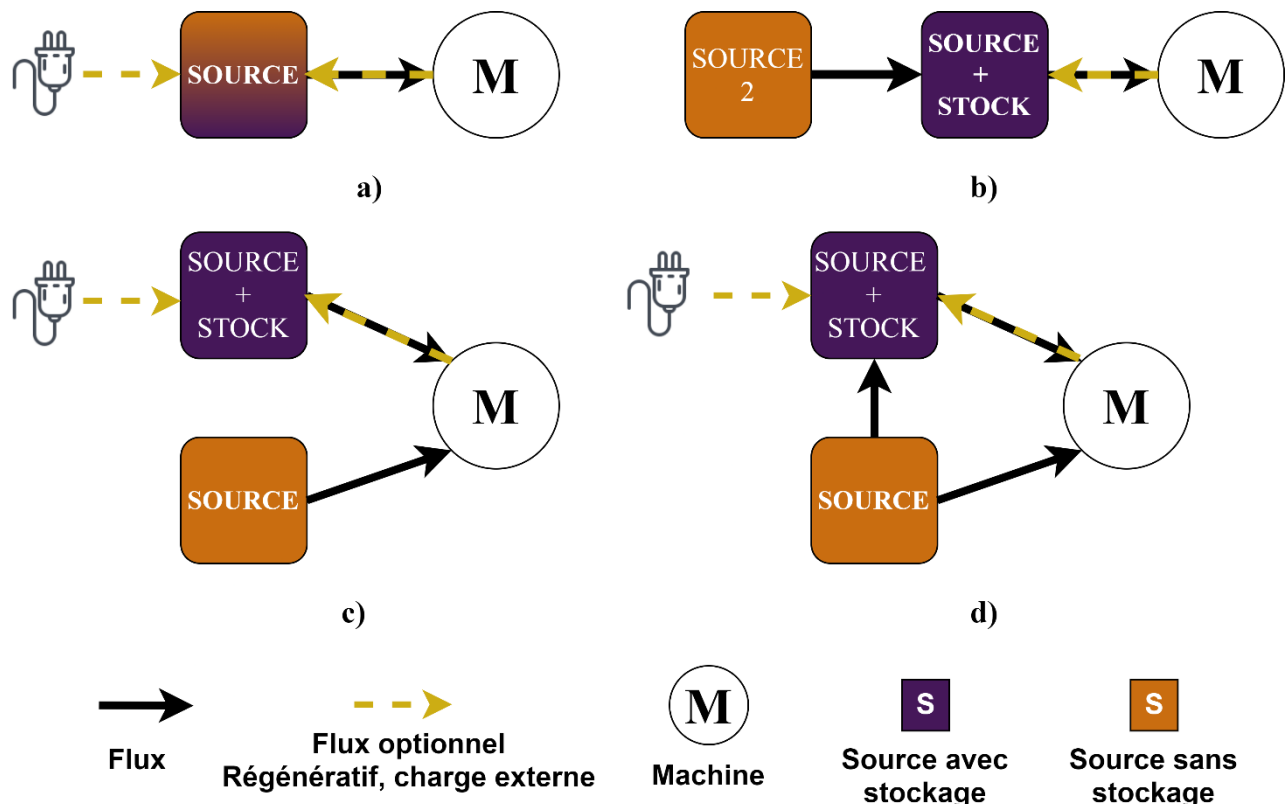


Figure C-1 : Différents types d'hybridation et les différents flux d'énergie transitant dans le système. Les schémas illustrent : a) un système non hybridé équipé d'une source unique avec ou sans stockage permettant ou non de recharger sur la prise et la régénération en fonction du type de moteur (thermique, électrique), ce sont les automobiles traditionnelles. b) l'hybridation série, avec une source sans stockage (thermique, animale, solaire, ...) qui ne tracte pas le véhicule en direct, mais qui voit son énergie transférée par une seconde source qui peut, elle, peut le stocker. c) Hybride parallèle avec deux sources d'énergie différentes qui sont couplées, mais ne peuvent pas s'échanger de l'énergie. d) Hybride série parallèle, les sources peuvent fonctionner en série ou en parallèle.

C.2 Concevoir un véhicule hybride

Concevoir un véhicule hybride implique souvent de raisonner dans un environnement multi-physique. En effet, les sources évoquées précédemment sont issues de différents domaines de la physique tels que la photonique, la thermique, la chimie ou encore la biophysique. Les couplages

effectués entre les différentes sources sont majoritairement effectués sous forme électrique qui permet le stockage d'énergie grâce aux batteries ou plus rarement grâce à des supercondensateurs.

La conception d'un véhicule intégré de toutes les sources présentées ici implique d'embarquer des éléments de conversion d'énergie qui permettent de relier les sources entre elles. Ces convertisseurs sont majoritairement composés par :

- Les convertisseurs électriques DC/DC, AC/DC, ...
- Les embrayages, les engrenages, les CVT

L'ensemble de ces éléments peut être modélisé afin de les comprendre, de les optimiser, et enfin de les dimensionner dans le but de les insérer dans un système global.

C.3 Élément de modélisation des systèmes multiphysiques

Modéliser un système multiphysique peut s'avérer complexe. Plusieurs niveaux de modélisation peuvent être identifiées. La sélection du niveau de modélisation adéquat est ensuite systématiquement une affaire de choix :

- ❖ Le niveau de complexité du modèle : cette question doit toujours être abordée sous l'angle de : quel phénomène voulons-nous modéliser ? De cette manière, il est possible de prendre en compte des modèles d'ordre de grandeur et de complexité adapté à la problématique.
- ❖ L'échelle de temps et le pas de calcul : ici encore, quel est le pas de temps réaliste vis-à-vis de notre application ?
- ❖ Les lois physiques : notamment la dynamique des systèmes peut être complexe à modéliser. Les systèmes très détaillés incluent de nombreuses variables d'état qui peuvent complexifier les calculs.

Afin de simuler ces modèles, différentes théories et logiciels (Simulink, Amesim, ...) permettent de mettre en place des environnements de simulation puis d'optimisation intéressants, Les théories sont connues sous le nom de :

- ❖ Approche analytique énergétique lagrangienne (équation de Lagrange généralisée aux systèmes multiphysiques)
- ❖ Bond graph ou graphe linéaire
- ❖ La Représentation Énergétique Macroscopique (REM)
- ❖ Les graphes de liaisons de manière générale

C.4 Éléments de modélisation

La modélisation des éléments constitutifs d'un système prend généralement deux formes distinctes qui permettent une modélisation fiable d'un système lorsque le système est décrit sous une approche énergétique. Ces méthodes sont basées sur un bilan de puissance au niveau de l'élément étudié telles que la puissance d'entrée $P_{entrée}(W)$ et la puissance de sortie $P_{sortie}(W)$ sont reliées par les pertes de l'élément $P_{pertes}(W)$.

$$P_{sortie} = P_{entrée} - P_{pertes} \quad \text{C-1}$$

- ❖ La modélisation analytique. Par exemple, une machine électrique qui serait uniquement soumise à des pertes par effet joule pourrait être modélisée par :

$$P_{pertes} = RI^2 \quad \text{C-2}$$

- ❖ La modélisation par cartographie. Une carte de pertes fonction du point de fonctionnement (pour une machine électrique, cette carte peut avoir jusqu'à 3 dimensions parmi les 4, $U_{batterie}$, $I_{batterie}$, ω_{mot} , T_{mot}) peut être utilisée à la place d'une démarche analytique. Cette cartographie peut être mesurée ou estimée grâce à un modèle analytique ou une estimation numérique en amont de la simulation. Par exemple, une modélisation des phénomènes magnétiques du stator d'une machine à l'échelle micro (simulation numérique locale de la répartition du champ magnétique) à l'aide des équations aux dérivées partielles de Maxwell peut être résolu par la méthode des éléments finis.

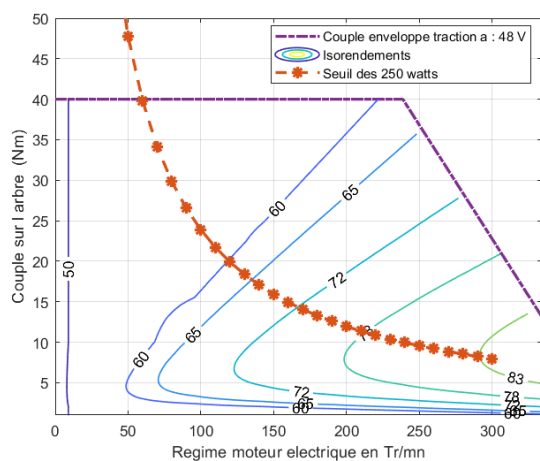


Figure C-2 : Cartographie de rendement d'un moteur BLDC classiquement utilisé sur des VAE.

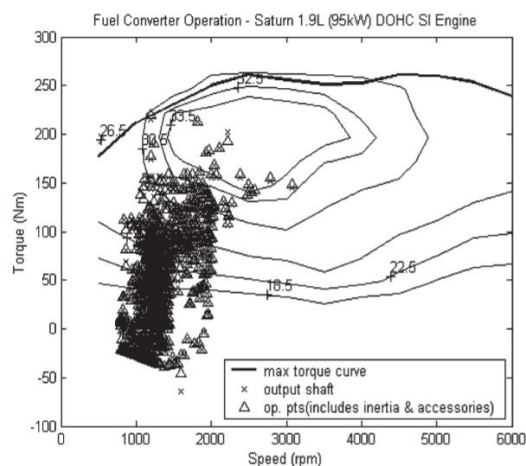


Figure C-3 : Cartographie de rendement d'un moteur thermique et ses points de fonctionnement sur un cycle de conduite normalisé type NEDC.

Les simulations effectuées doivent permettre de calculer des scénarios où le véhicule se déplace sur le parcours type défini (type NEDC, ...). La modélisation permet de déterminer l'état du système à tout instant et ainsi de simuler les points de fonctionnement du système.

Sur la Figure C-3, les points de fonctionnement du moteur thermique sont globalement assez loin de la zone de fonctionnement optimum qui se trouve proche du couple maximum du moteur.

Afin de déplacer les points de fonctionnement du moteur vers la zone efficace, des boucles d'optimisation sont généralement mises en place afin de trouver la solution permettant de minimiser les pertes, de dimensionner le moteur au plus juste. Par ce biais, les optimisations sont très dépendantes du parcours effectué. En effet, les résultats peuvent différer grandement entre un trajet urbain, autoroutier, de montagne, de plaine, etc. La détermination d'une solution optimale sur une série d'usage nécessite d'approfondir la démarche.

C.5 Vers l'intégration d'un humain dans la boucle d'optimisation

L'intégration et la compréhension de l'insertion du corps humain dans cette démarche d'optimisation sont particulières. En effet et en premier lieu, l'homme n'est pas pilotable et n'a donc pas un comportement répétable et bien défini. C'est pourtant le cas de la majorité des simulations sur des véhicules hybrides utilisant des moteurs thermiques, électriques, ... Dans un second temps, la modélisation de l'homme dans un modèle multiphysique n'est pas aisée, car l'humain est un sujet complexe dont les paramètres changent en fonction de nombreux facteurs internes comme externes [51], [55], [58]–[61].

Ainsi, intégrer le corps humain et ses réactions au cœur d'un problème d'optimisation est délicat. Néanmoins, certains postulats peuvent permettre de réduire le champ d'incertitude :

- ❖ L'homme se comporte comme l'expérimentateur le souhaite, c'est-à-dire que l'on minimise les incertitudes comportementales humaines. Cette hypothèse est particulièrement valable lors d'essais encadrés.
- ❖ Le modèle doit être purement énergétique et ainsi ne pas avoir à raisonner avec des notions de biomécaniques (chaînes cinématiques polyarticulaires et comportement musculaire) qui peuvent être complexes.

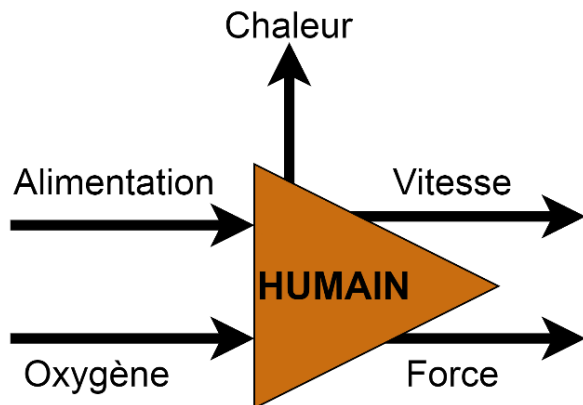


Figure C-4 : Proposition de modélisation d'un humain dans la cadre d'une analyse énergétique basique.

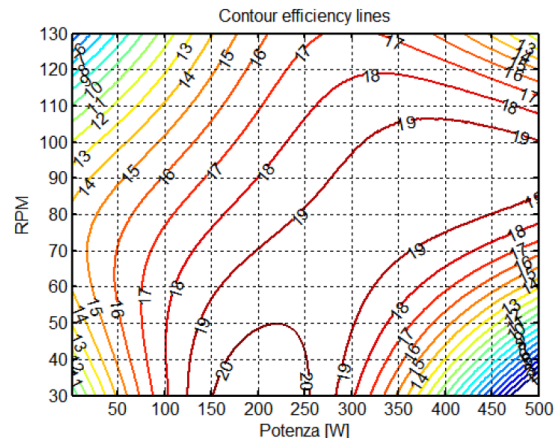


Figure C-5 : Carte de "rendement" dite de Gross Efficiency d'un humain.

À l'image d'un moteur thermique dans un véhicule hybride, l'hybridation de l'énergie humaine doit être focalisée sur le gain pour l'humain. Ainsi, le travail sur le point de fonctionnement maximisé du moteur peut ici être reproduit avec pour objectif de minimiser la fatigue de l'utilisateur.

La Figure C-4 présente un exemple de bloc énergétique pouvant être utilisé comme base de simulation. Le profil est pourtant complexe car aucune relation directe ne relie simplement les couples oxygène/alimentation et vitesse/force. La carte de rendement présentée sur la Figure C-5 est un exemple de modélisation entre la consommation d'oxygène et l'effort fourni par un cycliste.

Des détails concernant l'hybridation et l'approfondissement de ces informations ont été présentés au Chapitre V.

D. Analyse d'un convertisseur DCDC buck-boost bidirectionnel en courant

D.1 Cadre général

Le convertisseur bidirectionnel en courant a été brièvement présenté au Chapitre III. C'est cependant un élément important du système. L'objectif est de maintenir une tension constante aux bornes du bus. Comme la carte doit être compacte et potentiellement laisser passer une quantité de courant importante, une étude des pertes dans la carte a dû être réalisée.

D.2 Pertes dans les interrupteurs de puissance

Ainsi, les pertes standard ont été modélisées pour les interrupteurs de puissance MOSFETs, incluant un certain nombre de pertes comme les pertes Joules, les pertes par commutation, les pertes dans les diodes, ... L'entreprise ROHM propose une modélisation standard que nous avons choisi d'appliquer pour modéliser notre convertisseur avec $R_{DS(ON)}$, la résistance série, I_{out} le courant série, α , le pourcentage de temps du MOSFET en conduction, t_r et t_f les temps de montée et de descente du MOSFET, f_{sw} la fréquence de switching.

Les pertes Joules pour le MOSFET du côté positif du pont :

$$P_{cH} = I_{out}^2 R_{DS(ON)} \alpha \quad \text{D-1}$$

Les pertes Joules pour le MOSFET relié à la masse :

$$P_{cL} = I_{out}^2 R_{DS(ON)} (1 - \alpha) \quad \text{D-2}$$

Les pertes par commutation :

$$P_{swH} = 0,5 V_{bus} I_{out} (t_r + t_f) f_{sw} \quad \text{D-3}$$

Les pertes diodes :

$$P_D = V_{seuil\ diode} I_{out} (t_{Dr} + t_{Df}) f_{sw} \quad \text{D-4}$$

et enfin les pertes de charge de la grille :

$$P_g = V_{gs} Q_g f_{sw} \quad \text{D-5}$$

L'analyse et le calcul de ces pertes pour plusieurs références de MOSFETs ainsi que pour plusieurs fréquences à différentes puissances ont permis de choisir un MOSFET performant.

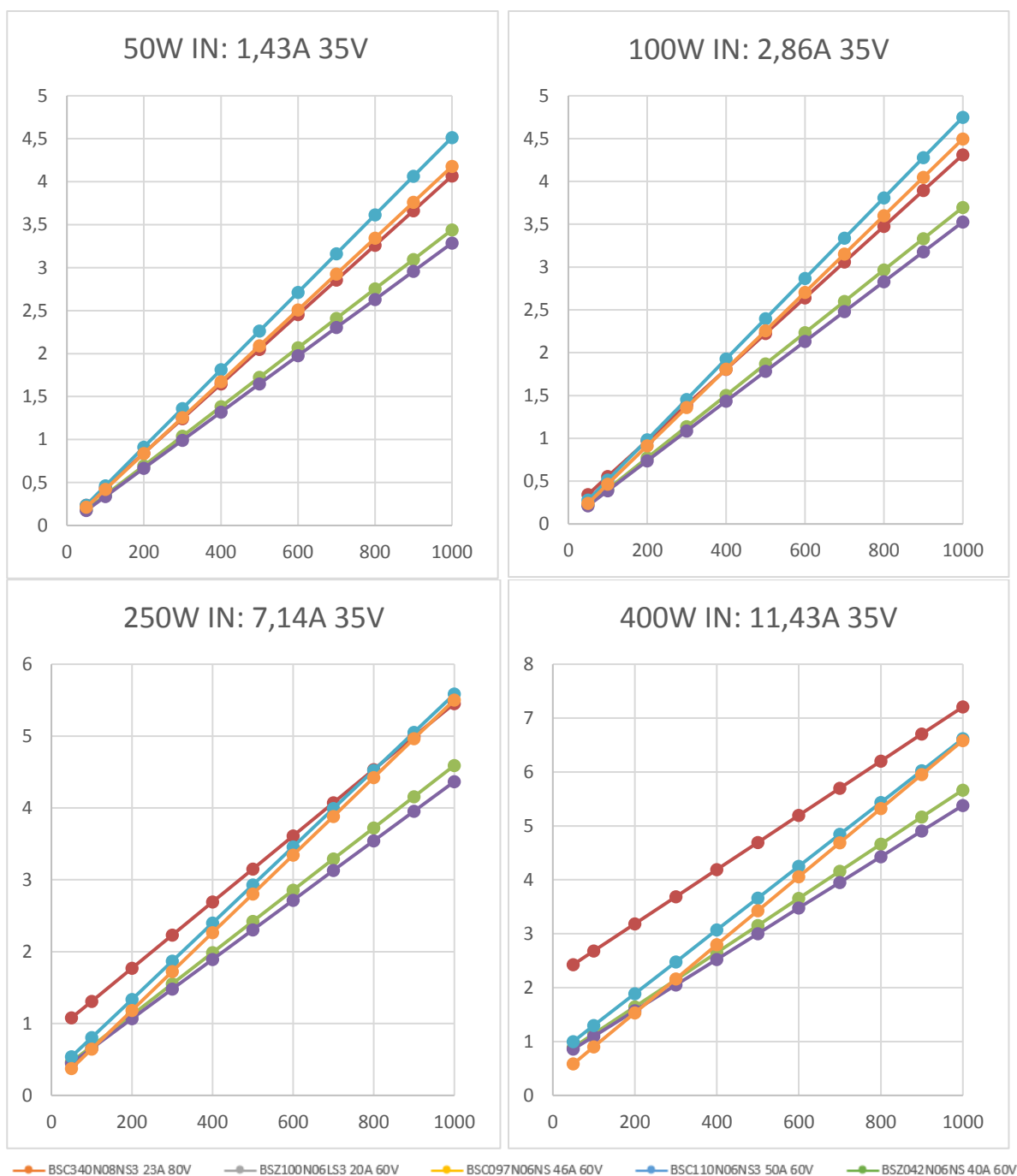


Figure D-1 : Simulation de pertes dans des interrupteurs de puissance de type MOSFET (fréquence de commutation en kHz en abscisse et pertes dans le composant en W en ordonnée).

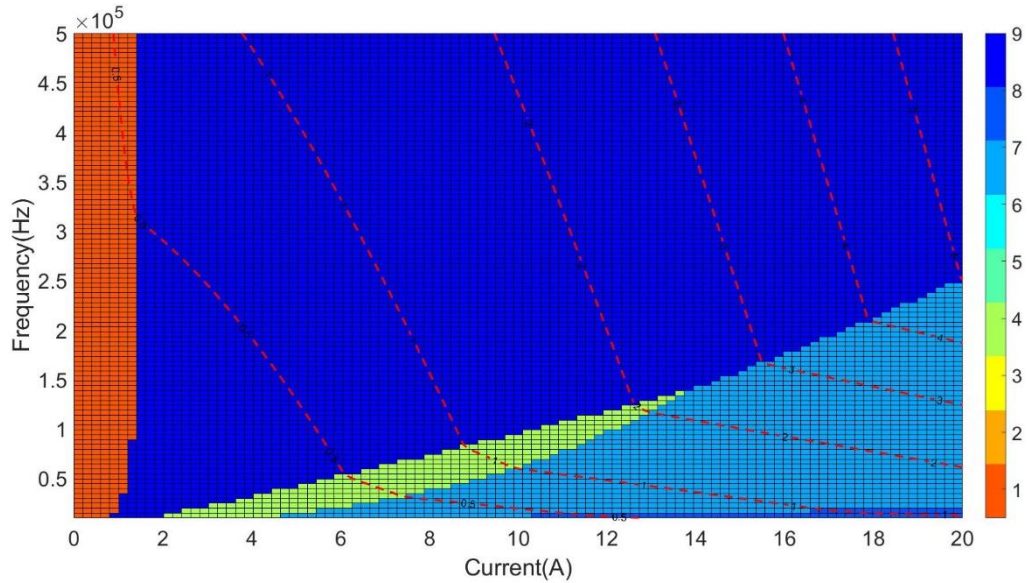


Figure D-2 : Cartographie indiquant le meilleur MOSFET de la base de composant (voir annexe F) en fonction de la fréquence de commutation et de courant, on peut observer plusieurs MOSFETs qui peuvent avoir différentes caractéristiques, avantages comme de faibles pertes par commutation ou encore de faibles pertes Joules.

D.3 Les pertes dans l'inductance

Une analyse des pertes dans les inductances a également été menée. Les pertes dans l'inductance sont complexes à modéliser. Elles comprennent une partie ohmique avec les pertes Joules, une partie fréquentielle due aux ondulations de courant dans le bobinage du composant. L'analyse des pertes de l'inductance se base sur les outils de simulation de performance pointus proposés par Würth electronic ou encore Coilcraft.

Le choix d'une inductance performante peut permettre de réduire les pertes de manière significative. L'étude menée a permis de diviser les pertes par 4 sur le convertisseur DC/DC des supercondensateurs.

La Figure D-3 présente la somme des pertes dans les interrupteurs de puissance ainsi que dans l'inductance après une sélection raisonnée des composants. La Figure D-4 illustre une réalisation de convertisseur 1 kW réalisé afin de permettre la stabilisation du bus de tension comme décrit au Chapitre III.

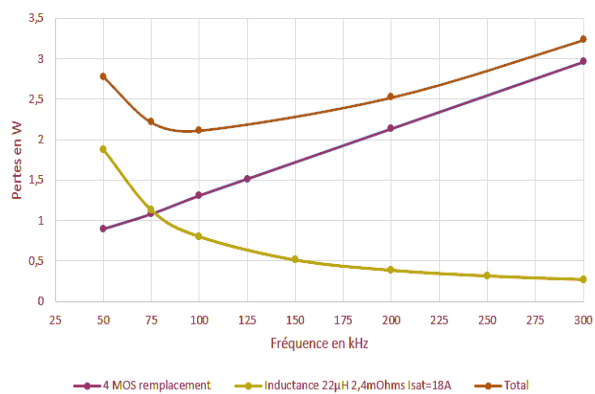


Figure D-3 : Estimation des pertes dans le convertisseur DC/DC comme la somme des pertes dans l'inductance et dans les MOS.



Figure D-4 : Illustration d'un convertisseur DC/DC 1 kW monté avec une sélection raisonnée de composants.

E. Le solaire, un vrai outil à échelle humaine

E.1 Éléments de compréhension du potentiel solaire

Des projets très ambitieux, comme le Solar Impulse, visent à alimenter des engins nécessitant d'importantes dépenses énergétiques en 100% solaire, un point fort de la thèse a été la découverte de la manne substantielle d'énergie que représente un panneau solaire comparée à l'énergie produite par un humain.

En effet, le Chapitre V a permis de décrire succinctement les performances physiques humaines et il s'avère qu'un homme peut produire environ 100 W en continu ou bien encore 1 ou 2 W/kg.

Les performances d'un panneau solaire souple équipé de cellules dernières générations de type MAXEON III, (Sunpower) sont de l'ordre de 250 W/m² et de 70 W/kg ce qui en fait un élément très intéressant vis-à-vis de la mobilité légère et notamment du vélo.

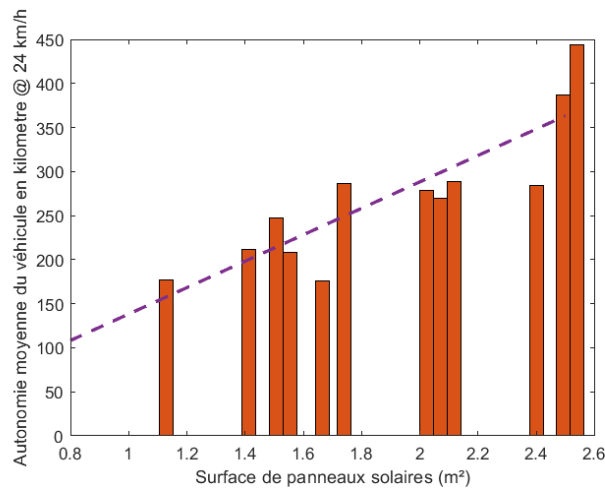


Figure E-1 : Estimation du nombre de kilomètres journalier pouvant être parcourus en totale autonomie et sans pédaler par une journée d'été ensoleillée (données issues du SUNTRIP 2018, collectées par Florian Bailly et Bernard Cauquil).

La Figure E-1 montre l'autonomie moyenne mesurée de plusieurs participants du Suntrip sur la première journée ensoleillée en partance d'Albertville. En recoupant ces résultats avec des données présentées au Chapitre I (consommation moyenne d'un VAE < 10 Wh.km⁻¹) il est possible d'estimer qu'un panneau solaire de petite taille est susceptible de pouvoir recharger l'équivalent de plusieurs dizaines de kilomètres quotidiens.

L'idée d'implémenter des panneaux sur des véhicules légers prend alors tout son sens dans le cas où le véhicule doit seulement effectuer quelques kilomètres quotidiens. En effet, l'annexe B-2 montre un exemple de véhicule intermédiaire entre une voiture et un vélo qui consomme environ 30 Wh/km. Ainsi, un mètre carré de panneau solaire sur ce véhicule pourrait fournir jusqu'à 50 km d'autonomie quotidienne en situations favorables en se basant sur les données présentées sur la Figure E-1.

F. Bases de données

F.1 Les supercondensateurs

Les Chapitres III et IV utilisent et simulent le vélo à base de supercondensateurs en intégrant les sous-ensembles constitutifs de manière analytique ou bien encore sur la base de données collectées et mises à disposition de l'algorithme [232], [233].

Ces bases de données incluent un maximum d'éléments pertinent vis-à-vis des composants qu'il faut modéliser dans le but de pouvoir simuler un comportement réaliste du système.

Dans le cas des supercondensateurs, les éléments suivants ont été intégrés à chaque composant :

- ❖ La capacité du supercondensateur C_{cell}^{SC}
- ❖ La résistance interne R_{cell}^{SC}
- ❖ Le prix Ct_{cell}^{SC}
- ❖ La tension maximale
- ❖ La tension minimale d'usage
- ❖ L'éventuelle évolution de la capacité en fonction de la tension
- ❖ La masse de la cellule M_{cell}^{SC}

La liste des composants modélisés est présentée ci-dessous au tableau F-1. Des régressions ont de plus été effectuées sur les données principales afin d'observer l'évolution des paramètres. Ainsi, la Figure F-4 montre bien la linéarité de la masse et de la capacité et ainsi confirme que la densité d'énergie pour les supercondensateurs est aujourd'hui assez stable indépendamment de la capacité. Les Figures F-2 et F-3 illustrent la décroissance de la résistance ohmique et thermique avec l'augmentation de la capacité, ce qui est attendu. Finalement, la Figure F-1 illustre la variation du prix des supercondensateurs et assez intéressante puisqu'elle souligne la non-linéarité du prix.

'ILL100'	'MAX0310'	'NES100'	'TV0035'
'ILL400'	'MAX0350'	'NES325'	'TV0060'
'IOX100'	'MAX0650'	'SAMWHA400'	'TV0100'
'IOX1300'	'MAX1200'	'SCA0500'	'VEC400'
'IOX2100'	'MAX1500'	'SCA0750'	'VEC360'
'IOX3150'	'MAX2000'	'SCA1200'	'VEC100'
'IOX400'	'MAX3000'	'SCA1800'	'XL3000'
'IOX600'	'MAX3400'	'SCA3200'	'XL3400'
'XV300'	'XV400'	'XV600'	

Tableau F-1 : Liste des supercondensateurs modélisés

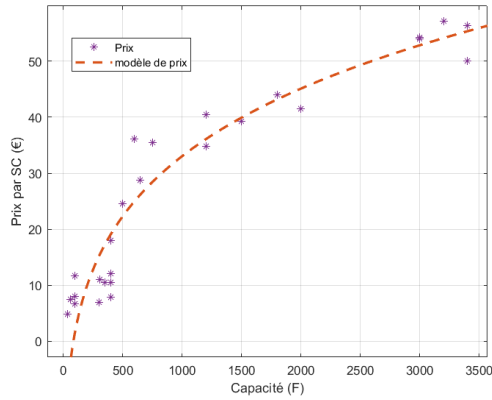


Figure F-1 : Prix des supercondensateurs en fonction de la capacité de ces derniers.

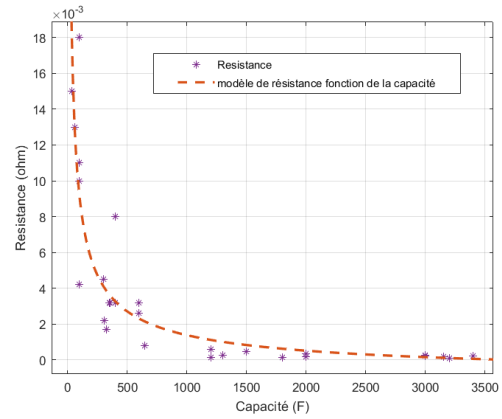


Figure F-2 : Résistance des supercondensateurs en fonction de leur capacité.

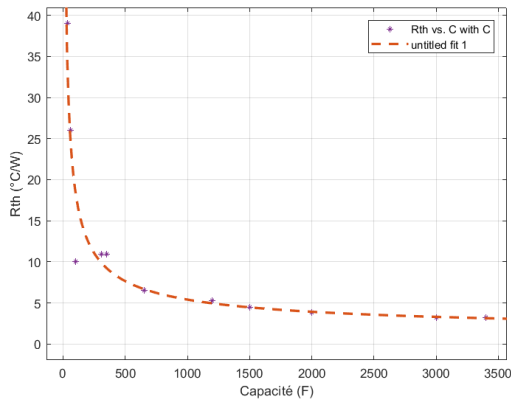


Figure F-3 : Résistance thermique des supercondensateurs.

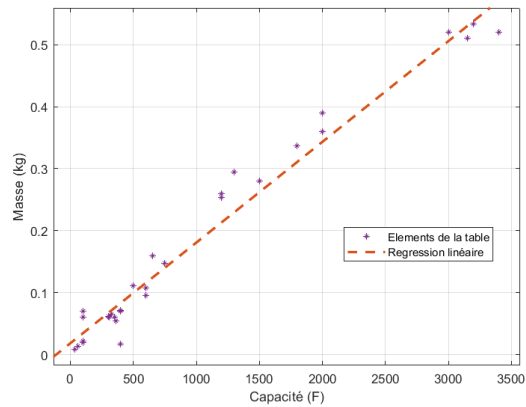


Figure F-4 : Masse des supercondensateurs.

F.2 Les interrupteurs de puissance

Une démarche similaire à celle effectuée avec les supercondensateurs a été effectuée avec les machines, les générateurs et les interrupteurs de puissances (MOSFETs). Cette section décrit la base de données concernant les MOSFETs.

Les interrupteurs de puissances modélisés sont listés dans le tableau F-2. Les Figures F-5 et F-6 montrent des exemples de variations de paramètres de ces derniers en fonction du courant maximal fourni par le constructeur.

Les paramètres modélisés sur ces composants sont les suivants :

- ❖ Courant drain maximal sur emprunte et dispositif de dissipation minimal
- ❖ Tension maximum Drain Source (généralement nommé V_{ds})
- ❖ Coût
- ❖ Résistance série du composant
- ❖ Temps de montée et de descente du transistor

❖ Pertes diodes en antiparallèle

AUIRFR540.mat'	'IRF3710.mat'	'PSMN025.mat'	'IRF6662.mat'
'BSC118.mat'	'IRF510.mat'	'PSMN069.mat'	'IRF747.mat'
'BSH114.mat'	'IRF6655.mat'	'PSMN9.mat'	'IRFH5053.mat'
'BUK765.mat'	'STN2NF10.mat'	'SI7322.mat'	'IRFH5210.mat'
'BUK7660.mat'	'SUM110N10.mat'	'STB35N.mat'	'IRFL110.mat'
'FDB86102LZ.mat'	'IRFR3410.mat'	'STB80.mat'	'IRFM120.mat'
'FQD19.mat'	'IRFS4010.mat'	'STD15NF.mat'	'IRFR120.mat'
'FQT7N10.mat'	'PHT4NQ10.mat'	'TSM70N.mat'	'PSMN013.mat'
'IPB78CN.mat'	'PMV213SN.mat'	'ZXMN10.mat'	

Tableau F-2 : Liste des MOSFET enregistrés dans le modèle

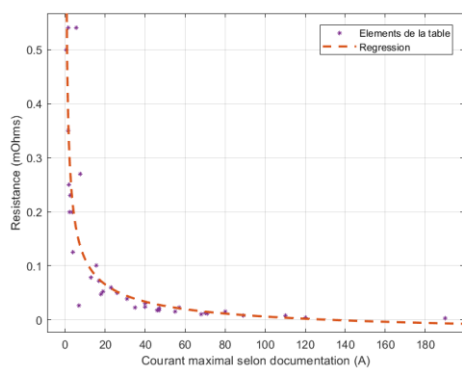


Figure F-5 : Evolution de la résistance série des interrupteurs de puissance en fonction du calibre courant.

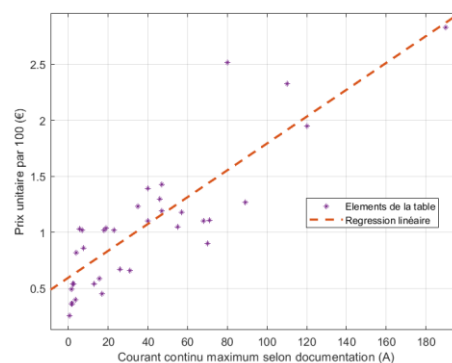


Figure F-6 : Évolution du prix des interrupteurs de puissance en fonction du calibre courant.

G. Cas de l'analyse d'un signal sinusoïdal par chaîne de Markov

L'objectif de cette partie est de reproduire un résultat de référence grâce aux chaînes de Markov. Le signal de référence à analyser est ici une fonction sinusoïdale et sa dérivée tel que présentées sur l'équation G-1 et la figure G-1.

Les chaînes de Markov vont ici être utilisées afin de statistiquement reproduire un signal. Cette opération est purement statistique. L'objectif est ici d'analyser le signal en considérant des transitions d'états. Le système suivant est le signal d'entrée (f_1, f_2) à reproduire :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 = \sin(x) \\ f_2 = f_1' = \cos(x) \end{array} \right. \quad \text{G.1}$$

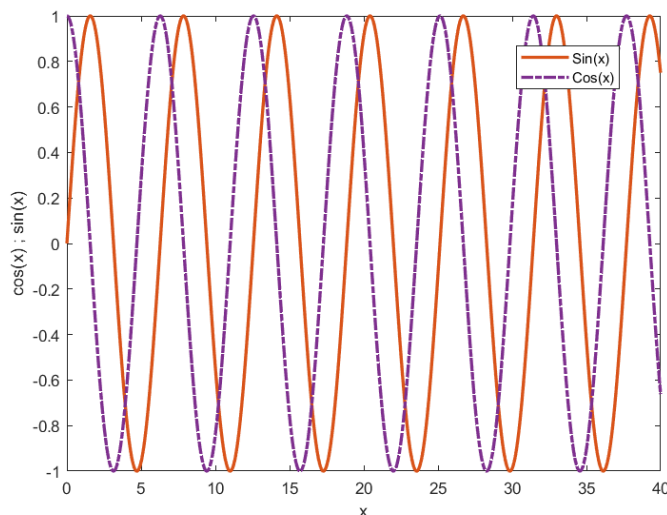


Figure G-1 : Ensemble de fonction f_1 et f_2 à analyser par chaînes de Markov.

De la même manière qu'un système physique mobile admet la vitesse et l'accélération comme variable d'état, il est ici primordial de disposer de la dérivée (f_2) en même temps que du signal propre (f_1) en entrée. En effet, l'algorithme ne pourrait pas alors identifier le sens d'évolution du signal et conduirait à des résultats aberrants. Comment savoir si le sinus est sur la demi-période croissante ou bien descendante sans connaître sa dérivée ?

Le domaine d'évolution de ces fonctions est situé dans l'intervalle $[-1, 1]$.

La première étape d'identification est de déterminer les différents états numériques que peuvent prendre nos signaux. Il convient ici de définir un pas de discrétisation (N), par exemple 5 valeurs. Les valeurs discrètes que peuvent alors prendre le sinus sont : $\{-1; -0.5; 0; 0.5; 1\}$. La répartition (discrétisation) peut se faire de différentes manières (arrondi au plus proche, tronquer, ...). Le signal obtenu est alors discrétisé. Nous notons f_1^d et f_2^d les signaux discrétisés de f_1 et f_2 sur N valeurs chacun.

Le nombre total d'état du système dépend du nombre de signaux à analyser (E), dans cet exemple 2. Le nombre d'état est alors exprimé par N^E . Dans le cas d'analyse de nombreux signaux, le pas de discrétisation est vite limité par la taille des matrices qui peuvent être conséquentes.

L'état du système est noté s . Dans notre cas, s est la discrétisation de deux signaux tel que, à tout instant x :

$$s_x = \{f_1^d(x), f_2^d(x)\} \quad \text{G.2}$$

Une fois la discrétisation effectuée, il est question d'analyser les transitions de la matrice s .

Chaque état du système s_x peut prendre une des N^E valeurs d'état possible et est susceptible d'évoluer vers un nouvel état s_{x+1} pouvant prendre N^E valeurs. Ainsi, la matrice de transition C est une matrice de taille N^{2E} . Dans le cas schématique de $N=3$ soit 9 états pour deux signaux, la matrice de transition est présentée Figure G-2. Dans le cas où le signal passe de l'état 3 à l'état 5, la matrice de changement d'état est incrémentée de 1 (voir case bleue de la Figure G-2). Chaque élément de la matrice peut être associé à un nombre $C_{i,j}$ où i représente l'indice de s_x et j l'indice de s_{x+1} .

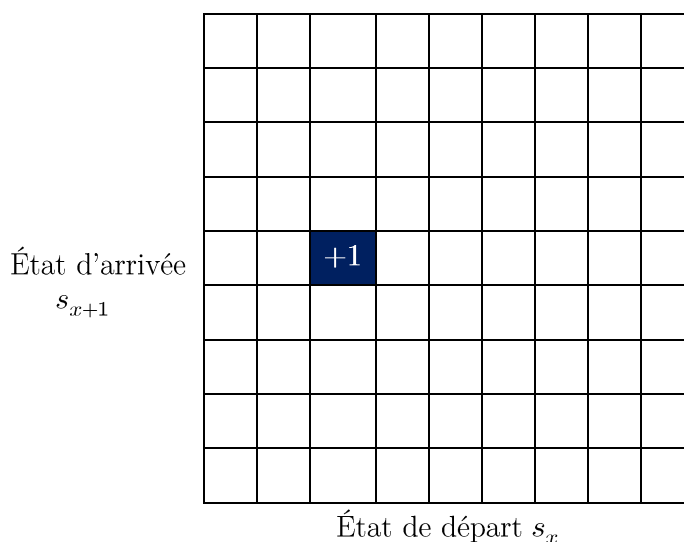


Figure G-2 : Illustration de l'opération d'incrémentement de la matrice de transition

La Figure G-3 montre la matrice de transition dans le cas de notre exemple pour $N = 10$. On peut facilement apercevoir que la diagonale est majoritairement présente et que le signal dévie peu de la diagonale. Ce phénomène traduit le fait que le système est un système continu, variant lentement vis-à-vis de l'échantillonnage. C'est-à-dire que le signal évolue lentement et est souvent catégorisé plusieurs fois de suite au même état, ce qui se traduit par une tendance à rester identique à lui-même et donc sur la diagonale (incrémentement de $C_{1,1}, C_{2,2}, \dots, C_{10,10}$).

Lorsque l'ensemble du signal a été traité, la matrice de changement d'état est normalisée par colonne de manière à créer une matrice de probabilité P définie aux équations G.3 et G.4 :

$$P_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{\sum_i C_{i,j}} \quad \text{G.3}$$

Chaque colonne représente une loi de probabilité telle que

$$\sum_i P_{i,j} = 1 \quad \text{G.4}$$

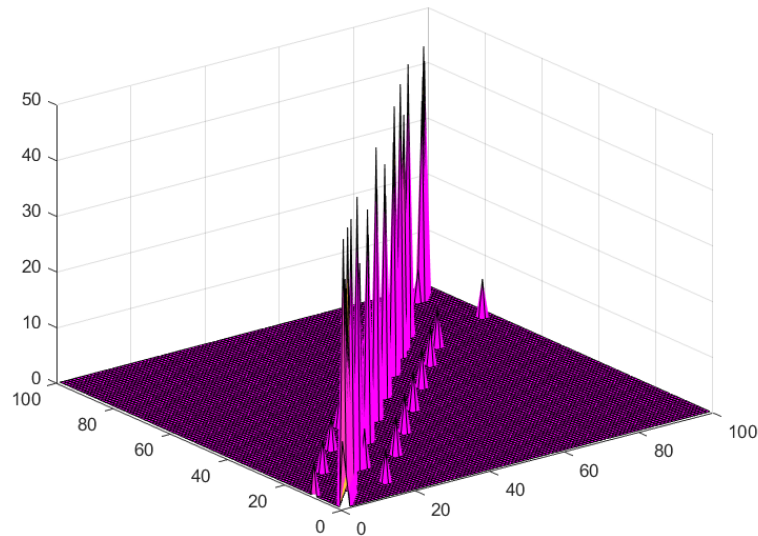


Figure G-3 : Matrice de transition d'état complète.

Une fois la matrice obtenue, une séquence aléatoire d'état S est identifiée à partir d'un état initial S_0 tel que la probabilité de se retrouver à l'état suivant est donnée par :

$$S_{x+1} = P S_{x+1}|S_x S_x \quad \text{G.5}$$

Un exemple de signal reconstitué est donné Figure G.4. La simulation est unique et dépend évidemment de l'état de départ, mais aussi de la suite aléatoire statistique. Ainsi, deux simulations successives ne donneront probablement jamais (exactement) le même résultat.

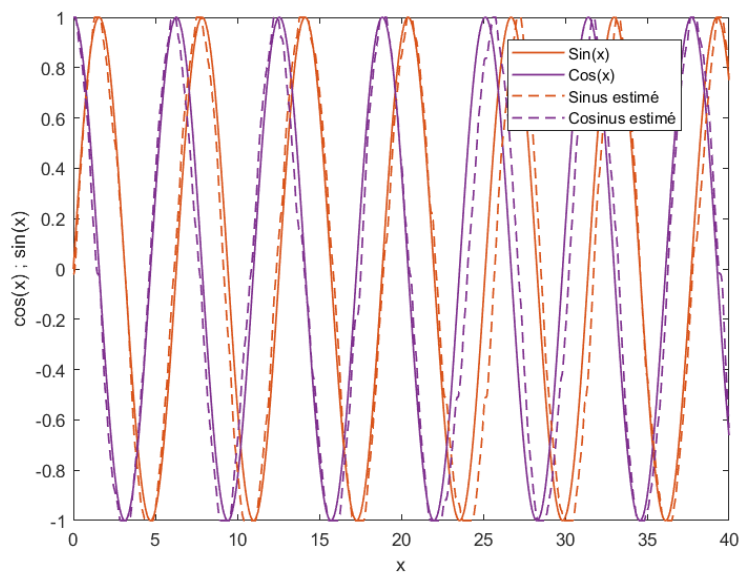


Figure G-4 : Signal initial f_1, f_2 ainsi que le signal recomposé à partir de la procédure mathématique proposée.

On peut apercevoir la variabilité temporelle du signal. En effet, l'analyse de la table statistique implique au signal de suivre une forme prédéterminée grâce à la présence de la dérivée. Cependant, la matrice n'impose pas le « timing », ainsi, il peut en résulter un décalage local fréquentiel (le signal reconstitué peut soudain être plus rapide ou plus lent que le sinus original). Pourtant, à l'échelle d'un nombre suffisant de périodes, les deux signaux sont quasiment en phase dus à la compensation statistique des erreurs.

H. Critique des résultats du Chapitre III : une seconde formulation

H.1 Nouvelle formulation de la variation d'état de charge

Le Chapitre III a permis d'estimer le rendement minimum nécessaire pour qu'un véhicule de type hybride série puisse fonctionner correctement.

La démarche proposée avait alors constitué à estimer l'état du système, composé de l'état de charge et de la vitesse à l'aide d'équations simples permettant de modéliser le fonctionnement du vélo hybride série. Notamment, la variation de l'état de charge était estimée grâce à la différence d'énergie consommée et d'énergie produite par l'intermédiaire du rendement η_{VHS} .

$$SOE_{k+1} = \frac{1}{E_{pack}} \left(P_H \Delta t - \frac{T_{mot}}{R_{roue} \eta_{VHS}^e} \Delta X \right) + SOE_k \quad \text{H.1}$$

Le rendement du vélo η_{VHS} est un rendement fixe image du rendement énergétique global moyen du véhicule, η_{VHS}^e . En écrivant la formule H.1, les pertes associées au vélo sont totalement imputées à la machine. Ainsi, cette équation considère que le générateur à un rendement idéal et que la machine cumule toutes les pertes. Pourtant, un autre raisonnement permet de répartir les pertes de manière plus équitable dans le système. En considérant que les rendements moyens de la machine η_{mach} et du générateur η_{gen} sont identiques, il est possible d'écrire :

$$\eta_{VHS} = \eta_{mach} \eta_{gen} = \eta_{mach}^2 \quad \text{H.2}$$

Et donc, il vient, en répartissant les pertes de manière équitable entre la machine et le générateur :

$$SOE_{k+1} = \frac{1}{E_{pack}} \left(P_H \Delta t \sqrt{\eta_{VHS}} - \frac{T_{mach}}{R_{roue} \sqrt{\eta_{VHS}}} \Delta X \right) + SOE_k \quad \text{H.3}$$

La modification sensible de la répartition des pertes peut affecter le résultat global et nous souhaitons identifier dans quelle proportion.

H.2 Résultats obtenus

Les Figures H-1 et H-2 reprennent les mêmes simulations que celles présentées au Chapitre III. Aux résultats déjà exploités, sont ajoutés les résultats identifiés grâce à la formule H.3.

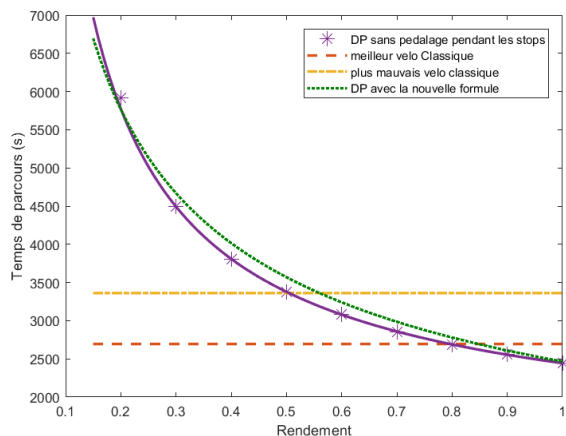


Figure H-1 : Estimation des temps de parcours dans le but d'estimer le rendement minimum de l'architecture pour les deux formules H.1 et H.3 sur un parcours plat avec des arrêts sur un parcours de type "Devie" pour un pack de 8Wh.

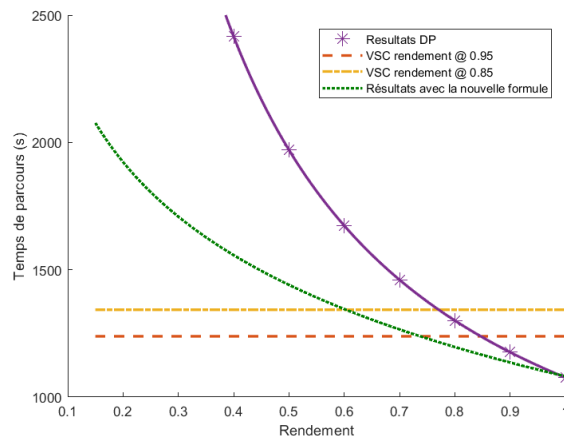


Figure H-2 : Estimation des temps de parcours dans le but d'estimer le rendement minimum de l'architecture pour les deux formules H.1 et H.3 sur un parcours plat avec des arrêts sur un parcours de type vallonné (50 m de D+ à 5%) pour un pack de 8Wh.

H.3 Conclusion

Les calculs présentés sur les Figures H.1 et H.3 permettent d'avancer que l'hypothèse émise au Chapitre III est correcte, car elle renforce les résultats qui avaient été identifiés. En effet, les temps de parcours sur le plat sont très similaires dans les deux cas de figure. Cependant, un écart de plus de 10% est à noter sur la Figure H.2 où la première formulation sous-estimait les performances du vélo hybride série.

Ainsi, la Figure H.2 permet de valider une gamme de rendement nécessaire entre 60 et 70% de rendement qui est aussi la gamme de rendement nécessaire sur le trajet plat.

La conclusion d'un rendement objectif de 60 à 70% se retrouve donc renforcée. Il est cependant plus difficile à atteindre dans le cas d'une montée (et donc du cas de Figure H-2) puisque la machine est susceptible de fonctionner sur des points de fonctionnements moins performants (fort couple, faible vitesse par exemple...).

ⁱ En effet, des supercondensateurs vide en direct sur le bus rendrait impossible l'utilisation du pilotage moteur. De plus, la zone contrôlable des machines est dépendante de la tension à ses bornes.