

CONCEPTION D'UNE REMORQUE SOLAIRE À ASSISTANCE ÉLECTRIQUE POUR CYCLOTOURISME

Par

Merlin TÉTRAULT-LECLERC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN ÉNERGIES RENOUVELABLES ET
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 24 JUIN 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Merlin Tétrault-Leclerc, 2026



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel Rousse, directeur mémoire
Département de Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Adrian Ilinca, président du jury
Département de Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Ricardo Izquierdo, membre du jury
Département de Génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 24 MARS 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Je crois profondément au vélo comme mode de transport. Au-delà de ses qualités pour le bien-être et environnementales, il représente à mes yeux une solution encore largement sous-estimée face aux défis contemporains de mobilité.

Dans un contexte où les véhicules tendent à devenir toujours plus gros, plus lourds et plus complexes, le choix du plus petit et du plus simple, constitue, selon moi, une démarche pertinente et nécessaire. Cette réflexion ne s'adresse pas uniquement à la société en général, mais également à moi-même.

Ce mémoire s'inscrit dans cette conviction : chercher à élargir la pratique d'un mode de transport fondamentalement simple, à une pratique parfois considérée comme réservée aux vrais cyclistes qui pédalent sans assistance.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire marque l'aboutissement d'un projet qui mûrissait depuis longtemps. Il n'aurait pu voir le jour sans l'appui, l'engagement et la confiance de plusieurs personnes qui ont joué un rôle déterminant dans ce parcours.

Je tiens d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur, Daniel Rousse. Au-delà du cadre académique, son lien de longue date avec ma famille et notre intérêt commun pour le vélo ont donné à ce projet une dimension particulière. Son intérêt pour le sujet et sa volonté de voir cette idée aboutir ont été des sources importantes de motivation. Je lui suis reconnaissant pour son encadrement, sa disponibilité et la liberté intellectuelle qu'il m'a laissée tout au long de cette démarche.

Je remercie également mon frère, Samuel Tétrault-Leclerc, pour sa contribution déterminante au développement de l'outil de simulation. À partir d'un premier modèle qu'il avait conçu dans son cadre professionnel, nous avons pu développer et enrichir progressivement la simulation présentée dans ce mémoire. Sa rigueur, son expertise technique et sa générosité dans le temps investi ont grandement contribué à la qualité du travail réalisé.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à ma copine, Maïa Descary, pour son soutien constant, tant sur le plan moral que financier. Sa présence et son encouragement ont été essentiels à l'aboutissement de cette maîtrise.

Enfin, je remercie sincèrement ma famille et mes amis pour leur appui indéfectible. Leur confiance, leurs encouragements et l'aide qu'ils m'ont apportée à différents moments de ce parcours m'ont permis de mener ce projet à terme dans de bonnes conditions.

Conception d'une remorque solaire à assistance électrique pour cyclotourisme

MERLIN TÉTRAULT-LECLERC

RÉSUMÉ

Dans un contexte de transition énergétique et de promotion du transport actif, le vélo à assistance électrique (VAE) s'est largement imposé pour les déplacements urbains de courte distance. Toutefois, son usage en cyclotourisme de longue durée et en autonomie demeure limité, notamment en raison de l'accès parfois restreint ou inexistant à la recharge électrique. Ce mémoire évalue le potentiel d'intégration de production solaire photovoltaïque (PV) mobile à un VAE afin de soutenir des voyages longue distance en autonomie complète.

L'objectif principal est de concevoir et d'évaluer, selon une approche de conception d'ingénierie, un système PV intégré à la pratique du cyclotourisme. Un outil de simulation de véhicule électrique solaire a été développé en Python, s'appuyant notamment sur la bibliothèque PVlib et sur une gestion systématique des données météorologiques. Ce modèle combine une représentation simplifiée de la dynamique du véhicule et de la production solaire afin d'analyser la performance énergétique et d'identifier les paramètres de conception dominants.

Deux parcours-types ont été étudiés, l'un à faible dénivelé et l'autre à fort dénivelé, permettant de comparer les performances relatives. Le concept proposé consiste en une remorque solaire intégrant 0,966 m² de PV, une batterie de 792 Wh et une assistance maximale de 500 W, pour une masse additionnelle de 20,37 kg. Par rapport à un cycliste sans système d'assistance, ce système permet un gain de vitesse moyenne d'un facteur 1,47 sur parcours plat et 2,31 sur parcours avec dénivelé, avec une contribution énergétique du système d'assistance atteignant respectivement 182 % et 204 % de celle du cycliste seul.

L'analyse de sensibilité montre que la masse et la surface PV influencent la performance d'un ordre de grandeur supérieur à la capacité de batterie et à la puissance maximale d'assistance. La masse est plus critique en terrain vallonné, alors que la surface PV l'est davantage en terrain

plat. Malgré certaines limites liées à la modélisation du moteur, de la batterie et des fonctions de contrôle, les résultats démontrent un potentiel non négligeable de l'assistance électrique solaire pour le cyclotourisme en autonomie et fournissent une base méthodologique réutilisable pour de futurs travaux.

Mots-clés: VAE, vélo à assistance électrique, PV, photovoltaïque, autonomie, modélisation, simulation, performance

Design of an electrically assisted solar trailer for cycle touring

MERLIN TÉTRAULT-LECLERC

ABSTRACT

In the context of the energy transition and the promotion of active transportation, electric bicycles (e-bikes) have become widely adopted for short urban trips. However, their use in long duration, self-supported cycle touring remains limited, particularly due to restricted or nonexistent access to electrical charging. This thesis evaluates the potential of integrating mobile photovoltaic (PV) power generation into an e-bike system to support long-distance travel in full autonomy.

The primary objective is to design and assess, following an engineering design approach, a PV system integrated into cycle touring practice. A solar electric vehicle simulation tool was developed in Python, notably relying on the PVlib library and a systematic management of meteorological data. The model combines a simplified representation of vehicle dynamics with PV power generation modeling in order to analyze energy performance and identify the dominant design parameters.

Two reference routes were studied: one with low elevation gain and one with significant elevation gain, allowing for relative performance comparisons. The proposed concept consists of a solar trailer integrating 0.966 m² of PV, a 792 Wh battery, and a maximum assistance power of 500 W, adding 20.37 kg to the system. In comparison to a cyclist riding without any assistance, this solution increases average speed by a factor of 1.47 on flat terrain and 2.31 on hilly terrain. The electrical assistance contribution reaches 182 % and 204 % of the cyclist's standalone energy output on flat and hilly routes, respectively.

Sensitivity analysis shows that total mass and PV surface area influence performance by roughly one order of magnitude more than battery capacity and maximum assistance power. Mass is more critical on hilly terrain, whereas PV surface area is more influential on flat terrain. Despite limitations related to motor, battery, and control function modeling, the results

demonstrate significant potential for solar-assisted e-bikes in autonomous cycle touring and provide a reusable methodological foundation for future work.

Keywords: E-bikes, electric bicycles, PV, photovoltaic, autonomy, modeling, simulation, performance

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Définitions.....	3
1.1.1 Vélo à assistance électrique (VAE)	3
1.1.2 Cyclotourisme	5
1.2 État de la littérature abordant les VAE	6
1.3 Revue de littérature thématique	10
1.3.1 Le VAE solaire et autres véhicules solaires.....	10
1.3.2 VAE et cyclotourisme.....	13
1.3.3 Modélisation de bicyclettes, de véhicules et de système PV	14
1.3.4 Technologies du VAE solaire: batteries, moteurs électriques et PV	16
CHAPITRE 2 MODÉLISATION DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES SOLAIRES.....	23
2.1 Modélisation et fonctionnement global de l’outil de simulation	23
2.2 Architecture de simulation.....	27
2.2.1 Gestion des données météorologiques dans le contexte d’une production solaire mobile : la classe <i>Environment</i> et la sous-classe <i>Path</i>	30
2.2.2 Les blocs de construction pour la modélisation d’un véhicule électrique solaire : Les classes <i>Rider</i> , <i>Battery</i> , <i>SolarPanel</i> , <i>Chassis</i> et <i>Motor</i>	36
2.2.3 Configurer et simuler un véhicule : la classe <i>Vehicle</i> et les fonctions de simulation.....	42
2.3 Configuration d’un véhicule électrique solaire : une bicyclette à assistance électrique solaire	46
CHAPITRE 3 ÉTUDE DE PERFORMANCE D’UN VAE SOLAIRE DANS UN CONTEXTE DE CYCLOTOURISME À L’AIDE DE SIMULATIONS	53
3.1 Détermination de parcours, de durées de simulations et de critères de performance pertinents.....	54
3.2 Étude de convergence sur le pas de temps d’intégration	60
3.3 Analyse de la sensibilité de la performance vis-à-vis des principaux paramètres d’un VAE solaire	62
3.4 Performance vis-à-vis un cas de référence sans système d’assistance	77
3.5 Quelques considérations supplémentaires	79
CHAPITRE 4 DESIGN PRÉLIMINAIRE D’UN VAE SOLAIRE.....	81
4.1 Élaboration d’un cahier des charges	81
4.2 Élaboration de concepts préliminaires	84
CONCLUSION	89

RECOMMANDATIONS	93
ANNEXE I CONTENU DES FICHIERS TMY ET DES MASQUES D'HORIZONS. ..	95
ANNEXE II CONTENU DES FICHIERS DE RÉSULTAT DE SIMULATION. LISTE DES VARIABLES ENREGISTRÉES POUR CHAQUE PAS DE TEMPS DE SIMULATION.	99
ANNEXE III CALCUL DE COEFFICIENT DE TRAINÉE AÉRODYNAMIQUE.....	103
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	105
BIBLIOGRAPHIE	113

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Classification légale et caractéristiques des VAE en Europe Tiré de Apostolou et al. (2018)3
Tableau 1.2	Types de commande d'assistance électrique des VAE Tiré de MacArthur & Kobel (2014)4
Tableau 1.3	Caractéristiques de batteries assemblées par différentes compagnies aérospatiales Tiré de Weston (2025).....20
Tableau 1.4	Caractéristiques de différentes cellules PV, <i>beginning-of-life</i> (BOL) Tiré de Weston (2025)22
Tableau 2.1	Configuration d'un objet de classe <i>Vehicle</i> modélisant un VAE solaire *Calcul du coefficient de résistance aérodynamique en ANNEXE III, une remorque est considérée **Coefficient de résistance dans la plage possible selon Wilson & Schmidt (2020) et correspondant à un pneu légèrement plus roulant qu'un pneu de montagne (Zorn, 2008)47
Tableau 3.1	Étude de convergence de la distance sur le pas de temps d'intégration, parcours: CGV et Pro Tour60
Tableau 3.2	Sensibilité paramétrique brute et relative d'un VAE solaire sur le parcours CGV74
Tableau 3.3	Sensibilité paramétrique brute et relative d'un VAE solaire sur le parcours Pro Tour74
Tableau 3.4	Sensibilité massique brute et relative d'un VAE solaire sur le parcours CGV, extrait d'une série de masse variable pour une batterie de 500 Wh, un panneaux PV de 0.5 m ² et une puissance d'assistance de 250 W75
Tableau 3.5	Configuration d'un objet de classe <i>Vehicle</i> modélisant un cyclotouriste sans système d'assistance électrique *Calcul du coefficient de résistance aérodynamique en ANNEXE III, un cycliste avec sacoches est considéré **Coefficient de résistance dans la plage possible selon Wilson & Schmidt (2020) et correspondant à un pneu légèrement plus roulant qu'un pneu de montagne (Zorn, 2008)77

	Page
Tableau 4.1	Fonctions principales et secondaires d'un système d'assistance électrique solaire en contexte de cyclotourisme, le facteur K de 1 à 5 (min à max) représente le niveau d'importance attribué à cette fonction82
Tableau 4.2	Contraintes d'un système d'assistance électrique solaire en contexte de cyclotourisme, le facteur K de 1 à 5 (min à max) représente le niveau d'importance attribué à cette contrainte.....83
Tableau 4.3	Dimensionnement des principales composantes d'un concept de système d'assistance électrique solaire intégré au niveau d'une remorque.....85
Tableau A I-1	Une journée extraite d'un fichier TMY95
Tableau A I-2	Un fichier de profil d'horizon.....97
Tableau A II-1	Extrait d'un fichier résultat de 1296000 secondes, toutes les unités sont en kg, m, s, C sauf si autrement indiqué99

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Densité énergétique de cellules Li-ion cylindriques 18650 Tiré de Weston (2025)17
Figure 1.2	Densité énergétique de cellules Li-ion cylindriques 21700 Tiré de Weston (2025)17
Figure 2.1	Diagramme de corps libre d'un véhicule représenté comme une masse en un point.....24
Figure 2.2	Schématisation de la résolution du modèle physique du mouvement du véhicule26
Figure 2.3	Architecture de programmation: classes et sous-classes29
Figure 2.4	Système ordonné d'identification de « carrés de grille » pour la gestion des données météorologiques32
Figure 2.5	Couverture des « carrés de grille » de TMY pour un trajet de Houston, Texas (droite) à Los Angeles, Californie (gauche)33
Figure 2.6	Couverture des carrés de grille d'horizon en un endroit où des trous de couverture étaient présents. <i>Mapdata horizon IDs</i> : la couverture de données d'horizon aux points exacts de la trace GPS. <i>Horizon files</i> : la couverture de données d'horizon finale34
Figure 2.7	Interactions de la sous-classe <i>Rider</i> durant la simulation37
Figure 2.8	Interactions de la sous-classe <i>Battery</i> durant la simulation38
Figure 2.9	Interactions de la sous-classe <i>SolarPanel</i> durant la simulation40
Figure 2.10	Interactions de la sous-classe <i>Chassis</i> durant la simulation.....41
Figure 2.11	Interactions de la sous-classe <i>Motor</i> durant la simulation42
Figure 2.12	Fonction de contrôle de la batterie, fonction du SOC.....47
Figure 2.13	Fonction de contrôle du moteur, fonction de la vitesse de déplacement ...48
Figure 2.14	Résultats de simulation, VAE solaire initial, t=15h, 15-06, pente 0 deg50

		Page
Figure 2.15	Résultats de simulation, VAE solaire initial, $t=0.1h$, 15-06, pente -10 deg.....	51
Figure 3.1	Parcours Google Earth, CGV et Pro Tour	55
Figure 3.2	Comparaison de profils d'élévation entre Google Earth et GPS <i>Visualizer</i> , les deux profils correspondent au Pro Tour.....	56
Figure 3.3	Comparaison de profils d'élévation entre Google Earth et GPS <i>Visualizer</i> , les deux profils correspondent au CGV	57
Figure 3.4	Puissance entrante dans le système pour une simulation de 15 jours débutant le 15 juin (moment d'utilisation favorable), parcours : CGV, surface de PV : $0.5 m^2$	59
Figure 3.5	Nuages de points avec échelle de couleur pour la vitesse moyenne [m/s]. Les unités des paramètres sont les suivantes : masse [kg], superficie de PV [m^2], capacité de batterie [Wh], puissance d'assistance (<i>motor</i>) [W]. Les deux derniers graphiques sont avec des panneaux de $1.5 m^2$	67
Figure 3.6	Surfaces par groupements de couleurs. Vitesse moyenne [m/s] (axe z) en fonction de la masse [kg] et de la surface solaire [m^2] pour le parcours CGV (haut) et Pro Tour (bas).....	70
Figure 3.7	Surfaces par groupements de couleurs. Vitesse moyenne [m/s] (axe z) en fonction de la puissance d'assistance [W] et de la capacité de batterie [Wh] pour le parcours CGV (haut) et Pro Tour (bas).....	71
Figure 3.8	Surfaces de performance (axe z) en fonction de la superficie de panneaux PV (axe x) pour une même capacité de batterie et trois puissances d'assistance différentes, vue normale à l'axe de la masse.....	72
Figure A III-1	Cd d'une boîte sans rayons sur roues Tiré de Hoerner (1965)	103

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

API	Interface de programmation d'application (<i>Application Programming Interface</i>)
DEM	Modèle d'élévation numérique (<i>Digital Elevation Model</i>)
PIPV	Produits intégrant du photovoltaïque (<i>product-integrated PV</i>)
PV	Photovoltaïque
SOC	État de charge d'une batterie (<i>State of Charge</i>)
TMY	Données météorologiques d'une année typique (<i>Typical Meteorological Year</i>)
VAE	Vélo à assistance électrique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A_{aero}	Surface de référence aérodynamique [m ²]
A_{col}	Surface totale des collecteurs solaires [m ²]
C_d	Coefficient de résistance aérodynamique [-]
C_{rr}	Coefficient de résistance au roulement [-]
E	Énergie contenue dans le système de batterie [Wh]
E_{in}	Énergie entrante dans le système de batterie [Wh]
E_{out}	Énergie sortante du système de batterie [Wh]
F	Force [N]
F_g	Force gravitationnelle [N]
F_n	Force normale [N]
F_{prop}	Force de propulsion [N]
F_{rd}	Force de résistance aérodynamique [N]
F_{rr}	Force de résistance au roulement [N]
g	Accélération gravitationnelle [m/s ²]
I_{gh}	Irradiation globale horizontale [W/m ²]
I_{dh}	Irradiation diffuse horizontale [W/m ²]
I_{dn}	Irradiation directe normale [W/m ²]
I_{POA}	Irradiation totale dans le plan du collecteur solaire [W/m ²]
$I_{T,direct}$	Irradiation directe dans le plan du collecteur solaire [W/m ²]
$I_{T,diffus\ ciel}$	Irradiation diffuse provenant du ciel dans le plan du collecteur solaire [W/m ²]

$I_{T,diffus horizon}$	Irradiation diffuse provenant de l'horizon dans le plan du collecteur solaire [W/m ²]
$I_{T,réfléchi sol}$	Irradiation réfléchie par le sol dans le plan du collecteur solaire [W/m ²]
m	Masse [kg]
SOC	État de charge entre 0 et 1 [-]
v_{vent}	Vitesse du vent projeté sur la direction de mouvement du véhicule [m/s]
W_{bat}	Puissance nette vue par la batterie [W]
W_{max}	Puissance d'assistance maximale permise [W]
W_{prop}	Puissance de traction (assistance) ou de freinage [W]
$W_{solaire}$	Puissance solaire [W]
$x(t)$	Position [m] au temps t [s]
$\dot{x}(t)$	Vitesse [m/s] au temps t [s]
$\ddot{x}(t)$	Accélération [m/s ²] au temps t [s]
t	Temps t [s]
dt	Pas de temps t [s]
ρ	Densité de l'air [kg/m ³]
η_{PV}	Rendement d'un collecteur PV [-]
θ	Pente du sol [deg]

INTRODUCTION

Les bicyclettes électriques ont grandement gagné en accessibilité et popularité au cours des dernières années, se taillant une place dans les gammes de produits de tous les grands fabricants de bicyclettes. Une offre importante s'est également développée dans les différents kits de conversion et accessoires pour vélos à assistance électrique (VAE), portée par de nouveaux acteurs dans le marché de la bicyclette électrique. Motivées par un désir de diminuer l'utilisation de la voiture personnelle, plusieurs villes Américaines ont lancé des programmes incitatifs pour l'achat de VAE (McQueen & Cherry, 2019) (Jones et al., 2024), le transport actif tel que le vélo (électrique ou non), la planche à roulettes et la marche étant des modes de transports efficaces pour réduire les émissions de GES (U.S. Department of Energy; Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2025) (Replogle & Fulton, 2014). Le transport actif ne se limite pas uniquement à une alternative à la voiture en milieu urbain. En effet, la pratique du cyclotourisme, qui peut s'étendre en dehors des villes, constitue un exemple de tourisme durable à faible empreinte carbone (Eijgelaar & Peeters, 2014). Une consommation d'énergie soutenable est tout aussi importante qu'un virage vers une production soutenable à l'aide d'énergies renouvelables, telles que l'éolien, le solaire et l'hydroélectrique. Tout comme les VAE, les panneaux solaires photovoltaïques (PV) ont grandement gagné en accessibilité, plusieurs produits commerciaux étant disponibles pour les particuliers, notamment pour des applications résidentielles ou de camping. Leur intégration au niveau des véhicules reste cependant limitée à des contextes compétitifs universitaires (Innovators Educational Foundation, 2026) ou des contextes nichés (The Sun Trip, 2025).

La littérature sur les VAE et leurs impacts est relativement abondante. Cependant, il semble qu'une grande partie de l'attention académique et de la classe politique soit portée sur les déplacements de courte durée, de courte distance, en milieu urbain et spécifiquement ceux ayant pour but de répondre aux obligations du quotidien, soit le travail et les emplettes. Relativement peu de travaux ou de politiques traitant de l'usage des VAE en contexte de cyclotourisme existent, encore moins incluant de façon directe ou indirecte les technologies PV. L'utilisation des VAE se paire pourtant bien avec plusieurs types de cyclotourisme, étant

donné les longueurs de trajets plus importantes qu'en ville, la durée de l'utilisation pouvant s'échelonner sur plusieurs jours et l'aspect plutôt récréatif que sportif inhérent à la pratique. Dans certains cas d'utilisation, l'accessibilité de la recharge peut être compromise ou absente; lors de long voyage en autonomie, lors de voyages interurbains de plusieurs jours en milieu rural ou à travers des parcs nationaux.

Dans ce contexte, cette étude porte sur l'intégration de production solaire PV mobile à la bicyclette en contexte de cyclotourisme. Plus précisément, en contexte de voyage de longue distance, de longue durée et en autonomie où l'utilisation d'un VAE seule n'est pas compatible avec l'aspect d'autonomie. Cette solution permettra de profiter de l'augmentation du confort, de la distance et de la vitesse qu'offre l'assistance électrique sans avoir à dépendre d'un accès au réseau électrique régional.

Le but principal de ce projet est de concevoir un système de production électrique PV intégrée à la pratique du cyclotourisme en autonomie et d'évaluer son potentiel en suivant une approche de conception d'ingénierie. Il est souhaité que ce travail de recherche puisse contribuer à combler le manque de représentation académique dans la littérature sur la synergie des sujets en jeu. Les objectifs spécifiques sont les suivants : (1) développer un outil permettant de simuler des véhicules électriques solaires avec une attention particulière portée sur l'aspect énergétique, (2) quantifier l'impact des paramètres de conception sur la performance du couple cycliste-système et (3) proposer une conception préliminaire avec des composantes et des contraintes réelles et évaluer sa performance.

Ce mémoire est séparé de la façon suivante. Le CHAPITRE 1 traite des définitions et de la revue de littérature. Le CHAPITRE 2 présente l'outil de simulation développé, la colonne vertébrale de la méthodologie de ce travail de recherche. Le CHAPITRE 3 met en application cette simulation pour les cas d'application à l'étude. Le CHAPITRE 4 poursuit l'exercice de conception d'ingénierie et propose une conception préliminaire basée sur les résultats du chapitre précédent. Une conclusion est tirée et des recommandations partagées afin de clore ce mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Définitions

1.1.1 Vélo à assistance électrique (VAE)

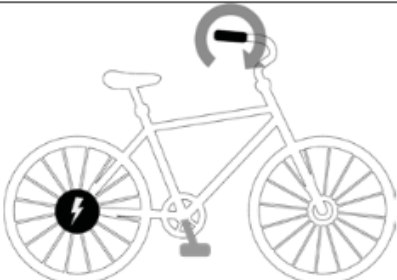
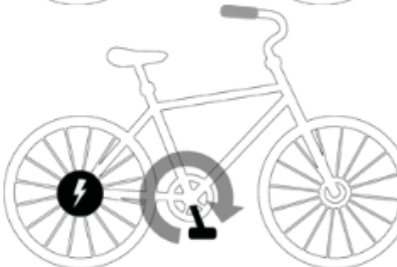
Le vélo à assistance électrique ou bicyclette assistée ou même *e-bike* est généralement décrit comme une bicyclette équipée d'un moteur électrique alimenté par une batterie rechargeable. Au Québec, tous les VAE sont regroupés sous une même classification : équipé d'un guidon et d'un pédalier, de 2 ou 3 roues en contact avec le sol, d'un moteur de puissance nominale de 500 W ou moins et d'une assistance cessant à une vitesse de 32 km/h, et ce, peu importe le mode d'activation de l'assistance (SAAQ, 2024). La classification aux États-Unis est maintenant largement basée sur un système de classes rédigé par l'association américaine *People for Bikes* malgré quelques différences encore présentes d'un état à l'autre (MacArthur et al., 2018). Les trois classes permettent un moteur électrique de puissance pouvant aller jusqu'à 750 W et sont les suivantes : classe 1, bicyclette électrique équipée d'un moteur offrant une assistance seulement lorsque l'utilisateur pédale jusqu'à une vitesse de 20 mph; classe 2, offrant de l'assistance indépendamment du pédalage (présence d'un accélérateur) jusqu'à une vitesse de 20 mph; classe 3, offrant une assistance seulement lorsque l'utilisateur pédale jusqu'à une vitesse de 28 mph (peopleforbikes, 2025). La classification européenne est sans surprise elle aussi différente tel que l'on peut voir au Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Classification légale et caractéristiques des VAE en Europe
Tiré de Apostolou et al. (2018)

E-bikes' Main Features	Bicycle-Style Electric Bicycle	Speed Pedelec
Assistance	EAB (electric-assisted bicycles)—Only when user is pedaling PB (powered bicycles)—Available without pedaling	100% of the time
Pedals	Provide power	Feet support
Motor Power	EAB < 250 Watts PB < 750 Watts	1000–4000 W
Speed	< 25 km/h	25–45 km/h
Battery Capacity	0.3–0.6 kWh	0.5–15 kWh

En plus de cette classification légale, les VAE sont souvent catégorisés par type d'assistance. L'assistance peut être commandée par l'utilisateur à l'aide d'un accélérateur : dans ce cas, il est possible de fournir la puissance nécessaire pour propulser le VAE sans avoir à pédaler. L'assistance peut par ailleurs être fournie en fonction du pédalage. La commande d'assistance électrique est déterminée en fonction du couple et de la vitesse de rotation au niveau du pédalier, tel que l'on peut voir au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Types de commande d'assistance électrique des VAE
Tiré de MacArthur & Kobel (2014)

	E-bike type	Alternative terms ^a
	Powered bicycle (PB, E-PB)	Throttle-assisted bicycle ; electrically propelled bicycle (EPB); electric bike power-on-demand (POD); on-demand bikes; motorized bicycle
	Power-assisted bicycle (PAB, E-PAB)	Pedal-assisted bicycle ; electrically assisted bicycle (EAB); pedal electric cycle (pedelec); electric pedal assist cycle (EPAC); human-powered hybrids

^a Bold indicates more commonly used terms in North America.

Bien que ce projet de recherche soit présenté au Québec, il ne se limitera pas à respecter la classification légale québécoise ou spécifiquement aucune des classifications énoncées. Cela découle de ce qu'il est souhaité de quantifier, soit, le potentiel de performance d'un système d'assistance électrique solaire et non le potentiel strictement à l'intérieur de ces limites. Il est cependant utile de conserver ces classifications en tête pour situer dans quelle région opèrent actuellement les composantes des VAE.

1.1.2 Cyclotourisme

Afin de bien délimiter le contexte à l'étude, il est important de bien définir le terme cyclotourisme et d'explicitement dire ce qui est entendu par son usage durant ce mémoire. Lamont effectue un exercice remarquable de recensement et de discussion sur la définition du cyclotourisme (Lamont, 2009). Dans cet article, Lamont passe en revue plusieurs définitions mises de l'avant par la communauté de recherche en tourisme dans les années 1990 et 2000 afin de fournir sa propre définition technique :

Trips involving a minimum distance of 40 kilometres from a person's home and an overnight stay (for overnight trips), or trips involving a minimum non-cycling round trip component of 50 kilometres and a minimum four hour period away from home (for day trips) of which cycling, involving active participation or passive observation, for holiday, recreation, leisure and/or competition, is the main purpose for that trip. Participation in cycling may include attendance at events organised for commercial gain and/or charity (competitive and non-competitive), as well as independently organised cycling. (Lamont, 2009)

Cette définition conçoit le cyclotourisme comme un voyage hors de la région d'origine d'un individu, dont la principale motivation est la pratique active ou passive du cyclisme. Elle inclut des personnes qui voyagent pour participer à des compétitions de cyclisme, en plus de celles qui voyagent spécifiquement pour assister à des événements cyclistes. Elle inclut des personnes faisant des excursions journalières dans le but de participer à une activité de cyclisme dont le déplacement pour atteindre le lieu de départ peut ne pas utiliser la bicyclette.

D'autres définitions sont plus strictes et distinguent les personnes s'engageant dans une activité de tourisme de plusieurs jours de celles qui s'engagent dans une excursion d'un jour. C'est le cas de la définition mise de l'avant par Ritchie, qui distingue le cyclotouriste de l'excursionniste :

A person who is away from their home town or country for a period not less than 24 hours or one night, for the purpose of a vacation or holiday, and for whom using a bicycle as a mode of transport during this time away is an integral part of their holiday or vacation. This vacation may be independently

organised or part of a commercial tour and may include the use of transport support services and any type of formal and/or informal accommodation. (Ritchie, 1998)

Quelques autres définitions ont été mises de l'avant lors de cette même période, variant sur certains points, mais souvent plus inclusives que celle de Ritchie. Certaines mettent l'accent sur l'aspect de loisirs et de récréation qui fait écho à la pratique du tourisme, le fait que l'activité de cyclisme soit importante au voyage, mais sans être strictement un mode de transport ni une participation sportive et excluant les petits déplacements pour des raisons telles que les emplettes ou se rendre à un rendez-vous (Lumsdon, 1996) (Simonsen & Jørgensen, 1998). Six caractéristiques reviennent systématiquement parmi les différentes définitions. (1) l'expérience cycliste se déroule loin du lieu de résidence de la personne; (2) le cyclotourisme peut durer une journée ou plusieurs jours; (3) la nature de l'activité cycliste est ou n'est pas compétitive; (4) le cyclisme doit être le but principal du voyage; (5) la participation au cyclisme se fait dans un contexte actif ou passif; et (6) le tourisme à vélo est une forme de loisirs ou de récréation (Lamont, 2009).

Ce qui est considéré par cyclotourisme dans le contexte de ce mémoire se rapproche davantage de la définition de Ritchie. Seulement, les excursions d'un jour sont également considérées comme du cyclotourisme, tant qu'il n'y a pas de déplacement pour atteindre le lieu de départ sans utiliser la bicyclette. Cela a pour but de retirer une excursion à vélo de montagne ou une participation à une course en circuit fermé (intérieure ou extérieure) du cyclotourisme où il faut se rendre au lieu de départ autrement qu'en vélo.

1.2 État de la littérature abordant les VAE

La littérature scientifique qui traite de la thématique exacte de ce projet de recherche, soit l'utilisation du VAE solaire en contexte de cyclotourisme, est peu abondante, voire très limitée. Apostolou et al. (2018) arrivent à ce même constat pour les VAE solaires uniquement, concluant que la performance du VAE solaire est mal documentée. Afin de bien recenser l'information de ce qui se fait en ce qui concerne le VAE solaire, il est nécessaire d'aller également voir en dehors du milieu académique, tout en gardant en tête qu'il ne s'agit pas de

publications revues par les pairs. L'état de la littérature sur le VAE solaire sera traité spécifiquement à la section 1.3.1. Tout d'abord, il est pertinent de faire un tour général de ce qui est abordé par la communauté scientifique au sujet des VAE.

Zhou et al. (2023) ont conduit une analyse bibliographique portant sur les travaux de recherche reliés aux VAE à travers les 50 dernières années. Selon les résultats de cette revue de littérature systématique, quelques axes de recherche abordant la thématique du VAE auraient principalement retenu l'attention de la communauté scientifique au cours des dernières années. Parmi ceux-ci figurent les modèles énergétiques et les systèmes de recharge, le comportement et la sécurité, les impacts environnementaux et sur la santé ainsi que les caractéristiques et les facteurs déterminants d'utilisation. Toujours selon Zhou et al. (2023), les travaux de recherche se seraient déroulés en trois phases à partir de 1976.

- Une première phase de développement, de 1976 à 2010, où l'intérêt académique était tourné vers les technologies de puissance électriques, le comportement opérationnel et l'analyse des accidents, les bénéfices environnementaux et sanitaires, ainsi que l'état des applications actuelles des VAE.
- Une seconde phase de développement stable, de 2011 à 2014, où les axes importants concernaient les habitudes de déplacement et la relation entre les politiques et l'usage du VAE.
- Une troisième phase de développement rapide, de 2015 à 2023, où les VAE sont désormais bien implantés en tant que mode de transport. L'intérêt académique est encore plus important pour la santé et la sécurité des usagers et également pour l'amélioration technologique en continu.

Les études sur le VAE varient de nature avec le contexte sociogéographique (Apostolou et al., 2018) (Zhou et al., 2023); en Chine particulièrement, les analyses traitent beaucoup de la croissance économique et du marché entourant le VAE, en Europe, l'impact sur la santé et l'environnement est prioritaire alors qu'en Amérique du Nord plus d'études portent sur l'impact du VAE sur les comportements des consommateurs. Les transferts modaux engendrés par le choix du VAE, l'accessibilité, l'équité et le cas d'utilisation du fret sont également des axes de recherche importants (Jacob Korn et al., 2023).

La plupart des études récentes concernant les VAE ont été menées à l'aide de sondages auprès des usagers, reposant principalement sur leurs expériences, ce qui peut créer des incohérences avec les données réelles (Apostolou et al., 2018; Jacob Korn et al., 2023). Les données tirées de sondages sont, de façon générale, susceptibles de comporter des erreurs de biais et/ou de perception de la performance. Deux sondages américains sont fréquemment cités et utilisés comme base afin de conduire des études. Un premier sondage américain d'envergure de MacArthur et al. (2014) et reconduit une seconde fois (MacArthur et al., 2018) s'intéresse aux habitudes et aux facteurs d'utilisation des VAE de la population nord-américaine propriétaire d'un VAE ainsi qu'à la démographie des utilisateurs. Un rapport commandé par l'Union Cycliste Internationale (Mason et al., 2015) présente un scénario global analysant l'impact d'une utilisation du vélo bien plus présente à travers le monde. Les données de ce scénario et de son prédécesseur (Replogle et Fulton, 2014) sont également souvent citées et utilisées comme base pour d'autres études.

L'utilisation du VAE est généralement associée à une diminution de l'utilisation de véhicules motorisés, entraînant un impact bénéfique sur l'environnement en réduisant les émissions de GES (Bourne et al., 2020; Mason et al., 2015; McQueen et al., 2019; Göran Smith et al., 2017; Tozluoğlu et al., 2024). Cela entraîne conséquemment un impact bénéfique sur la santé (Bourne et al., 2020; Fishman & Cherry, 2016; Mason et al., 2015) à travers la promotion de l'activité physique et l'augmentation de la qualité de l'air en milieu urbain. Le VAE permet aux utilisateurs de se déplacer à vélo plus souvent, sur de plus longues distances et avec plus de bagages (MacArthur et al., 2014, 2018). Cela est en partie dû au fait que la vitesse de déplacement atteignable est plus élevée (Hassanpour & Bigazzi, 2024), mais aussi à cause que l'effort requis est plus faible. La vitesse accrue pourrait cependant engendrer de nouveaux problèmes de sécurité (Dozza et al., 2016), mais il n'y a pas de consensus à ce sujet. Cherry et MacArthur (2019) rapportent ne pas avoir décelé d'impacts positifs ou négatifs sur la sécurité de l'usage des VAE.

La nature des déplacements par VAE est en grande partie utilitaire, la raison principale d'utilisation étant pour aller au travail à 45 % et pour des déplacements locaux à 20 % (MacArthur et al., 2014); pour aller au travail à 45.8 % et pour des déplacements utilitaires à 44.7 % (McQueen et al., 2019). Une part des déplacements est souvent rapportée à la catégorie loisirs et récréation, à l'intérieur de laquelle se trouverait le cyclotourisme. Il est cependant impossible de savoir de façon plus granulaire ce qui compose cette catégorie, étant donné la nature des données récoltées (sondage). Le VAE en usage récréatif est tout de même important lorsque la part des déplacements récréatifs est prise en compte au lieu de tous les déplacements. Près de la moitié des répondants disent utiliser principalement leur VAE pour leurs déplacements récréatifs. Le VAE a un effet d'encourager la pratique du vélo de façon récréative et de la rendre accessible à une population plus élargie (MacArthur et al., 2014, 2018).

Les VAE cargo, ou *e-cargo bikes*, sont une application directe de cette technologie pour un usage spécifique. L'assistance électrique permet de contrer la masse additionnelle du vélo et du cargo, permettant à l'utilisateur de transporter de l'équipement ou des passagers, des enfants la plupart du temps, et constitue un réel potentiel de livraison de marchandises légères (Göran Smith et al., 2017) (Philips, Ian et al., 2025). L'expérience des usagers de ce type de vélo souligne de nouvelles difficultés en lien avec le stationnement et l'assurance pour vol ou dommages (Egan et al., 2025). L'assistance électrique s'est également introduite dans les réseaux de mobilité partagée, que ce soit au niveau de la bicyclette ou d'autres véhicules de micromobilité (Shaheen, Susan et al., 2022) : Bixi à Montréal, par exemple. Il s'agit d'une autre application importante du VAE pour un cas d'utilisation bien précis.

La littérature sur les systèmes électriques et électroniques est vaste. Le contexte d'application n'est souvent pas spécifié dans ces études plutôt technologiques. Une revue de littérature axée sur le développement technologique directement ou indirectement en lien avec le VAE (Hung & Lim, 2020) recense spécifiquement plusieurs articles et études sur la dynamique et la puissance, le contrôle des moteurs électriques, les technologies de batteries et de charge des

dernières années. Cette littérature est traitée plus spécifiquement, puisqu'elle est directement nécessaire pour l'atteinte du second objectif spécifique de ce projet.

1.3 Revue de littérature thématique

1.3.1 Le VAE solaire et autres véhicules solaires

Tel que recensé par Hung & Lim (2020), quelques articles présentent des essais expérimentaux d'intégration de PV à la bicyclette, principalement publiés en Inde à travers des journaux moins ou peu reconnus (Bachche & Hanamapure, 2012; Bhavani et al., 2015; Mishra et al., 2016; Sayyad et al., 2016; Sathisha & Kanchan, 2017). Mis à part le renom des journaux de ces publications, ces études donnent l'impression d'être précipitées et tendent à directement électrifier une bicyclette en incluant du PV dans un circuit de recharge de la batterie, sans démontrer de méthodologie structurée et claire afin d'atteindre un quelconque objectif. Les panneaux PV utilisés sont des produits commerciaux qui sont maintenant dépassés. Les batteries utilisées sont des batteries acide-plomb, même si, en date de ces publications, d'autres technologies étaient disponibles. Les résultats de ces publications ne mettent pas en lumière la performance du VAE solaire vis-à-vis le VAE ou le vélo traditionnel pour un cas d'utilisation précis, seules la vitesse maximale et l'autonomie étant présentées sans contexte d'utilisation (Bachche & Hanamapure, 2012; Bhavani et al., 2015; Sayyad et al., 2016). Ces critères d'observation ne sont pas pertinents et les observations elles-mêmes discutables. La vitesse maximale n'est pas garante d'un temps de parcours plus faible, dépendamment de l'effort que l'utilisateur est prêt à fournir, du dénivelé du parcours et de plusieurs facteurs externes. L'autonomie, sans spécifier de vitesse, ne dit rien de la capacité du système à bonifier le déplacement. Saleh & Murali (2019) et Kowalski (2020) présentent des exercices similaires plus récents, mais avec les mêmes problèmes que précédemment cités, voire encore moins complets. Asrori et al. (2023) font une bien meilleure intégration de production PV au VAE, ainsi qu'une analyse de l'énergie réellement capturée et emmagasinée par le système pour un profil d'irradiation réel d'une journée. Cependant, ils traitent principalement de la production d'électricité sans aborder la fonction primaire du VAE solaire, soit se déplacer. Le constat suivant peut être fait : les publications scientifiques pertinentes et/ou de qualité traitant de

l'intégration du PV aux VAE sont difficiles à trouver et celles qui sont existantes sont incomplètes. Cela rejoint la conclusion antérieure d'Apostolou et al. (2018) à la suite de leur revue de littérature, qui ont ensuite conduit une étude expérimentale sur le terrain afin d'observer les habitudes d'utilisation d'un groupe utilisant un VAE solaire. Bien qu'ils concluent que l'usage du VAE solaire a été bien intégré dans les habitudes de déplacement quotidien du groupe test, peu de données et de résultats techniques sont présentés. Les déplacements moyens du groupe test étaient de 10,3 km et en milieu urbain. Le VAE solaire était un Sparta M7S LTD équipé de panneaux PV intégrés au niveau de la roue avant et d'une batterie de 400 Wh.

Des cellules PV sont utilisées dans plusieurs autres applications et intégrées au niveau de produits, d'où le terme *product-integrated PV* (PIPV), depuis les années 2000 (Reinders, 2020; Apostolou et al., 2018). L'ouvrage *Designing with Photovoltaics* (Reinders, 2020), mentionne différents cas d'application de PIPV, dont les bateaux, les voitures, les avions et les bicyclettes, mais peu de détails techniques. Un cas d'application de design d'une voiture électrique solaire de course est présenté plus en détail et traite bien des questions de gestion de l'énergie et de la balance entre la production et la consommation électrique. La course mentionnée dans cet ouvrage, le *Bridgestone World Solar Challenge* (Bridgestone World Solar Challenge, 2025), est une compétition universitaire internationale se déroulant tous les deux ans en Australie en alternance avec ses contreparties américaines, la *American Solar Challenge* et la *Formula Sun Grand Prix* (Innovators Educational Foundation, 2026). Ces deux cadres compétitifs universitaires sont d'excellents exemples d'activités académiques pertinentes et transférables vers le VAE solaire. McGregor et al. (2022) abordent la conception d'une telle voiture solaire dans une publication technique. Le développement des prototypes de chacune des équipes n'est pas nécessairement sujet à des publications académiques ou techniques, ni publiquement accessible. La simulation de voitures électriques solaires est tout de même bien mieux couverte par la littérature récente. Une modélisation mathématique exhaustive de la dynamique du véhicule et de l'irradiation solaire peut permettre d'évaluer la performance d'un véhicule solaire et d'optimiser la vitesse de déplacement ou l'heure de départ (Gardashov et al., 2025). Sornek et al. (2022) ont développé un petit bateau électrique solaire autonome pour prises de

mesures en lien avec la qualité de l'eau d'un lac. Ils ont évalué la capacité d'opération dans différents scénarios d'utilisation et conclu pouvoir économiser de 30 à 50 % d'énergie qui serait autrement prélevée du réseau électrique régional.

Des données et expériences pertinentes existent en dehors de la communauté académique. Tout une communauté d'enthousiastes de VAE solaire est active et partage ses expériences à travers d'autres mécanismes que la publication. Bien que moins officielle et sans mécanismes de révision, l'information qui s'y trouve ne devrait pas être mise de côté. *The Sun Trip* est une organisation française qui rassemble cette communauté autour de compétitions de vélo solaire encadrées (The Sun Trip, 2025). Les participants des éditions passées y sont répertoriés, mais peu d'information technique est directement accessible sur leur site. Cependant certains participants ont partagé leurs données telles que la distance et vitesse moyenne journalière et la quantité d'énergie journalière capturée et dépensée (Havran, 2022). Un partenaire commercial de cette organisation, *SolarMoov*, offre des services de conversion et quelques remorques solaires pour bicyclette (SolarMoov, 2025). L'information technique de leurs produits est cependant difficilement accessible. Certaines personnes se sont lancées dans des projets personnels de VAE solaire, la plupart du temps avec un objectif de grands voyages à vélo, et ont partagé leur expérience. C'est notamment le cas de Mark Havran qui a documenté tout un voyage à travers l'Amérique du Nord (Havran, 2022) à travers un blogue personnel. Il partage non seulement un classeur d'entrées journalières de la distance, l'énergie consommée, l'énergie capturée et le dénivelé, mais également un recensement des données des participants du *The Sun Trip 2018* et un outil de planification de voyage en VAE solaire. Toutes ces données sont pertinentes et intéressantes, mais doivent tout de même être prises avec un œil critique, vu l'absence de vérification par les pairs. Une autre compagnie fournit des kits de conversion pour des personnes intéressées à faire leur propre VAE solaire (GRIN Technologies, 2025) en plus de toutes les autres composantes associées au VAE. Elle répertorie des informations techniques de différentes composantes nécessaires au VAE solaire, dont quelques panneaux et cellules PV et les distribue. Il existe une bonne quantité de savoir-faire et de connaissances au sujet des VAE solaires en dehors du monde académique, mais il est plus difficile à cerner étant

donné qu'une partie se trouve cachée derrière une barrière de l'entreprise privée et une autre doit être vérifiée et validée attentivement avant de pouvoir y faire confiance.

1.3.2 VAE et cyclotourisme

Le cyclotourisme seul et ses définitions ont déjà été traités précédemment. L'usage du VAE strictement en contexte de cyclotourisme n'est pas spécifiquement abordé dans la littérature scientifique malgré la présence indéniable du VAE dans l'industrie du tourisme. La part de VAE dans les locations d'environ 200 opérateurs de tours était de 19 % en 2014 (Adventure Travel Trade Association, 2014) et le VAE est identifié comme la tendance principale pour 51 % des opérateurs en 2024 (Agathe Daudibon & Heather Kelly, 2024), une augmentation remarquable. Selon le rapport d'Agathe Daudibon & Heather Kelly (2024) pour l'*Adventure Travel Trade Association* et l'*European Cyclist' Federation*, la location de VAE est maintenant courante chez les opérateurs de tours. Le vélo de *touring* (de cyclotourisme) représente le type de vélo utilisé par la clientèle à 63 % en Europe et à 29 % ailleurs. Les tours sont principalement d'une durée de 4 à 8 jours en Europe et ailleurs. Il est à noter que les tours dont il est question dans ce rapport peuvent être guidés ou non. Le VAE a récemment fait son apparition dans un standard international, *ISO 11956:2025*, traitant du tourisme d'aventure et du cyclotourisme (ISO, 2025), démontrant qu'il est attendu qu'il occupe un espace de plus en plus important dans ce marché.

Pour ce qui en est du cyclotourisme sans distinction entre l'usage ou non du VAE, il s'agit d'une thématique importante de publication de recherche (Ciascai et al., 2022). Un rapport commandé par la commission du transport et du tourisme du Parlement européen analyse l'impact du réseau *EuroVelo*, un réseau cyclable européen géré par la Fédération Cycliste Européenne. Ce rapport concluait que le potentiel économique du réseau est considérable tout en ayant des impacts sur l'environnement bien plus faibles que d'autres types de vacances (Weston et al., 2012). Les retombées économiques du cyclotourisme peuvent être particulièrement bénéfiques en régions rurales qui ne bénéficient pas du tourisme habituel (Piket et al., 2013; Ciascai et al., 2022).

1.3.3 Modélisation de bicyclettes, de véhicules et de système PV

L'ouvrage *Bicycling Science* (Wilson & Schmidt, 2020) offre une base solide de modélisation de la physique d'une bicyclette. Les auteurs couvrent plusieurs types de résistances : aérodynamique, pente, roulement, bosses et accélération, en plus de quantifier la capacité de génération de puissance humaine. Ils touchent également à quelques aspects de la dynamique de la bicyclette, soit le freinage, la direction, la balance et la stabilité. Cet ouvrage ne vient cependant pas expliquer en profondeur tous les phénomènes physiques en jeu. Un angle plutôt généraliste est employé permettant de faire un tour de tous les éléments importants de façon égale. L'ouvrage *Race Car Vehicle Dynamics* (Milliken & Milliken, 1994) couvre de façon très pointue et très large la dynamique des automobiles. Cet ouvrage va certainement plus en profondeur dans la dynamique et la physique des véhicules, mais se concentre sur des applications automobiles. Les concepts de modèle masse-point et de modèle bicyclette (modélisation simplifiée de l'automobile sans roulis et non d'une bicyclette) sont introduits comme simplifications et peuvent certainement être adaptés au projet de ce mémoire. Il est possible d'aller extrêmement en profondeur dans la modélisation de l'aérodynamique et de l'interface de contact entre la route et le pneu. Un niveau de complexité élevé n'est probablement pas nécessaire pour un exercice de conception tel que celui de ce mémoire. Des coefficients aérodynamiques généraux, tirés du chapitre 7 de l'ouvrage *Fluid Mechanics* (White, 2011), traitant d'écoulements fluides autour de corps immergés en combinaison avec les valeurs présentées par Wilson & Schmidt (2020) devraient être suffisants. Néanmoins, *Race Car Vehicle Dynamics* est une excellente référence en la matière. La modélisation de l'adhérence d'un pneu est complexe. Le modèle le plus répandu et couramment utilisé est celui du *Magic Formula Tire Model* développé par Hans Pacejka (Pacejka & Bakker, 1992). Une modélisation plus complète mène à une plus grande perte énergétique qu'une modélisation avec un coefficient de résistance au roulement fixe (Manca et al., 2023), mais ajoute de la complexité à la modélisation.

L'irradiation solaire et la production électrique PV est couverte en profondeur dans l'ouvrage *Solar Engineering of Thermal Processes* (Duffie & Beckman, 2013). Plusieurs modèles sont présentés et expliqués afin de représenter plus ou moins exactement la capture de l'irradiation solaire par un collecteur PV ou non. La librairie libre d'accès PVlib (Anderson et al., 2023) implémente la grande majorité des modèles présentés par Duffie & Beckman (2013) en plus de servir de pont entre des bases de données d'irradiation solaire. L'application usuelle de cette librairie est d'estimer le potentiel de performance d'implémentation de production solaire fixe. Une fonctionnalité récente est implémentée afin de facilement avoir accès à des données d'irradiation pour une localisation donnée (Jensen et al., 2023), ce qui présente un potentiel de modélisation mobile avec cette plateforme.

Reinders (2020) fait une mise en application de production solaire PV au niveau d'une voiture électrique solaire au chapitre 4 de l'ouvrage *Designing with Photovoltaics*, où la balance énergétique est simplement modélisée. La modélisation d'un véhicule électrique solaire de Gardashov et al. (2025) est bien exécutée, cependant, la dynamique du véhicule dépend directement des conditions d'irradiation solaire comme aucune batterie n'est modélisée. Hung a étudié la performance et les caractéristiques d'opération du VAE par simulation et présente une modélisation intéressante du système utilisateur-VAE (Hung et al., 2018; Hung, Jaewon, et al., 2017; Hung, Sung, et al., 2017).

Quelques outils de simulation web existent et méritent d'être mentionnés. *Grin Technologies* ont, sur leur site web, un simulateur de charge de batterie, de moteur électrique ainsi qu'un simulateur de voyage qui peuvent être utilisés avec des composantes qu'ils ont caractérisées. Leurs outils sont, somme toute, bien faits et bien expliqués. Un second simulateur web pertinent est celui de Walter Zorn (Zorn, 2008), qui modélise la physique du vélo et permet de visualiser plusieurs graphiques de vitesse-puissance, mais n'offre pas de solutions dynamiques (Wilson & Schmidt, 2020).

1.3.4 Technologies du VAE solaire: batteries, moteurs électriques et PV

Plusieurs technologies sont mises à contribution dans toutes les formes de véhicules électriques solaires. Les principales sont au niveau des batteries, des moteurs de traction et des panneaux PV. Il est donc pertinent de faire une revue de littérature rapide de ces trois secteurs technologiques afin de dessiner un portrait global de la performance de ces technologies (rendement, densité de puissance, densité de capacité, etc.) ainsi que de recenser ce qui est commercialement disponible dans le monde du VAE.

Les chimies de batteries rechargeables utilisées pour des véhicules électriques incluent les batteries au plomb, au nickel (NiCd, NiMH) et au lithium. Étonnamment, beaucoup de VAE utilisent des batteries au plomb, surtout en Chine, le plus grand marché de batteries au plomb au monde (Hung & Lim, 2020). Il reste que, pour la majorité des applications de véhicules électriques, les batteries au lithium dominent par leur bien plus grande densité énergétique et meilleur rendement. Weston (2025) présente, dans un rapport de la *NASA*, les caractéristiques de différentes cellules de batteries commerciales en 2024, voir les Figure 1.1 et Figure 1.2 et le Tableau 1.3.

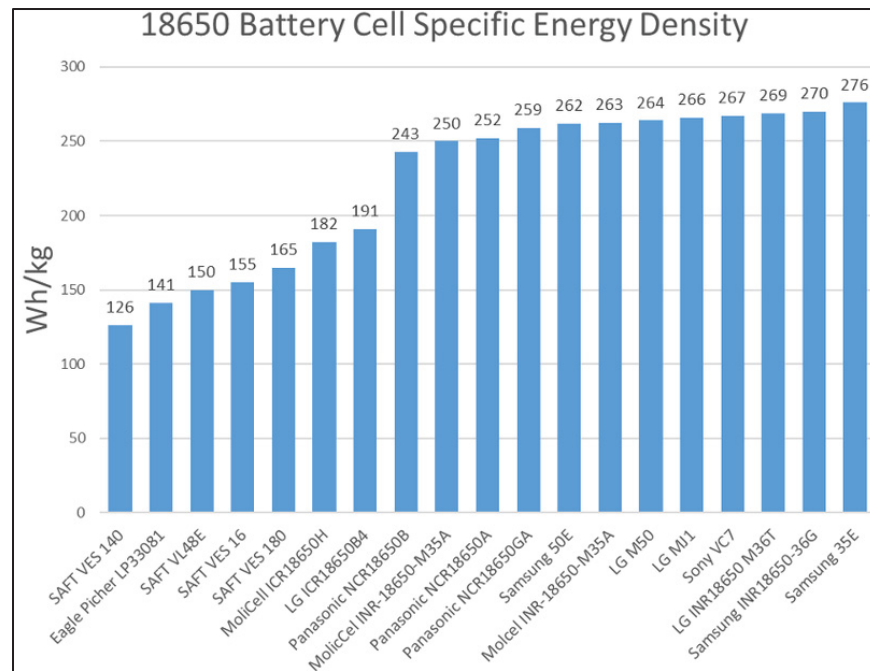


Figure 1.1 Densité énergétique de cellules Li-ion cylindriques 18650
Tiré de Weston (2025)

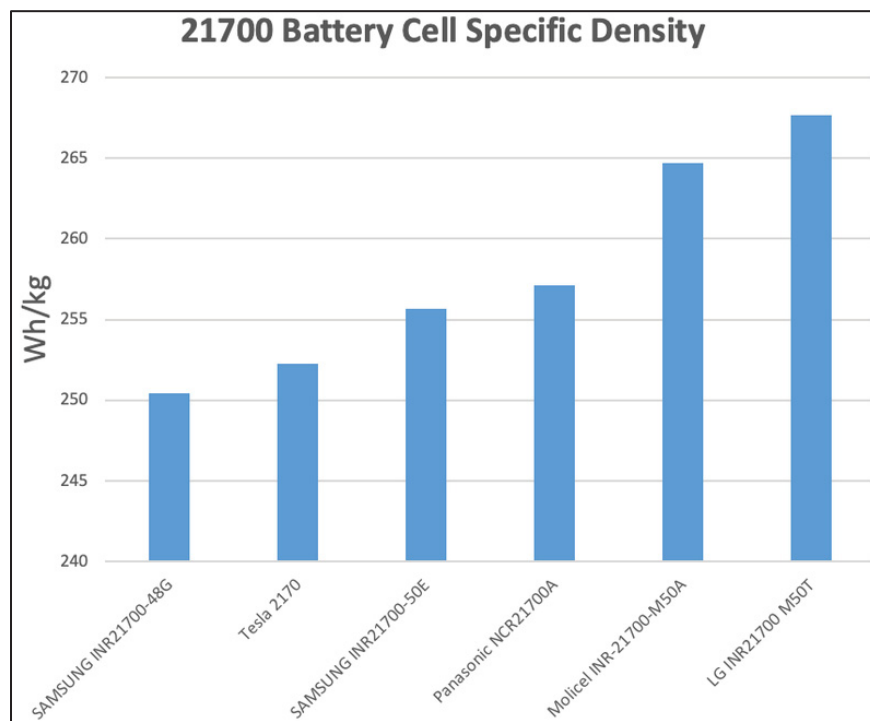


Figure 1.2 Densité énergétique de cellules Li-ion cylindriques 21700
Tiré de Weston (2025)

Bien que pour le domaine de l'aérospatiale, les cellules commerciales recensées dans ce rapport sont pertinentes pour des applications dans tous les domaines, dont les véhicules électriques. La recherche actuelle sur le stockage d'énergie par batterie porte davantage sur l'augmentation de la densité énergétique et de la capacité de stockage. La recherche sur les batteries à électrolytes solides, *Solid-State Batteries*, démontre qu'elles pourraient améliorer la performance des batteries Li-ion (Bicer et al., 2025), mais l'état de cette technologie est encore peu mature. La combinaison de plusieurs chimies dans une même batterie ou une station de charge de véhicule électrique est une avenue d'amélioration de la vitesse de charge des batteries qui est explorée en recherche (Barcellona et al., 2023; Potter, 2022). Pour ce qui est de l'offre commerciale au niveau des VAE, les batteries assemblées sont similairement dans le même spectre de capacité. *Bosch* offre une batterie d'appoint de 250 Wh jusqu'à des batteries intégrées ou sur support de 800 Wh (Bosch, 2025); *Mahle* offre une batterie externe de 171 Wh et deux internes de 237 et 350 Wh (Mahle, 2025); *Grin Technologies* distribue une large gamme de batteries allant de 100 à 1500 Wh et de 800 Wh en moyenne (GRIN Technologies, 2025).

Les moteurs électriques utilisés dans les véhicules électriques existent sous plusieurs formes dans le monde de l'automobile. Cependant, ils se limitent à des moteurs à courant continu, avec ou sans balais, dans le monde des VAE (Hung & Lim, 2020). Pour ce qui est de l'intégration, les moteurs électriques de VAE sont intégrés soit au niveau du moyeu de la roue avant/arrière (*Hub drive*) ou du pédalier (*Mid drive*). Les technologies de motorisation électrique constituent un vaste domaine de recherche. N'étant pas le sujet principal de ce mémoire, seulement un aperçu de l'offre commerciale spécifique au VAE sera couvert dans cette revue de littérature. À cause de la réglementation encadrant les VAE, les fabricants spécifient une puissance nominale continue de 250 W afin de s'y conformer, sans nécessairement spécifier dans quelles conditions, ce qui crée une certaine ambiguïté : la puissance d'un moteur dépend du système en entier et des conditions d'opération, sans ces informations, une puissance nominale n'est pas informative. *Bosch* offre une gamme de moteurs *Mid drive* développant 40 à 100 Nm et une puissance maximale de 586 à 750 W

(Bosch, 2025); *Mahle* offre des moteurs de 40 à 65 Nm et de 250/275 W (Mahle, 2025); *Grin Technologies* distribue une large gamme de moteurs allant de 250 à 2000 W (il ne s'agit pas de valeurs nominales) (GRIN Technologies, 2025). Dans tous ces cas, les fabricants affichent une puissance nominale ou une puissance de 250 W simplement pour être conformes.

Tableau 1.3 Caractéristiques de batteries assemblées par différentes compagnies aérospatiales
Tiré de Weston (2025)

[illegible]

Finalement, afin de compléter l'information requise pour modéliser de façon adéquate un véhicule électrique solaire, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques de performance des panneaux PV. En se basant à nouveau sur le rapport de Weston (2025), une vue d'ensemble de la performance récente de cellules PV est présentée au Tableau 1.4. Tout comme la motorisation électrique, la recherche dans le domaine du PV est vaste. Néanmoins, déterminer la performance exacte atteignable par un type ou un autre de cellule, au silicium mono ou polycristallin, couche mince ou multi-jonction n'est pas directement lié avec l'objectif de ce projet.

Tableau 1.4 Caractéristiques de différentes cellules PV, *beginning-of-life* (BOL)
Tiré de Weston (2025)

Table 3-1: Solar Cells Product Table								
Company	Cell Name	BOL Efficiency	Voc (V)	Vmp (V)	Jsc (mA/ cm ²)	Jmp (mA/ cm ²)	Pmp (W/m ²)	Ref
AZUR Space ^{Germany}	Silicon S 32	16.8	0.628	0.528	45.8	43.4	229.2	(4)
	3G30-Adv	29.5	2.7	2.411	17.2	16.71	403	
	4G32-Adv	31.5	3.426	2.999	15.2	14.37	431	
	TJ 3G28C	28	2.667	2.37	16.77	16.14	1367	
Rocket Lab ^{USA}	ZTJ	29.5	2.726	2.41	17.4	16.5	397.7	(5)
	ZTJ+	29.4	2.69	2.39	17.1	16.65	397.9	
	ZTJ Omega	30.2	2.73	2.43	17.4	16.8	408.2	
	Z4J	30.0	3.95	3.54	12	11.5	407.1	
	IMM α	32.0	4.78	4.28	10.7	10.12	433.1	
	ZTJM	29.5	2.72	2.38	17.1	16.5	392	
SpectroLab ^{USA}	XTJ	29.5	2.633	2.348	17.76	17.02	399.6	
	XTJ-Prime	30.7	2.715	2.39	18.1	17.4	415.9	(7)
	XTE-SF	32.2	2.75	2.435	18.6	17.8	433.4	(6)
	XTE-HF	32.1	2.782	2.49	18	17.4	427.9	
	XTE-LILT	31.6	2.755	2.459	18.1	17.4	427.9	
	UTJ	28.4	2.66	2.35	17.14	16.38	384.93	(8)
	TASC	27	2.52	2.19	32	28	270	(9)
	ITJ	26.8	2.565	2.27	16.9	16	1353	(10)
Emcore Corporation ^{USA}	BTJ	28.5	2.7	2.37	17.1	16.3	386	(11)
	ZTJ	29.5	2.726	2.41	17.4	16.5	397	

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES SOLAIRES

La conception d'un véhicule solaire fait intervenir une quantité importante de variables et de paramètres. Il est difficile de savoir intuitivement quels paramètres influencent, et dans quelle mesure, la performance de ce dernier. C'est dans cette optique qu'un outil de simulation basé en Python a été développé afin d'évaluer la performance théorique d'un véhicule solaire en fonction de plusieurs paramètres qui seront expliqués dans la suite de ce chapitre. L'utilisation de cet outil permet ainsi de dimensionner les différents composants des sous-systèmes du véhicule de façon plus informée. L'outil de simulation basé en Python utilise la librairie libre d'accès PVlib (Anderson et al., 2023). Il fait notamment usage des fonctionnalités incluses dans celle-ci afin d'interagir avec plusieurs bases de données météorologiques (Jensen et al., 2023), dont PVGIS (Huld et al., 2012; Martinez, 2025), et de modéliser l'irradiation solaire. Cet outil et son code source sont partagés en intégralité à travers un répertoire GitHub (Tétrault-Leclerc et Tétrault-Leclerc, 2025). Le fonctionnement global et la modélisation de la physique du véhicule sont présentés en première partie. L'architecture du véhicule solaire proposée pour la modélisation est la suivante : un véhicule d'une certaine masse, m [kg], comprenant une certaine surface de panneaux solaires PV, A_{col} [m²], une certaine capacité de stockage d'énergie (batterie), E [Wh], et d'une certaine puissance d'assistance maximale, W_{max} [W]. Elle est décrite plus en détail en seconde partie. Une mise en application de l'outil dans un contexte de cyclotourisme, le sujet de ce travail de recherche, est faite en troisième partie.

2.1 Modélisation et fonctionnement global de l'outil de simulation

La modélisation physique du véhicule s'inspire de la modélisation de la bicyclette de Wilson & Schmidt (2020) en incorporant une contribution possible d'un utilisateur à la propulsion telle que proposée par Hung et al. (2017). La simulation développée en est une de type masse-point à temps différé basée sur le principe des variables d'états. Le véhicule est considéré comme une masse ponctuelle écartant ainsi tous les degrés de liberté en rotation (Milliken & Milliken,

1994). Le problème est simplifié davantage en contraignant le véhicule à se déplacer le long d'un itinéraire en une dimension, résultant en un seul degré de liberté : la position du véhicule. Tous les attributs intemporels liés à l'environnement de la simulation sont alors exprimés en fonction de la position du véhicule le long de l'itinéraire spécifié (élévation, pente, direction, latitude, longitude, fuseau horaire, etc.). Les variables d'états sont instationnaires (elles fonction du temps) et sont recalculées à chaque pas de temps de simulation. Ces variables sont la position et la vitesse. Selon le principe fondamental de Newton, on peut écrire l'équation du mouvement longitudinal d'un véhicule se déplaçant sur un itinéraire 1D :

$$m\ddot{x}(t) = \Sigma F \quad (2.1)$$

Il suffit de faire un simple diagramme des corps libres sur ledit véhicule, afin de déterminer les forces en jeu. Deux forces résistives (aérodynamique et résistance au roulement) et une de propulsion sont considérées. La force gravitationnelle est évidemment prise en compte avec une force normale comme réaction (Figure 2.1).

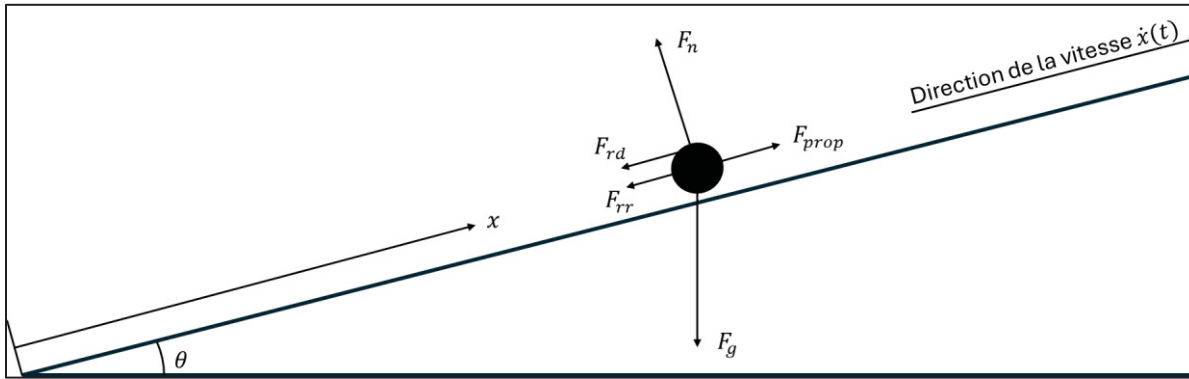


Figure 2.1 Diagramme de corps libre d'un véhicule représenté comme une masse en un point

En ramenant toutes ces forces sur l'axe x , une équation est obtenue uniquement en termes de la position x . La résistance aérodynamique est prise en compte à l'aide de la relation classique :

$F_{rd} = \frac{1}{2} \rho C_d A_{aero} \dot{x}(t)^2$, la résistance au roulement à l'aide de la relation classique: $F_{rr} = F_n C_{rr}$ et $F_g = mg$. Les coefficients aérodynamiques et de résistance au roulement, la densité de l'air et l'aire de référence sont des paramètres de simulation. L'équation (2.1) devient donc :

$$\ddot{x}(t) = \frac{F_{prop}}{m} - \frac{1}{2m} \rho C_d A_{aero} \dot{x}(t)^2 - g C_{rr} \cos \theta - g \sin \theta \quad (2.2)$$

Quelques considérations supplémentaires sont nécessaires. Afin d'assurer que la force de résistance au roulement soit toujours inverse au déplacement et que la force de résistance de l'air soit toujours consistante avec la direction du vent, un terme de signe et une vitesse de vent dans la direction du mouvement sont ajoutés pour obtenir une équation du mouvement finale:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) = & \frac{F_{prop}}{m} - \frac{1}{2m} \rho C_d A_{aero} \dot{x}(t)^2 \text{signe}(\dot{x}(t) - v_{vent}) \\ & - g C_{rr} \cos \theta \text{signe}(\dot{x}(t)) - g \sin \theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

La modélisation de la physique est somme toute simple. Il est cependant pertinent de faire remarquer que certains paramètres sont dans les faits variables. La vitesse du vent instantanée varie en fonction du temps et de la position. La pente instantanée varie en fonction de la position. La force de propulsion est en fait la variable de contrôle de la physique modélisée. C'est à travers une commande de cette force que l'accélération est calculée, et donc la vitesse, et donc la distance parcourue sur un pas de temps.

La commande de cette force de propulsion F_{prop} est déterminée à partir des conditions instantanées du véhicule et appliquée jusqu'au prochain pas de temps. En fait, l'équation (2.3) est résolue à partir des conditions instantanées jusqu'au prochain pas de temps en utilisant cette commande. Le pas de temps est le temps d'intégration auquel la solution de l'équation (2.3) est multipliée. Cela entraine des conditions différentes pour le prochain pas de temps et une nouvelle commande de F_{prop} est déterminée et ainsi de suite.

La Figure 2.2 illustre la schématisation de la résolution du modèle physique du mouvement du véhicule.

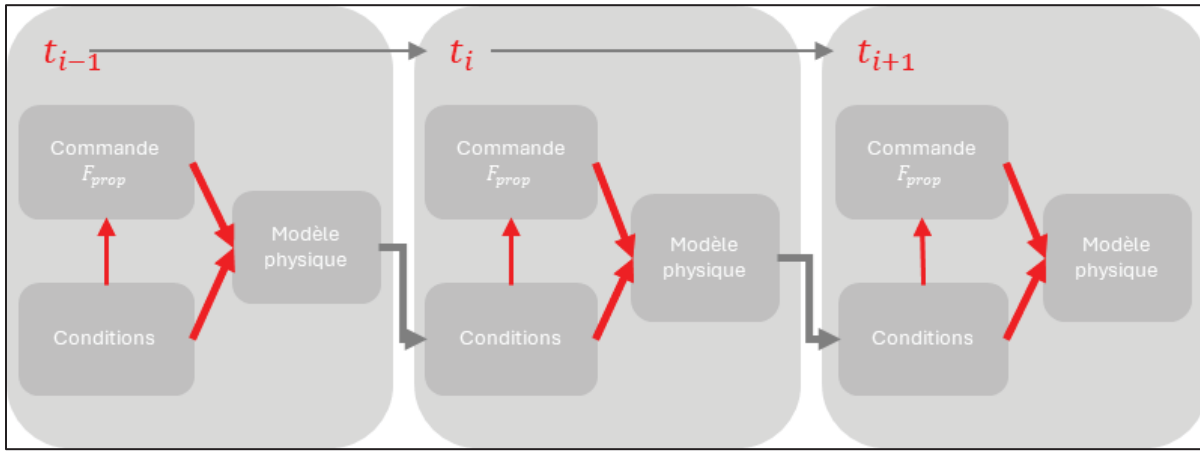


Figure 2.2 Schématisation de la résolution du modèle physique du mouvement du véhicule

Comme certaines conditions sont dépendantes de la position du véhicule et du temps (vitesse et orientation du vent, irradiation solaire, etc.), la solution du modèle physique au pas de temps précédent est nécessaire pour déterminer les conditions au pas de temps actuel. Cela impose un choix de valeurs initiales pour la position $x(0)$, la vitesse $\dot{x}(0)$ et l'accélération $\ddot{x}(0)$. Celles-ci sont également paramétrables, mais auront de moins en moins d'impact sur les résultats de simulation plus le temps de simulation total sera grand.

D'autres conditions pour la commande de F_{prop} peuvent être spécifiques à l'état du véhicule en soit. Par exemple, l'état de charge de la batterie et la vitesse de déplacement peuvent être des conditions pertinentes pour déterminer une nouvelle commande de F_{prop} . De telles conditions peuvent être mises en place dans cet outil de simulation, permettant une certaine boucle de contrôle.

2.2 Architecture de simulation

Cet algorithme de résolution est implémenté dans un outil de simulation basé en Python et fait usage d'une approche de programmation orientée par objet, ce langage de programmation étant favorable à cette approche. Cela permet une bonne organisation des variables spécifiques (attributs) qui peuvent être attribuées à des groupes de variables. Pour la clarté, quelques définitions s'imposent. Les groupes de variables, sont généralement appelés des objets de programmation dans le contexte de Python et dans le contexte de cet outil, le type d'objets utilisés sont des classes, qui peuvent contenir des variables spécifiques à ce groupe, des attributs. Des objets peuvent également contenir d'autres objets. Des classes peuvent être composées d'attributs et de sous-classes. L'utilisation de la langue anglaise fut choisie pour le développement de cet outil dans une optique de diffusion avec le public et la communauté scientifique. Cela permet également une cohérence avec l'utilisation de la librairie PVlib, qui est elle aussi en anglais. Des classes peuvent également comprendre des fonctions spécifiques à celles-ci qui sont appelées des méthodes.

Deux classes sont dédiées au domaine de simulation :

- *Path* : Une classe qui existe afin de préparer la simulation. Elle permet de faire la création et la gestion des chemins sur lesquels des simulations peuvent être lancées. La classe *Path* est également une sous-classe d'*Environment*.
- *Environment* : Une classe qui contient les variables et paramètres de simulation qui sont propres à l'environnement dans lequel le véhicule simulé se déplace. Un objet de classe *Environment* doit contenir un objet de classe *Path* pour pouvoir être utilisé dans une simulation.

Six classes sont dédiées à la simulation du véhicule :

- *Rider* : Une classe permettant de définir les paramètres d'un pilote et l'horaire de conduite en temps local. Pour le cas d'un véhicule à propulsion humaine, elle contient également la puissance de propulsion délivrable par le pilote.

- *Battery* : Une classe contenant les paramètres de modélisation de la batterie du véhicule. Elle contient des méthodes spécifiques pour l'imposition de *de-rating* et la mise à jour de l'état de charge (SOC).
- *SolarPanel* : Une classe contenant les paramètres de modélisation des panneaux solaires véhicule. Elle contient la modélisation de l'irradiation solaire.
- *Chassis* : Une classe contenant des paramètres constants définissant le véhicule (masse, masse de cargo, coefficients de résistances de roulement et aérodynamique).
- *Motor* : Une classe contenant les paramètres de modélisation du moteur électrique. Elle contient des méthodes spécifiques pour l'imposition de *de-rating*.
- *Vehicle* : Une classe parent qui a besoin des cinq classes précédentes et la classe *Environment* en entrée. Étant parent, elle permet d'établir des ponts entre les classes et leurs attributs. Elle contient des méthodes spécifiques pour la modélisation de la physique du véhicule.

Afin de mieux communiquer cette architecture, le schéma de la Figure 5 permet de visualiser comment ces classes sont imbriquées l'une dans l'autre et vient montrer comment les attributs sont partagés entre elles. Les attributs d'une sous-classe pouvant être transférés à la classe parent, certains attributs de certaines classes sont continuellement mis à jour par la classe *Vehicle* durant la simulation.

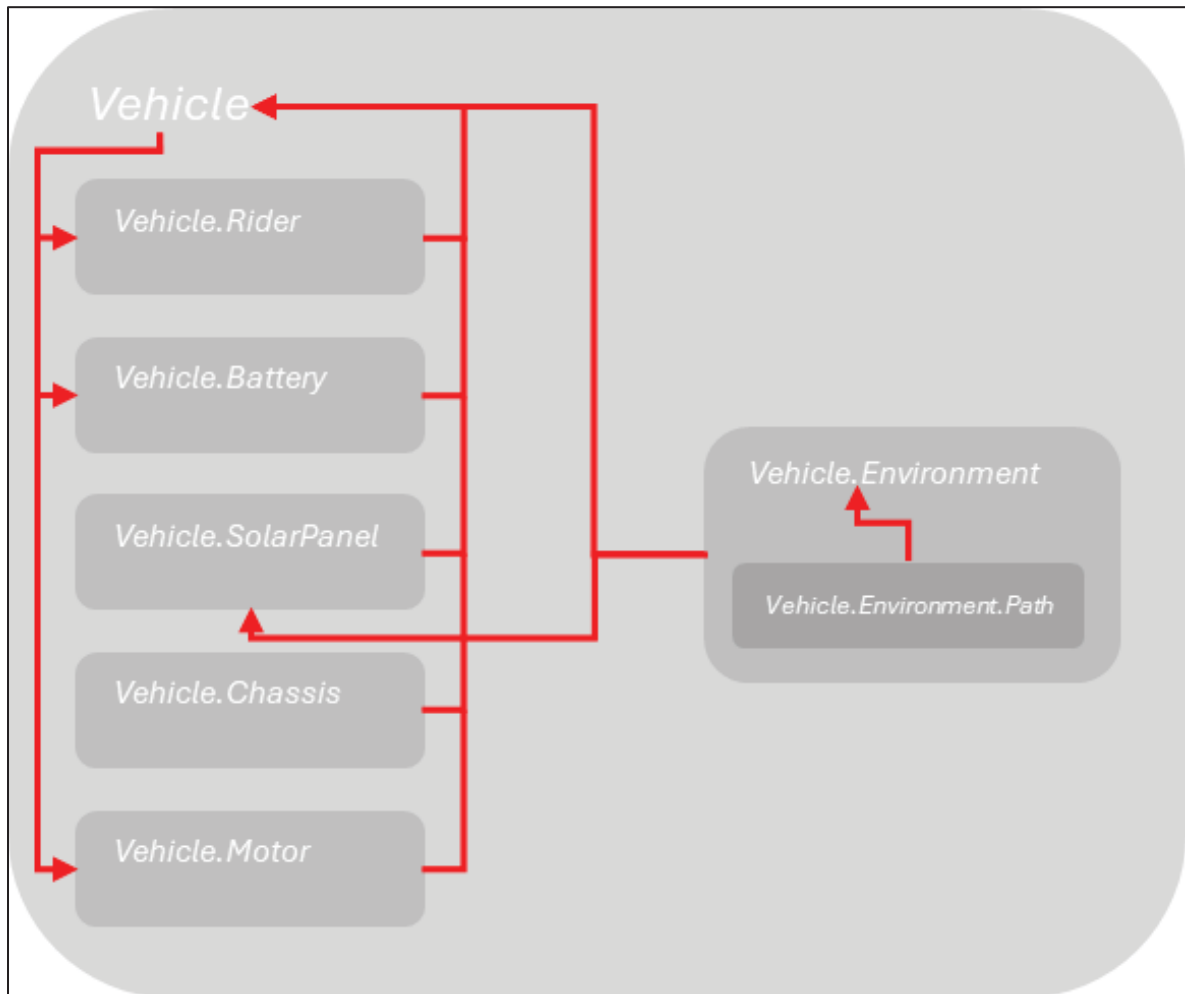


Figure 2.3 Architecture de programmation: classes et sous-classes

Le modèle physique du mouvement du véhicule établi dans la section précédente est au niveau de la classe *Vehicle*. Cependant, la résolution de ce modèle se fait à travers une fonction de simulation qui prend un objet de classe *Vehicle* en entrée ainsi que des conditions initiales. Cela implique que la position, la vitesse, l'accélération et le temps existent uniquement au niveau de cette fonction. Afin de résoudre l'équation (2.3), plusieurs informations sont nécessaires et se trouvent dans les attributs de toutes les classes. C'est pour cette raison que la classe *Vehicle* est parente. De cette façon, les attributs des sous-classes sont transférés à la classe-parent et disponibles pour utilisation durant la résolution du pas de temps. Inversement, à travers cette classe-parent, il est possible d'aller mettre à jour les attributs des sous-classes

en cas de variation (SOC, fuseau horaire, pente, temps local, irradiation, etc.) Avec une telle architecture, il est possible de modifier ou d'ajouter des fonctionnalités aux sous-classes sans nécessairement beaucoup d'implications au niveau des autres classes. Cela a été fait dans l'optique de pouvoir construire sur cette base et de pouvoir implémenter de meilleurs modèles de moteurs, de batteries, de PV et une physique plus complexe dans le futur.

2.2.1 Gestion des données météorologiques dans le contexte d'une production solaire mobile : la classe *Environment* et la sous-classe *Path*

La classe *Environment* et la sous-classe *Path* représentent une contribution importante du projet de recherche de ce mémoire. Lors de la simulation d'un véhicule solaire, il est impossible de savoir d'avance quelle sera la ressource solaire à un temps donné. Ce qui est peut-être une évidence puisque le but d'une telle simulation est de déterminer où se situera un véhicule solaire qui utilise cette ressource pour alimenter sa batterie au bout d'un déplacement. Cela dépend d'où est situé le véhicule et cela dépend à son tour de la vitesse de déplacement, qui, elle est le résultat de la résolution du modèle physique du véhicule. Des données météorologiques sont nécessaires tout au long d'un itinéraire, et, comme il est impossible de savoir quand, il est difficile d'utiliser les données météorologiques à l'instant voulu uniquement. Il est possible, en interagissant avec des bases de données, d'aller chercher cette information durant le calcul du pas de temps, mais cette opération est souvent beaucoup plus lente que tout le reste du calcul (on parlerait ici de centaines, voire de milliers de fois plus lente), lorsque cette interaction est avec une base de données web. Cela entraînerait aussi de retélécharger toutes les mêmes données si la simulation était pour être refaite avec les mêmes paramètres, ce qui arrive souvent avec l'utilisation d'outils de simulation, surtout durant la phase initiale de configuration. L'approche proposée est alors d'enregistrer localement les données météorologiques annuelles (sur une base horaire) tout au long d'un itinéraire. Cette approche implique une très grande quantité de données à gérer, plus ou moins en fonction de la résolution spatiale des données disponibles et de la résolution avec laquelle on souhaite simuler (la résolution spatiale est un paramètre de la classe *Path*).

Les cas d'utilisation typiques d'énergie solaire sont fixes en termes de localisation : on évalue la ressource en un point géographique seulement, pour une centrale, une usine, une résidence, une petite communauté. Toutefois, dans le cas d'un véhicule, l'évaluation de la ressource, et donc de l'énergie disponible, évolue avec le déplacement. En discrétisant le mouvement de ce véhicule, on se retrouve à effectuer une réévaluation des paramètres à chaque pas de temps. La manipulation de cette grande quantité de données météorologiques n'est donc pas standard. La classe *Environment* et la sous-classe *Path* sont conçues et parviennent à fournir une solution systématique à ce problème. La stratégie employée pour garantir un accès rapide, lors de la simulation, aux données nécessaires au temps et à l'emplacement requis est de préalablement construire un domaine de simulation contenant toutes les données météorologiques pour une année typique (TMY) et un profil d'horizon pour les effets d'ombrage à chaque position possible de l'itinéraire. Une année typique (TMY) consiste en un tableau de données horaires en un endroit pour une année complète (température, irradiation solaire, humidité, vitesse de vent, etc.) qui est généré par PVGIS en suivant la procédure ISO 15927-4. La méthodologie est décrite plus en détail par Huld et al. (2018). Un profil d'horizon est un fichier contenant la hauteur de l'horizon en degrés pour 48 directions équidistantes du Nord au Nord en passant par l'Est, le Sud et l'Ouest qui est calculé par PVGIS en utilisant la base de données d'élévation (DEM) SRMT-3 DEM. Toutes ces données sont sauvegardées dans une structure de fichiers afin de pouvoir y accéder au moment opportun. Il est possible de faire l'analogie avec le maillage des domaines de simulation en analyse par éléments finis. Ici, cette structure de fichiers représente en quelque sorte le maillage du domaine de simulation 1D propre à un itinéraire (à une géométrie en analyse par éléments finis).

En fonction de la résolution spatiale spécifiée à l'objet de classe *Path*, un système ordonné d'identification est utilisé afin d'obtenir une identification unique pour chaque zone où les données sont les mêmes. L'appellation « carré de grille » sera utilisée pour faire référence à ces zones pour la suite. L'identification systématique est de la forme : (#ID latitude ; #ID longitude). Il y a un lot de données différent pour les TMY et les profils d'horizon pour qu'ils puissent permettre des résolutions différentes. Dans le cas de PVGIS, les profils d'horizon ont

une résolution spatiale d'environ 90m et les TMY de 4 à 25 km dépendamment de la base de données disponible en une location.

Une représentation visuelle de la méthode systématique d'identification des carrés de grille est présentée ci-dessous. Le carré de grille dont le coin inférieur gauche est à l'origine du système ordonné est celui avec le premier numéro d'identification (0;0). Les côtés inférieur et gauche d'un carré de grille sont considérés comme appartenant à celui-ci. Les deux autres sont considérés comme appartenant aux carrés de grille voisins afin d'éviter toute ambiguïté avec des coordonnées GPS exactement ou très proches de la frontière entre deux carrés de grille.

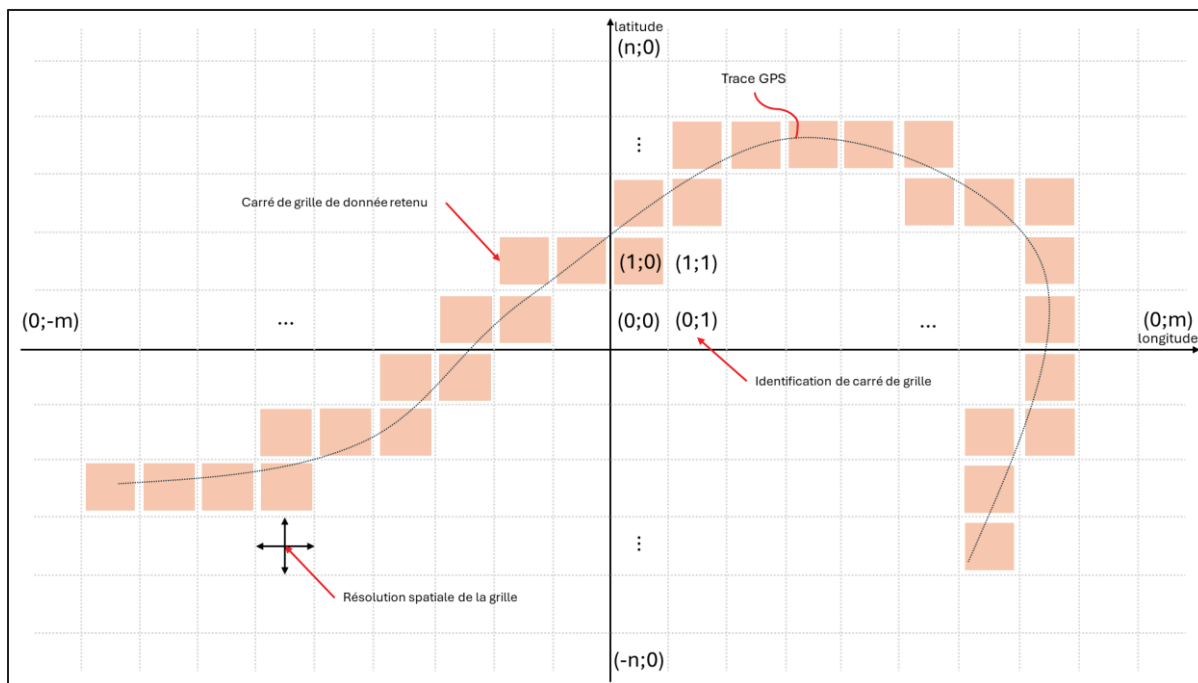


Figure 2.4 Système ordonné d'identification de « carrés de grille » pour la gestion des données météorologiques

Il arrive fréquemment que deux coordonnées GPS soient significativement éloignées, laissant des trous dans la couverture des carrés de grilles. Une méthode de la classe *Path* est affectée au maillage et comble ces trous afin d'assurer une continuité dans la couverture de données. Un exemple de couverture de grille pour un trajet de Houston, Texas à Los Angeles, Californie (itinéraire extrait de *Google Maps*) avant et après avoir comblé les trous est présenté en Figure

2.5. L'exemple est plus frappant avec les données d'horizon en Figure 2.6. Chaque point représente le coin inférieur gauche d'un carré de grille.

L'interpolation spatiale des données météorologiques n'est pas implémentée dans cet outil de simulation. Cela fait en sorte que les données météorologiques, telles que la température et les composantes de l'irradiation solaire sont souvent discontinues lorsque le véhicule passe d'un carré de grille TMY à un autre, provoquant un changement abrupt de ces valeurs.

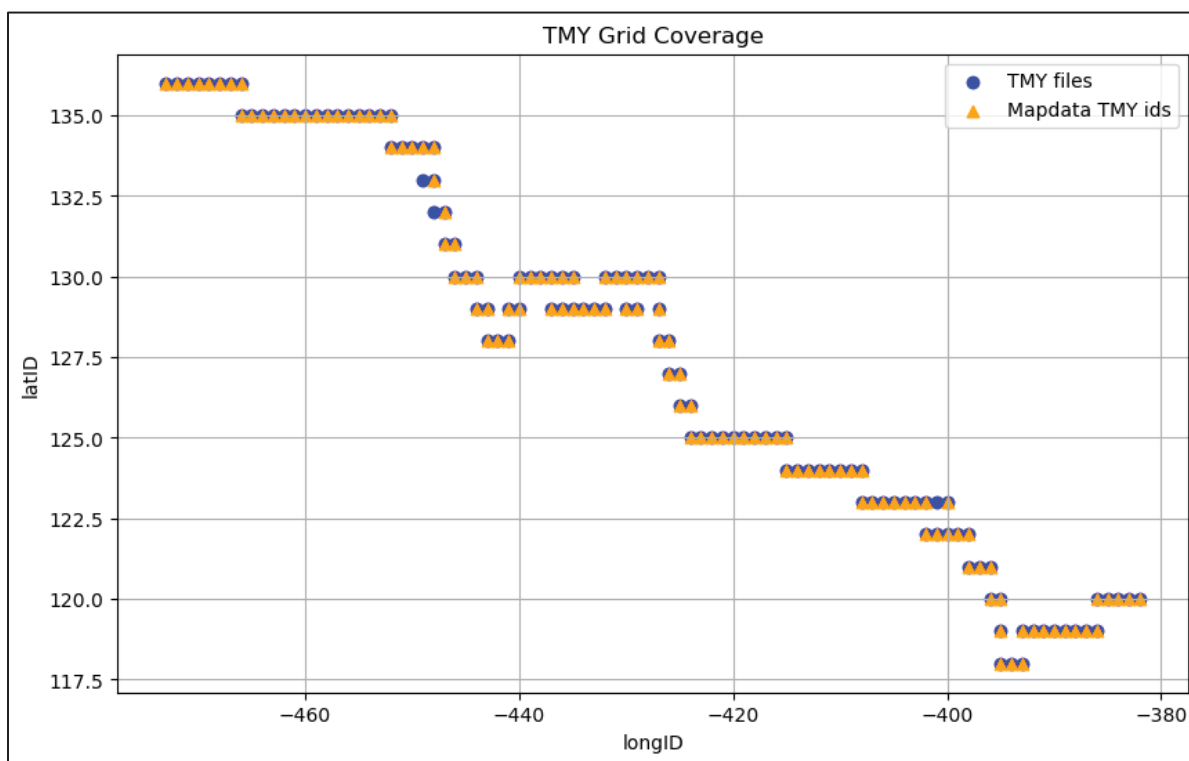


Figure 2.5 Couverture des « carrés de grille » de TMY pour un trajet de Houston, Texas (droite) à Los Angeles, Californie (gauche)

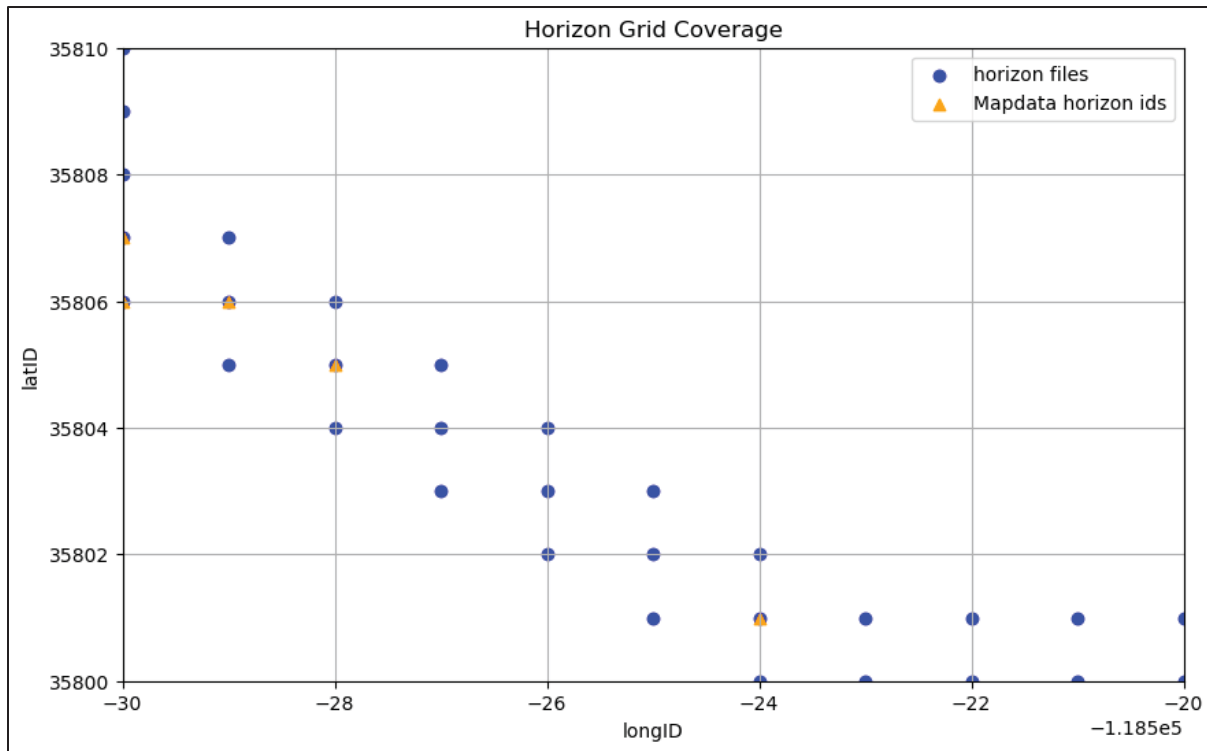


Figure 2.6 Couverture des carrés de grille d'horizon en un endroit où des trous de couverture étaient présents. *Mapdata horizon IDs*: la couverture de données d'horizon aux points exacts de la trace GPS. *Horizon files*: la couverture de données d'horizon finale

La procédure pour créer le domaine de simulation se fait en quatre étapes. Afin de créer un domaine de simulation, une trace GPS avec élévation est requise sous forme de fichier texte contenant les colonnes latitude, longitude et élévation.

1. Initialisation d'un objet de classe *Path*. Création d'une structure de fichier.

En spécifiant un nom afin d'identifier et nommer la structure de fichier et un type d'itinéraire du point A au point B (A2B) ou du point A au point A (A2A), une structure de fichier est écrite localement. L'attribut de type d'itinéraire est utilisé durant la simulation pour l'arrêter une fois l'itinéraire complété ou pour compter les tours.

2. Génération d'un fichier maître *mapdata*.

Pour chaque coordonnée de la trace GPS, la position est calculée à l'aide de la fonction de Haversine et la distance calculée en prenant en compte le changement d'élévation. En

appliquant une différence avant, à la première ligne; arrière, à la dernière ligne; et centrée, pour toutes les autres, les variations de position, d'altitude, de latitude et de longitude sont calculées, permettant de déterminer la pente du sol et la direction de l'itinéraire. Pour chaque coordonnée de la trace GPS, un fuseau horaire et un numéro d'identification de carré de grille est attribué pour les données TMY et d'horizon. Ce fichier agit comme une carte contenant toutes ces variables et les clés pour aller appeler les fichiers TMY et d'horizon adéquats et requis. Finalement, ce fichier contient toutes les informations sur le domaine de simulation qui sont intemporelles et uniquement en fonction de la position ainsi que les clés pour aller chercher les fichiers météorologiques pertinents toujours en fonction de la position. Il agit également comme base d'interpolation pour toutes les variables qu'il contient, permettant d'assurer une meilleure continuité (de premier ordre) de la position, de l'élévation, de la pente, de la direction, etc.

3. Téléchargement des données TMY requises.

Tous les fichiers TMY sont systématiquement téléchargés de PVGIS et enregistrés dans leur répertoire dédié en suivant la liste des numéros d'identification de carré de grille contenue dans le fichier *mapdata*. Un second passage à travers cette même liste identifie et comble les trous de couverture de fichiers TMY.

4. Téléchargement des données d'horizon requises.

Exactement la même procédure que pour les fichiers TMY, mais dans un répertoire dédié aux fichiers d'horizon.

Les étapes 3 et 4 peuvent être coûteuses en termes de ressources informatiques lorsque l'itinéraire devient très long, surtout pour extraire les relevés d'horizon à une résolution d'environ 100m. À titre de démonstration, un certain itinéraire d'environ 2500 km a requis une centaine de fichiers TMY et un peu moins de 100 000 fichiers d'horizon pour couvrir tout l'itinéraire. Pour un ordinateur de travail relativement bien équipé d'un peu moins de 10 ans (Lenovo ThinkPad P52), chaque itinéraire a nécessité environ 12h de temps de calcul pour construire le domaine de simulation complet, dont environ 11h strictement pour les fichiers

d'horizon. Cependant, une fois le domaine complété, les simulations peuvent être exécutées significativement plus rapidement que si elles devaient continuellement faire des requêtes à des bases de données web. Il s'agit de l'un des aspects originaux prépondérants de la présente recherche. Bien entendu, la simulation peut également devenir coûteuse lorsque le temps de simulation augmente et que le pas de temps diminue.

2.2.2 Les blocs de construction pour la modélisation d'un véhicule électrique solaire : Les classes *Rider*, *Battery*, *SolarPanel*, *Chassis* et *Motor*

Tel qu'expliqué, un objet de classe *Vehicle* est composé de cinq sous-classes qui doivent être initialisées. Avant de présenter plus en détail ces cinq sous-classes, il est pertinent de rappeler que la dynamique, soit le modèle physique du véhicule, est contenue au niveau de la classe parent *Vehicle*, mais que sa résolution se fait à travers une fonction de simulation qui gère le temps de simulation et les résultats du modèle physique du véhicule (position, vitesse et accélération) ainsi que les interactions entre les classes, les conditions instantanées et la commande de propulsion. Les paramètres intemporels sont décrits par des flèches blanches. Les variables qui sont mises à jour en fonction du temps de simulation sont décrites par des flèches rouges. Les informations qui sont transférées au prochain pas de temps sont décrites par des flèches grises.

La classe *Rider* permet principalement de contrôler la marche ou l'arrêt du véhicule en fonction d'un horaire de conduite. Ce contrôle est effectué à travers une variable booléenne de marche ou d'arrêt. Cependant, cette variable est mise à jour par l'objet parent *Vehicle* qui compare le temps local à l'horaire de conduite spécifique à l'objet *Rider*. Pour traiter la particularité de véhicules à assistance électrique, une contribution de puissance par l'utilisateur peut également être spécifiée à cette classe. Sinon, pour des véhicules purement électriques, il suffit de mettre cette contribution à zéro. Une certaine masse de conducteur est spécifiée pour être prise en compte dans le modèle physique. Voir la Figure 2.7 pour la schématisation.

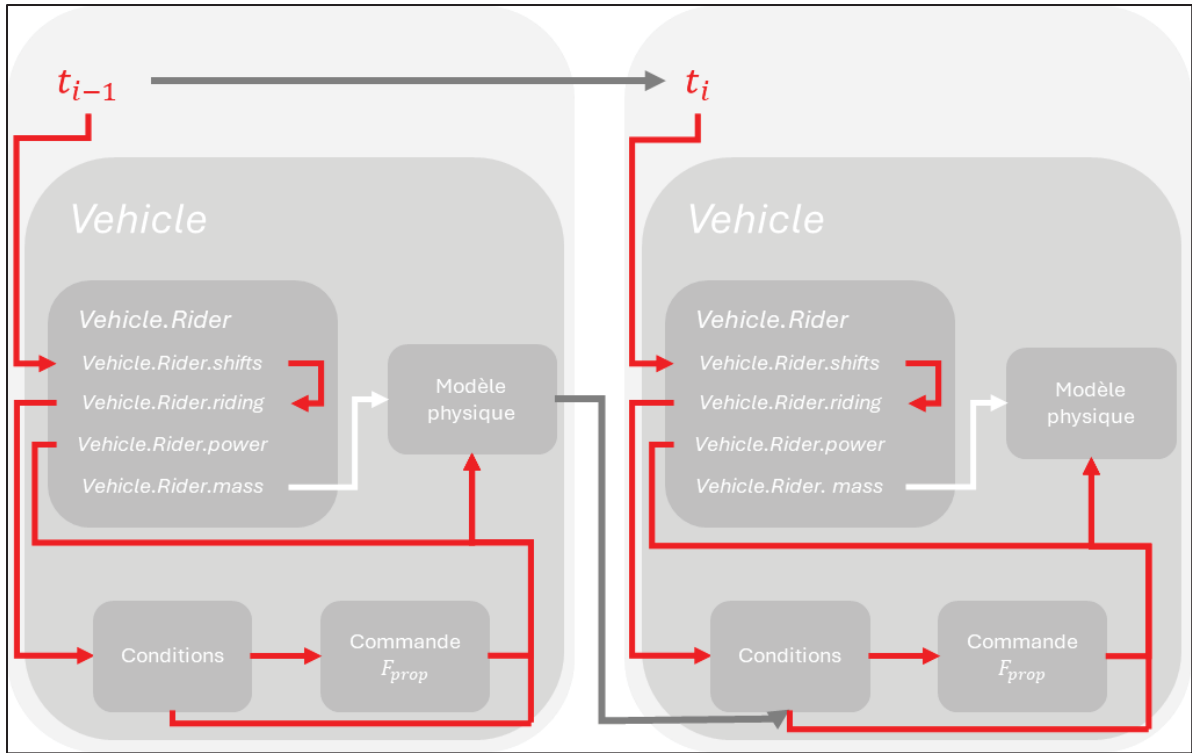


Figure 2.7 Interactions de la sous-classe *Rider* durant la simulation

La classe *Battery* contient la modélisation de la batterie et des méthodes spécifiques afin de déterminer la puissance pouvant être délivrée par la batterie en fonction du SOC et de la demande de puissance par le véhicule et pour appliquer des limites de charge et de décharge à la batterie. Le modèle de batterie en est un idéal, c'est-à-dire que toute l'énergie stockée peut être restituée sans aucunes pertes. La capacité en Wh est le seul paramètre de ce modèle. Un bilan énergétique est calculé sur chaque pas de temps de simulation en prenant en compte la puissance de propulsion W_{prop} et de la puissance solaire générée $W_{solaire}$:

$$\Delta E = \sum E_{in} - \sum E_{out} = (W_{solaire} - W_{prop}) * dt \quad (2.4)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \Delta E \quad (2.5)$$

Pour des fins de contrôle, une limite inférieure (Llim) et supérieure (Ulim) de SOC sont utilisées pour créer une fonction de contrôle de la décharge de la batterie. Aucune règle n'est

imposée pour la recharge. Cette fonction de contrôle sera décrite dans la section 2.2.3. Voir la Figure 2.8 pour la schématisation.

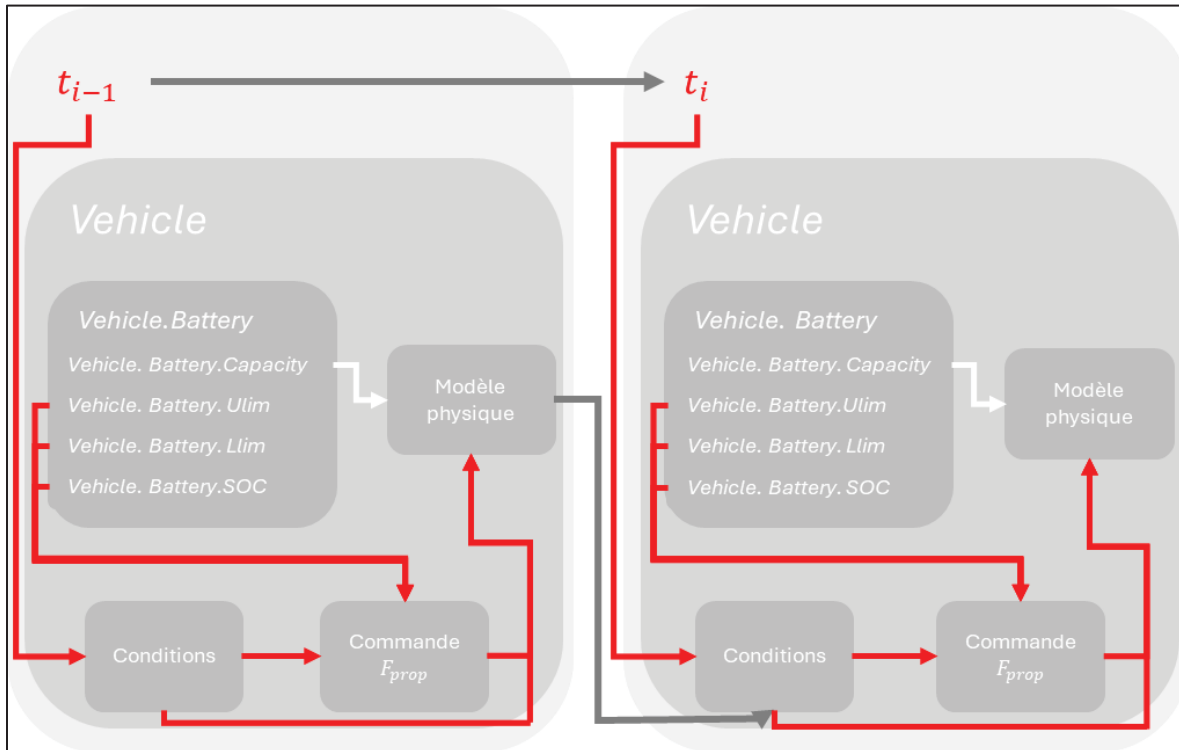


Figure 2.8 Interactions de la sous-classe *Battery* durant la simulation

La classe *SolarPanel* fait usage de la librairie PVlib afin de modéliser l'irradiation solaire dans le plan du panneau. Elle contient également la modélisation du panneau PV, avec comme paramètres : une superficie de panneau et un rendement énergétique. Plusieurs façons existent pour évaluer la ressource solaire en fonction du temps de l'année et de la position géographique. Il existe en effet plusieurs modèles pour estimer la radiation solaire incidente sur une surface horizontale au niveau du sol, tel que le modèle de Hottel ou celui de Liu et Jordan (Duffie & Beckman, 2013), mais ceux-ci prennent en compte un ciel dégagé. D'autres modèles existent qui prennent en compte l'ennuagement, mais ils doivent être basés sur des données expérimentales mesurées sur sites. Des modèles de ces types sont difficilement compatibles avec une production solaire mobile, puisqu'il faudrait soit ignorer l'ennuagement et ainsi surestimer potentiellement de beaucoup la ressource solaire, ou se limiter à des trajets

inscrits dans des zones où des modèles avec des coefficients empiriques expérimentaux fiables sont disponibles. Pour cette deuxième option, cela viendrait enlever toute forme de flexibilité quant aux itinéraires possibles pour simuler les performances du véhicule. C'est pourquoi l'utilisation des bases de données météorologiques à travers PVGIS est préférée à ces modèles pour déterminer les différentes composantes de l'irradiation solaire au niveau du sol. Les données d'irradiation solaire disponibles dans PVGIS sont de nature calculée par images satellites ou basée sur une réanalyse de données météorologiques et prennent en compte l'enneigement dans les deux cas. Pour l'Amérique du Nord, il s'agit du deuxième type de données, soit celles réanalysées (ERA5). Les composantes de l'irradiation solaire ne sont pas modélisées. Les données synthétiques de valeurs instantanées d'irradiation globale horizontale I_{gh} , diffuse horizontale I_{dh} et directe normale I_{dn} sont utilisées directement de PVGIS. Pour passer de ces trois composantes à l'irradiation dans le plan du panneau solaire (*Plane of Array Irradiance*, POA), des modèles de transposition doivent être utilisés (Duffie & Beckman, 2013). Plusieurs modèles existent (isotropique, Hay Davies, Perez), mais dans tous les cas :

$$I_{POA} = I_{T,direct} + I_{T,diffus\ ciel} + I_{T,diffus\ horizon} + I_{T,réfléchi\ sol} \quad (2.6)$$

Le modèle isotropique de la librairie PVlib est utilisé, c'est-à-dire que toute la radiation diffuse arrive au panneau de façon uniforme et combine celles provenant du ciel et de l'horizon en une seule. Pour la partie réfléchi du sol, une valeur par défaut d'albédo de 0,25 est spécifiée, ce qui correspond à la valeur par défaut de PVlib. Le POA dépend également de l'orientation du panneau PV dans l'espace et de la position relative du soleil. Le modèle actuel de panneau en est un fixe dans l'espace et parallèle au sol. Une condition logique est implémentée pour vérifier si le soleil est sous l'horizon et si tel est le cas, seul $I_{T,diffus}$ est pris en compte sinon I_{POA} est pris en compte. Si les trois composantes des données météorologiques sont à zéro, le calcul du modèle de transposition est également égal à zéro. Il s'agit en pratique que la nuit est tombée. Dans le cadre de cet outil, le POA s'exprime alors :

$$I_{POA} = f(direction, pente, ombrage, I_{gh}, I_{dh}, I_{dn}, position\ solaire) \quad (2.7)$$

Pour revenir à la modélisation du panneau PV, ce POA (attribut *SolarPanel.I*) est utilisé pour calculer la puissance solaire pouvant être envoyée à la batterie, $W_{solaire}$ (attribut *SolarPanel.solarpower*), en prenant compte des paramètres du panneau :

$$W_{solaire} = I_{poa} A_{col} \eta_{PV} \quad (2.8)$$

Voir la Figure 2.9 pour la schématisation.

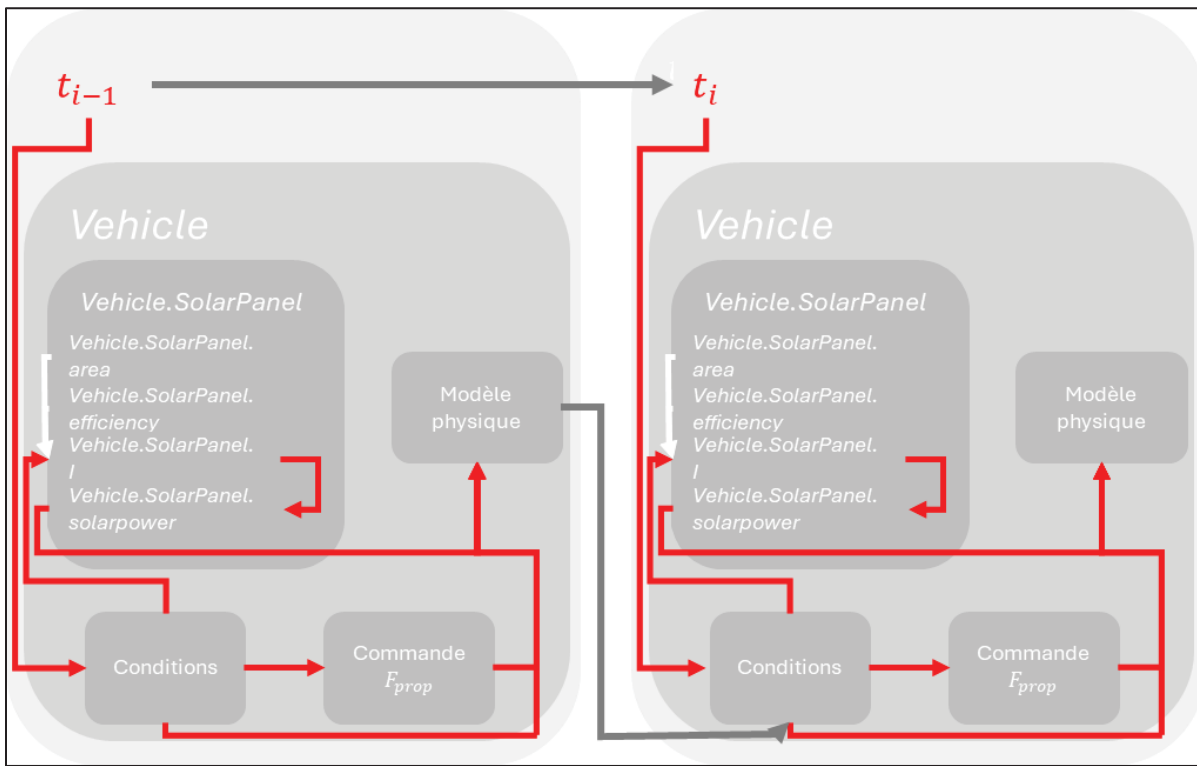


Figure 2.9 Interactions de la sous-classe *SolarPanel* durant la simulation

La classe *Chassis* contient des paramètres en lien avec l'enveloppe et la structure du véhicule. Seuls trois paramètres constituent complètement cette classe : la masse du châssis, un coefficient de résistance aérodynamique (CdA) et un coefficient de résistance au roulement (Crr). Ce paramètre de masse comprend toutes les masses de chacun des systèmes et toute masse de cargo, si présente. Il est plus simple d'avoir peu d'endroits où paramétrer la masse. Voir la Figure 2.10 pour la schématisation.

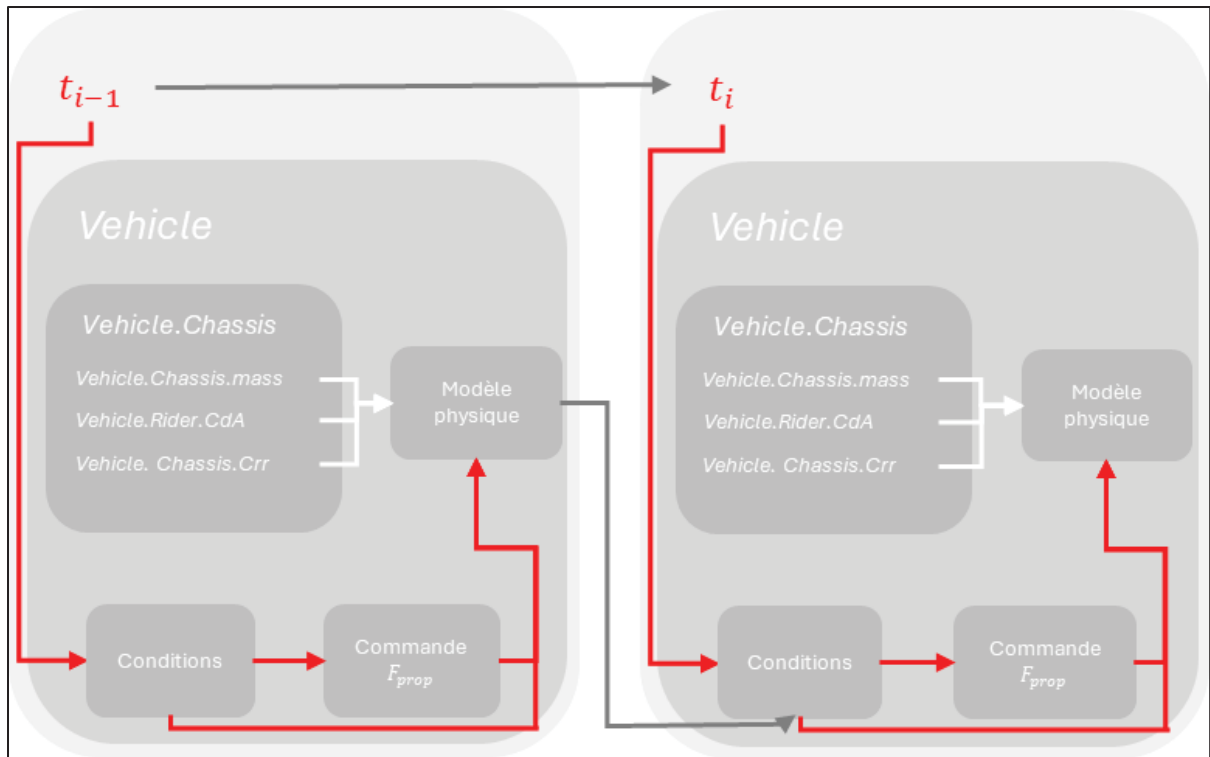


Figure 2.10 Interactions de la sous-classe *Chassis* durant la simulation

La classe *Motor* contient la modélisation du moteur électrique et des méthodes spécifiques de contrôle de la puissance W_{prop} pouvant être délivrée par le moteur en fonction de la vitesse de déplacement. Le modèle de moteur est simple et comprend deux paramètres : une puissance maximale W_{max} et un rendement fixe. Il n'y a pas de courbe de couple ou de rendement en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Voir la Figure 2.11 pour la schématisation. Cette fonction de contrôle sera décrite dans la section 2.2.3.

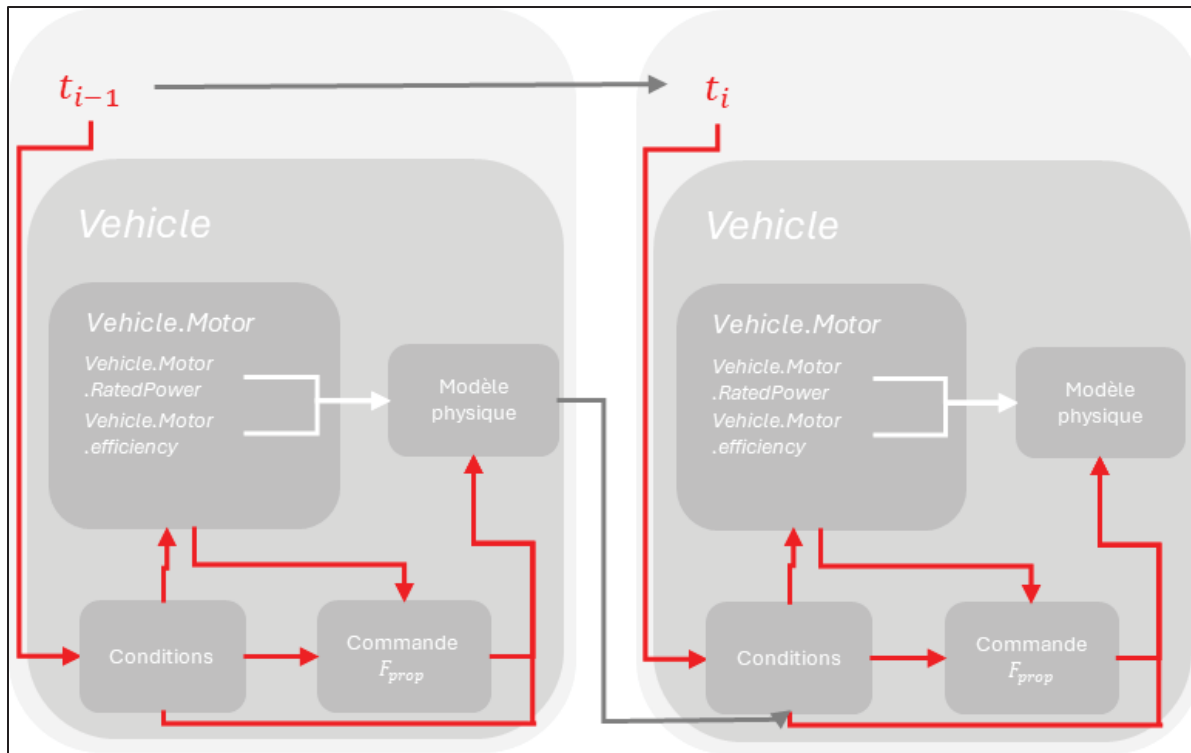


Figure 2.11 Interactions de la sous-classe *Motor* durant la simulation

2.2.3 Configurer et simuler un véhicule : la classe *Vehicle* et les fonctions de simulation

Les différentes classes composant le véhicule ont toutes un rôle unique lors d'une simulation. Ces rôles ont été mis en évidence dans la dernière section en omettant les interrelations entre les classes afin d'aérer le contenu des schémas et d'offrir une compréhension conceptuelle de leurs rôles individuels. Ces interrelations entre les classes sont en quelque sorte cachées dans le bloc intitulé *Conditions* qui peut regrouper autant les états physiques du véhicule (position et vitesse) que les états des sous-systèmes (batterie : SOC, PV : POA, moteur : W_{prop}) que les conditions instantanées de l'environnement dans lequel le véhicule se déplace (pente, direction, latitude/longitude, température, direction et vitesse du vent). Ces interrelations sont cependant importantes pour obtenir le contrôle de la simulation et créer une certaine logique d'exécution. L'architecture présentée avec un objet parent contenant des objets enfants permet d'attribuer à une variable unique toute une structure de variables. Cette façon de procéder simplifie

grandement la programmation et l'utilisation de cet outil, puisque toutes les variables sont contenues dans une seule variable, un seul objet de programmation. C'est un autre des aspects originaux et pertinents de ce mémoire.

C'est exactement le rôle de la classe *Vehicle*, regrouper toutes les variables en un seul ensemble qui est plus facilement manipulable. Cette classe ne contient explicitement aucun paramètre, puisque tous les paramètres sont attribués au niveau des sous-systèmes (sous-classes). Elle contient cependant plusieurs méthodes spécifiques permettant de résoudre l'équation du mouvement du véhicule, l'équation (2.3). Certaines méthodes sont écrites pour faire le calcul des forces de résistance (de roulement, aérodynamique et de la gravité). Elles utilisent les conditions instantanées, telles que décrites au paragraphe précédent, pour calculer toutes les forces externes agissant sur le véhicule. Une méthode est dédiée à déterminer quelle force de propulsion sera développée par le moteur durant un pas de temps. Elle utilise les mêmes conditions instantanées et combine les fonctions de contrôle de la batterie et du moteur afin de déterminer la valeur de cette force. Les fonctions de contrôle permettent de déterminer un facteur de puissance entre -1 et 1 qui sera appliqué au moteur. Une valeur positive indique que le moteur est en traction et, inversement, en freinage régénératif. Lorsque le moteur est en traction, la fonction de contrôle de la batterie prime sur celle du moteur. C'est-à-dire que le véhicule ne peut pas excéder la fonction de contrôle de la batterie, même si la fonction de contrôle du moteur est plus grande, mais la respecte lorsqu'elle est inférieure à celle de la batterie. Une condition spéciale est implémentée : lorsque la fonction de contrôle de la batterie est égale à 1, la fonction de contrôle du moteur est ignorée. Cela est fait dans l'idée d'éviter le plus possible que le système soit incapable de recevoir de l'énergie parce que la batterie est pleine. Il est pertinent de rappeler que la fonction de contrôle de la batterie est fonction du SOC et que celle du moteur est fonction de la vitesse de déplacement. Ces fonctions sont implémentées dans le code, mais l'intention est d'avoir la possibilité de les modifier afin de tester différentes stratégies de traction.

La méthode spécifique la plus importante de la classe *Vehicle* fait la résolution de l'équation (2.3) en utilisant les conditions instantanées, les forces de résistances et la force de propulsion

afin de calculer la vitesse, l'accélération et la puissance entrante ou sortante de la batterie durant le pas de temps de simulation. Cette méthode, intitulée *dynamics*, interagit avec toutes les sous-classes, afin de vérifier toutes les conditions logiques et d'aller chercher toutes les informations météorologiques nécessaires aux calculs. Une explication de cette fonction sous forme d'étapes est énumérée ci-dessous :

1. Établir les conditions initiales en termes de position, vitesse et énergie $(x, \dot{x}, E)$. Établir quelle est la date et l'heure locale/UTC.
2. Vérifier si le parcours est complété. Sortir de la simulation si tel est le cas, ou compter les tours s'il s'agit d'une boucle.
3. Vérifier si le véhicule est dans un carré de grille différent du pas de temps précédent, mettre à jour les tableaux de données à utiliser si nécessaire.
4. Avec l'heure locale/UTC et les données météorologiques, établir quelle est l'énergie capturée par le panneau PV.
5. Vérifier si le véhicule est censé être en déplacement selon son horaire de conduite. Si oui, établir la vitesse relative du vent afin d'évaluer la puissance et la force nette de propulsion. Sinon, le véhicule est à l'arrêt et la vitesse, la puissance et la force de propulsion sont toutes annulées.
6. Effectuer le calcul de l'accélération résultante de cette force de propulsion nette. Faire le bilan énergétique entre la puissance entrante et sortante de la batterie afin d'obtenir la puissance résultante vue par celle-ci.
7. Vérifier si la puissance résultante ferait sortir le SOC de sa plage de 0 à 1. Ajuster la puissance en conséquence pour ce pas de temps.
8. Renvoyer les variables de position, vitesse et énergie (x, v, E) qui seront utilisées comme conditions initiales pour le prochain pas de temps.

Finalement, une fonction de simulation à pas de temps fixe est implémentée dans le cadre de ce projet de recherche. Cette fonction fait simplement appel à la méthode *dynamics* d'un objet de classe *Vehicle* afin de récupérer les variables de sortie et les multiplier par un temps d'intégration. Cette fonction crée un fichier de résultats et l'écrit ligne par ligne avec tous les

attributs pertinents de l'objet de classe *Vehicle* durant chaque pas de temps. Il est ensuite possible d'aller consulter ou de faire un post traitement des fichiers résultats pour générer des graphiques ou valider le comportement de différents aspects de la simulation. Une liste des variables présente pour chaque pas de temps de simulation se trouve en ANNEXE II.

Il serait très pertinent d'implémenter une simulation à pas de temps variable afin d'optimiser la quantité de calculs à exécuter, à l'aide de méthodes de Runge-Kutta, par exemple. Plusieurs améliorations sont par ailleurs possibles au niveau de la modélisation du moteur et de la batterie, qui sont extrêmement simplifiés. Une implémentation de contrôleur au niveau du moteur serait pertinente pour essayer de suivre la commande de traction plutôt que de l'imposer. Un moteur n'ayant pas toujours la capacité de couple à différents régimes, notamment au démarrage, pour respecter une commande en puissance.

2.3 Configuration d'un véhicule électrique solaire : une bicyclette à assistance électrique solaire

Le cas à l'étude dans le cadre de ce mémoire est celui d'un VAE solaire dans un contexte de cyclotourisme. Cette dernière section du chapitre est dédiée à décrire comment les différents paramètres présentés dans les deux dernières sections sont définis pour correspondre à ce cas. Le véhicule présenté ici est un point de départ et pas nécessairement le cas idéal de VAE solaire. Il permet tout de même de valider le comportement général du véhicule et des sous-systèmes. Pour la suite de ce mémoire, un cycliste de 70 kg, une bicyclette de 10 kg et 30 kg d'équipements seront tout le temps pris en compte. Son horaire de conduite sera composé de deux périodes de quatre heures séparées d'une pause d'une heure, durant lesquelles il contribue à la traction du véhicule à la hauteur d'un effort constant de 100 W. Pour ce premier véhicule fictif, une pénalité aérodynamique, assumant une remorque, est comprise. Un système d'assistance est également compris, sans ajout de masse. Cela serait équivalent à avoir beaucoup moins de bagages que 30 kg. Ici, un premier objectif est uniquement de valider le comportement du système d'assistance. L'ajout de masse par le système d'assistance sera pris en compte dans les prochains chapitres. Le système est composé d'une batterie parfaite de 500 Wh, d'un panneau PV de 1 m² et capable d'offrir une puissance d'assistance de 250 W. Les paramètres de simulation sont résumés au Tableau 2.1. Plusieurs de ces paramètres seront étudiés au chapitre CHAPITRE 3.

Les fonctions de contrôle expliquées précédemment doivent également être configurées. La fonction de contrôle au niveau de la batterie est simplement linéaire, faute de savoir quelle stratégie serait la plus performante. Elle est construite avec une limite inférieure à 0 et supérieure à 1, ainsi qu'un point de rupture de SOC pour chacune de ces limites, 0.05 et 0.95 (Figure 2.12). Il est supposé qu'une portion de la capacité de la batterie est inaccessible pour la propulsion.

Tableau 2.1 Configuration d'un objet de classe *Vehicle* modélisant un VAE solaire

*Calcul du coefficient de résistance aérodynamique en ANNEXE III, une remorque est considérée

**Coefficient de résistance dans la plage possible selon Wilson & Schmidt (2020) et correspondant à un pneu légèrement plus roulant qu'un pneu de montagne (Zorn, 2008)

Rider	Mass	Power	Shifts	
	70 kg	100 W	8h-12h/13h-17h	
Battery	Capacity	Efficiency		
	500 Wh	1		
SolarPanel	Surface area	Efficiency		
	1 m ²	0.2		
Chassis	Mass	Cargo mass	CdA*	Crr**
	10 kg	30 kg	0.600	0.004
Motor	Rated power	Efficiency		
	250 W	1		

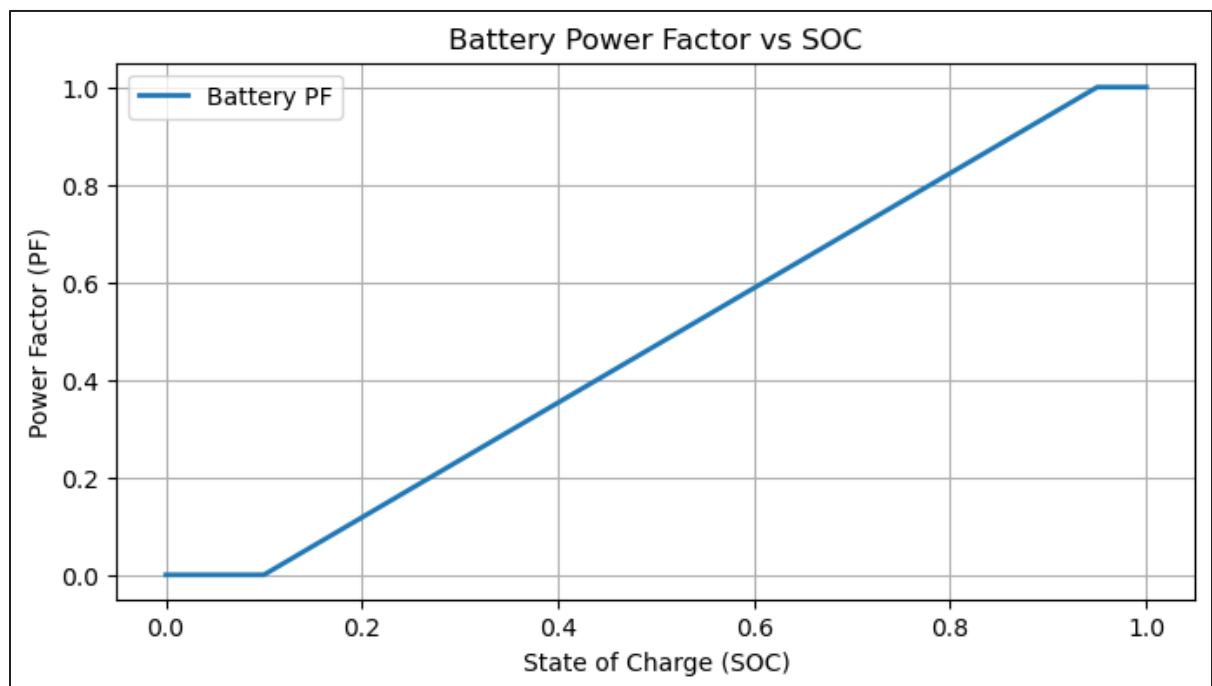


Figure 2.12 Fonction de contrôle de la batterie, fonction du SOC

La fonction de contrôle au niveau du moteur est une fonction polynomiale d'ordre 2 avec une dérivée négative jusqu'à zéro, puis une dérivée positive jusqu'à -1. Un *power factor* négatif indique une recharge régénérative de la batterie. La partie en freinage régénérative, la partie négative, est continue et miroir avec celle en traction. Elle atteint un plateau à -1 pour des vitesses supérieures à 25 m/s (Figure 2.13). Le graphique indique qu'au-delà de 12 m/s, plus de 40 km/h, donc lors de descentes, le frein régénératif est activé. L'hypothèse est faite que cette stratégie est performante, puisqu'elle permet de minimiser la perte d'énergie due à la résistance aérodynamique, qui est également de second ordre, et d'utiliser l'énergie stockée lorsque la vitesse de déplacement est plus faible et qu'elle aura un plus grand impact sur le gain en vitesse.

Des validations initiales ont été faites afin de valider la modélisation physique du couple cycliste-vélo seul. Ces validations ont pris la forme de simulations sur des parcours fictifs de différentes pentes et sans vent. Elles ont donné des résultats extrêmement similaires à des outils web tel que le simulateur de Zorn (2008) (résultat à l'intérieur de 1 % de différence pour différentes puissances et pentes).

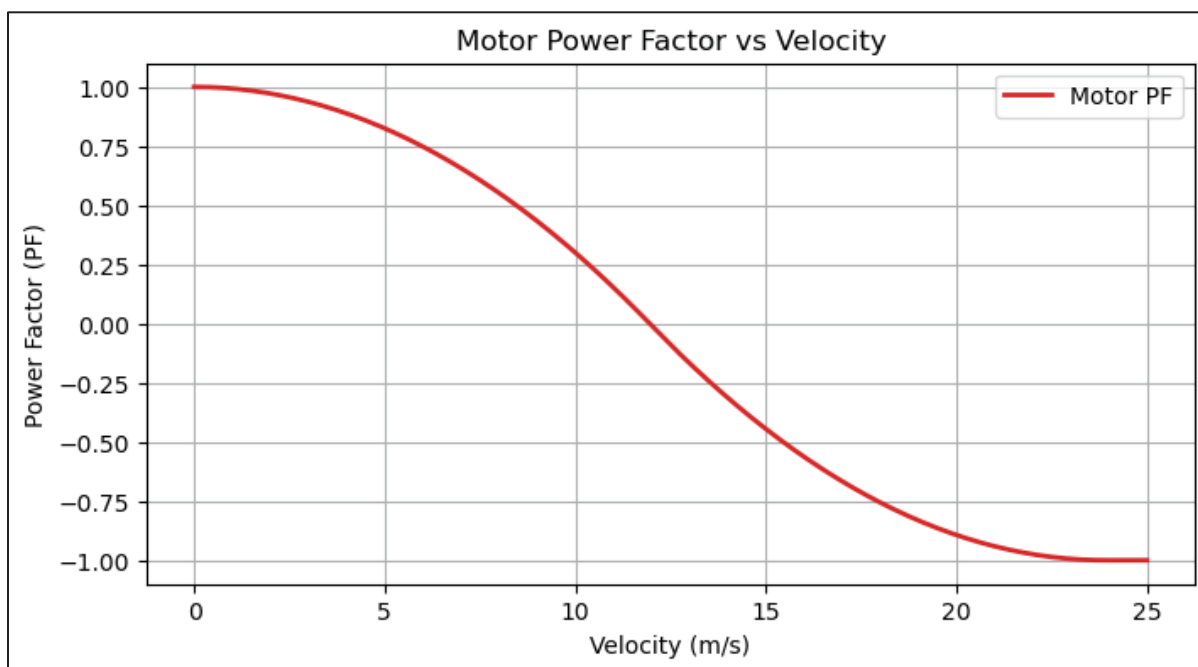


Figure 2.13 Fonction de contrôle du moteur, fonction de la vitesse de déplacement

Pour des fins de validation du système d'assistance électrique, une simulation sur un parcours de pente nulle, à une localisation fixe, est faite avec des données météorologiques correspondant à la position du circuit Gilles Villeneuve (CGV) (latitude: 45.513..., longitude: -73.527...). La simulation est exécutée de 5h00 à 20h00 le 15 juin. La grande majorité des heures d'ensoleillement de cette journée spécifique est alors prise en compte, et l'horaire d'utilisation du véhicule (8h-12h, 13h-17h, courbe orange) est facilement visible. La Figure 2.14 présente graphiquement la position, la vitesse, le SOC et la puissance d'assistance électrique en fonction du temps de simulation issue des résultats de cette simulation. On y distingue des comportements clés qui valident le bon fonctionnement des sous-systèmes :

- Le véhicule est à l'arrêt en dehors des heures de conduite et la batterie se recharge adéquatement. On remarque que la vitesse est nulle et que la position reste constante avant 8h00, entre 12h00 et 13h00 et après 17h00. On remarque également que le SOC augmente durant ces mêmes périodes d'arrêts.
- Plus le SOC augmente, plus l'assistance électrique et la vitesse augmentent (entre 8h00 et 12h00) jusqu'au point où la fonction de contrôle du moteur remplace celle de la batterie (entre 13h00 et 17h00).
- La batterie se recharge plus rapidement à la pause en milieu de journée que le matin et le soir. Cela est cohérent avec les données météorologiques de cette journée à ces coordonnées GPS et au caractère général d'un panneau PV sous une irradiation solaire typique.
- La vitesse atteint un certain plateau, mais varie légèrement, puisque le vent change légèrement d'orientation et de vitesse durant cette journée.

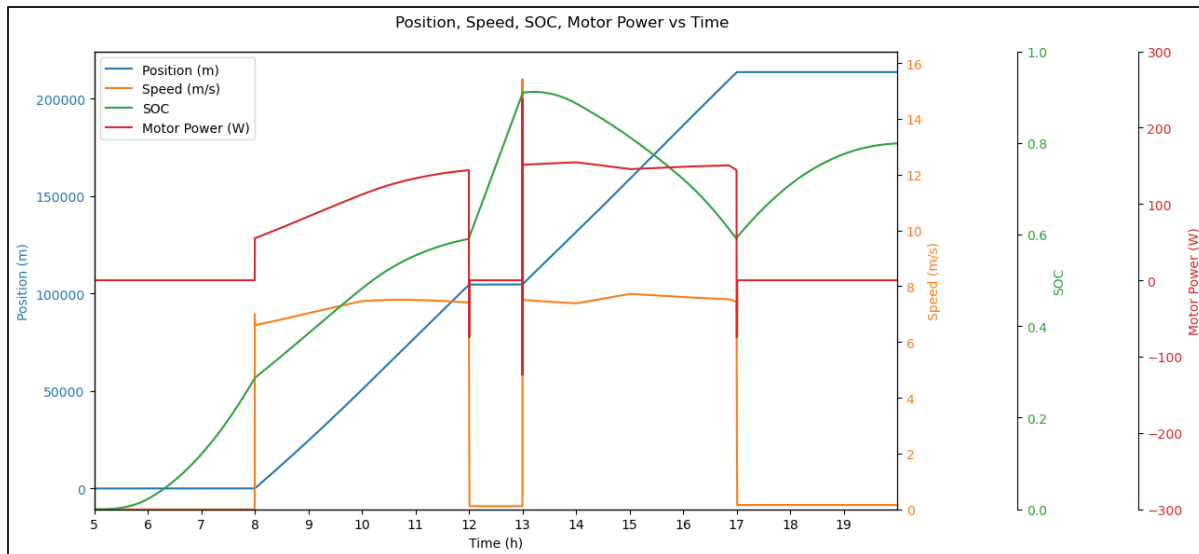


Figure 2.14 Résultats de simulation, VAE solaire initial, $t=15h$, 15-06, pente 0 deg

On peut également observer que la simulation permet des sauts abrupts lors du changement de condition de marche et d'arrêt. Cela est dû au fait que les calculs sont faits avec des conditions constantes durant le temps d'intégration ce qui induit ce genre de sauts. Le but du présent projet n'en est pas un d'asservissement et/ou de contrôle. Ces quelques moments ont peu d'impact sur la distance finale parcourue au bout d'une simulation. Il est donc jugé acceptable d'utiliser les résultats malgré ces sauts. On peut également observer que le système permet du freinage régénératif lorsque le véhicule s'arrête (puissance négative à 12h00 et 17h00) ou lorsqu'il dépasse une vitesse de coupure (puissance négative à 13h00 qui coïncide avec une pointe de vitesse élevée). Afin de mieux valider cet aspect, une seconde simulation de validation est nécessaire : un VAE sans panneaux PV dans une pente descendante constante. On peut voir les résultats de cette seconde simulation à la Figure 2.15.

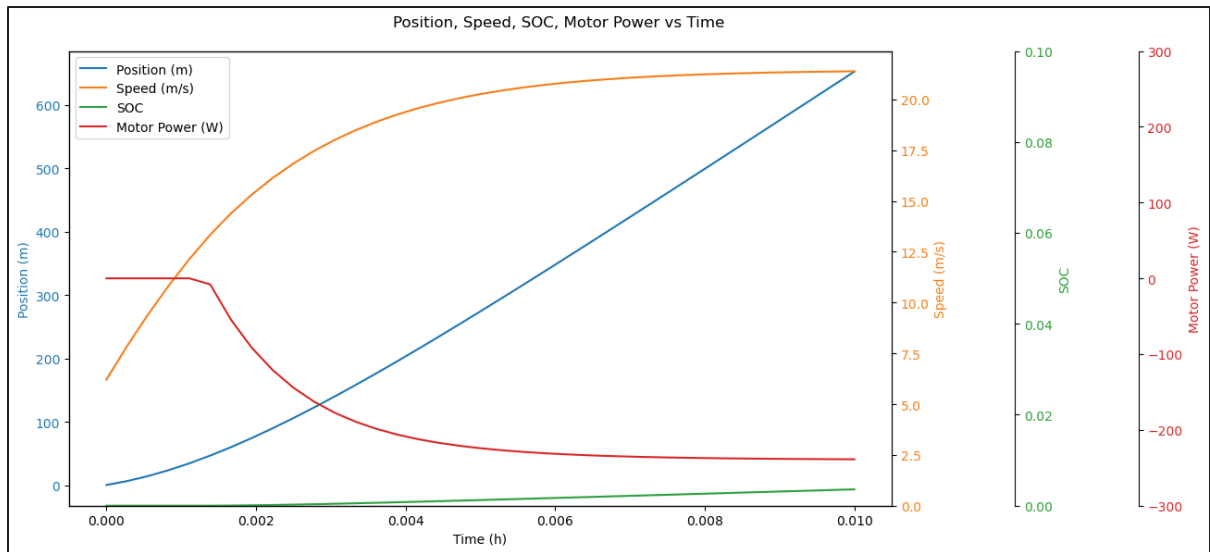


Figure 2.15 Résultats de simulation, VAE solaire initial, $t=0.1h$, 15-06, pente -10 deg

Comme attendu, on observe que le moteur passe de plus en plus en freinage régénératif lorsque la vitesse dépasse un certain seuil et que l'énergie est récupérée par la batterie. Le véhicule arrive à un point d'équilibre en termes de vitesse avec le freinage du moteur et les forces de résistance (aérodynamique et de roulement).

L'outil de simulation développé et présenté tout au long du CHAPITRE 2 est au cœur de la méthodologie employée dans le cadre de ce mémoire. Comme n'importe quelle simulation, celle-ci comprend des hypothèses de modélisation ainsi que des erreurs numériques qui la rendent inexacte. De tels outils peuvent pour autant être utiles dans une optique de design afin de prendre des décisions et des orientations de conception de manière plus informée avant d'engager d'importantes dépenses en ressources matérielles et en temps. Ce chapitre était absolument nécessaire afin de fournir les bases pour le suivant et pour permettre à quiconque désirant utiliser cet outil de mieux s'y retrouver.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE PERFORMANCE D'UN VAE SOLAIRE DANS UN CONTEXTE DE CYCLOTOURISME À L'AIDE DE SIMULATIONS

Le présent chapitre a comme objectif de présenter la suite de la méthodologie employée dans le cadre de ce projet de recherche. L'outil de simulation développé au chapitre précédent est au cœur de cette méthodologie, mais une simulation seule ne garantit pas des résultats pertinents. La façon dont elle est utilisée est déterminante de la qualité et de la pertinence des résultats. Le cas d'utilisation à l'étude est celui d'un long parcours de cyclotourisme en autonomie de plusieurs jours, voire semaines, où l'objectif en est un de plaisance, le déplacement en soi étant central à l'activité récréative. L'approche utilisée pour arriver à une évaluation pertinente de la performance du système proposé est la suivante :

1. Un ou des critères de performance doivent être identifiés afin de correspondre au cas d'utilisation adéquatement. Les durées, les moments dans l'année et les parcours doivent être déterminés afin d'y correspondre.
2. Déterminer le pas de temps adéquat pour représenter la physique le mieux possible tout en limitant la quantité de calculs numériques à faire.
3. Évaluer la sensibilité de la performance vis-à-vis des paramètres principaux du VAE solaire.
4. Établir un ou des cas de référence pour comparer la performance du VAE solaire à une ou des configurations de cyclotourisme existantes.

Chaque étape sera présentée en détail dans une sous-section dédiée du présent chapitre. Les résultats de cette méthodologie seront utilisés pour faire une conception préliminaire d'un VAE solaire, c'est-à-dire d'élaborer des objectifs réalistes en termes des principaux paramètres afin d'obtenir un gain en performance suffisant pour justifier l'utilisation d'un tel système. Dans une optique de conception, cette liste d'objectif se retrouve dans un cahier des charges. Cela sera couvert au CHAPITRE 4.

3.1 Détermination de parcours, de durées de simulations et de critères de performance pertinents

Une première étape cruciale s'impose pour faire une simulation de véhicule pertinente. Il faut bien définir des conditions de simulation qui représentent adéquatement le cas d'utilisation voulu. Le cas d'utilisation est particulièrement difficile à cerner, puisqu'il existe une infinité de parcours et de moments existants pour un voyage de cyclotourisme de longue durée. Il est préférable d'essayer d'éviter d'optimiser le système pour un parcours et une période trop spécifique, ce qui pourrait risquer de concevoir une solution qui excelle dans une situation et de mal performer dans une autre.

Deux parcours-types, l'un plat et l'autre comportant des côtes, sont choisis afin de tester l'outil de simulation proposé. Ce sont des boucles de courte distance publiquement accessibles à vélo¹. Le parcours plat correspond à la partie accessible toute la saison estivale (sauf durant le grand prix de formule 1) du circuit Gilles Villeneuve, ci-après désigné CGV. Le parcours comportant des côtes correspond à une version plus pratique du parcours du grand prix cycliste de Montréal passant notamment par la voie Camilien-Houde et le campus de l'Université de Montréal, ci-après désigné Pro Tour. Les parcours ont été reconstruits dans Google Earth (Figure 3.1). Les données d'élévations sont extraites à l'aide de *GPS Visualizer* (Schneider, 2003). Les données d'élévation extraites de cette façon ont une moins bonne résolution que celles de Google. Elles sont tout de même utilisées afin d'éviter d'avoir à utiliser un service payant. Les profils sont comparés à la Figure 3.2 et à la Figure 3.3.

Les dénivelés positifs cumulatifs pour le CGV et le Pro Tour (Figure 19) sont respectivement d'environ 12 [m] sur 4.11 [km] ($3 \left[\frac{m}{km}\right]$) et 215 [m] sur 9.56 [km] ($22 \left[\frac{m}{km}\right]$). Ces parcours vont permettre d'évaluer la performance sur deux types de parcours et d'estimer (d'interpoler

¹ Je me permets ici de brièvement rompre avec le style d'écriture de ce mémoire afin d'expliquer la raison derrière le choix de ces parcours. Habitant la ville de Montréal, je connais intimement les deux parcours choisis dans ce mémoire et il m'est possible de les parcourir moi-même afin d'en récupérer les traces GPS pour les reconstruire dans la simulation et éventuellement aller les valider en essais physiques. Les deux parcours sélectionnés se situent à Montréal et sont couramment utilisés par toute la communauté cycliste de route de la ville.

en quelque sorte) la performance sur des trajets se trouvant quelque part entre ces deux scénarios.



Figure 3.1 Parcours Google Earth, CGV et Pro Tour

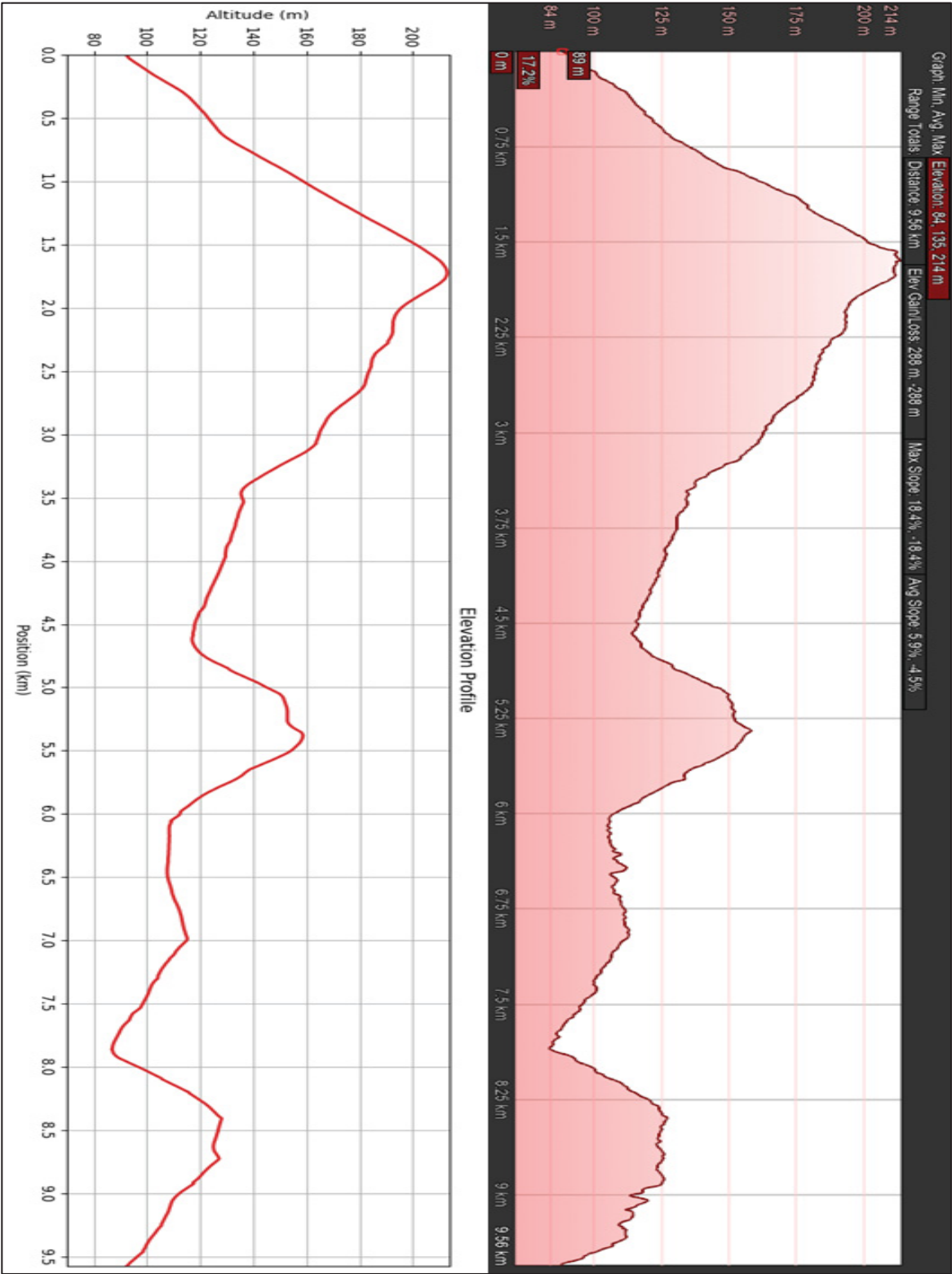


Figure 3.2 Comparaison de profils d'élévation entre Google Earth et GPS *Visualizer*, les deux profils correspondent au Pro Tour

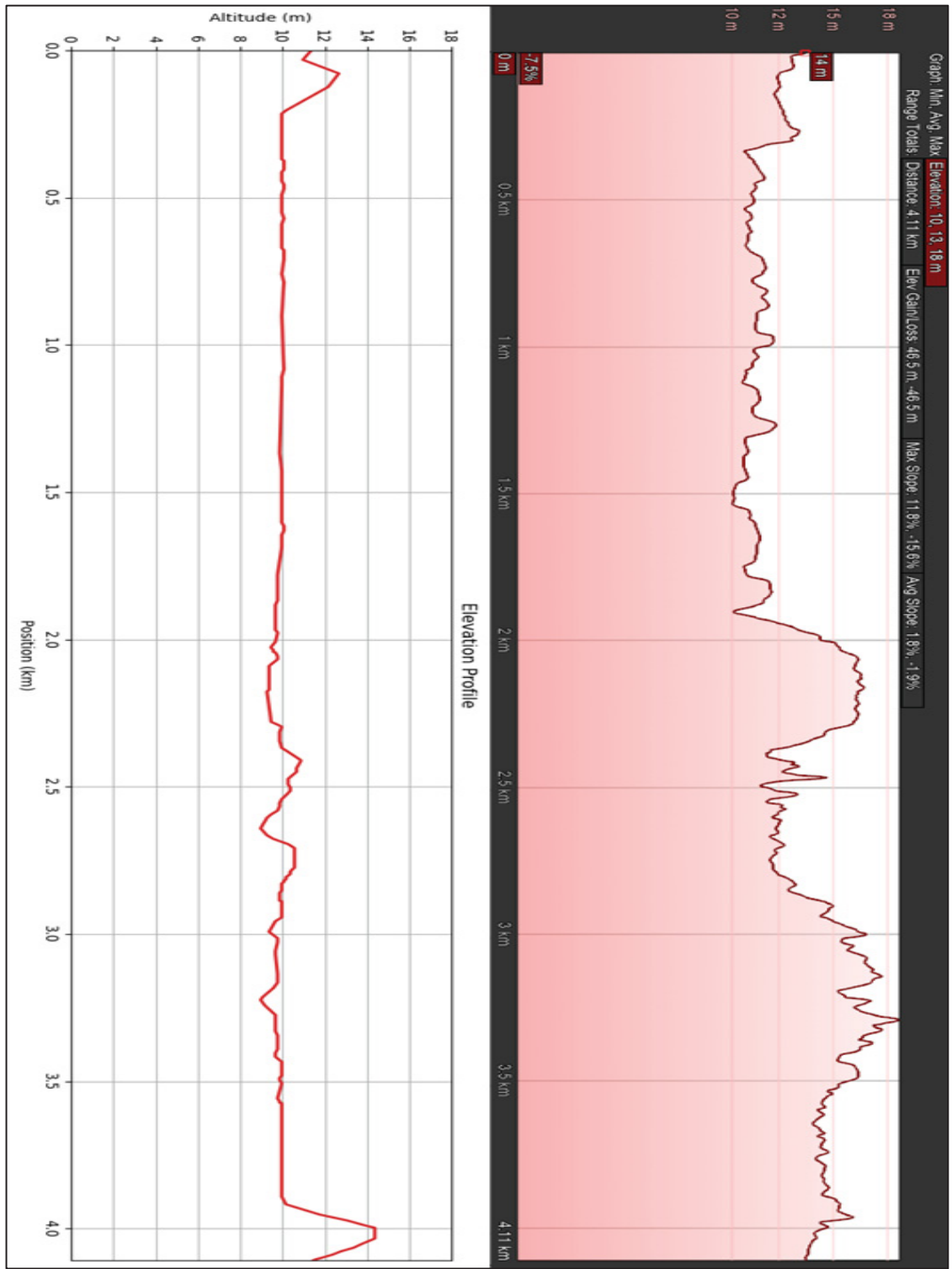


Figure 3.3 Comparaison de profils d'élévation entre Google Earth et *GPS Visualizer*, les deux profils correspondent au CGV

Il est également nécessaire de simuler la performance sur une durée suffisamment longue pour faire ressortir l'aspect général de celle-ci. Une durée suffisamment longue permet d'évaluer le système sur un mix réaliste de conditions. Il est alors préférable de choisir des journées différentes durant la simulation, afin de représenter un mix de conditions météorologiques. Il est également important d'éviter d'évaluer une « coïncidence » avec la météo plutôt que la performance du système. Le concept problématique de la « coïncidence » évoqué ici, est qu'il serait possible pendant la simulation de suivre un nuage ou une éclaircie sur un trajet principalement dans une direction. Les parcours-types choisis étant des boucles, cet aspect de coïncidence est mitigé, puisque le véhicule reste essentiellement dans les mêmes deux ou trois carrés de grille de TMY.

Avec l'utilisation de données météorologiques, il est impossible d'éliminer l'impact du moment de l'année sur la performance. Cela est jugé acceptable, voire souhaitable, afin de pouvoir évaluer la performance sur les mêmes parcours au printemps, à l'été et à l'automne. Il est d'abord logique de déterminer si un système d'assistance électrique solaire peut faire une différence significative dans un cas d'utilisation favorable i.e avec une irradiation abondante. Dans le cas où il serait difficile de conclure que le système a un impact bénéfique, il ne serait pas nécessaire d'étudier des cas d'utilisation moins favorables et plus marginaux. Dans ce contexte, la durée de simulation est fixée à 15 jours, du 15 au 30 juin au moment de l'année où le système devrait théoriquement être le plus intéressant dans l'hémisphère nord, puisque la durée d'ensoleillement est maximale et les précipitations moindres, et donc l'ennuagelement moins fréquent. Des périodes de mêmes durées en avril/mai et en septembre/octobre pourraient éventuellement être simulées. Dans un contexte comme celui du Québec, il n'est pas nécessaire d'évaluer la performance en hiver, alors que le réseau cyclable n'est pas praticable pour le cyclotourisme.

La Figure 3.4 permet d'observer l'aspect des profils de variation de la puissance générée par le panneau solaire (irradiation solaire fois 20 %). Pour le moment d'utilisation favorable de la mi-juin, on ne peut voir qu'une seule journée très ennuagée (jour 6). Certaines journées ont un profil bien plus clair (jours 1, 2, 3 et 11), ce qui indique que les données météorologiques de

tous les carrés de grilles du parcours sont similaires. Il s'agit alors des journées avec un ciel le plus dégagé possible. Les autres journées sont des journées où les données météorologiques varient d'un carré de grille à un autre. Il s'agit alors de journées avec un ciel partiellement ennuagé, mais avec des valeurs maximales d'irradiation tout aussi importantes que lors de journées pour lesquelles le ciel est bien dégagé.

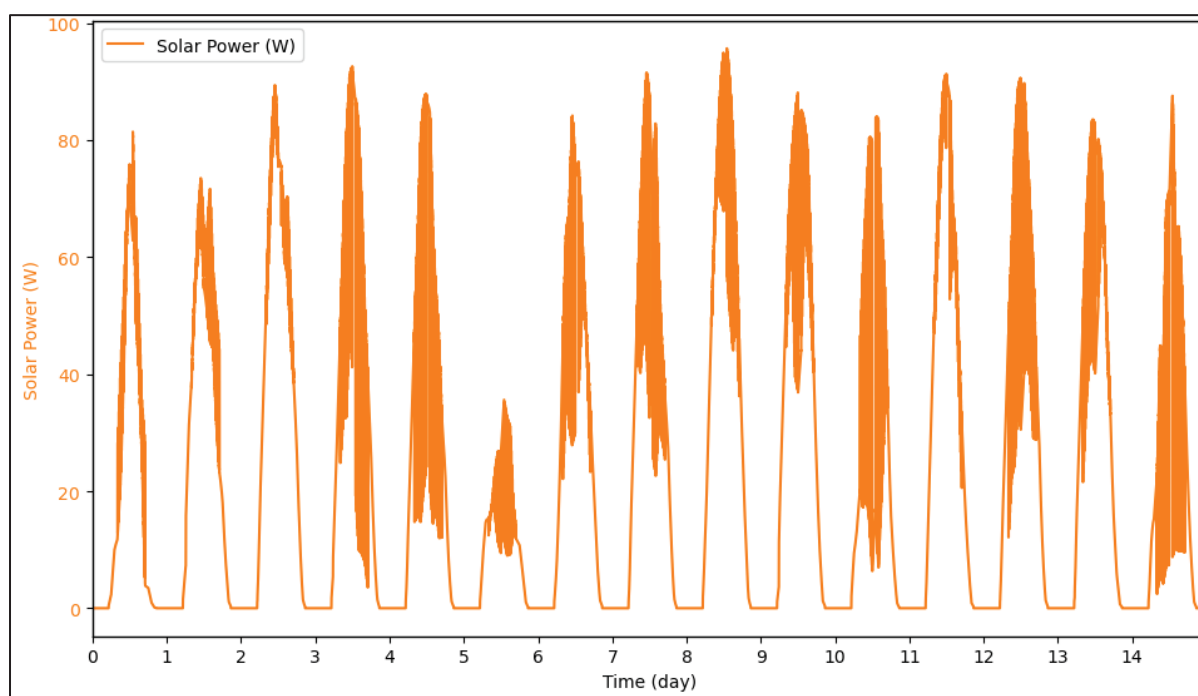


Figure 3.4 Puissance entrante dans le système pour une simulation de 15 jours débutant le 15 juin (moment d'utilisation favorable), parcours : CGV, surface de PV : 0.5 m^2

La performance fut mentionnée à plusieurs reprises jusqu'à maintenant, mais elle n'a toujours pas été explicitement définie. Dans le cadre de ce projet de recherche, l'accent est mis sur la distance finale qu'il est possible d'atteindre avec un système d'assistance électrique solaire. Dans un contexte de cyclotourisme, puisque le déplacement fait partie intégrale de l'expérience voulue, il est logique de mesurer la performance selon la distance parcourue. Cependant, la distance seule ne permet pas de comparer adéquatement deux voyages de durées différentes. Le critère de performance le plus pertinent est donc de normaliser la distance par le temps total

de déplacement, c'est-à-dire d'évaluer la vitesse de déplacement moyenne lors du voyage ou du parcours simulé.

3.2 Étude de convergence sur le pas de temps d'intégration

Afin de renforcer la confiance envers les résultats de simulation qui seront obtenus, il est nécessaire de vérifier que la résolution de l'équation (2.3) donne des résultats qui sont cohérents avec la réalité et le profil d'altitude des parcours. Pour chacun des parcours-types, la même simulation de 24h, le 15 juin, est faite en réduisant le pas de temps jusqu'à ce que la distance finale se stabilise. Un pas de temps de 15 secondes est utilisé comme point de départ. Le Tableau 3.1 montre la convergence de la distance finale sur le pas de temps pour les deux parcours-types à l'étude.

Tableau 3.1 Étude de convergence de la distance sur le pas de temps d'intégration, parcours: CGV et Pro Tour

Pas de temps (s)	CGV			Pro Tour		
	Distance finale (km)	Différence avec solution à 0.1s	Différence avec solution précédente	Distance finale (km)	Différence avec solution à 0.1s	Différence avec solution précédente
15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5	195.796	2.15%	N/A	N/A	N/A	N/A
3	194.449	1.45%	-0.69%	142.163	5.72%	N/A
2	193.932	1.18%	-0.27%	133.298	-0.87%	-6.24%
1	192.414	0.39%	-0.78%	134.372	-0.08%	0.81%
0.1	191.667	0.00%	-0.39%	134.474	0.00%	0.08%

Il est important de noter que la simulation est instable pour un pas de temps de 10 secondes et plus sur le parcours CGV et 5 secondes et plus pour le parcours Pro Tour. Les conditions de démarrage ne limitant pas l'accélération ou la force maximale de traction pouvant être développée, la simulation permet momentanément des forces et donc des accélérations très importantes. La vitesse de déplacement calculée au prochain pas de temps est alors

physiquement trop importante lorsque le pas de temps est trop grand. La force de résistance aérodynamique est alors encore plus importante (puisque au carré de la vitesse) et fait en sorte que la vitesse devient négative au pas de temps suivant. Le bilan des forces étant fortement négatif (voulant ralentir le véhicule), une accélération négative couplée à un long pas de temps permet ce comportement. Lorsqu'une vitesse négative est détectée, la simulation est aussitôt interrompue afin d'éviter de gaspiller des ressources informatiques. La physique du mouvement du véhicule est très susceptible d'être instable si le pas de temps augmente au-delà d'un certain seuil, beaucoup plus que lors de simulations énergétiques solaires en bâtiment, qui sont typiquement faites avec un pas de temps d'une heure. Plusieurs améliorations sont envisageables au niveau de la programmation afin de mitiger cette sensibilité, notamment un pas de temps variable ou adaptatif.

En faisant l'hypothèse que la solution avec un pas de temps de 0,1 seconde est la solution considérée exacte (une réduction d'un ordre de grandeur supplémentaire ne permettrait pas d'améliorer la prédiction de plus 100m), deux variations sont observées : l'écart avec la solution jugée exacte et celle avec la solution précédente. Cette seconde variation est typiquement ce qui est utilisé pour déterminer ou non la convergence. Cependant, cette variation seule n'est pas satisfaisante dans un des cas. En effet, on voit que la convergence n'arrive pas au même pas de temps pour les deux parcours ni de la même façon. Pour un parcours plutôt plat, la distance semble être surestimée et lentement tendre vers une valeur alors que la variation d'une solution à l'autre est pratiquement la même et sous le seuil du 1 %, ce qui devrait être amplement suffisant dans ce cas. Pour un parcours de côtes, la distance oscille autour, puis tend rapidement vers une valeur. Le pas de temps est jugé suffisamment petit lorsque les deux critères sont simultanément sous le seuil du 2 %. Selon ces critères, un pas de temps de 3 secondes pour CGV et de 1 seconde pour le Pro Tour seraient suffisants.

Quelques considérations supplémentaires sont à prendre en compte. Le fait que cette étude de convergence est faite avec un VAE solaire pouvant fournir une assistance jusqu'à 250 W et qu'il est souhaitable de tester des puissances plus élevées qui peuvent mener à des accélérations plus importantes, il est prudent de se laisser une certaine marge de manœuvre pour

accommoder ces plus grandes accélérations. Un pas de temps plus court que nécessaire permet d'assurer une stabilité pour de futures simulations. Pour des fins pratiques d'exécution de simulation en série (*batch runs*), il est plus simple de choisir un pas de temps conservateur pour tous les parcours et tous les VAE solaires envisagés. Pour toutes ces raisons, le pas de temps est fixé à 1 seconde. Cet exercice de convergence n'est pas parfait, mais tout de même utile afin d'utiliser un pas de temps qui évite des instabilités et permet l'obtention d'une solution raisonnablement proche de la solution la plus exacte possible.

Un des critères importants pour la convergence vers une distance finale est le fait de ne pas passer par-dessus le relief du parcours sans en prendre compte. Lorsque le pas de temps est grand, la vitesse reste la même sur une plus longue distance, sans s'ajuster pour la pente qui change. Imaginons un véhicule au pied d'une importante pente avec une vitesse élevée. En réalité, le véhicule devrait décélérer aussitôt qu'il commence à monter, cependant, avec un long pas de temps, il garde sa vitesse malgré la pente jusqu'à la fin de celui-ci. Poussé à l'extrême, cela peut faire en sorte de complètement omettre des changements de dénivelés qui ont généralement un grand impact sur la vitesse. Le pas de temps est en quelque sorte déterminé pour assurer un certain pas de distance maximale au-delà duquel le relief du parcours n'est plus adéquatement respecté.

3.3 Analyse de la sensibilité de la performance vis-à-vis des principaux paramètres d'un VAE solaire

Les deux sections précédentes représentent la phase de configuration de la simulation qui est utilisée dans la présente section. La suite de la méthodologie consiste maintenant à utiliser cette simulation adéquatement configurée afin de grossièrement cartographier la performance d'un VAE solaire à travers des plages de valeurs pour les quatre paramètres principaux de ce type de véhicule : la masse totale, la capacité de la batterie, la surface de panneaux solaires PV et la puissance d'assistance permise. Ne sachant pas à priori lequel de ces paramètres est le plus important ni autour de quelle valeur ils devraient se situer, des plages assez larges sont prises en compte afin d'aller chercher des points d'opération dans une plus grande variété de combinaisons. Les plages sont grossièrement représentatives de ce qui se fait en matière de

VAE et VAE solaire. L'objectif est également d'établir si des tendances générales et/ou des relations entre certains paramètres sont percevables.

L'exécution d'une étude paramétrique peut rapidement prendre de l'ampleur et demander beaucoup de ressources informatiques. Ces simulations sont exécutées en série et en parallèle afin de réduire le temps d'exécution. Le lecteur intéressé est invité à consulter le script *BatchRuns_MP.py* (Tétrault-Leclerc, Tétrault-Leclerc, 2025) permettant d'exécuter plusieurs instances de Python en simultané.

Les plages de valeurs pour les paramètres étudiés sont les suivantes :

- Masse totale (kg) : 100, 125, 150, 175.
- Capacité de la batterie (Wh) : 500, 1000, 1500.
- Surface de panneau solaire PV (m²): 0.5, 1.0, 1.5.
- Puissance d'assistance permise (W) : 250, 375, 500.

La masse totale pourrait sembler excessive, mais il est important de se rappeler le contexte d'utilisation de ce VAE solaire : un voyage de cyclotourisme de longue durée. Pour ce genre de voyage et pour une personne de masse moyenne, disons de 70kg, il est facile d'atteindre le 100 kg, voire 125 kg avec un vélo de randonnée conventionnel (10-15 kg) et de l'équipement de cyclotourisme (20-40 kg). Le système à l'étude vient inévitablement ajouter de la masse et viendrait idéalement non seulement compenser pour cet ajout de masse, mais pourrait permettre de transporter un peu plus d'équipements. Ainsi, il est jugé pertinent d'aller voir ce qu'il se passe avec la performance pour des configurations plus lourdes. Les capacités de batteries sont grossièrement représentatives de ce qui est commercialement disponible sur le marché des VAE de toutes catégories (urbain, route, montagne et cargo). La plage de surface de panneau est grossièrement représentative de l'espace disponible à vélo, selon les dimensions existantes pour des vélos cargos et des remorques commercialement disponibles (Aevon trailers, 2025; Larry vs Harry, 2025; Riese & Müller, 2025). Il est estimé que la largeur disponible est de 0.5 m à 0.75 m et que la longueur disponible est de 1 m à 2 m. Les puissances d'assistance permises peuvent aller jusqu'à 500 W comme il est généralement permis à travers

le Canada. Cela explique la plage de puissance évaluée. La vitesse maximale permise à partir de laquelle il n'est plus légal de fournir une assistance électrique varie avec la région, mais elle se situe autour de 32 km/h en Amérique du Nord. Afin d'évaluer le potentiel de performance du système, cette limite n'est pas prise en compte comme elle viendrait potentiellement limiter le gain en performance. Au total, 108 simulations de 15 jours débutant le 15 juin sont nécessaires pour évaluer la performance de chacune des combinaisons possibles pour un même parcours. En ayant un parcours-type pour le plat et un pour les côtes, le compte final est donc de 216 simulations pour générer les valeurs de performance qui sont à l'étude.

Les données seront représentées de plusieurs façons.

- 1) Des nuages de points en 3D avec une échelle de couleur pour la performance sont présentés en premier. Tous les nuages de points ne sont pas présentés, une sélection suffisante est faite afin de pouvoir partager des observations sans redondance.
- 2) Des surfaces sont présentées en deuxième afin d'approfondir l'analyse des résultats. Les vues et les combinaisons les plus pertinentes uniquement sont présentées dans ce présent mémoire. Les vues utilisent une projection orthogonale (sans perspective) afin de pouvoir mieux observer les pentes des surfaces générées sans distorsion à cause du point de vue et du point focal de la vue.
- 3) Finalement, les résultats seront présentés sous forme de tableau afin de compléter l'analyse de sensibilité de façon clairement quantifiée.

La Figure 3.5 est organisée de la façon suivante : de haut en bas, les configurations changent et, de gauche à droite, le parcours change (gauche – CGV et droite – Pro Tour). Cela permet de rapidement voir et isoler les tendances venant de la variation des paramètres et celles venant des différences entre les parcours. L'échelle de couleur est la même pour un même parcours, mais différente entre les deux parcours. Les graphiques du haut présentent les résultats de vitesse moyenne pour un moteur de 250 W et des variations de la capacité de la batterie, de la surface du panneau solaire et de la masse totale du véhicule, ceux de la deuxième et de la troisième rangée présentent la vitesse pour les mêmes paramètres, mais pour des puissances de moteur respectives de 375W et 500 W. Les deux graphiques de la 4^e rangée présentent les

résultats de vitesse moyenne pour une surface du panneau solaire de 1.5 m^2 et des variations de la capacité de la batterie, de la puissance du moteur et de la masse totale du véhicule.

Quelques conclusions peuvent être tirées des observations effectuées sur ce type de représentation graphique :

1. La performance maximale se trouve toujours dans un coin. Cela semble être surtout lié à une diminution de la masse et une augmentation de la surface de panneaux PV. Cela est également vrai pour la puissance d'assistance et la capacité de batterie selon les deux derniers graphiques, mais dans une moindre mesure.
2. Les trois différentes superficies de panneaux PV produisent trois strates de couleur distinctes. Ce paramètre semble ainsi être le paramètre ayant le plus d'influence, surtout pour un parcours plat. Pour un parcours avec plus de dénivelés, la variation apparente de la vitesse moyenne en fonction de la masse et de la superficie de PV est trop semblable pour dire lequel des deux paramètres est dominant.
3. Une balance subtile entre la puissance d'assistance et la capacité de batterie semble plus importante que la valeur de ces paramètres seuls. Une augmentation de la puissance avec une petite batterie n'a pas d'impact significatif sur la performance. Voir la dernière rangée des graphiques de la Figure 3.5.
4. Une balance subtile entre la superficie de panneaux PV et la capacité de batterie semble importante en plus de la valeur de ces paramètres. Une augmentation de la capacité de batterie avec un petit panneau PV n'a pas d'impact significatif sur la performance.
5. La masse a plus d'impact pour des parcours avec plus de dénivelés que plat.

Cette représentation ne permet pas de voir comment les différentes configurations s'entrecoupent ou si elles s'entrecoupent ou non. Une quantification de la sensibilité vis-à-vis la performance est difficile, étant donné qu'elle est représentée par une échelle de couleur.

L'utilité de cette représentation est néanmoins instructive, puisque la variation de la vitesse moyenne sur parcours plat passe de 7 à 9 m/s alors qu'elle passe de près de 4,5 à 8,5 m/s sur

parcours comportant des dénivelés. À priori, diminuer la masse (sans surprise), augmenter la surface du panneau (et *de facto* sa puissance nominale) et la capacité de la batterie semble être favorable à la plus grande vitesse moyenne sur les deux types de parcours confondus. Mais, puisque l'effet de la variation de la taille de la batterie semble moins critique que les autres, l'effort financier pourrait davantage porter sur les autres paramètres que celui-là.

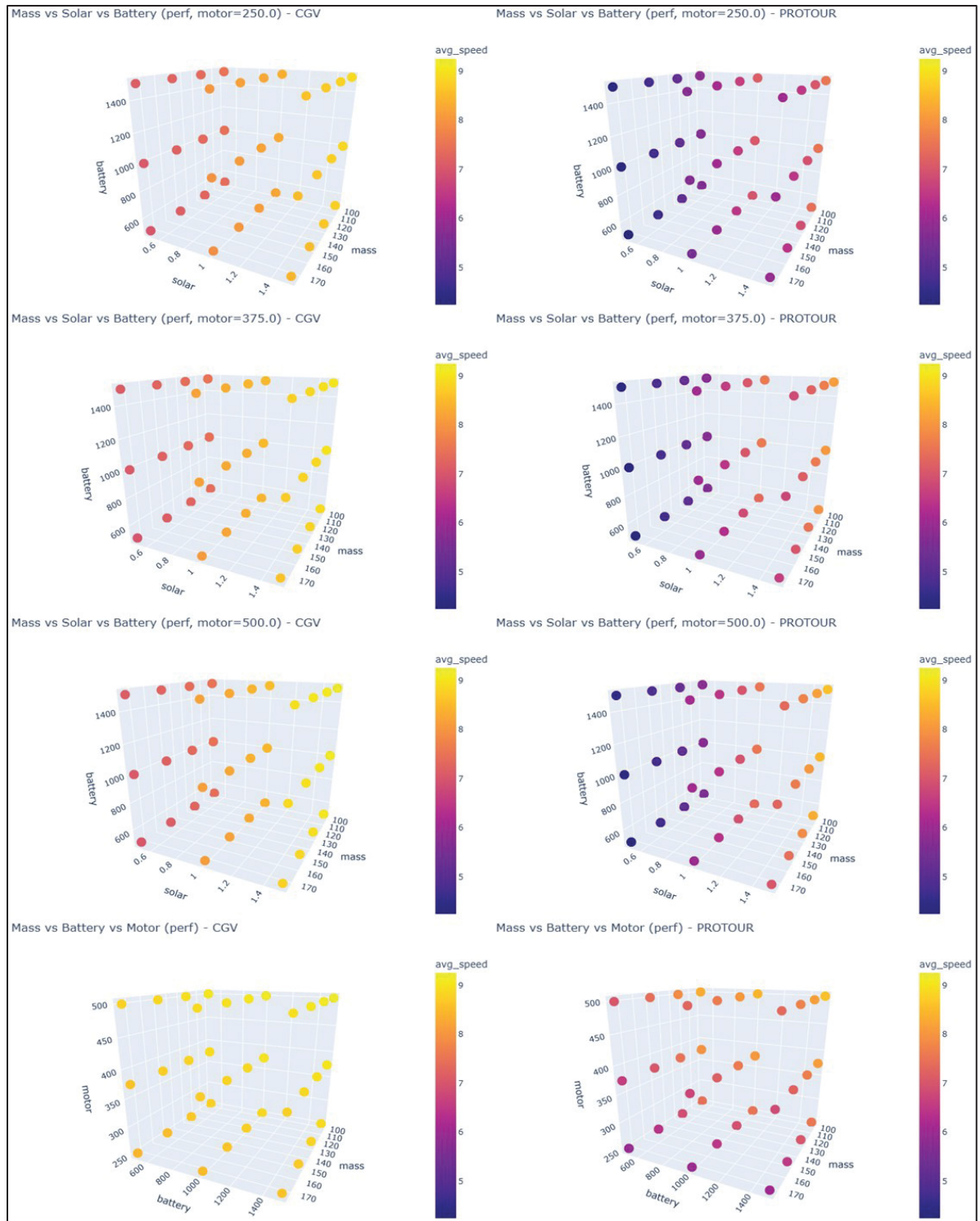


Figure 3.5 Nuages de points avec échelle de couleur pour la vitesse moyenne [m/s]. Les unités des paramètres sont les suivantes : masse [kg], superficie de PV [m²], capacité de batterie [Wh], puissance d'assistance (*motor*) [W]. Les deux derniers graphiques sont avec des panneaux de 1.5 [m²]

La Figure 3.6 et la Figure 3.7 sont organisées de la façon suivante : de haut en bas, les axes x et y gardent les mêmes paramètres et les parcours changent. Les familles de couleurs permettent de regrouper selon un troisième paramètre et le ton de couleur dans la même famille pour le quatrième. Entre les deux figures, les paramètres x et y changent. Cela permet de rapidement voir et isoler les tendances venant de la variation des paramètres et ceux venant des différences entre les parcours. Cette représentation permet de voir lorsque des configurations s'entrecroisent. Quelques observations redondantes et supplémentaires sont possibles avec ce type de représentation graphique :

1. La performance maximale est encore toujours dans un coin. Cela vient confirmer qu'il y a intérêt à minimiser la masse et maximiser tout le reste.
2. Les mêmes trois strates selon les superficies de panneaux PV sont présentes. Voir le graphique dans le coin inférieur gauche. Cependant, lorsque le parcours a beaucoup de dénivelés, les strates ne sont plus aussi présentes.
3. Pour des configurations avec des petits panneaux PV, la puissance d'assistance permise et la capacité de batterie n'ont pratiquement pas d'impact sur la performance. La superficie de panneaux est alors sous-dimensionnée. Le système ne fait pas entrer assez d'énergie pour pouvoir utiliser la puissance permise ni la capacité de stockage.
4. Des deux graphiques du haut, on peut observer la pente générale des surfaces. La pente est plus importante dans la direction de la superficie de panneaux PV que de la masse. Le paramètre le plus sensible de façon absolue est la superficie de panneaux PV.
5. Le système est globalement plus sensible lorsque le parcours présente plus de dénivelés. Les pentes dans les deux axes sont accentuées par le changement de parcours.
6. Augmenter la capacité ne mène jamais à une diminution de la performance (à masse égale).
7. Augmenter la puissance disponible peut diminuer la performance dans certains cas (à capacité égale) (surface rose qui dépasse la verte dans les deux graphiques du haut).

Le point 7 est à discuter. Une plus grande puissance disponible peut entraîner une diminution de la performance. Pourquoi? Parce que la logique de contrôle est fonction du SOC en pourcentage et non en énergie brute (Wh) et de la puissance maximale disponible. La modélisation est en cause. Le système peut drainer rapidement la batterie avec une puissance trop élevée et faire en sorte qu'il n'y ait pas assez d'énergie disponible dans une situation où elle serait plus utile (se vider trop vite sur le plat et ne plus avoir assez pour aider à la montée). Le système se met plus ou moins toujours à l'équilibre entre l'énergie qui entre et qui sort, mais cela ne se passe pas au même SOC exprimé en pourcentage lorsque la capacité change : donc pas à la même puissance disponible pour assister. La différence de performance est cependant trop petite pour pouvoir réellement affirmer que le système performe moins bien. Il est cependant possible de dire que le système ne performe pas mieux malgré la puissance d'assistance supérieure.

Plusieurs observations tirées des graphiques en nuage de points sont encore présentes avec cette représentation par surfaces. Cela vient en quelque sorte renforcer ces observations. L'observation qu'une certaine balance entre certains paramètres est importante en plus de leur valeur absolue vient également se préciser (points 3 et 6). Cette idée de balance mérite d'être approfondie davantage. La Figure 3.8 est en vue normale à l'axe de la masse et souligne l'intersection avec le premier plan de même masse avec des traces grasses de couleur.

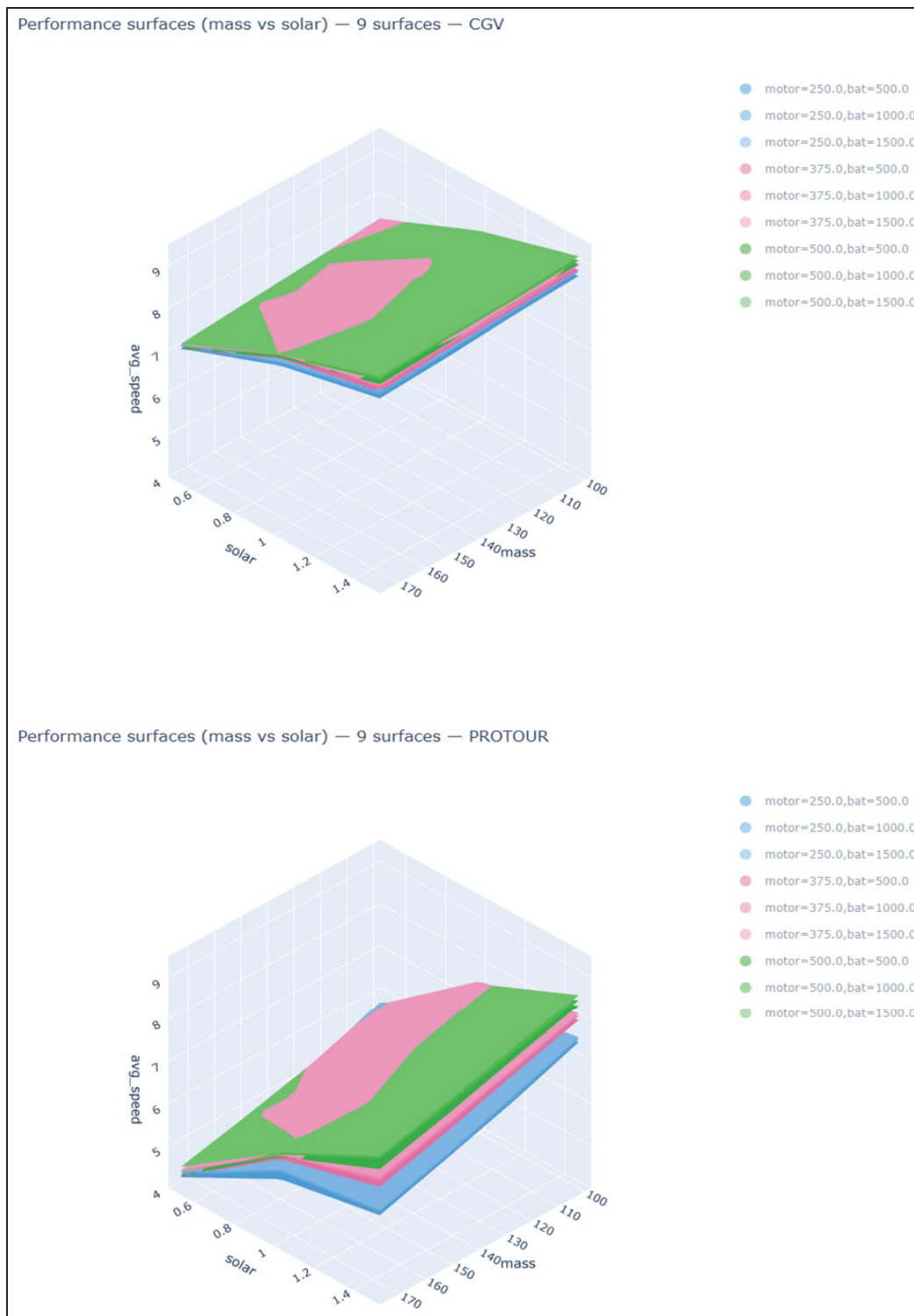


Figure 3.6 Surfaces par groupements de couleurs. Vitesse moyenne [m/s] (axe z) en fonction de la masse [kg] et de la surface solaire [m²] pour le parcours CGV (haut) et Pro Tour (bas)

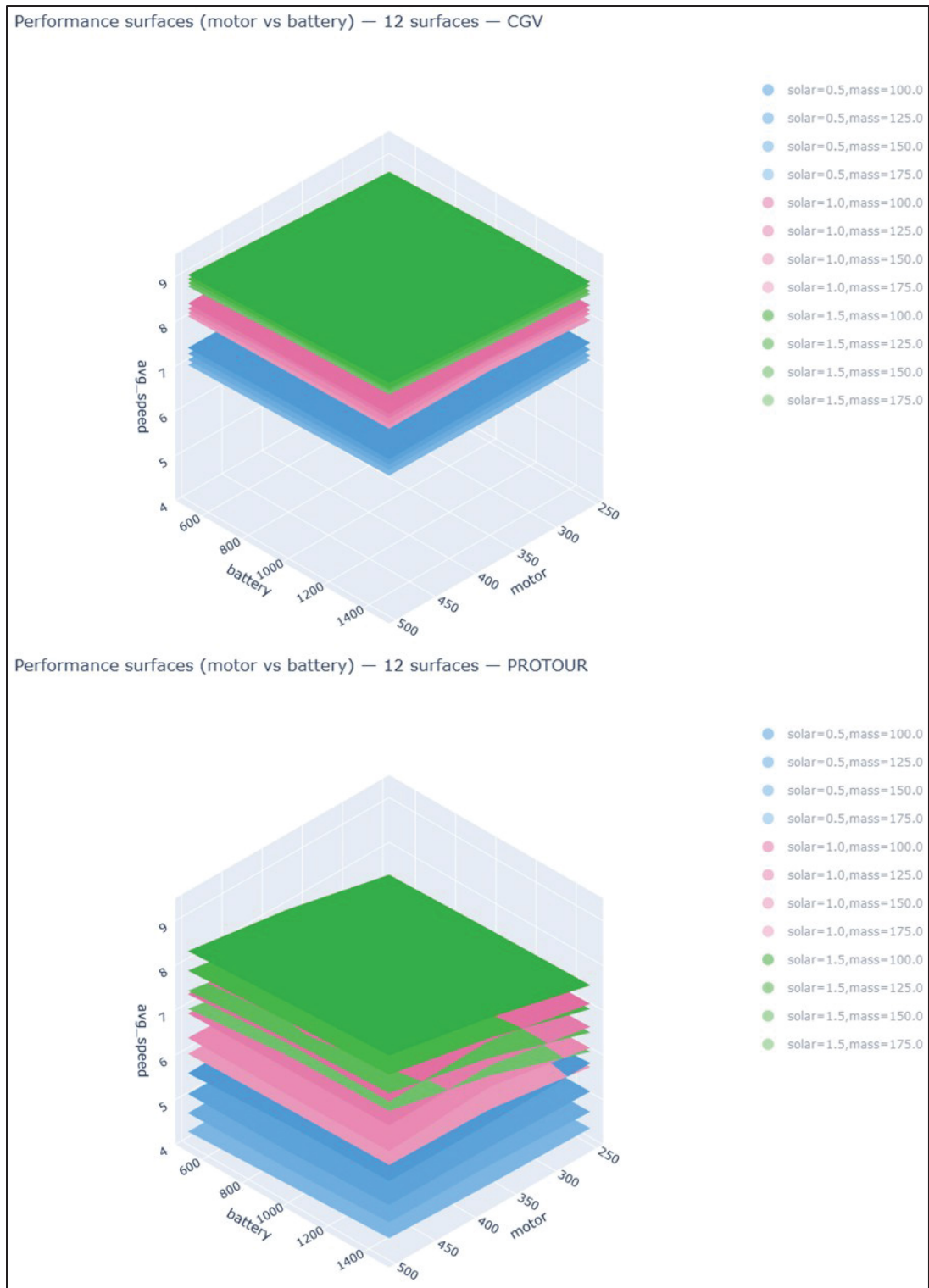


Figure 3.7 Surfaces par groupements de couleurs. Vitesse moyenne [m/s] (axe z) en fonction de la puissance d'assistance [W] et de la capacité de batterie [Wh] pour le parcours CGV (haut) et Pro Tour (bas)

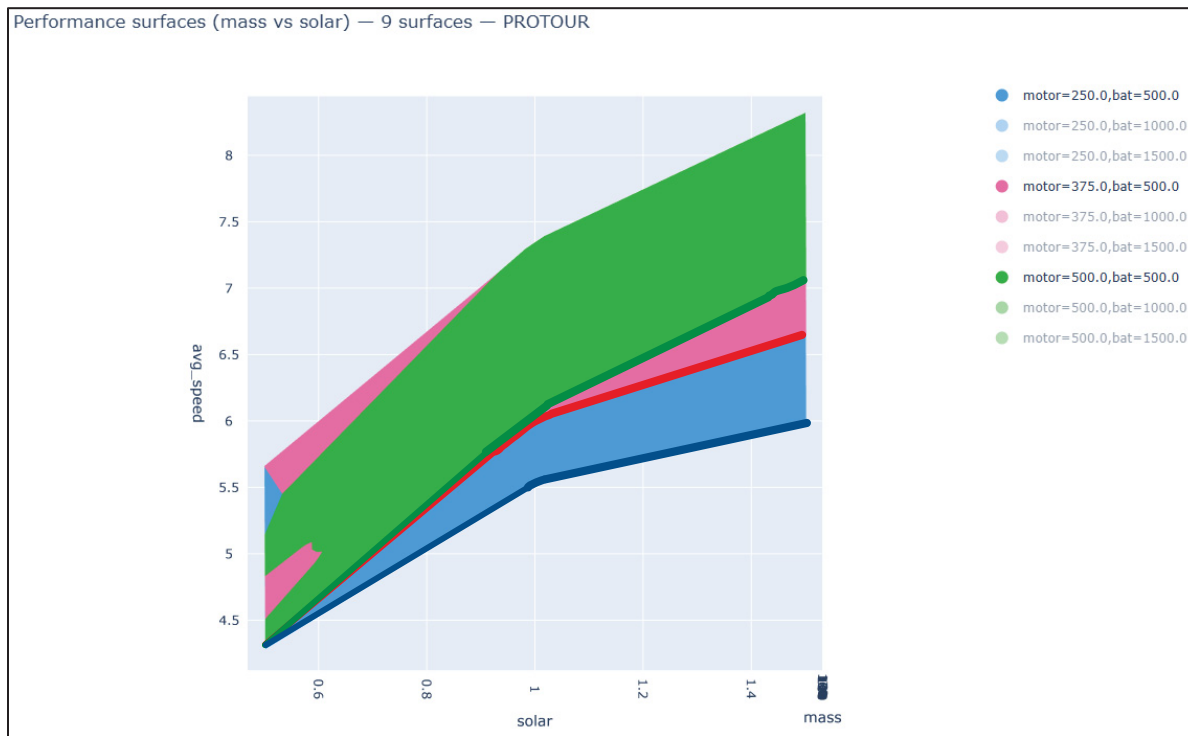


Figure 3.8 Surfaces de performance (axe z) en fonction de la superficie de panneaux PV (axe x) pour une même capacité de batterie et trois puissances d'assistance différentes, vue normale à l'axe de la masse

Cela permet de remarquer une ligne de pli dans les surfaces exactement lorsque le paramètre de la surface de panneaux PV est égal à 1. Cela est en partie dû au fait que seuls trois points sont utilisés pour représenter une relation qui n'est certainement pas linéaire, la surface étant générée par interpolation linéaire. Cette ligne de pli est partagée pour les trois surfaces qui n'ont que la puissance d'assistance comme différence. Si on se concentre sur l'intersection de ces surfaces avec le premier plan de même masse, les traces grasses de couleurs respectives, cette ligne de pli apparait de façon plus évidente. À une superficie de 0.5 m² PV, les trois systèmes performant également. Entre 0.5 et 1 m² de superficie PV, les systèmes avec une puissance disponible de 375 et 500 W performant essentiellement de la même manière, alors que le système avec un moteur de 250 W performe moins bien que les deux autres plus la superficie augmente. Entre 1 et 1.5 m², le système de 375 W commence à sous-performer par rapport au 500 W et celui à 250 W sous-performe encore plus. L'écart entre le système de 375

et 500 W dans la partie droite du graphique est d'allure identique et pratiquement de même envergure que l'écart entre le système de 250 et 375 W dans la partie gauche. Lorsque la puissance d'assistance disponible augmente trop par rapport à l'augmentation de surface de panneaux PV, le gain en performance augmente de moins en moins rapidement, voire n'augmente plus si les panneaux PV sont insuffisants pour soutenir cette charge (la surface verte et la rose coïncident). Inversement, lorsque la surface de panneaux PV augmente trop par rapport à la charge disponible (la puissance d'assistance), le manque de charge ne permet pas de bien profiter de toute l'énergie entrante dans le système. Ces lignes de pli et leurs allures sont pratiquement identiques pour toutes les intersections de ces surfaces avec les autres plans de même masse. Autrement dit, ces trois surfaces sont pratiquement parallèles. Cela est également vrai pour les autres trios de surfaces pour des capacités de batterie et de parcours différents. Cette balance est donc indépendante de la masse, bien que celle-ci ait une influence sur la charge. Son influence sur la charge n'affecte pas ce concept de balance. Cette balance est également indépendante de la capacité de batterie et du parcours. La masse et la capacité de batterie ont tout de même un impact important sur la performance du système. Cela indique qu'un VAE solaire avec une puissance d'assistance maximale et une superficie PV autour de 375 W/m^2 serait celui avec la meilleure balance pour les parcours-types et le moment de l'année simulés (et pour tous les autres paramètres de simulations qui sont restés les mêmes...).

Les surfaces présentées plus haut sont en termes de valeurs brutes, et non relatives, des paramètres. Afin de boucler cette étude de sensibilité et d'y apporter un peu plus de quantitatif, une dernière représentation des résultats de simulation s'impose. Le Tableau 3.2 et le Tableau 3.3 chiffrent la sensibilité absolue et relative pour les toutes les combinaisons simulées. Les sensibilités brutes sont simplement la variation de la vitesse moyenne, le critère de performance, par unité du paramètre (kg pour la masse par exemple). Certains paramètres varient du simple au triple (la surface de panneaux PV et la capacité de batterie), la puissance d'assistance varie du simple au double et la masse d'un facteur 1 à 1.75. Cela rend la comparaison quantitative plus difficile en plus du fait que les paramètres ne sont pas des quantités de même nature. Les données sont alors normalisées afin d'obtenir des sensibilités relatives. La variation de vitesse moyenne est calculée par différences finies dans la même

série de simulation, c'est-à-dire avec les mêmes paramètres, sauf celui qui varie dans cette série, par rapport au paramètre variable de la série. La différence avant, centrée ou arrière, est utilisée en fonction des données disponibles autour du point où la dérivée est approximée. Les dérivées sont normalisées par la valeur de la vitesse moyenne et du paramètre où elles sont évaluées. La sensibilité est alors le ratio de la variation de la vitesse moyenne et de la variation du paramètre. Cela permet une comparaison entièrement relative et sans unités. Les sensibilités par paramètre moyennes, minimales et maximales du jeu de données sont tabulées au Tableau 3.2 et Tableau 3.3.

Tableau 3.2 Sensibilité paramétrique brute et relative d'un VAE solaire sur le parcours CGV

CGV June 15 00:00:00 – June 30 00:00:00 shifts: 08:00:00-12:00:00 and 13:00:00-17:00:00 rider = 100W cst								
	Brute mass sensitivity (m/s)/kg	Relative mass sensitivity ratio %/%	Brute batt sensitivity (m/s)/Wh	Relative batt sensitivity ratio %/%	Brute solar sensitivity (m/s)/m2	Relative solar sensitivity ratio %/%	Brute motor sensitivity (m/s)/W	Relative motor sensitivity ratio %/%
AVG	-4.31E-03	-0.075	1.23E-04	0.0143	1.56	0.174	6.42E-04	0.025
MIN	-6.35E-03	-0.143	5.19E-07	0.0001	0.88	0.111	-4.80E-04	-0.029
MAX	-1.81E-03	-0.021	2.27E-04	0.0404	2.18	0.257	1.73E-03	0.087

Tableau 3.3 Sensibilité paramétrique brute et relative d'un VAE solaire sur le parcours Pro Tour

PROTOUR June 15 00:00:00 – June 30 00:00:00 shifts: 08:00:00-12:00:00 and 13:00:00-17:00:00 rider = 100W cst								
	Brute mass sensitivity (m/s)/kg	Relative mass sensitivity ratio %/%	Brute batt sensitivity (m/s)/Wh	Relative batt sensitivity ratio %/%	Brute solar sensitivity (m/s)/m2	Relative solar sensitivity ratio %/%	Brute motor sensitivity (m/s)/W	Relative motor sensitivity ratio %/%
AVG	-1.84E-02	-0.411	1.66E-04	0.0244	2.32	0.321	2.05E-03	0.099
MIN	-2.53E-02	-0.729	-6.74E-07	-0.0001	0.68	0.157	-1.14E-03	-0.088
MAX	-1.24E-02	-0.198	5.39E-04	0.0673	3.79	0.503	6.10E-03	0.283

L'interprétation de ces sensibilités relative doit être effectuée avec prudence. Tout d'abord, il est important de se rappeler que toutes ces données comprennent des erreurs de modélisation et des erreurs numériques. Il faut aussi comprendre que la normalisation est locale et utilise une référence mobile. Lorsque la valeur de référence change, cela affecte également la valeur de la variation. Prenons un cas en exemple. Le Tableau 3.4 présente les sensibilités brutes et relatives pour une série de masse extraite de l'étude complète.

Tableau 3.4 Sensibilité massique brute et relative d'un VAE solaire sur le parcours CGV, extrait d'une série de masse variable pour une batterie de 500 Wh, un panneaux PV de 0.5 m² et une puissance d'assistance de 250 W

avg_speed m/s	Mass kg	Brute mass sensitivity (m/s)/kg	Relative mass sensitivity ratio %/%
7.3876	100	-4.50E-03	-0.061
7.2751	125	-4.65E-03	-0.080
7.1550	150	-4.86E-03	-0.102
7.0323	175	-4.91E-03	-0.122

À la première ligne, une différence finie avant avec une masse de référence de 100 kg est utilisée. La vitesse de référence est également celle de cette même ligne, soit 7.39 m/s. Les valeurs de la seconde ligne sont utilisées afin de calculer la variation de la vitesse et de masse. Ainsi, la variation normalisée de la masse à la première ligne est de 25 %. C'est ce 25 % qui sera au dénominateur de la sensibilité relative. La variation de la vitesse est d'environ -1.5 % et sera au numérateur de la sensibilité relative. À la seconde ligne, une différence finie centrée est utilisée et les références sont maintenant 125 kg et 7.28 m/s. La variation de masse est maintenant de 20 %, bien que le pas de masse soit toujours de 25 kg. Cela a pour effet de gonfler la sensibilité relative. Inversement, la vitesse de référence diminue et a pour effet de dégonfler la sensibilité relative. Il est recommandé de travailler avec les deux sensibilités pour évaluer la variation de la performance en un point de cette étude paramétrique. Ici, on observe que la masse a de plus en plus d'impact sur la performance, plus le système est lourd de façons brute et relative.

Bien que la sensibilité relative ne soit pas évidente à utiliser pour évaluer la variation de performance en un point précis, le fait de pouvoir en faire la moyenne sur la globalité des données est utile pour comprendre les tendances générales du système à l'étude.

1. Les ordres de grandeur des sensibilités sont différents. La sensibilité relative de la masse et de la superficie de panneaux PV sont plus ou moins d'un ordre de grandeur plus élevé que celles de la capacité de batterie et la puissance d'assistance.
2. Sur le plat, l'ordre d'importance des paramètres est le suivant : superficie de PV, masse, puissance d'assistance et capacité de batterie.
3. Sur un parcours avec dénivelé, l'ordre d'importance des paramètres est le suivant : masse, superficie de PV, puissance d'assistance et capacité de batterie.
4. En comparant les données pour le parcours plat et avec dénivelé, on observe que le parcours avec dénivelé accentue tous les paramètres, mais de proportion différente. La masse est 5,5 fois, la capacité 1,7 fois, le PV 1,9 fois et la puissance 3,9 fois plus sensible pour le parcours avec dénivelé que le parcours plat.

Cela conclut l'étude de sensibilité paramétrique d'un VAE solaire. Plusieurs tendances générales et une relation de balance entre deux paramètres ont été observées. La résolution très grossière de l'étude ne permet pas de définir de façon précise cette relation de balance, un raffinement serait nécessaire pour l'étudier en détail. Il est jugé que l'étude est suffisante pour l'instant. Un raffinement serait plus approprié dans une phase plus avancée de conception alors que quelques concepts seraient en processus d'évaluation.

3.4 Performance vis-à-vis un cas de référence sans système d'assistance

Puisque l'essence de ce travail de recherche est un exercice de conception d'un système d'assistance électrique solaire pour VAE, il est pertinent de déterminer le gain en performance par rapport à un cas d'utilisation raisonnable. Le contexte étant de longs voyages en autonomie, le cas d'utilisation de référence le plus logique est celui d'un cyclotouriste en autonomie qui n'est pas équipé d'un VAE ou d'un système d'assistance électrique. Le Tableau 3.5 résume les paramètres de simulation représentant un cycliste équipé d'un vélo traditionnel et de 30 kg de bagages pour voyager en autonomie.

Tableau 3.5 Configuration d'un objet de classe *Vehicle* modélisant un cyclotouriste sans système d'assistance électrique

*Calcul du coefficient de résistance aérodynamique en ANNEXE III, un cycliste avec sacoches est considéré

**Coefficient de résistance dans la plage possible selon Wilson & Schmidt (2020) et correspondant à un pneu légèrement plus roulant qu'un pneu de montagne (Zorn, 2008)

Rider	Mass	Power	Shifts	
	70 kg	100 W	8h-12h/13h-17h	
Battery	Capacity			
	0 Wh			
SolarPanel	Surface area			
	0 m²			
Chassis	Mass	Cargo mass	CdA*	Crr**
	10 kg	30 kg	0.561	0.004
Motor	Rated power			
	0			

Le coefficient de trainée est diminué puisqu'une remorque n'est plus prise en compte. Afin de modéliser un cycliste sans assistance, la capacité, la superficie de PV et la puissance d'assistance sont mises à zéro. Les mêmes deux parcours sont simulés pour la même durée et au même moment de l'année. Deux vitesses moyennes de référence pour le CGV et le

PROTOUR de 5.937 m/s et 3.242 m/s sont obtenues respectivement. En combinant ces deux vitesses de référence avec les données de l'étude de sensibilité, il est possible de quantifier le gain en performance pour chacune des combinaisons simulées.

Cette vérification rapide permet d'immédiatement juger du potentiel d'un tel système. Sans avoir un système précisément dimensionné en tête, les valeurs minimales, maximales et moyennes du gain de performance pour chacun des parcours-types sont encourageantes. Pour le parcours-type CGV, les ratios du gain de performance minimal, maximal et moyen sont de 1.182, 1.552 et 1.368. Pour le parcours type Pro Tour, ils sont de 1.311, 2.646 et 1.944. Cela prend en compte plusieurs combinaisons peu intéressantes, notamment celles avec la plus petite superficie de panneaux PV. Cela prend également en compte des simulations où la masse est inférieure à la référence. Les valeurs minimales et maximales ne peuvent pas être considérées, mais les moyennes donnent une bonne idée du potentiel d'un système d'assistance électrique solaire.

Le gain en performance potentiel moyen serait entre 1.368 et 1.944 en fonction du profil du parcours. Considérant un parcours à mi-chemin entre les deux parcours-types et en posant l'hypothèse simplificatrice que le gain en performance est alors en plein milieu à 1.656, cela voudrait dire de compléter le parcours Montréal-Québec en 9h58min alors que *Google Maps* prédit une durée de 16h32min pour faire ce trajet à vélo. Cet exercice simpliste a seulement pour but d'illustrer le potentiel d'un gain en performance de facteur 1.656 et est évidemment inexact. Le profil de ce trajet n'est pas similaire aux parcours-types et le temps prédit par *Google Maps* ne prend pas en compte un cyclotouriste, équipé de 30 kg de matériel, fournissant un effort constant de 100 W. Néanmoins, il est clair que le potentiel d'un tel système est bel et bien présent, dans un contexte de cyclotourisme en autonomie.

Cette étude ne peut rien conclure de la pertinence d'un tel système couplé avec un accès régulier ou partiel au réseau électrique régional pour effectuer de la recharge. Ce cas d'utilisation n'a pas été simulé, mais pourrait l'être avec plusieurs ajustements au niveau de la logique de conduite. Le cas de référence devrait également être ajusté en conséquence.

Cela conclut le présent chapitre et l'étude de la performance d'un VAE solaire. Cette étude peut également être vue comme une cartographie de la performance d'un système à assistance électrique solaire en contexte de cyclotourisme en autonomie. Dans une démarche de conception, une personne intéressée pourrait repartir des résultats de cette étude, élaborer plusieurs concepts et vérifier où ils se situeraient en termes de performance. Le concepteur serait également informé sur les orientations possibles pour améliorer efficacement son concept en fonction des ressources qui lui sont disponibles. La méthodologie employée peut également être reproduite pour des cas d'utilisation différents (voyages de différentes durées, accessibilité à de la recharge sur le réseau, etc.) ou des véhicules différents.

3.5 Quelques considérations supplémentaires

L'une des hypothèses effectuées dans les simulations concerne la puissance délivrée par la ou le cycliste : cette puissance est fixée à 100 W. Dans les faits i.e. lors d'un voyage réel, la personne connaît le SOC de départ, quel chemin (dénivelé) l'attend, quelle météo, donc l'irradiation approximative, est prévue – pour le jour courant et les jours suivants, dans quel état de fatigue elle se trouve et ainsi elle peut doser la puissance assistée en provenance du système de même que celle qu'on doit fournir par le métabolisme (augmenter ou diminuer). De même, elle peut décider d'enclencher la régénération bien avant 12 m/s lors d'une longue descente, etc. En fait, dans les modélisations, d'une part, la ou le cycliste n'est considéré.e que comme un apport de puissance constant et d'autre part chaque trajet est conçu de manière aveugle i.e. de façon à ce que le système ne connaisse pas ce qui s'en vient, puisqu'il est impossible de savoir quel parcours sera suivi réellement par les utilisateurs.

On pourrait ultérieurement modéliser un cycliste qui contrôle l'assistance et entraîner un modèle à performer le plus possible sur les parcours-types en tenant compte du VO₂max et d'autres caractéristiques métaboliques. Clairement, cela permettrait une meilleure performance sans changer rien au système. Mais, dans les faits chaque voyage, chaque journée, sur un même parcours, peut être différent et fera appel au libre arbitre de la personne qui emploie le système.

Par exemple, lors d'une magnifique journée ensoleillée, la personne pourrait simplement décider de passer la journée au bord d'un cours d'eau en laissant le panneau recharger complètement sa batterie, sans égard au fait qu'à midi cette dernière pourrait être totalement chargée. Ou à l'inverse, visiter un ou des musées lors d'une journée pluvieuse alors qu'elle aurait pu vider la batterie en assistance électrique : ça, c'est impossible à modéliser!

CHAPITRE 4

DESIGN PRÉLIMINAIRE D'UN VAE SOLAIRE

Ce mémoire constitue fondamentalement un exercice de conception suivant une approche prescriptive. Beaucoup d'efforts ont été déployés pour définir la problématique avant de faire un premier concept. Peu importe l'approche de conception, un tel exercice est toujours long et complexe. Étant donné le temps requis afin de développer et tester une simulation de véhicule électrique solaire fonctionnelle présentée au CHAPITRE 2, le temps requis afin de construire une méthodologie systématique et de rouler plusieurs simulations d'un VAE solaire au CHAPITRE 3, l'exercice de conception s'arrêtera à la suite de cette prochaine étape du processus de conception. Ce bref dernier chapitre a pour but de montrer comment utiliser les résultats de simulation obtenus afin de circonscrire les configurations possibles tout en respectant des contraintes réelles, et non purement théoriques, ainsi que de rapidement évaluer des concepts préliminaires élaborés avec des composantes commerciales disponibles. Des contraintes liées au coût, à la sécurité, à la réglementation, etc., seraient à prendre en compte pour un réel développement de produit. De telles contraintes ne seront pas prises en compte, visant la conception d'un prototype plutôt qu'un produit fini.

4.1 Élaboration d'un cahier des charges

Un rappel des objectifs du système et du projet de recherche est fait à l'aide d'un tableau des fonctions principales du système. Quelques fonctions secondaires sont également proposées afin de compléter le portrait fonctionnel. Ces dernières sont optionnelles et peuvent grandement varier en fonction des préférences du concepteur. Les deux fonctions primaires sont d'apporter un gain en performance et de permettre de transporter des bagages. Les deux fonctions secondaires sont d'être étanche et de permettre la recharge d'appareils électroniques à partir de la batterie du système. Leurs critères (les façons de les mesurer), leurs niveaux (les cibles) et leurs flexibilités (les plages d'acceptabilité) sont également présentés au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Fonctions principales et secondaires d'un système d'assistance électrique solaire en contexte de cyclotourisme, le facteur K de 1 à 5 (min à max) représente le niveau d'importance attribué à cette fonction

No.	Fonction	K	Critère	Niveau	Flexibilité	Commentaire
FP-1	Apporter un gain de performance significatif.	5	Gain sur un parcours type plat.	Facteur de performance 1.5	+ ∞ - 0.2	Le gain en performance est par rapport au cas de référence sans système.
			Gain sur un parcours type avec dénivelé.	Facteur de performance 2.0	+ ∞ - 0.5	Les deux fonctions principales sont en opposition entre elles. Le gain en performance doit être vu en comparaison à masse égale.
FP-2	Transporter du matériel (cargo).	4	Capacité à transporter de la masse (max).	Masse 30 kg	+ ∞ - 5	
			Capacité à transporter du volume (max).	Volume 100 L	+ ∞ - 20	
FS-1	Être étanche.	3	Offrir un espace fermé intérieur.	Oui/Non	NA	Cela pourrait aller d'une boîte étanche à des sacs étanches.
FS-2	Être une réserve de recharge pour appareils électroniques.	2	Permettre la recharge d'appareils.	Oui/Non	NA	Cela pourrait aller d'un simple port USB à un système de distribution.

Quelques contraintes pratiques sont nécessaires afin de définir un périmètre dans lequel travailler. Dans l'optique qu'un produit de ce genre soit utilisé en voyage de cyclotourisme, il est important que la masse du système ne dépasse pas un certain seuil afin d'être capable de le soulever/déplacer seul. La longueur et largeur ne doivent pas rendre le vélo trop encombrant ni l'empêcher de circuler et négocier les virages dans les voies cyclables. Ces contraintes sont présentées de la même manière que les fonctions au Tableau 12.

Tableau 4.2 Contraintes d'un système d'assistance électrique solaire en contexte de cyclotourisme, le facteur K de 1 à 5 (min à max) représente le niveau d'importance attribué à cette contrainte

No.	Contrainte	K	Critère	Niveau	Flexibilité	Commentaire
C-1	Masse totale maximale.	5	NA	Masse 35 kg	+ 0 - 0	Masse à vide du système sans désassemblage. Similaire aux VAE les plus lourds sur le marché.
C-2	Limite d'encombrement.	4	Durant l'utilisation.	Lng 3000 mm Lrg 850 mm	Lng + 250 Lng - ∞ Lrg + 50 Lrg - ∞	Longueur maximale similaire aux VAE les plus longs sur le marché. Largeur maximale similaire aux guidons les plus larges sur le marché.
			Durant le transport du système, pouvoir entrer dans un espace rectangulaire.	Rectangle de 2000 x 1700 mm	NA	Espace approximativement disponible dans une boîte de camion de style <i>pickup</i> .
C-3	Accessibilité/facilité de maintenance.	3	Subjectif.	NA	NA	Idéalement, rendre la maintenance ordinaire possible sans la nécessité d'un atelier.

Toutes les fonctions primaires et secondaires reflètent des choix de conception et ne sont pas des lignes directrices rigides à suivre. Quelqu'un pourrait attribuer un différent niveau d'importance aux fonctions, différents niveaux et différentes flexibilités ou en proposer d'autres. Il est pratiquement impossible de faire un quelconque exercice de conception de produit, sans prendre quelques décisions subjectives, voire personnelles. Jusqu'ici, ces décisions ont été évitées en prenant le temps d'analyser le comportement général de la performance sans fixer de paramètres. Maintenant, certains paramètres doivent être déterminés, afin de poursuivre l'exercice de conception. Pour augmenter les chances de succès vis-à-vis des contraintes, une première décision qui orientera massivement l'élaboration d'un premier concept est de considérer le système comme étant une remorque plutôt que de l'intégrer à un vélo cargo. La longueur totale est probablement négativement affectée, puisque cette décision risque de donner des concepts plus longs. Cependant, en étant séparable, la masse totale à manipuler par l'utilisateur se voit de beaucoup réduite, simplifiant la manipulation. Il en va de même pour le transport et la maintenance. En intégrant le système au niveau de la remorque, l'argument pourrait être formulé à l'effet que cette solution permet d'être utilisée sur différentes bicyclettes et d'être interchangeable. Bien que cela pourrait être

le cas, le contrôle du système aurait tout de même à passer par des commandes accessibles au cycliste, qui elles se trouvent au niveau de la bicyclette. Cette solution ne pourrait pas être si facilement interchangeable. La traction d'assistance pourrait être intégrée à la roue arrière de la bicyclette ou à la remorque. Les implications sur la dynamique du vélo n'est pas prise en compte pour le choix de la position du moteur.

4.2 Élaboration de concepts préliminaires

Des cibles de dimensionnement sont identifiées à partir des résultats du chapitre précédent afin d'assurer un point de départ viable en termes de performance. Il a été établi qu'une bonne balance entre la puissance d'assistance et la superficie de PV se trouve autour de 375 W par m^2 de PV. Des sensibilités paramétriques, il a été établi que la capacité de batterie n'influence pas beaucoup la performance, mais qu'elle est tout de même bénéfique. Pour cette raison, il n'est pas jugé nécessaire d'avoir une si grande capacité. Une première cible entre 500 et 1000 Wh est considérée. À ce stade-ci, le coût en performance de l'ajout de ces composantes provenant de l'ajout de leur masse est pris en compte. Plusieurs combinaisons de composants ont été considérées et simulées sur les deux parcours-types. De ce lot, ce chapitre présente la combinaison retenue à l'issue du processus de conception. Les caractéristiques importantes et la masse des composants de ce concept sont présentées au Tableau 4.3.

Le moteur choisi ne devrait pas avoir de problème à fournir 500 W, étant donné la plage de puissance dans laquelle il est capable d'opérer. Le ratio de puissance d'assistance et de PV se situe à environ 414 W/m^2 , légèrement plus haut que la cible de départ de 375 W/m^2 , considérant que les panneaux PV sont ici plus performants que ceux simulés en référence (25 % au lieu de 20 %). Cette configuration est simulée pour un cycliste de 70 kg, un vélo de 10 kg et 30 kg de cargo – l'objectif et la référence de simulation cités aux Tableaux 5 et 10 – en plus de la masse ajoutée par le système. La masse totale passe à 130 kg environ. Les facteurs de performance par rapport aux vitesses de référence sont alors de 1,47 et 2,31 pour un parcours plat et avec dénivelé respectivement. La performance répond aux fonctions principales. Cependant, afin de répondre aux fonctions secondaires, un gain de masse est inévitable. Si l'on fait le bilan, il reste

5.5 kg pour transporter plus d'équipements ou accommoder pour la masse à ajouter pour compléter le système, avant de dépasser la capacité de chargement de cette remorque. Quelques composantes électriques et électroniques n'ont pas été prises en compte (*Max Power Point Tracker, On Board Charger, Motor Control Unit*) sans compter une structure pour soutenir le panneau PV. Il est cependant important de noter qu'il serait possible de transporter des bagages au niveau du vélo en plus de la remorque, mais ce n'est pas la solution souhaitée.

Tableau 4.3 Dimensionnement des principales composantes d'un concept de système d'assistance électrique solaire intégré au niveau d'une remorque

Composante	Masse	Dimension clé	Autres spécifications	Approvisionnement
Remorque	7 kg	7 kg	Capacité de chargement : 45 kg Volume de chargement : ~L700 x l400 x h600 mm (~160 L) Taille montée : ~L1900 x l430 x h560 mm Taille démontée : ~L980 x l430 x h530 mm Roue unique centrée	Aevon STD 100
Panneau PV	5.6 kg	0.966 m ²	Rendement : 25% Puissance nominale : 160 W (± 5 W) Dimensions : 600×1610×25 mm	EcoFlow NextGen 160W Portable Solar Panel
Batterie	3.99 kg	792 Wh	Voltage : 36V Capacité : 22 Ah Voltage à pleine charge : 42 V Dimensions : 348x141x59 mm	36V 22Ah eZee Flat Battery
Moteur	3.78 kg	500 W	Plage de puissance : 500-1000 W Puissance nominale RPM / V : 11.1	eZee Front Fast Wind
Total	20.37 kg			

Une faiblesse de modélisation est rencontrée ici. La modélisation en puissance d'assistance maximale ne permet pas d'aider le concepteur à mieux choisir le moteur électrique en soi, puisque cette dernière dépend du contrôle (en courant, en vitesse ou en couple) du moteur, du moteur et de la batterie (la tension d'alimentation). La puissance indiquée par un fabricant est souvent liée à une gestion thermique du moteur. Un moteur CC sans balais n'a pas le même rendement selon sa vitesse de rotation et au couple demandé. Le rendement est typiquement moins bon à basse vitesse et haut couple (condition de démarrage) et est meilleur à haute vitesse et bas couple. Les caractéristiques de couple de démarrage et de couple en général sont des spécifications qui permettent de mieux choisir un moteur. Une modélisation améliorée et en

termes de couple moteur serait plus adéquate pour aider à la sélection d'un moteur électrique que celle présentement utilisée, mais devrait être jumelée à une caractérisation du moteur soit directement par le fabricant ou par soi-même.

Ce paragraphe étudie comment il est le plus pertinent d'enlever de la masse. Il est possible de se situer, au départ, aux points les plus proches de la configuration de base présentée plus haut dans l'étude de la sensibilité. Pour une configuration de cette masse, de cette superficie de panneaux PV, de cette puissance et de cette capacité, les sensibilités peuvent être directement utilisées pour voir ce qui affecte le plus la performance. À ce point, chaque kilogramme coûte 0,004 [m/s] tandis que les autres sensibilités brutes sont de $9,58 \text{ E-5 [(m/s)/Wh]}$, $1,27 [(m/s)/m^2]$ et $9,07\text{E-4 [(m/s)/W]}$. Pour ce qui est des sensibilités relatives, elles sont de -0,058, 0,009, 0,178 et 0,039 pour la masse, la capacité, la superficie PV et la puissance d'assistance. L'objectif est de retirer de la masse parmi ces composantes afin de minimiser l'impact sur la performance. On peut voir qu'il est mieux de ne pas retirer de superficie PV, mais plutôt de diminuer la masse de la batterie ou de la motorisation. Il s'avère qu'il est difficile de trouver des batteries légèrement plus petites avec une densité énergétique similaire. Les quelques grammes économisés par la diminution de ces deux composantes entraîneraient une légère diminution de la performance.

Pour conclure ce dernier chapitre, il est intéressant de mettre en perspective les résultats obtenus avec le concept actuel. Sur une période de 15 jours où un cycliste consacrerait 8h par jours en mouvement, à un effort constant de 100 W, il dépenserait 12 kWh pour son déplacement total. Il est possible de calculer ce que le système lui aurait offert en cumulant toutes les puissances d'assistance fournies pendant un pas de temps d'une seconde: un bonus de 21,8 kWh sur le CGV et de 24,5 kWh sur le PROTOUR, soit un bonus de 182 % et 204 % par rapport à la contribution du cycliste seul. Ce bonus se traduit par un gain en performance, en vitesse moyenne, qui respecte les cibles de conception de 1.5 (+∞, -0.2) sur un parcours plat et de 2.0 (+∞, -0.2) sur un parcours avec fort dénivelé, performant bien mieux lorsque le dénivelé est plus accentué. Une marge est présente sur la performance et la capacité de

chargement de la remorque qui devrait être suffisante pour accommoder les autres composantes nécessaires à l'obtention d'un prototype réel.

La modélisation d'une puissance maximale d'assistance et d'une fonction de contrôle de la puissance en fonction du SOC s'apparente à une logique de contrôle ou une stratégie de gestion de l'énergie. Cette dernière n'est pas parfaite dans une optique de sélection de moteurs électriques. Elle est cependant responsable du comportement du système et donc partiellement en cause pour la performance obtenue. Différentes stratégies de gestion de l'énergie devraient être également étudiées afin de déterminer si la performance leur serait attribuable plutôt qu'aux paramètres de conception. En réalité, cette puissance serait effectivement limitée par le moteur, mais également par toute la chaîne d'électronique de puissance, soit le contrôleur de moteur et la batterie. La modélisation proposée ne permet pas de continuer l'exercice de design bien plus loin. Il serait temps de passer à une phase d'essais expérimentaux, de revoir la modélisation du moteur et de la batterie et d'introduire un modèle de contrôleur de moteur. Des essais expérimentaux en environnement contrôlé et réel permettraient de valider la modélisation et de mesurer la performance réelle d'une remorque à assistance électrique solaire. Finalement, cette démarche de conception et cet outil de simulation pourraient servir à évaluer d'autres concepts, tels qu'un VAE solaire sur une base de vélo cargo ou dans d'autres cas d'utilisation.

CONCLUSION

Dans un contexte où le VAE fait maintenant partie du paysage urbain en tant que moyen de transport de courte distance, l'utilisation du VAE pour des déplacements de plus longues distances, tel que de longs voyages de cyclotourisme, reste plus marginal. Le VAE est bel et bien présent dans l'industrie du tourisme, étant beaucoup utilisé par les opérateurs de tours et présent dans les réseaux de mobilité partagée, tel que Bixi. Cependant, l'accessibilité de la recharge peut être compromise ou absente dans certains cas d'utilisations: lors de long voyage en autonomie, lors de voyages interurbains de plusieurs jours en milieu rural ou à travers des parcs nationaux. Dans ces cas précis, le VAE conventionnel n'est pas compatible avec l'aspect d'autonomie par rapport au réseau électrique régional.

Ce mémoire se penche sur la possibilité d'élargir l'usage du VAE à ce cas d'utilisation en cyclotourisme et en autonomie. Pour ce faire, l'intégration d'une production solaire PV mobile à la bicyclette est évaluée, en s'inscrivant dans une démarche de conception d'ingénierie, afin de quantifier un gain en performance. L'objectif principal de ce projet était de concevoir un système de production électrique PV intégré à la pratique du cyclotourisme en autonomie et d'évaluer son potentiel. Le potentiel est principalement mesuré à travers le gain en performance, en vitesse moyenne, relativement à un cycliste qui doit transporter son matériel sans assistance électrique. Deux parcours-types sont identifiés sur lesquels mesurer la performance, un parcours plat (circuit Gilles-Villeneuve) et un avec de forts dénivelés (parcours du grand prix cycliste de Montréal). Cet exercice de conception repose sur une modélisation de véhicule électrique solaire qui combine une modélisation simplifiée du mouvement d'un véhicule à celle d'une production solaire PV. Elle permet d'abord d'étudier la performance d'un vélo à assistance électrique solaire et de cerner les paramètres de conception les plus importants. Elle permet ensuite d'itérer sur un concept basé sur de réelles composantes commerciales.

Un concept de remorque à assistance électrique solaire équipé de $0,966 \text{ m}^2$ de PV (de puissance nominale de 160 W), d'une capacité de batterie de 792 Wh et d'une assistance maximale de 500 W , ajoutant une masse supplémentaire de $20,37 \text{ kg}$, est proposé. À toutes autres masses égales (cycliste, bicyclette et cargo), cette solution permet un gain en vitesse moyenne d'un facteur $1,47$ et $2,31$ pour un parcours plat et avec dénivelé respectivement. Ce gain est atteint à la hauteur d'une contribution énergétique de la part du système d'assistance de 182% et 204% fois celle du cycliste seul pour un parcours plat et avec dénivelé respectivement, démontrant une bien meilleure performance sur les parcours présentant de forts dénivelés.

L'outil de simulation développé en Python et partagé sur GitHub permet de simuler un véhicule électrique solaire en faisant usage de la librairie PVlib. L'approche systématique de gestion des données météorologiques est une contribution importante de cet outil. La modélisation du moteur et de la batterie devrait être revue en priorité afin de permettre de mieux guider la prise de décision au niveau de ces composants. Néanmoins, cette modélisation offre une base à laquelle il est possible d'ajouter des fonctionnalités. Les paramètres principaux d'un VAE solaire, la masse, la superficie de PV, la capacité de batterie et la puissance d'assistance maximale n'ont pas la même importance; une analyse de sensibilité paramétrique de la performance démontre que l'impact de la variation de la masse et de la superficie de PV est plus ou moins d'un ordre de grandeur supérieur à celle de la capacité et de la puissance d'assistance; la masse est plus critique pour des parcours avec de forts dénivelés alors que la superficie de PV est plus critique pour des parcours plats; de façon générale, la performance est plus sensible à la variation de tous les paramètres sur un parcours avec forts dénivelés. Une certaine balance entre la superficie de PV et de la puissance d'assistance maximale est observable. Une balance de 375 W/m^2 s'avère être un bon point de départ de conception.

Au terme de ce mémoire, le potentiel d'intégration de PV au VAE en contexte de cyclotourisme est mieux quantifié et mieux compris. Ce projet contribue à la documentation de la performance technique du VAE solaire, qui n'est pas abondante, et encourage la création de future documentation en partageant un outil de simulation qui peut être réutilisé ou à partir duquel s'inspirer. L'impact de certains paramètres de conception est mieux compris, mais une

grande quantité de paramètres n'ont pas été étudiés. Notamment, l'impact des fonctions de contrôle modélisées pour la batterie et pour la puissance d'assistance et leur interaction avec la performance du système est inconnu. Autrement dit, il est difficile de dire si les observations tirées au niveau des paramètres étudiés peuvent s'étendre de façon plus générale ou si elles ne tiennent que pour ces fonctions de contrôle. Néanmoins, le potentiel d'assistance électrique PV en contexte de cyclotourisme en autonomie est non négligeable, vu l'ampleur des valeurs de gain en performance.

RECOMMANDATIONS

Afin d'améliorer la stabilité de la simulation et mieux aider au choix du moteur, il serait pertinent de modifier la modélisation du moteur en incluant une limite de couple, ou une modélisation plus honnête de la physique d'un moteur DC sans balais afin d'éviter des pics de force de propulsion. Ces pics de force surviennent principalement à très basse vitesse et induisent des accélérations extrêmes sur un pas de temps d'intégration, et ces accélérations extrêmes sont une cause directe d'instabilité. D'un autre côté, l'implémentation d'un pas de temps variable permettrait également de venir diminuer les instabilités en permettant de réduire le pas de temps lorsque la solution varie rapidement et de l'augmenter lorsqu'elle est plus stable. Cela pourrait également améliorer la vitesse de calcul de la simulation. L'implémentation d'un contrôleur sur la puissance d'assistance au lieu de l'imposer serait une avenue intéressante pour permettre au véhicule d'essayer de suivre la commande de puissance plutôt que de l'imposer.

L'effet de la stratégie de gestion de l'énergie à travers différentes fonctions de contrôle (au niveau de la batterie et de l'assistance ou autre) devrait être étudié. Ici, seulement une stratégie combinant deux fonctions de contrôle a été étudiée. Différentes formes de courbes de fonctions de contrôle devraient être explorées : linéaires, polynomiales, par segments, etc. Elles devraient également être étudiées seules et en combinaison pour étudier leurs impacts respectifs et combinés.

Différents scénarios d'accessibilité à la recharge devraient être explorés. Certes, dans une application où la recharge n'est pas possible, le VAE solaire est pertinent. Dans d'autres applications, avec un accès plus ou moins fréquent à la recharge, la pertinence du VAE solaire n'est peut-être pas justifiable par rapport au VAE conventionnel et une seconde batterie. Dans un contexte urbain, pour de petits déplacements, le VAE solaire est certainement moins justifiable, alors qu'il est facile de recharger fréquemment. Déterminer dans quels cas son

apport en performance est justifiable par rapport à l'alternative conventionnelle est important afin d'éviter d'intégrer du PV là où il n'est pas requis.

ANNEXE I

CONTENU DES FICHIERS TMY ET DES MASQUES D'HORIZONS.

Le tableau suivant présente un extrait de ce qui se trouve dans un fichier TMY. Un seul jour de l'année y est présenté et toutes les colonnes sont présentées :

Tableau A I-1 Une journée extraite d'un fichier TMY

time(UTC)	temp air	relative h	ghi	dni	dni	IR(h)	wind spe
2017-01-	-1.91	85.94	0	0	0	285.7	3.45
2017-01-	-1.5	86.37	0	0	0	287.77	3.55
2017-01-	-1.08	86.81	0	0	0	289.84	3.64
2017-01-	-0.67	87.24	0	0	0	291.91	3.74
2017-01-	-0.25	87.67	0	0	0	293.98	3.83
2017-01-	0.16	88.1	0	0	0	296.05	3.93
2017-01-	0.58	88.54	0	0	0	298.12	4.02
2017-01-	0.99	88.97	0	0	0	300.2	4.12
2017-01-	0.58	92	0	0	0	287.95	3.72
2017-01-	0.38	88.5	0	0	0	265.3	4.48
2017-01-	0.18	85.15	0	0	0	266.85	5.17
2017-01-	-0.16	88.45	0	0	0	250.2	6
2017-01-	-0.6	88.45	0	0	0	267.45	6.14
2017-01-	-1.18	85	60.8	434.47	40.1	280.4	6.34
2017-01-	-1.95	78.35	136.25	208.81	98.55	271.1	6.48
2017-01-	-2.61	75.2	217.45	403.16	103.7	270.15	6.41
2017-01-	-3.03	75.1	296.1	499.69	123.45	241.15	5.79
2017-01-	-3.04	72.1	325.05	580.74	112.3	234.95	5.79
2017-01-	-2.8	69.35	305.4	620.04	92.6	227.75	5.72
2017-01-	-2.46	72.25	209.75	530.66	62.4	212.85	4.62
2017-01-	-2.52	72.25	86.65	307.36	33.1	209.2	4.07
2017-01-	-3.1	75.1	2	0	2	208.6	3.17
2017-01-	-4.02	78.05	0	0	0	208.2	2.28
2017-01-	-4.95	81.2	0	0	0	207.65	1.72

wind dire	pressure	Month Da	Month Da
145	100100	2025-01-	1.74E+09
157	100040	2025-01-	1.74E+09
165	99960	2025-01-	1.74E+09
174	99920	2025-01-	1.74E+09
182	99870	2025-01-	1.74E+09
186	99840	2025-01-	1.74E+09
195	99830	2025-01-	1.74E+09
208	99950	2025-01-	1.74E+09
226	100010	2025-01-	1.74E+09
239	100050	2025-01-	1.74E+09
249	100170	2025-01-	1.74E+09
257	100350	2025-01-	1.74E+09
262	100550	2025-01-	1.74E+09
269	100740	2025-01-	1.74E+09
273	100940	2025-01-	1.74E+09
274	101120	2025-01-	1.74E+09
271	101270	2025-01-	1.74E+09
269	101360	2025-01-	1.74E+09
267	101460	2025-01-	1.74E+09
262	101610	2025-01-	1.74E+09
262	101750	2025-01-	1.74E+09
264	101860	2025-01-	1.74E+09
266	101970	2025-01-	1.74E+09
258	102060	2025-01-	1.74E+09

Le tableau suivant présente un fichier de profil d'horizon en intégralité :

Tableau A I-2 Un fichier de profil d'horizon

horizon_azimuth [deg]	horizon_elevation [deg]
0	0.4
7.5	0.4
15	0.4
22.5	0.4
30	0.4
37.5	0.8
45	0.8
52.5	0.8
60	0.8
67.5	0.8
75	0.8
82.5	1.1
90	1.1
97.5	1.1
105	1.9
112.5	1.9
120	1.9
127.5	0.8
135	0.8
142.5	1.1
150	0.4
157.5	0
165	0
172.5	0
180	0
187.5	0
195	0
202.5	0
210	0
217.5	0.4
225	0.4
232.5	0.4
240	0.4
247.5	0.4
255	0.8

horizon_azimuth [deg]	horizon_elevation [deg]
262.5	1.1
270	1.5
277.5	1.9
285	2.3
292.5	1.1
300	1.9
307.5	1.9
315	1.9
322.5	1.9
330	1.9
337.5	1.9
345	0.8
352.5	0.4

ANNEXE II

CONTENU DES FICHIERS DE RÉSULTAT DE SIMULATION. LISTE DES VARIABLES ENREGISTRÉES POUR CHAQUE PAS DE TEMPS DE SIMULATION.

Le tableau suivant présente un extrait de ce qui se trouve dans un fichier de résultats à la suite d'une simulation. Seulement quelques secondes y est présentées et toutes les colonnes sont présentées :

Tableau A II-1 Extrait d'un fichier résultat de 1296000 secondes, toutes les unités sont en kg, m, s, C sauf si autrement indiqué

simtime	Distance	Velocity	Energy [Ws]	Times_local
29107	3554.495	12.8355	2709140	2025-06-15 08:05:07-04:00
29108	3567.331	12.8579	2708671	2025-06-15 08:05:08-04:00
29109	3580.189	12.7987	2708201	2025-06-15 08:05:09-04:00
29110	3592.988	12.3773	2708299	2025-06-15 08:05:10-04:00
29111	3605.365	11.9936	2708364	2025-06-15 08:05:11-04:00
29112	3617.359	11.6828	2708398	2025-06-15 08:05:12-04:00
29113	3629.042	11.4302	2708406	2025-06-15 08:05:13-04:00
29114	3640.472	11.2174	2708393	2025-06-15 08:05:14-04:00
29115	3651.689	11.0410	2708364	2025-06-15 08:05:15-04:00
29116	3662.73	10.8963	2708321	2025-06-15 08:05:16-04:00
29117	3673.627	10.7754	2708266	2025-06-15 08:05:17-04:00
29118	3684.402	10.6694	2708203	2025-06-15 08:05:18-04:00
29119	3695.072	10.5762	2708132	2025-06-15 08:05:19-04:00
29120	3705.648	10.4943	2708053	2025-06-15 08:05:20-04:00
29121	3716.142	10.4219	2707969	2025-06-15 08:05:21-04:00
29122	3726.564	10.3577	2707879	2025-06-15 08:05:22-04:00
29123	3736.922	10.3008	2707785	2025-06-15 08:05:23-04:00
29124	3747.223	10.2507	2707687	2025-06-15 08:05:24-04:00
29125	3757.473	10.2063	2707585	2025-06-15 08:05:25-04:00
29126	3767.68	10.1671	2707480	2025-06-15 08:05:26-04:00
29127	3777.847	10.1323	2707372	2025-06-15 08:05:27-04:00

Times_UTC	lat	long	altitude	timezone	slope [rad]	direction [rad]	WindDirection [deg]
2025-06-15 12:05:07+00:00	45.50843	-73.5292	9.7653	America/T	-0.00162	0.391301	194.9381
2025-06-15 12:05:08+00:00	45.50854	-73.5292	9.7150	America/T	-0.00163	0.392956	194.9411
2025-06-15 12:05:09+00:00	45.50865	-73.5291	9.7858	America/T	0.006279	0.48441	194.9442
2025-06-15 12:05:10+00:00	45.50871	-73.529	9.9	America/T	0	1.488427	194.9472
2025-06-15 12:05:11+00:00	45.50872	-73.5288	9.9	America/T	0	1.570796	194.9503
2025-06-15 12:05:12+00:00	45.50873	-73.5287	9.9	America/T	0	1.360376	194.9533
2025-06-15 12:05:13+00:00	45.50878	-73.5285	9.9	America/T	0	1.163626	194.9564
2025-06-15 12:05:14+00:00	45.50883	-73.5284	9.9	America/T	0	1.052217	194.9594
2025-06-15 12:05:15+00:00	45.50891	-73.5283	9.9	America/T	0	0.900302	194.9625
2025-06-15 12:05:16+00:00	45.50899	-73.5282	9.9	America/T	0	0.70439	194.9656
2025-06-15 12:05:17+00:00	45.50908	-73.5282	9.9	America/T	0	0.505139	194.9686
2025-06-15 12:05:18+00:00	45.50917	-73.5281	9.9	America/T	0	0.457435	194.9717
2025-06-15 12:05:19+00:00	45.50926	-73.5281	9.9	America/T	0	0.41499	194.9747
2025-06-15 12:05:20+00:00	45.50935	-73.528	9.9	America/T	0	0.374692	194.9778
2025-06-15 12:05:21+00:00	45.50945	-73.528	9.9	America/T	0	0.358771	194.9808
2025-06-15 12:05:22+00:00	45.50954	-73.528	9.9	America/T	0	0.363373	194.9839
2025-06-15 12:05:23+00:00	45.50963	-73.5279	9.9	America/T	0	0.370666	194.9869
2025-06-15 12:05:24+00:00	45.50972	-73.5279	9.9	America/T	0	0.348618	194.99
2025-06-15 12:05:25+00:00	45.50981	-73.5279	9.9	America/T	0	0.348379	194.9931
2025-06-15 12:05:26+00:00	45.5099	-73.5278	9.9	America/T	0	0.348141	194.9961
2025-06-15 12:05:27+00:00	45.50999	-73.5278	9.9	America/T	0	0.347904	194.9992

WindSpeed	Pressure [Pa]	Temperature [C]	dni	ghi	dhi	Relativewindspeed	motor power
2.206731	100558.3	14.5514	18.68183	125.4208	115.8837	2.187943	500
2.206775	100558.3	14.5516	18.69721	125.4476	115.9004	2.187524	500
2.20682	100558.3	14.5518	18.71259	125.4743	115.9172	2.15189	500
2.206865	100558.3	14.552	18.72797	125.5011	115.9339	0.742714	-68.2838
2.20691	100558.3	14.5522	18.74335	125.5279	115.9506	0.56934	-34.9077
2.206955	100558.3	14.5524	18.75873	125.5547	115.9673	1.002264	-3.43387
2.207	100558.3	14.5526	18.77411	125.5814	115.9841	1.367415	22.29215
2.207045	100558.3	14.5528	18.78949	125.6082	116.0008	1.551653	42.72613
2.20709	100558.3	14.553	18.80488	125.635	116.0175	1.771408	59.59139
2.207135	100558.2	14.5532	18.82026	125.6618	116.0342	1.993898	73.32996
2.20718	100558.2	14.5534	18.83564	125.6886	116.0509	2.141862	84.44082
2.207225	100558.2	14.5536	18.85102	125.7153	116.0677	2.164908	93.61198
2.20727	100558.2	14.5538	18.8664	125.7421	116.0844	2.181272	101.57
2.207315	100558.2	14.554	18.88178	125.7689	116.1011	2.193167	108.4973
2.20736	100558.2	14.5542	18.89716	125.7957	116.1178	2.196918	114.5422
2.207405	100558.2	14.5544	18.91254	125.8224	116.1346	2.195964	119.844
2.20745	100558.2	14.5546	18.92792	125.8492	116.1513	2.194327	124.5111
2.207494	100558.2	14.5548	18.9433	125.876	116.168	2.199147	128.6242
2.207539	100558.2	14.555	18.95868	125.9028	116.1847	2.199248	132.2304
2.207584	100558.2	14.5552	18.97406	125.9296	116.2014	2.199348	135.4068
2.207629	100558.2	14.5554	18.98944	125.9563	116.2182	2.199448	138.2056

POA/radiance	Solarpower
124.7859	30.13579
124.8107	30.14178
124.8074	30.14099
124.873	30.15683
124.8979	30.16285
124.9229	30.16887
124.9478	30.17489
124.9727	30.18091
124.9977	30.18693
125.0226	30.19295
125.0475	30.19897
125.0724	30.20499
125.0973	30.21101
125.1223	30.21703
125.1472	30.22305
125.1721	30.22906
125.197	30.23508
125.222	30.2411
125.2469	30.24712
125.2718	30.25314
125.2967	30.25917

ANNEXE III

CALCUL DE COEFFICIENT DE TRAINÉE AÉRODYNAMIQUE.

Le calcul d'approximation d'un coefficient de résistance aérodynamique suit le raisonnement suivant :

1. Du tableau 7.3 de White (2011), *Drag of Three-Dimensional Bodies at $Re \geq 10^4$* , un CdA pour un cycliste en position normale est de 0,51. De Wilson & Schmidt (2020), un CdA pour un cycliste et vélo de ville est de 0,63 et de 0,40 pour un cycliste et vélo de route.
2. Assumant un CdA de 0.51, et une hypothèse conservatrice que des portes bagages traditionnels augmentent ce coefficient de 10 %, un cycliste avec son kit de cyclotourisme aurait un CdA de 0.561.
3. Assumant un concept de remorque à assistance électrique solaire en forme de boîte sans arrêtes arrondies, d'un volume de 140 litres ($L \times H \times l$: $1 \times 0,35 \times 0,4$ m) et un Cd de 0,86, une surface frontale de $0,14 \text{ m}^2$ et un CdA de 0,1204 sont calculés pour la remorque seule.

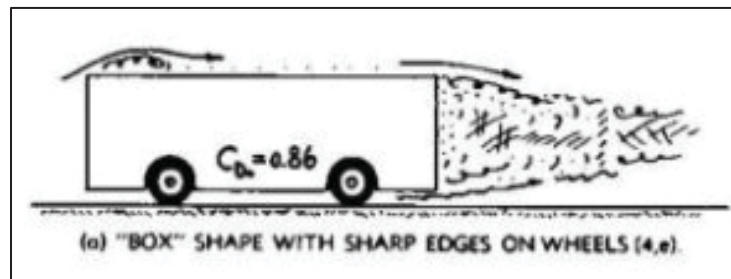


Figure A III-1 Cd d'une boîte sans rayons sur roues
Tiré de Hoerner (1965)

4. De Spoelstra et al. (2021), la réduction de drag d'un cycliste dans le sillon d'un autre cycliste est de 66 %. Cette réduction est appliquée au CdA de la remorque pour ensuite le combiner avec celui d'un cycliste avec bagages. Pour un cyclotouriste avec remorque, un CdA de 0,599631 est calculé ($0,561 + 0,1204 \times 0,33$).

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adventure Travel Trade Association. (2014). *2014 Cycling Survey* (p. 46). Adventure Travel Trade Association (ATTA). https://learn.adventuretravel.biz/research/2014-cycling-survey?utm_source=chatgpt.com
- Aevon trailers. (2025). *Trailer STD 100*. Aevon Trailers. <https://aevon-trailers.com/en/product/trailer-std-100/>
- Anderson, K. S., Hansen, C. W., Holmgren, W. F., Jensen, A. R., Mikofski, M. A., & Driesse, A. (2023). pvlb python: 2023 project update. *Journal of Open Source Software*, 8(92), 5994. <https://doi.org/10.21105/joss.05994>
- Apostolou, G., Reinders, A., & Geurs, K. (2018). An Overview of Existing Experiences with Solar-Powered E-Bikes. *Energies*, 11(8), 2129. <https://doi.org/10.3390/en11082129>
- Asrori, A., Winoko, Y. A., Subagiyo, S., Udianto, P., & Eryk, I. H. (2023). Design and Development of Hybrid Solar E-Bike for Sustainable Green Transportation. *Journal of Applied Engineering Science*, 21(4). <https://doi.org/10.5937/jaes0-45297>
- Bachche, A. B., & Hanamapure, N. S. (2012). Design and development of solar assisted bicycle. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(6). https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Design%20and%20development%20of%20solar%20assisted%20bicycle&author=A.B.%20Bachche&publication_year=2012&pages=452-457
- Barcellona, S., Colnago, S., Ferri, E., & Piegari, L. (2023). Evaluation of Dual-Chemistry Battery Storage System for Electric Vehicles Charging Stations. *19th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2023, October 24, 2023 - October 27, 2023, 2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2023 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023.10403281>
- Bhavani, T., Santhosh, K., Dhiraj, K., & Udai, S. (2015). Novel Design of Solar Electric Bicycle with Pedal Assistance. *International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, 2(4).
- Bicer, E., Aksoz, A., Bakar, R., Odabai, C., Vonk, W., Soares, M. I., Goncalves, R., Lourenco, E., Uzel, A., Aksoy, T., Haste, Z. O., Oral, B., Erolu, O., Asal, B., & Oyucu, S. (2025).

- Solid-State Batteries: Chemistry, Battery, and Thermal Management System, Battery Assembly, and Applications—A Critical Review. *Batteries*, 11(Compendex). <https://doi.org/10.3390/batteries11060212>
- Bosch. (2025). *BOSCH battery options*. <https://www.bosch-ebike.com/ca/products/batteries>
- Bourne, J. E., Cooper, A. R., Kelly, P., Kinnear, F. J., England, C., Leary, S., & Page, A. (2020). The impact of e-cycling on travel behaviour: A scoping review. *Journal of Transport & Health*, 19, 100910. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100910>
- Bridgestone World Solar Challenge. (2025). Bridgestone World Solar Challenge. <https://worldsolarchallenge.org/home>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Egan, R., Julienne, H., & Caulfield, B. (2025). Finding a place for the e-cargo bike: The parking and insurance practices of owners in Ireland. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, 5, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.jcmr.2025.100078>
- Egiguren, J., Nieuwenhuijsen, M. J., & Rojas-Rueda, D. (2021). Premature Mortality of 2050 High Bike Use Scenarios in 17 Countries. *Environmental Health Perspectives*, 129(12), 127002. <https://doi.org/10.1289/EHP9073>
- Eijgelaar, E., & Peeters, P. (2014). Bicycle tourism. In *Encyclopedia of Tourism* (pp. 1–2). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01669-6_240-1
- Fishman, E., & Cherry, C. (2016). E-bikes in the Mainstream: Reviewing a Decade of Research. *Transport Reviews*, 36(1), 72–91. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069907>
- Gardashov, E., Eminov, M., Kara, G., & Gardashov, R. (2025). Simulation and visualizations of solar car motion along the road. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 271, 106524. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106524>
- Göran Smith, Helena K. Strömberg, & Pontus Wallgren. (2017). Electric Bicycle Adoption: Opportunities and Requirements. In Pontus Wallgren & Björn Sanden (Eds.), *System Perspectives on Electromobility* (Edition: 2, pp. 181–190). Chalmers University of Technology. https://www.researchgate.net/publication/320611992_Electric_Bicycle_Adoption_Opportunities_and_Requirements

- GRIN Technologies. (2025). *GRIN Technologies*. <https://ebikes.ca/>
- Havran, M. (2022, February 9). Technical Stuff. *SOLAR Ebike*. <https://solare.bike/technical-stuff/>. Consulté le 2025-04-18.
- Hassanpour, A., & Bigazzi, A. (2024). Operating speed distributions in off-street cycling facilities by vehicle type and motorization. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, 2, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.jcmr.2024.100021>
- Huld, T., Paietta, E., Zangheri, P., & Pinedo Pascua, I. (2018). Assembling Typical Meteorological Year Data Sets for Building Energy Performance Using Reanalysis and Satellite-Based Data. *Atmosphere*, 9(2), 53. <https://doi.org/10.3390/atmos9020053>
- Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86(6), 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>
- Hung, N. B., Jaewon, S., & Lim, O. (2017). A study of the effects of input parameters on the dynamics and required power of an electric bicycle. *Applied Energy*, 204, 1347–1362. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.025>
- Hung, N. B., Sung, J., Kim, K., & Lim, O. (2017). A Simulation and Experimental Study of Operating Characteristics of an Electric Bicycle. *Energy Procedia, 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8-11 October 2016, Beijing, China*, 105, 2512–2517. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.723>
- Hung, N. B., Sung, J., & Lim, O. (2018). A simulation and experimental study of operating performance of an electric bicycle integrated with a semi-automatic transmission. *Applied Energy*, 221, 319–333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.195>
- Hung, N. B., & Lim, O. (2020). A review of history, development, design and research of electric bicycles. *Applied Energy*, 260, 114323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>
- Innovators Educational Foundation. (2026). *Organizers of the American Solar Challenge and Formula Sun Grand Prix*. Innovators Educational Foundation. <https://www.americansolarchallenge.org/>

- Jacob Korn, Amy Plovnick, Jason Sydoriak, & Alex Wilkerson. (2023). Electric Bicycle (E-bike) Trends, Impacts, and Opportunities: Literature Review Summary (No. FHWA-HEP-23-033; p. 47). Federal Highway Administration Office of Human Environment.
- Jensen, A. R., Anderson, K. S., Holmgren, W. F., Mikofski, M. A., Hansen, C. W., Boeman, L. J., & Loonen, R. (2023). pvlib iotools—Open-source Python functions for seamless access to solar irradiance data. *Solar Energy*, 266, 112092. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112092>
- Jones, L. R., Bennett, C., MacArthur, J. H., & Cherry, C. R. (2024). Consumer purchase response to e-bike incentives: Results from a nationwide stated preference study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129, 104114. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104114>
- Jones, T., Harms, L., & Heinen, E. (2016). Motives, perceptions and experiences of electric bicycle owners and implications for health, wellbeing and mobility. *Journal of Transport Geography*, 53, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.04.006>
- Kowalski, S. Sample structural solution for a city tricycle with an additional solar drive. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2020, 109, 85-92. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.109.8>.
- Lamont, M. (2009). Reinventing the Wheel: A Definitional Discussion of Bicycle Tourism. *Journal of Sport & Tourism*, 14(1), 5–23. <https://doi.org/10.1080/14775080902847363>
- Larry vs Harry. (2025). *Original Bullitt*. Larry vs Harry. <https://larryvsharry.com/products/original-bullitt>
- Lumsdon, K. (1996). There's no business like big business. *Hospitals & Health Networks / AHA*, 70(12), 27–28.
- Manca, R., Tramacere, E., Favelli, S., Tonoli, A., & Camosi, L. (2023). Impact of Rolling Resistance Modeling on Energy Consumption for a Low Voltage Battery Electric Vehicle. *2023 International Symposium on Electromobility (ISEM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISEM59023.2023.10334888>
- MacArthur, J., Dill, J., & Person, M. (2014). Electric Bikes in North America: Results of an Online Survey. *Transportation Research Record*, 2468(1), 123–130. <https://doi.org/10.3141/2468-14>

- MacArthur, J., Harpool, M., Schepke, D., & Cherry, C. (2018). *A North American Survey of Electric Bicycle Owners*. Transportation Research and Education Center. <https://doi.org/10.15760/trec.197>
- MacArthur, J., Kobel, N. (2014). *Regulations of E-Bikes in North America: A POLICY REVIEW* (A POLICY REVIEW NITC-RR-564; p. 59). National Institute for Transportation and Communities (NITC).
- Mahle. (2025). *MAHLE X20 System*. MAHLE SmartBike Systems. <https://mahle-smartbike.com/x20/>
- Martinez, A. (2025). PVGIS Photovoltaic Geographical Information System. Ispra, Europe: European Commission.
- Mason, J., Fulton, L., & McDonald, Z. (2015). *A Global High Shift Cycling Scenario: The Potential for Dramatically Increasing Bicycle and E-bike Use in Cities Around the World, with Estimated Energy, CO₂, and Cost Impacts*. Institute for Transportation and Development Policy (ITDP) and University of California, Davis.
- McGregor, D., Samsons, A., Millar, M., Pudney, P., Curlis, S., & Watkins, S. (2022). Design of the Body and Structure for a Practical and Highly Efficient Solar-Electric Sports Car: SAE Technical Paper 2022-01-5038. *SAE International*. <https://doi.org/10.4271/2022-01-5038>
- McQueen, M., & Cherry, C. (2019). *How E-Bike Incentive Programs are Used to Expand the Market*. Transportation Research and Education Center (TREC). <https://doi.org/10.15760/trec.223>
- Mishra, K. S., Gadhawe, S. V., Chaudhari, D. C., Varma, B., & Barve, S. B. (2016). (PDF) Design and Development of Solar Hybrid Bicycle. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4. https://www.researchgate.net/publication/305683710_Design_and_Development_of_Solar_Hybrid_Bicycle
- Philips, Ian, Cairns, Sally, De Séjournet, Alice, Anable, Jillian, Azzouz, Labib, & Behrendt, Frauke. (2025). *E-Cargo Bikes as a Personal Transport Mode in the UK: Insights from National Surveys and Suburban Trials*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000727935>

- Potter, J. (2022). Extending the Range of Electric Vehicles Through the Use of a Dual-Chemistry Battery System. *SAE 2022 Annual World Congress Experience, WCX 2022, April 5, 2022 - April 7, 2022, SAE Technical Papers*, (2022). <https://doi.org/10.4271/2022-01-0704>
- Replogle, M. A., & Fulton, L. M. (2014). *A Global High Shift Scenario: Impacts And Potential For More Public Transport, Walking, And Cycling With Lower Car Use*. Institute for Transportation and Development Policy (ITDP) and University of California, Davis
- Riese & Müller. (2025). *The Load5 60 – Space for everything that matters | Riese & Müller*. Riese & Müller. <https://www.r-m.de/en-se/bikes/load5-60/>
- Ritchie, B. W. (1998). Bicycle tourism in the South Island of New Zealand: Planning and management issues. *Tourism Management*, 19(6), 567–582. [https://doi.org/10.1016/S0261-5177\(98\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0261-5177(98)00063-6)
- SAAQ. (2024). *En vélo électrique*. SAAQ. <https://saaq.gouv.qc.ca/securite-routiere/moyens-deplacement/velo-electrique>
- Sathisha K. & Deepesh Kanchan. (2017). Concept of Solar and Pedal Powered Electric Bicycle. *Electrical and Electronic Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.5923/J.EEE.20170702.03>
- Sayyad, A., Ajagekar, P., Patil, M., Ambewadkar, R. E., & Kukade, P. (2016). SOLAR POWERED ELECTRIC BICYCLE WITH KINETIC ENERGY RESTORATION SYSTEM (KERS). *International Journal Of Electrical, Electronics And Data Communication*, 4(6).
- Schneider, A. (2003). *GPS Visualizer*. <https://www.gpsvisualizer.com/>
- Shaheen, Susan, Cohen, Adam, & Broader, Jacquelyn. (2022). Shared Micromobility: Policy, Practices, and Emerging Futures. In *Routledge Companion to Cycling* (1st ed.). Routledge.
- Simonsen, P., & Jørgensen, B. (1998). *Cycle tourism: an economic and environmental sustainable form of tourism?* Unit of Tourism Research, Research Centre of Bornholm.
- SolarMoov. (2025). *Page d'accueil*. SolarMoov. <https://solarmoov.com/>
- Sornek, K., Wiercioch, J., Kurczyna, D., Figaj, R., Wójcik, B., Borowicz, M., & Wieliński, M. (2022). Development of a solar-powered small autonomous surface vehicle for

- environmental measurements. *Energy Conversion and Management*, 267, 115953. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115953>
- Spoelstra, A., Sciacchitano, A., Scarano, F., & Mahalingesh, N. (2021). On-site drag analysis of drafting cyclists. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 219, 104797. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104797>
- Tozluoğlu, Ç., Liao, Y., & Sprei, F. (2024). Potential of e-bikes to replace passenger car trips and reduce greenhouse gas emissions. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, 2, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.jcmr.2024.100043>
- Tétrault-Leclerc, M., Tétrault-Leclerc, S., (2025). Solar-EV [code source]. Repéré à <https://github.com/MerlinTetraultLeclerc/Solar-EV>
- The Sun Trip. (2025). *Solar Bike Adventures*. The Sun Trip. <https://www.thesuntrip.com/en/>
- U.S. Department of Energy; Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (n.d.). *Alternative Fuels Data Center: Active Transportation and Micromobility*. Retrieved September 10, 2025, from <https://afdc.energy.gov/conserve/active-transportation>
- Weston, S. (2025). *State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology 2024 Edition* (NASA/TP—20250000142). NASA. <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/>
- Zhou, J., Li, Z., Dong, S., Sun, J., & Zhang, Y. (2023). Visualization and bibliometric analysis of e-bike studies: A systematic literature review (1976–2023). *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 122, 29. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103891>
- Zorn, W. (2008). *Bicycle Speed (Velocity) And Power Calculator*. kreuzotter. <http://kreuzotter.de/english/espeed.htm>

BIBLIOGRAPHIE

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Hoerner, S. F. (1965). *Fluid-dynamic drag: Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*.
- Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1994). *Race Car Vehicle Dynamics* (7th ed.). SAE International.
- Milliken, W. F., Kasprzak, E. M., Milliken, D. L., & Metz, L. D. (2003). *Race Car Vehicle Dynamics—Problems, Answers and Experiments*. SAE International.
- Reinders, A. (2020). *Designing with Photovoltaics* (1st ed.). Taylor & Francis Group.
<https://www.taylorfrancis.com/reader/download/4ce0b24c-362e-4986-8cc2-758e9be9226c/book/epub?context=ubx>
- Wilson, D. G., & Schmidt, T. (with Papadopoulos, J.). (2020). *Bicycling Science* (4th ed.). The MIT Press.

