

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MODÉLISATION ET GESTION ÉNERGÉTIQUE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE
HYBRIDE À BASSE VITESSE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
LOUBNA LAATIOUI

MAI 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

Direction de recherche :

Alben Cardenas

Directeur de recherche

Jury d'évaluation

Afef Bennani-Ben Abdelghani,
Université de Tunis El Manar, Tunisie

Évaluatrice Externe

Miloud Bagaa, Université du Québec à Trois-Rivières

Évaluateur

Alben Cardenas, Université du Québec à Trois-Rivières

Directeur de recherche

Résumé

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans la continuité des travaux portant sur la gestion optimale de l'énergie embarquée dans les véhicules électriques et hybrides.

La transition énergétique actuelle favorise le développement des véhicules électriques, considérés comme une solution plus écologique et durable par rapport aux véhicules à moteur thermique. Cependant, les batteries de ces véhicules demeurent un élément clé du système. Leur capacité de stockage, bien qu'en nette amélioration ces dernières années, reste un enjeu important dans certains contextes d'utilisation, malgré des autonomies désormais de plus en plus comparables à celles des véhicules thermiques.

Notre recherche se concentre spécifiquement sur le développement et l'optimisation d'un véhicule électrique hybride à basse vitesse. Ce type de véhicule, destiné aux environnements urbains ou à des applications spécifiques nécessitant des vitesses réduites, peut tirer parti de solutions hybrides pour améliorer son efficacité énergétique et prolonger sa durée de vie.

Afin de surmonter les limitations des batteries, nous explorons des solutions permettant de concevoir un système hybride intégrant des sources d'énergie renouvelables, telles qu'un système photovoltaïque, une batterie et une pile à combustible, tout en conservant la possibilité de recharge via le réseau électrique. Cette approche vise à maximiser l'autonomie et la performance du véhicule électrique hybride à basse vitesse.

L'objectif principal de ce projet est d'analyser le comportement énergétique de ce système hybride (PV-Bat-PAC) et de proposer une stratégie de gestion énergétique. Cette stratégie permettra de déterminer la source d'énergie à solliciter à chaque instant, afin de réduire les

risques de dégradation et de vieillissement des composants, tout en assurant une continuité de service optimale pour le système de propulsion. En optimisant les périodes de recharge et en gérant efficacement les flux énergétiques, nous visons à accroître l'autonomie de ces véhicules et à renforcer leur viabilité comme alternative aux véhicules thermiques.

Ce travail de recherche constitue une contribution essentielle au développement de véhicules électriques hybrides à basse vitesse plus performants et durables, participant activement à la transition vers des modes de transport plus écologiques et soutenables.

Mots-clés : Véhicules électriques, panneau photovoltaïque, hybride, pile à combustible, systèmes de gestion de l'énergie.

Abstract

The research work presented in this manuscript builds upon previous studies on the optimal management of onboard energy in electric and hybrid vehicles.

The current energy transition encourages the development of electric vehicles as a more ecological and sustainable solution compared to internal combustion engine vehicles. However, the batteries of these vehicles remain a key component of the system. Although their storage capacity has significantly improved in recent years, it still represents an important challenge in certain usage conditions, despite driving ranges that are now increasingly comparable to those of conventional vehicles.

Our research specifically focuses on the development and optimization of a low-speed hybrid electric vehicle. This type of vehicle, intended for urban environments or specific applications requiring reduced speeds, can benefit from hybrid solutions to improve energy efficiency and extend its service life.

To overcome the limitations of batteries, we explore optimal solutions for designing a hybrid system that integrates renewable energy sources, such as a photovoltaic system, a battery, and a fuel cell, while maintaining the option of recharging via the electrical grid. This approach aims to maximize the range and performance of the low-speed hybrid electric vehicle.

The main objective of this project is to analyze the energy behavior of this hybrid system (PV-Bat-FC) and to propose an energy management strategy. This strategy determines which energy source should be used at each instant, in order to reduce the risks of degradation and aging of the components, while ensuring optimal continuity of service for the propulsion system. By optimizing charging periods and efficiently managing energy

flows, we aim to increase the range of these vehicles and enhance their viability as an alternative to combustion engine vehicles.

This research work represents a key contribution to the development of more efficient and durable low-speed hybrid electric vehicles, actively supporting the transition to more ecological and sustainable modes of transportation.

Keywords: Electric Vehicles, Photovoltaic Panel, Hybrid, Fuel Cell, Energy Management Systems.

Remerciements

On ne réussit jamais seul. Derrière chaque accomplissement, qu'il soit grand ou petit, se trouvent des personnes qui soutiennent, guident et inspirent.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur Alben Cardenas, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité, sa bienveillance et la qualité de ses conseils tout au long de ce projet. Il a été d'un grand soutien, tant sur le plan académique qu'humain, en facilitant notamment notre intégration au sein du milieu universitaire. Je le remercie également pour son appui dans l'obtention d'un financement ayant soutenu la réalisation de ce projet.

Je tiens également à remercier l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) pour le cadre académique stimulant, les ressources mises à disposition et le soutien financier accordé durant mes études. L'environnement d'apprentissage, les laboratoires, les outils pédagogiques et les plateformes de recherche ont joué un rôle essentiel dans la réalisation de ce travail.

Dans cette même perspective, je remercie le Département de génie électrique et génie informatique (GÉGI) pour la qualité de l'enseignement reçu. Je suis reconnaissante envers les professeurs qui ont su transmettre, avec rigueur et passion, des connaissances solides ayant enrichi ma formation tant sur le plan théorique que pratique.

Au-delà du cadre universitaire, je souhaite adresser quelques mots à celles et ceux qui m'ont accompagnée, à un moment ou à un autre, et dont la présence, discrète ou lointaine, m'a apporté un soutien précieux tout au long de ce cheminement.

À la mémoire de mon cher papa, qui m'a tant appris et continue de m'inspirer.

À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa force silencieuse et son soutien constant dans les moments de doute et d'incertitude.

À mon frère, dont la présence rassurante à mes côtés est l'une des plus belles choses que la vie m'ait offertes.

À ma famille, qui a toujours été pour moi une source d'équilibre et de joie, à mes amis, ainsi qu'à toutes les personnes qui me sont les plus chères. Sans vous, cette expérience n'aurait pas été possible.

Enfin, une pensée toute particulière à mon enseignant de deuxième année du primaire, Monsieur Saïd Lami, pour son accompagnement fidèle depuis l'enfance et pour ses encouragements constants, qui demeurent pour moi une précieuse source d'inspiration.

Avant-propos

Le présent document constitue le mémoire de recherche intitulé « Modélisation et gestion énergétique d'un véhicule électrique hybride à basse vitesse ». Cette étude a été réalisée à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) et entamée en septembre 2023, sous la direction de Monsieur Alben Cardenas, professeur à l'UQTR.

Réalisé par Loubna Laatioui, étudiante inscrite au programme 3824 - Maîtrise en génie électrique (avec mémoire), ce mémoire vise à modéliser un véhicule électrique hybride à basse vitesse et à développer une stratégie de gestion énergétique optimale, en intégrant une batterie, une pile à combustible, un système photovoltaïque et une connexion au réseau électrique, permettant d'améliorer l'autonomie du véhicule, de préserver la durée de vie des composants et de favoriser une mobilité durable et silencieuse, adaptée aux besoins des campus universitaires, des complexes résidentiels et des zones touristiques.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
Avant-propos	ix
Table des matières	x
Liste des tableaux	xiv
Liste des figures	xv
Définitions	xix
Nomenclature	xxi
Chapitre 1 - Introduction générale	1
Introduction générale	1
1.1 Contexte et motivations de la recherche	1
1.2 Analyse fonctionnelle et objectifs du projet	4
1.2.1 Approche PFMS	6
1.2.2 Objectifs de recherche	6
1.3 Planification et méthodologie de recherche	8
1.4 Structure du mémoire	11
1.5 Conclusion	12

Chapitre 2 - Revue de littérature	13
2.1 Introduction	13
2.2 Genèse et évolution des véhicules électriques	13
2.3 L'émergence de l'hybridation dans les véhicules électriques	16
2.4 Classification architecturale des VHE	18
2.5 Degrés d'hybridation dans les VHE	20
2.6 Les véhicules à basse vitesse : vers une hybridation énergétique (VEHBV)	22
2.7 Contraintes et défis inhérents aux architectures énergétiques multi-sources dédiées aux VEHBV	24
2.7.1 Inexistence d'un cycle de conduite normalisé spécifique aux VEHBV	25
2.7.2 Variabilité de la demande et compromis énergétiques	26
2.8 Stratégies de gestion énergétique des véhicules hybrides électriques	27
2.8.1 Stratégies basées sur des règles	28
2.8.2 Stratégies basées sur l'optimisation	30
2.8.3 Stratégies prédictives	32
2.8.4 Stratégies basées sur l'apprentissage	33
2.9 Conclusion	33
Chapitre 3 - Description et modélisation des composants du système multi-sources du VEHBV	35
3.1 Introduction	35
3.2 Conception et expérimentation d'un cycle de conduite représentatif pour le VEHBV	35
3.3 Modèle dynamique du VEHBV	39
3.3.1 Représentation mathématique du modèle dynamique du VEHBV ..	39

3.3.2	Caractéristiques du prototype de VEHBV étudié	43
3.4	Modélisation du système de stockage d'énergie (Batterie)	48
3.5	Modélisation des panneaux photovoltaïques (PV)	52
3.6	Modélisation de la pile à combustible (PAC)	59
3.6.1	Généralités et choix technologique de la pile à combustible	59
3.6.2	Modélisation électrochimique et dynamique de la pile à combustible PEM	61
3.7	Configuration énergétique et méthodologie de dimensionnement du VEHBV	65
3.8	Conclusion	69
 Chapitre 4 - Gestion optimisée de l'énergie dans les véhicules électriques hybrides		
	à basse vitesse	71
4.1	Introduction	71
4.2	Conception et logigramme de la stratégie heuristique de gestion énergétique	71
4.3	Analyse et résultats de simulation du système multi-sources du VEHBV sous conditions de fonctionnement représentatives	76
4.3.1	Performance du système multi-sources en régime nominal avec contribution photovoltaïque	76
4.3.2	Comportement du système multi-sources avec sollicitation de la pile à combustible	83
4.4	Algorithme génétique pour la sélection optimale de la borne de recharge ..	87
4.4.1	Description générale de l'algorithme génétique	87
4.4.2	Adaptation de l'algorithme au problème étudié	89
4.4.3	Formulation du problème d'optimisation	90
4.4.4	Résultats de simulation et validation du GA	93
4.5	Conclusion	100

Chapitre 5 - Conclusion générale et perspectives	102
Annexe A - Fiche technique du PV Renogy 100 W	111
Annexe B - Données climatiques du site expérimental issues de PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), qui s'appuie sur les données climatiques ERA5 issues de la réanalyse du Centre européen ECMWF	113
Annexe C - Fiche technique de la pile à combustible PEM 500 W (H-500)	114

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Fonctions principales (FP) et fonctions contraintes (FC) du VEHBV.	5
Tableau 1-2 Application de l'approche PFMS au projet VEHBV.	6
Tableau 1-3 Organisation des phases du projet de recherche VEHBV.	9
Tableau 3-1 Caractéristiques principales des quatre essais de conduite réalisés sur le campus de l'UQTR.	38
Tableau 3-2 Exemples de coefficients de traînée aérodynamique selon le type de véhicule.	41
Tableau 3-3 Paramètres du modèle mécanique du véhicule.	44
Tableau 3-4 Caractéristiques comparatives des principales technologies de piles à combustible.	60
Tableau 3-5 Estimation de l'ordre de grandeur du coût d'acquisition des principaux composants de la chaîne énergétique du VEHBV dans le cadre du prototypage expérimental (prix catalogue observés en février 2026).	69
Tableau 4-1 Résultats comparatifs des décisions spatiales obtenues par l'algorithme génétique.	99
Tableau 4-2 Comparaison des performances énergétiques des scénarios de recharge minimale et de recharge jusqu'au SOC_{Max} avec prise en compte du coût de la borne.	99

Liste des figures

Figure 1.1	Diagramme de la bête à cornes du VEHBV.	3
Figure 1.2	Diagramme pieuvre du VEHBV.	5
Figure 1.3	Diagramme PFMOS du projet VEHBV réalisé sur Cameo.	8
Figure 1.4	Diagramme de Gantt du projet VEHBV.	9
Figure 2.1	Charrette électrique de William Morrison, 1892.	15
Figure 2.2	Émissions totales de gaz à effet de serre dues aux transports au Canada, de 2000 à 2021.	17
Figure 2.3	Architecture série d'un VHE.	18
Figure 2.4	Architecture parallèle d'un VHE.	19
Figure 2.5	Architecture mixte d'un VHE.	20
Figure 2.6	Répartition des principales défaillances observées sur les véhicules électriques à basse vitesse (VEBV).	23
Figure 2.7	Prototypes de VEHBV développés à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR).	24
Figure 2.8	Cycle FTP-72 (a), Cycle NEDC (b), Cycle NYCC (c) et Cycle SC03 (d).	25
Figure 2.9	Cycle WLTP.	26
Figure 2.10	Classification des stratégies de gestion énergétique.	28
Figure 2.11	Schéma fonctionnel d'un contrôle à logique floue.	30
Figure 2.12	Proportion des principales stratégies de gestion énergétique basées sur l'optimisation (DP, ECMS, MPC) dans la littérature entre 2012 et 2022.	32

Figure 3.1	Trajets GPS réalisés lors des quatre essais expérimentaux sur le campus de l'UQTR.	37
Figure 3.2	Évolution de la vitesse et de la pente (alpha) – Essai #2.	38
Figure 3.3	Représentation des efforts agissant sur le véhicule en montée.	39
Figure 3.4	Visualisation comparative des coefficients C_d pour différents types de véhicules.	42
Figure 3.5	Architecture du modèle dynamique du VEHBV développé sous Simulink.	45
Figure 3.6	Trajectoires des 4 essais réalisés autour du campus de l'UQTR.	46
Figure 3.7	Évolution de la puissance de traction pour le Test #2.	47
Figure 3.8	Évolution de l'énergie de traction pour le Test #2.	47
Figure 3.9	Valeurs de densité d'énergie spécifique des batteries utilisées et des technologies futures pour les véhicules électriques.	49
Figure 3.10	Modèle PV à une diode.	52
Figure 3.11	Panneau solaire Renogy 100 W monocristallin pliable (RNG-KIT-STCS-100D-VOY20).	55
Figure 3.12	Caractéristiques I–V et P–V du module (1000 W/m ² , 25°C).	55
Figure 3.13	Influence de l'irradiance sur les courbes I–V et P–V du module.	56
Figure 3.14	Influence de la température sur les courbes I–V et P–V du module. .	57
Figure 3.15	Irradiation mensuelle obtenue à partir de PVGIS pour le site de l'UQTR.	58
Figure 3.16	Profils temporels d'irradiation solaire et de température ambiante issus des données climatiques du mois de juin.	59
Figure 3.17	Circuit électrique équivalent dynamique d'une PEMFC.	64

Figure 3.18	Tension et puissance du modèle de la pile à combustible PEM (500 W).	65
Figure 3.19	Schéma de l'architecture énergétique du véhicule électrique hybride basse vitesse (VEHBV).	66
Figure 4.1	Schéma fonctionnel de la commande de la PAC.	74
Figure 4.2	Principe de la logique à hystérésis appliquée à la PAC.	74
Figure 4.3	Logigramme de la stratégie heuristique de gestion énergétique du VEHBV.	76
Figure 4.4	Courant absorbé par la charge au cours du cycle associé au Test #1.	77
Figure 4.5	Évolution de la tension du bus continu et de sa référence au cours du Test #1.	78
Figure 4.6	Évolution de l'état de charge de la batterie SOC_{Bat} au cours du Test #1.	79
Figure 4.7	Évolution de la tension batterie V_{Bat} au cours du Test #1.	80
Figure 4.8	Résultats de simulation du générateur photovoltaïque au cours du Test #1: profils d'irradiance solaire incidente et de température de cellule, évolution du courant I_{PV} et de la tension V_{PV} en sortie du champ PV, indice de performance du MPPT, et comparaison entre la puissance fournie P_{PV} et la puissance idéale $P_{Idéale}$	82
Figure 4.9	Évolution des puissances de la charge, du générateur photovoltaïque, de la batterie et de la pile à combustible au cours du Test #1.	83
Figure 4.10	Activation des sources énergétiques et des modes EMS lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #1.	84

Figure 4.11 Évolution de l'état de charge de la batterie SOC_{Bat} lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #1.	85
Figure 4.12 Évolution des puissances des différentes sources du système multi-sources lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #1.	86
Figure 4.13 Évolution conjointe du SOC_{Bat} (a), des puissances multi-sources (b) et du SOC_{H_2} (c) lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #2.	87
Figure 4.14 Logigramme de l'algorithme génétique standard (GA).	89
Figure 4.15 Distance minimale aux bornes de recharge dans la zone étudiée. ...	94
Figure 4.16 Évolution de la valeur moyenne de la fonction objectif au cours des générations pour le Cas 4.	95
Figure 4.17 Cartes illustrant les scénarios de variation spatiale : répartition des bornes de recharge, identification des bornes admissibles et sélection de la borne optimale pour différentes positions de départ et d'arrivée.	97

Définitions

Véhicule électrique (VE) : Véhicule propulsé exclusivement par un moteur électrique alimenté par une batterie rechargeable, sans moteur thermique.

Véhicule hybride électrique (VHE) : Véhicule combinant au moins deux sources d'énergie différentes, généralement une source électrique et une autre mécanique ou chimique, afin d'améliorer l'efficacité énergétique.

Véhicule électrique hybride à basse vitesse (VEHBV) : Véhicule à propulsion 100 % électrique, limité à une vitesse maximale d'environ 40 km/h, destiné aux zones urbaines, campus universitaires ou sites touristiques.

Architecture multi-sources : Configuration énergétique intégrant plusieurs sources (batterie, pile à combustible, panneaux photovoltaïques, réseau) afin d'assurer la continuité d'alimentation et l'optimisation du rendement global.

Batterie : Dispositif électrochimique permettant de stocker l'énergie électrique et de la restituer selon les besoins du système.

Pile à combustible (PAC) : Générateur électrochimique transformant directement l'hydrogène et l'oxygène en électricité, chaleur et eau.

Panneau photovoltaïque (PV) : Dispositif convertissant directement le rayonnement solaire en énergie électrique.

Cycle de conduite : Profil vitesse–temps représentant un scénario de déplacement utilisé pour évaluer la consommation d'énergie et les performances dynamiques d'un véhicule.

Cycle WLTP : Cycle mondial harmonisé utilisé pour les essais de consommation et d'émissions, offrant une meilleure représentativité des conditions réelles de conduite.

État de charge (SOC) : Rapport entre l'énergie restante dans la batterie et sa capacité totale, exprimé en pourcentage.

Système de gestion énergétique (EMS) : Ensemble de stratégies et d'algorithmes assurant la répartition optimale de la puissance entre les sources d'énergie du véhicule.

Modélisation dynamique : Représentation mathématique du comportement mécanique et énergétique du véhicule, intégrant les forces, vitesses et flux d'énergie.

Puissance de traction : Puissance mécanique nécessaire pour assurer le déplacement du véhicule selon la résistance de la route et la vitesse imposée.

Algorithme génétique (GA) : Méthode d'optimisation inspirée de la sélection naturelle, utilisée pour rechercher la meilleure solution parmi un grand nombre de combinaisons possibles.

MATLAB/Simulink : Environnement de modélisation et de simulation de systèmes dynamiques continus et discrets, utilisé dans cette étude pour construire, paramétrer et exécuter le modèle du VEHBV.

Stateflow : Outil graphique de Simulink dédié à la modélisation de logiques décisionnelles à états finis pour les stratégies de commande et de gestion énergétique.

Autonomie : Distance maximale que le véhicule peut parcourir avant qu'une recharge ne soit nécessaire, en fonction de la capacité énergétique disponible et du profil de conduite.

Rendement énergétique : Rapport entre l'énergie utile délivrée et l'énergie totale consommée.

Durée de vie des composants : Période pendant laquelle les éléments du système conservent leurs performances nominales avant dégradation significative.

Nomenclature

Acronymes

VE	Véhicule Électrique
VHE	Véhicule Hybride Électrique
VEHBV	Véhicule Électrique Hybride à Basse Vitesse
PV	Panneau Photovoltaïque
PAC	Pile à Combustible
EMS	Energy Management System (Système de Gestion Énergétique)
GA	Algorithme Génétique
SOC	State of Charge (État de charge)
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
DC/DC	Convertisseur à courant continu

Notations générales

M	Masse totale du véhicule	[kg]
F_{tr}	Force de traction	[N]
F_{rr}	Force de résistance au roulement	[N]
$F_{aéro}$	Force de traînée aérodynamique	[N]
F_p	Force due à la pente	[N]
C_{rr}	Coefficient de résistance au roulement	[-]
C_d	Coefficient de traînée aérodynamique	[-]
A_f	Surface frontale du véhicule	[m ²]
ρ_{air}	Densité volumique de l'air	[kg/m ³]
g	Accélération gravitationnelle	[m/s ²]
V	Vitesse du véhicule	[m/s]
V_w	Vitesse du vent	[m/s]
α	Angle d'inclinaison de la pente	[rad]
r	Rayon de la roue	[m]
P_{Bat}	Puissance délivrée par la batterie	[W]
P_{PAC}	Puissance fournie par la pile à combustible	[W]
P_{PV}	Puissance fournie par le panneau photovoltaïque	[W]
G	Irradiance solaire	[W/m ²]
T_{op}	Température de fonctionnement (ambiante)	[°C]
E_{Tot}	Énergie totale produite par les sources	[Wh]
SOC_{Bat}	État de charge de la batterie	[%]
SOC_{H_2}	État de charge du réservoir d'hydrogène	[%]

Chapitre 1 - Introduction générale

1.1 Contexte et motivations de la recherche

L'adoption des véhicules électriques (VE) et des véhicules hybrides électriques (VHE) est devenue une nécessité urgente à notre époque. D'une part, l'augmentation continue du nombre de véhicules à moteur à combustion interne (ICE) entraîne une surconsommation de combustibles fossiles, aggravant les émissions de gaz à effet de serre et contribuant de manière alarmante au réchauffement climatique [1]. D'autre part, les ressources fossiles s'épuisent à un rythme préoccupant, posant de sérieux défis pour la durabilité énergétique future. Face à ces enjeux, il est essentiel de privilégier des solutions de mobilité plus respectueuses de l'environnement, telles que les VE et VHE, afin de réduire notre empreinte carbone et de favoriser une transition énergétique durable [2].

L'augmentation des émissions de CO₂, accélérée depuis la révolution industrielle, a entraîné de nombreuses conséquences néfastes : le réchauffement climatique accentuant l'effet de serre, l'acidification des océans mettant en péril les écosystèmes marins, ainsi que la multiplication des phénomènes climatiques extrêmes tels que les ouragans et les inondations. Pour atténuer ces effets, il est indispensable de mettre en œuvre des politiques de réduction des émissions de CO₂ dans les secteurs les plus polluants, notamment le transport et l'industrie [3].

L'énergie électrique, en tant que vecteur énergétique, représente une alternative stratégique pour la préservation des ressources fossiles et la réduction des émissions de polluants atmosphériques [4]. Aujourd'hui, les technologies de production, de transport et de distribution de l'électricité ont atteint un niveau de maturité élevé, favorisant son intégration croissante dans de nombreux secteurs économiques, notamment celui des transports [5]. Cependant, le stockage de l'électricité demeure un défi technologique

majeur, dans la mesure où elle ne peut être conservée directement et nécessite une conversion préalable sous une autre forme d'énergie [6]. Dans les systèmes embarqués, cette contrainte se traduit principalement par le recours aux batteries électrochimiques, dont les limitations en termes de densité énergétique constituent un facteur déterminant de l'autonomie et des performances des véhicules électriques [7].

Une solution innovante consiste à développer un système multi-sources, communément appelé système hybride d'énergie. Ce système associe plusieurs sources complémentaires afin de pallier les limites propres à chacune [8]. Dans le cas des véhicules électriques hybrides à basse vitesse (VEHBV), cette approche s'avère essentielle pour améliorer l'autonomie et satisfaire les besoins en puissance, en particulier durant les phases transitoires telles que les accélérations, les décélérations et le freinage [9].

Les VEHBV trouvent leur utilité dans divers domaines d'application, notamment le transport urbain, les services de livraison, les véhicules d'entretien en zones piétonnes ainsi que dans les parcs industriels [10]. Leur faible vitesse et leur efficacité en milieu à forte densité de circulation les rendent particulièrement adaptés à ces environnements. L'intégration de systèmes multi-sources contribue non seulement à améliorer leur autonomie, mais aussi à garantir une puissance adaptée aux besoins opérationnels variés [11]. Le diagramme présenté à la Figure 1.1, construit selon la méthode de la « bête à cornes » issue de l'analyse fonctionnelle [12], permet de représenter de manière synthétique le besoin auquel répond le VEHBV.

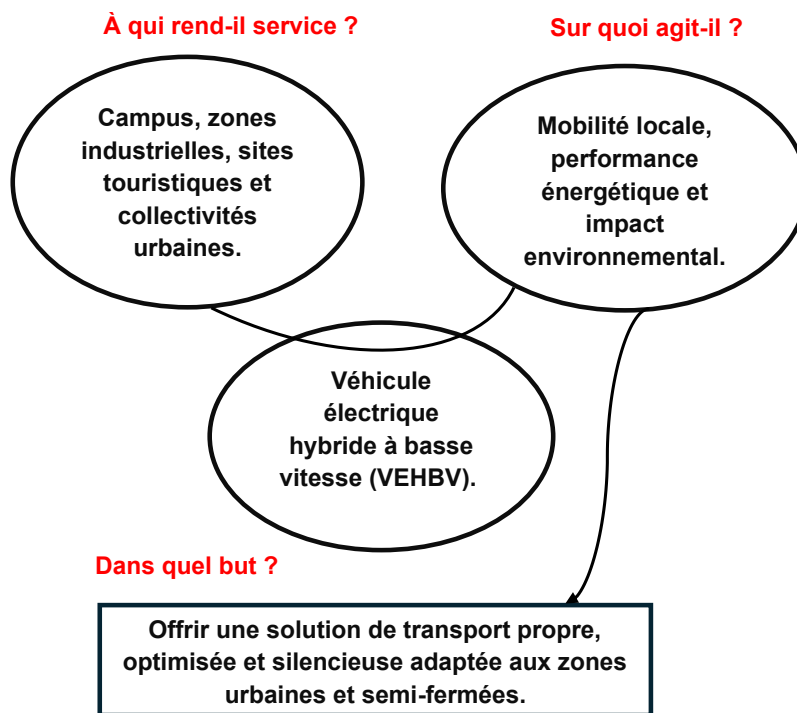


Figure 1.1 Diagramme de la bête à cornes du VEHBV.

Face aux défis environnementaux et énergétiques contemporains, il devient impératif de concevoir des solutions de mobilité durable capables de répondre aux besoins croissants de déplacement, tout en limitant leur impact écologique. Ce projet de recherche, mené au sein du laboratoire du Département de génie électrique et de génie informatique (GÉGI) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), s'inscrit pleinement dans cette dynamique d'innovation technologique et de recherche appliquée.

Il a pour objectif de répondre aux enjeux liés à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, à la dépendance aux combustibles fossiles et au réchauffement climatique, par le développement d'un véhicule électrique hybride à basse vitesse (VEHBV) respectueux de l'environnement. Ce projet mobilise une équipe multidisciplinaire composée d'étudiants aux cycles supérieurs (maîtrise et doctorat), chacun étant chargé d'un volet spécifique du développement du véhicule.

Dans ce contexte, ma contribution porte sur la modélisation du véhicule ainsi que sur le développement de stratégies avancées de gestion énergétique, exploitant trois sources d'énergie complémentaires : l'énergie solaire à travers des panneaux photovoltaïques, l'énergie chimique issue d'une pile à combustible et l'électricité du réseau, utilisée comme source de recharge auxiliaire. Le véhicule est spécifiquement conçu pour répondre aux contraintes des environnements urbains, des campus universitaires, des complexes résidentiels et des zones touristiques, où la réduction des nuisances sonores et des émissions polluantes, ainsi que le respect des limitations de vitesse, constituent des impératifs majeurs.

Ce projet s'inscrit ainsi dans une démarche de mobilité durable, en proposant une solution performante, durable et respectueuse de l'environnement. Il vise à modéliser et à optimiser la gestion énergétique d'un VEHBV dans le but d'améliorer ses performances globales et de réduire son empreinte environnementale.

1.2 Analyse fonctionnelle et objectifs du projet

Pour bien cerner les enjeux et les orientations d'un projet d'ingénierie, une analyse fonctionnelle rigoureuse s'impose. Elle permet de structurer la réflexion autour des besoins à satisfaire, des fonctions à assurer et des contraintes à respecter. Dans le cadre du présent projet, cette analyse repose sur l'approche PFMS (Problématique, Finalité, Mission, Système), complétée par une définition claire des objectifs. Cette démarche fournit un cadre méthodologique solide pour guider les choix techniques et orienter la suite du développement. Sur la base de cette méthodologie, le diagramme pieuvre du VEHBV, présenté à la Figure 1.2, formalise les interactions du système avec son environnement ainsi que les fonctions de service (FP) et les fonctions contraintes (FC) qui en résultent. Ces fonctions sont récapitulées dans le Tableau 1-1.

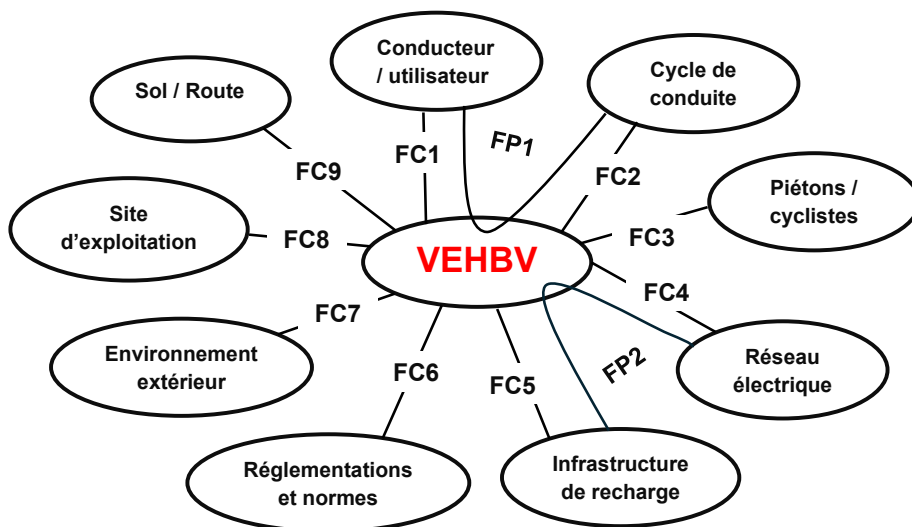


Figure 1.2 Diagramme pieuvre du VEHBV.

Tableau 1-1 Fonctions principales (FP) et fonctions contraintes (FC) du VEHBV.

Référence	Description
FP1	Assurer le transport du conducteur selon un cycle de conduite défini.
FP2	Assurer le raccordement au réseau via les infrastructures de recharge disponibles.
FC1	S'adapter aux besoins du conducteur.
FC2	S'adapter aux profils de vitesse, accélérations et arrêts.
FC3	Garantir la sécurité des usagers extérieurs.
FC4	Être conforme aux caractéristiques du réseau électrique.
FC5	S'adapter à la disponibilité et à la compatibilité des bornes de recharge.
FC6	Respecter les réglementations et normes.
FC7	Résister à l'environnement extérieur (pluie, chaleur, etc.).
FC8	S'adapter au site d'exploitation (pente, espace, etc.).
FC9	Adhérer à la surface de roulement.

1.2.1 Approche PFMS

Afin de mieux structurer la réflexion autour du projet, nous avons adopté la méthode PFMS, qui permet de clarifier la problématique, la finalité, les missions et le système étudié. Les éléments constitutifs de cette approche appliquée au projet VEHBV sont présentés dans le Tableau 1-2.

Tableau 1-2 Application de l'approche PFMS au projet VEHBV.

Problématique	Comment modéliser un VEHBV écologique, silencieux et performant pour les environnements urbains et semi-fermés, en réduisant l'impact environnemental, tout en optimisant l'autonomie, l'efficacité énergétique et la gestion des ressources disponibles ?
Finalité	Proposer une solution de mobilité durable à faible vitesse, adaptée aux campus, zones résidentielles, industrielles et touristiques, en minimisant les émissions de gaz à effet de serre et la pollution sonore.
Mission	La mission consiste à modéliser un système multi-sources en intégrant les interactions entre les panneaux photovoltaïques, la pile à combustible et la batterie, à simuler le comportement du véhicule selon différents cycles de conduite réalistes afin d'évaluer ses performances dynamiques et énergétiques, et à développer une stratégie de gestion énergétique intelligente, adaptée aux contraintes des environnements urbains et semi-fermés, et fondée sur un algorithme d'optimisation.
Système	Un véhicule électrique hybride à basse vitesse optimisé pour les trajets urbains semi-fermés, intégrant des sources d'énergie solaire, chimique et réseau, avec un système de gestion énergétique avancé.

1.2.2 Objectifs de recherche

Ce projet de recherche a pour objectif principal la modélisation et le développement d'une stratégie de gestion énergétique pour un véhicule électrique hybride à basse vitesse (VEHBV), destiné à répondre aux enjeux actuels de mobilité durable et d'efficacité énergétique.

Le système repose sur l'hybridation de trois sources complémentaires : solaire, hydrogène et réseau, intégrées au sein d'une architecture multi-sources. L'un des axes fondamentaux du projet consiste à modéliser cette architecture en tenant compte des sous-systèmes de génération, de stockage, de conversion et de consommation d'énergie. Cette modélisation constitue un préalable indispensable au développement de la stratégie de gestion énergétique. Parallèlement, une stratégie intelligente de gestion énergétique sera élaborée, reposant sur des algorithmes de prise de décision, notamment un algorithme génétique, afin de :

- Optimiser l'exploitation des sources selon l'état de charge de la batterie;
- Intégrer les conditions extérieures, telles que la disponibilité solaire et l'accès aux infrastructures de recharge;
- Identifier la borne de recharge optimale en fonction de la direction du véhicule et de son autonomie restante.

L'objectif final est de maximiser l'autonomie du VEHBV, de réduire les pertes énergétiques, de prolonger la durée de vie des composants et de minimiser l'impact environnemental, tout en respectant les contraintes de performance, de coût et de conformité réglementaire. Afin de structurer et formaliser ces orientations, la Figure 1.3 présente la déclinaison logique de la problématique du projet en finalité, mission et objectifs spécifiques selon l'approche PFMOS.

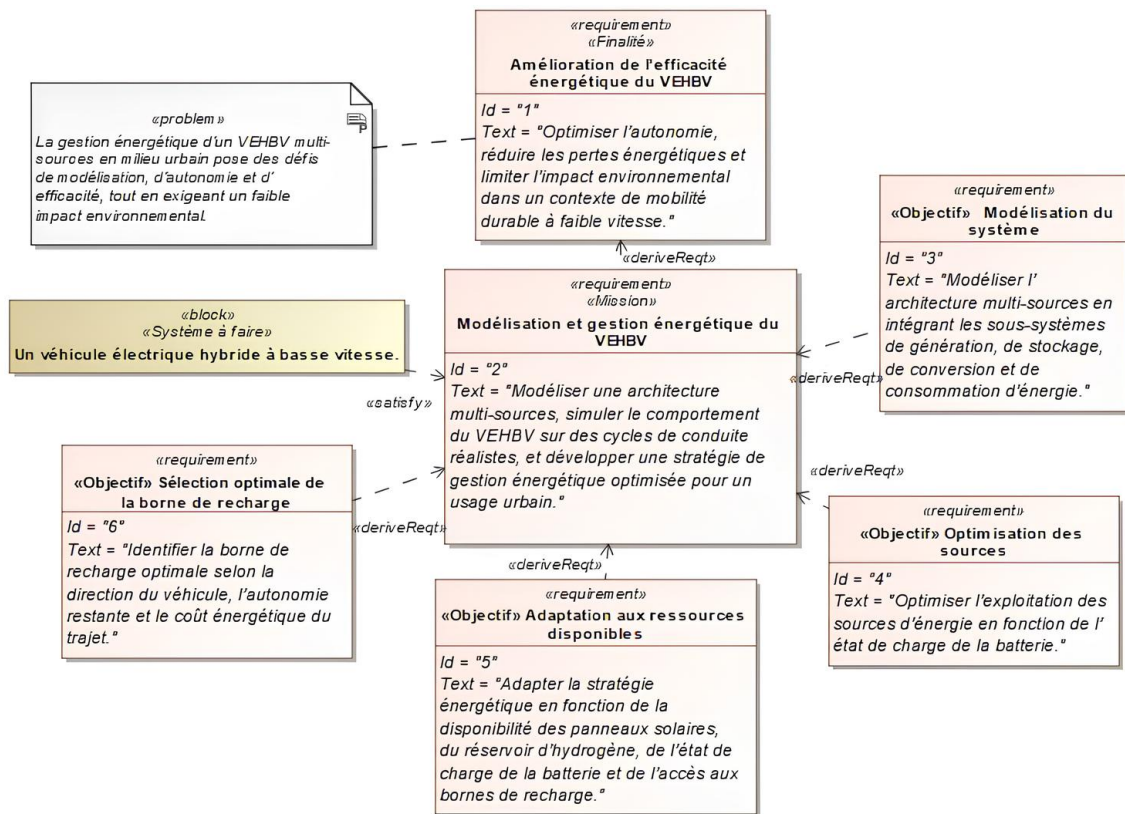


Figure 1.3 Diagramme PFMOS du projet VEHBV réalisé sur Cameo.

1.3 Planification et méthodologie de recherche

La réalisation de ce projet de recherche repose sur une planification rigoureuse et une organisation progressive des différentes phases de travail. Les activités ont été structurées en fonction des objectifs scientifiques du mémoire, des contraintes académiques et de l'évolution naturelle du processus de recherche, depuis la phase de cadrage jusqu'à la finalisation du manuscrit. Les différentes phases sont synthétisées dans le Tableau 1-3 et illustrées par le diagramme de Gantt présenté à la Figure 1.4, permettant de visualiser leur enchaînement ainsi que les chevauchements entre certaines activités.

Tableau 1-3 Organisation des phases du projet de recherche VEHBV.

Phase	Description des travaux
Phase 1 : Cadrage du projet et revue de littérature	Définition du cadre général du projet, clarification des objectifs de recherche et amorce de la revue de littérature.
Phase 2 : Modélisation du système VEHBV	Approfondissement de la revue de littérature et modélisation des différents sous-systèmes du VEHBV.
Phase 3 : Développement du modèle dynamique	Conception du cycle de conduite représentatif et élaboration du modèle dynamique global du véhicule.
Phase 4 : Stratégie de gestion énergétique	Développement de la stratégie de gestion énergétique et implémentation de la logique heuristique.
Phase 5 : Optimisation et analyse des performances	Implémentation de l'algorithme génétique et analyse des performances énergétiques du système.
Phase 6 : Validation et analyse des résultats	Validation globale du modèle et interprétation des résultats obtenus.
Phase 7 : Rédaction et finalisation du mémoire	Réalisation des simulations finales, analyse approfondie des résultats, rédaction, relecture, mise en forme et préparation du dépôt initial.

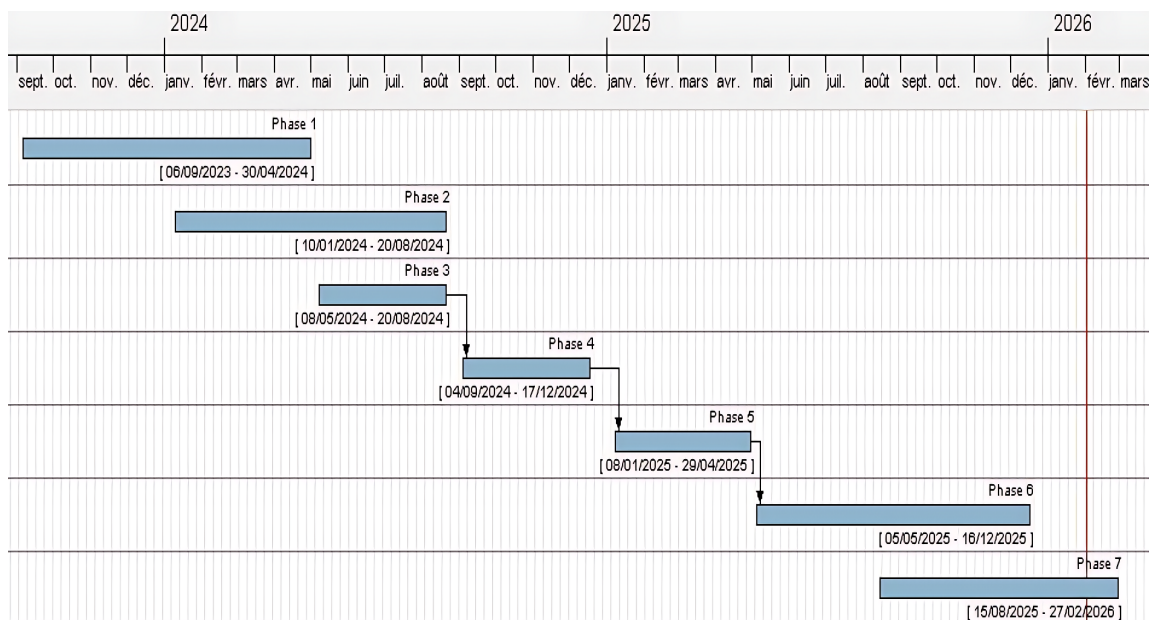


Figure 1.4 Diagramme de Gantt du projet VEHBV.

En complément de cette planification temporelle, la méthodologie adoptée dans ce mémoire repose sur une démarche structurée et progressive visant à répondre à la problématique de recherche et à atteindre les objectifs établis. Cette méthodologie s'articule autour de plusieurs étapes principales, présentées ci-dessous.

- **Analyse de la problématique et revue de la littérature** : Une analyse approfondie a été réalisée pour identifier les défis spécifiques liés à la gestion énergétique d'un véhicule électrique hybride à basse vitesse (VEHBV). Cette étape a inclus une revue de la littérature visant à comprendre le fonctionnement des systèmes multi-sources (batterie, pile à combustible, photovoltaïque), leurs stratégies de gestion énergétique (EMS) et les approches d'optimisation existantes.

- **Modélisation et conception du système VEHBV** : Le modèle global du véhicule a été développé sous MATLAB/Simulink en intégrant les principaux sous-systèmes : batterie, pile à combustible, générateur photovoltaïque et charge. Cette étape a permis d'établir les équations dynamiques et énergétiques nécessaires pour représenter fidèlement les interactions entre les différentes sources et simuler le comportement du véhicule.

- **Élaboration de la stratégie de gestion énergétique (EMS)** : Une stratégie heuristique a été conçue sous Stateflow pour réguler la répartition de puissance entre les sources selon l'état de charge de la batterie et la demande énergétique. Elle a été complétée par un algorithme génétique (GA) permettant d'identifier la borne de recharge optimale en fonction de la direction du véhicule, de son autonomie et des contraintes de faisabilité énergétique.

- **Simulation, validation et analyse des résultats** : Le modèle complet du VEHBV et la stratégie de gestion énergétique ont été testés sous différents scénarios. Les simulations

ont permis d'évaluer la performance énergétique, la stabilité et la robustesse du système. Les résultats obtenus ont ensuite été analysés afin d'examiner la cohérence du modèle, l'efficacité de la stratégie de gestion énergétique et l'impact de l'optimisation sur la performance globale du véhicule.

1.4 Structure du mémoire

La structure de ce mémoire a été conçue de manière logique afin d'assurer une lecture fluide et de présenter clairement les principales étapes du travail de recherche. Le deuxième chapitre, Revue de la littérature, retrace l'évolution des véhicules électriques et hybrides, en mettant l'accent sur les architectures multi-sources et les particularités des véhicules électriques hybrides à basse vitesse (VEHBV). Il met en lumière les principaux défis énergétiques et les stratégies de gestion proposées dans la littérature, afin de situer la contribution du présent travail dans le contexte scientifique existant. Le troisième chapitre, Description et modélisation des composants du système multi-sources du VEHBV, présente la modélisation du véhicule et de ses principales sources d'énergie, notamment la batterie, les panneaux photovoltaïques et la pile à combustible, tout en établissant la base de simulation utilisée pour le développement et la validation des stratégies de gestion énergétique. Le quatrième chapitre, Gestion optimisée de l'énergie dans les véhicules électriques hybrides à basse vitesse, décrit la stratégie heuristique développée et l'intégration de l'algorithme génétique (GA) pour la sélection optimale de la borne de recharge. Il analyse ensuite les résultats de simulation permettant d'évaluer la performance, la robustesse et la pertinence de la stratégie proposée. Enfin, la Conclusion générale synthétise les principales contributions du projet, évalue les performances obtenues et propose des perspectives d'amélioration pour les travaux futurs. Cette organisation assure une progression rigoureuse et structurée, guidant le lecteur

depuis la formulation de la problématique jusqu'à la validation des solutions développées et l'évaluation de leurs performances.

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre a posé les bases du projet en définissant son cadre conceptuel, sa problématique et ses objectifs. L'approche d'ingénierie des systèmes adoptée a permis de structurer les besoins et de préciser les orientations méthodologiques du travail. Ces éléments constituent le socle sur lequel repose la suite de l'étude, dont le chapitre suivant présente la revue de la littérature afin d'ancrer la recherche dans son contexte scientifique et technologique.

Chapitre 2 - Revue de littérature

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une revue de littérature consacrée aux véhicules hybrides électriques (VHE), avec un accent particulier sur les véhicules électriques hybrides à basse vitesse (VEHBV). Il débute par un rappel historique de l'évolution des véhicules électriques et l'émergence de l'hybridation comme solution aux limites des véhicules purement électriques. Les principales architectures et degrés d'hybridation sont ensuite exposés, avant de préciser les spécificités des VEHBV et leurs domaines d'application. Le chapitre met ensuite en lumière les contraintes propres aux architectures multi-sources, en particulier l'absence de cycles de conduite normalisés et la variabilité de la demande énergétique. Enfin, il se conclut par une présentation des principales stratégies de gestion énergétique, allant des approches à base de règles aux méthodes d'optimisation, prédictives et basées sur l'apprentissage.

2.2 Genèse et évolution des véhicules électriques

Alors que le véhicule électrique est souvent perçu comme une innovation récente, son développement remonte en réalité à une époque aussi ancienne que celle des véhicules à essence. À l'origine, les premières automobiles fonctionnaient avec des moteurs à vapeur, offrant une alternative viable, mais présentant plusieurs inconvénients : encombrement, complexité d'utilisation et temps nécessaire au chauffage de la chaudière. Avec l'émergence des moteurs à combustion interne et l'amélioration des infrastructures routières, les véhicules à essence ont progressivement dominé le marché. Toutefois, dès la fin du XIX^e siècle, l'électricité a commencé à être explorée comme solution de propulsion automobile, offrant une alternative plus propre et plus silencieuse, bien que limitée par l'autonomie des batteries [13].

Aux alentours de 1830, l'homme d'affaires écossais Robert Anderson aurait mis au point l'un des premiers véhicules électriques : une carriole alimentée par des batteries non rechargeables [14]. En 1834, l'Américain Thomas Davenport, originaire de Brandon, construisit une petite locomotive électrique capable de parcourir une courte distance. Trois ans plus tard, en 1837, l'Écossais Robert Davidson développa un modèle similaire capable d'atteindre une vitesse maximale d'environ 6 km/h. Toutefois, ces véhicules restaient limités par l'absence de systèmes de stockage rechargeables. Une avancée majeure eut lieu en 1859, lorsque le Français Gaston Planté inventa la première batterie rechargeable au plomb-acide, permettant un stockage plus efficace de l'énergie. En 1881, Camille Faure améliora cette technologie en augmentant la capacité et la durabilité des batteries [15].

En 1892, William Morrison, chimiste établi à Des Moines, conçut l'un des premiers véhicules électriques à quatre roues (Figure 2.1). Ce surrey électrique, capable de transporter jusqu'à 12 passagers, fonctionnait grâce à 24 batteries et un moteur de 4 chevaux. Il pouvait atteindre une vitesse maximale de 22,5 km/h (14 mph) et nécessitait environ 10 heures de recharge. Bien que cette invention ait démontré le potentiel de l'électrification des transports, elle est restée au stade de prototype et n'a jamais été commercialisée à grande échelle [13, 14, 16].



Figure 2.1 Charrette électrique de William Morrison, 1892 [13].

Le premier modèle de véhicule électrique fabriqué en plusieurs exemplaires fut l'Electrobat, conçu en 1895 par Pedro Salom et Henry G. Morris à Philadelphie. Ce véhicule marqua les débuts de la production industrielle de voitures électriques aux États-Unis [13, 14, 16]. Quelques années plus tard, en 1899, la Belgique se distingua avec La Jamais Contente, première voiture électrique à dépasser les 100 km/h. Conçue par Camille Jenatzy, elle se caractérisait par une carrosserie profilée en forme de torpille [15].

Entre 1895 et 1920, environ 50 entreprises se lancèrent dans la fabrication de véhicules électriques, témoignant de l'attrait technologique que suscitait cette solution à l'époque. En 1900, ces véhicules représentaient 38 % des nouvelles immatriculations automobiles aux États-Unis et, en 1912, environ 34 000 voitures électriques y étaient enregistrées [16].

Malgré cet essor, la montée en puissance des véhicules à essence, favorisée par l'amélioration des moteurs thermiques et le développement rapide d'une infrastructure pétrolière, a progressivement entraîné le déclin de la voiture électrique [14]. Sa production a chuté au fil des décennies, avant de connaître une résurgence récente, portée par les préoccupations environnementales et les avancées en matière de stockage d'énergie.

Aujourd'hui, les véhicules 100 % électriques connaissent une adoption croissante, soutenue par des innovations technologiques continues, une infrastructure de recharge en pleine expansion et une amélioration significative de leurs performances. En 2024, les ventes mondiales de VE ont atteint 17,1 millions d'unités, soit une hausse de 25 % par rapport à 2023 [17].

2.3 L'émergence de l'hybridation dans les véhicules électriques

Depuis plus d'un siècle, les véhicules à moteur thermique dominent le secteur des transports. Toutefois, ils demeurent l'une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre (GES), contribuant de manière significative au réchauffement climatique. Malgré les réglementations et les initiatives mises en œuvre pour limiter leur impact environnemental, les émissions liées à ce secteur restent élevées. Au Québec, le transport représente à lui seul 43 % des émissions totales de GES, dont 31,2 % sont attribuables au transport routier, qui constitue ainsi la principale source de pollution atmosphérique [18]. L'évolution des émissions liées au secteur des transports au Canada est illustrée à la Figure 2.2.

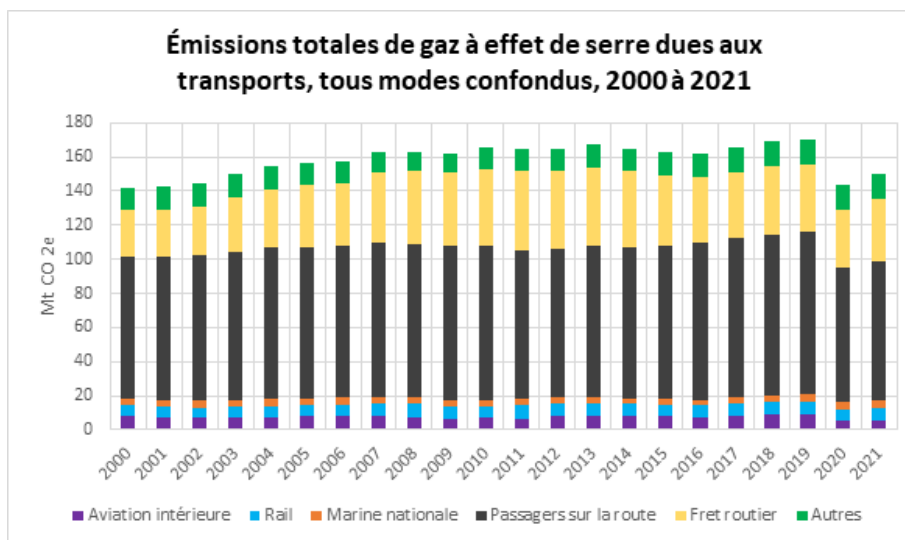


Figure 2.2 Émissions totales de gaz à effet de serre dues aux transports au Canada, de 2000 à 2021 [19].

Face à ces enjeux, les véhicules électriques (VE) apparaissent comme une solution prometteuse pour réduire l’empreinte carbone du secteur des transports. Toutefois, leur adoption à grande échelle demeure limitée par plusieurs défis techniques, notamment une autonomie restreinte, des temps de recharge prolongés et un réseau d’infrastructures encore peu développé. Pour pallier ces contraintes, l’hybridation s’est imposée comme une solution intermédiaire en combinant plusieurs sources d’énergie : batteries, moteurs thermiques, piles à combustible, panneaux photovoltaïques ou encore supercondensateurs [18]. Cette approche a marqué un tournant dans l’industrie automobile, en particulier avec l’introduction de la Toyota Prius, souvent considérée comme la première voiture hybride électrique commercialisée à grande échelle [20].

L’émergence des véhicules hybrides s’est accompagnée d’une diversification des approches techniques permettant de combiner plusieurs sources d’énergie. Cette diversité se traduit par différentes architectures de propulsion ainsi que par des degrés d’hybridation variables, en fonction du niveau d’implication de la motorisation électrique. Les sections

suivantes présentent ces deux aspects fondamentaux de la conception des VHE.

2.4 Classification architecturale des VHE

L'architecture du groupe motopropulseur constitue un élément déterminant dans la conception des véhicules hybrides électriques (VHE). On distingue principalement trois topologies d'hybridation : série, parallèle et série-parallèle (ou combinée), qui se différencient par la localisation du point de couplage entre les chaînes de traction thermique et électrique.

- **Hybridation série** : dans cette configuration, seul le moteur électrique assure la propulsion. Il est alimenté par des batteries, rechargées à la fois par freinage régénératif et par une génératrice entraînée par un moteur thermique découplé des roues. Ce dernier fonctionne dans une plage optimale de rendement, ce qui permet une gestion énergétique souple. L'architecture correspondante est illustrée à la Figure 2.3. Toutefois, le rendement global peut être limité en raison des conversions successives d'énergie [21,22].

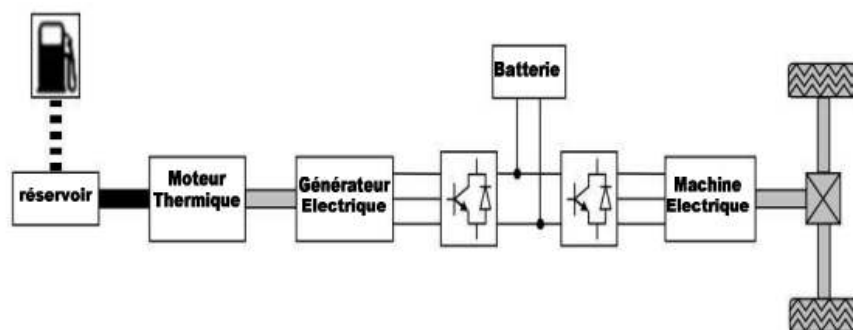


Figure 2.3 Architecture série d'un VHE [21].

- **Hybridation parallèle** : les moteurs thermique et électrique sont couplés mécaniquement via un coupleur mécanique (CM) et peuvent propulser

conjointement le véhicule. Le moteur électrique fonctionne également en génératrice pour recharger les batteries. La répartition de puissance entre les deux sources est assurée par un système de gestion énergétique selon les conditions de conduite. Cette architecture est représentée à la Figure 2.4. Elle permet de réduire la consommation de carburant, mais entraîne une complexité accrue dans le pilotage énergétique [21,22].

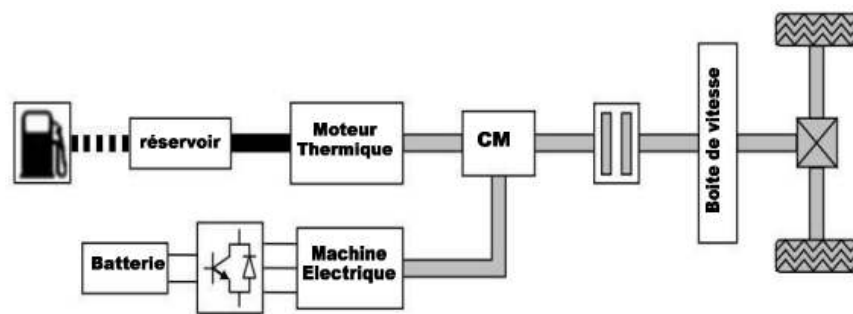


Figure 2.4 Architecture parallèle d'un VHE [21].

- **Hybridation série-parallèle (ou mixte)** : cette topologie combine les avantages des deux architectures précédentes. Grâce à un train épicycloïdal ou à un dispositif de couplage équivalent (CM), le système permet une utilisation alternée ou simultanée des deux moteurs selon les besoins. L'architecture correspondante est présentée à la Figure 2.5. Bien que plus complexe et plus onéreuse, cette configuration offre une meilleure efficacité énergétique et de faibles émissions [21, 22].

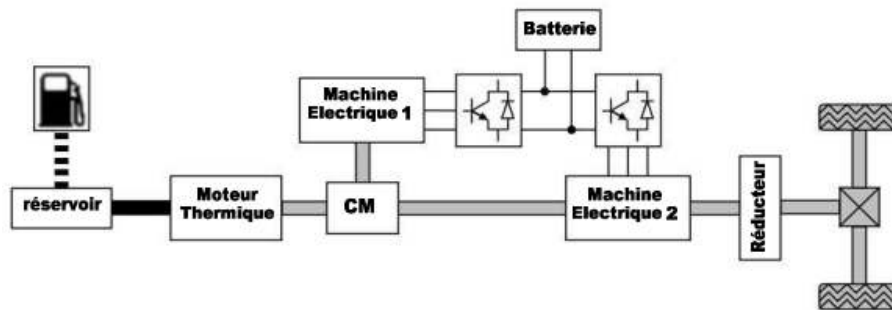


Figure 2.5 Architecture mixte d'un VHE [21].

Selon cette classification, le VEHBV développé dans ce projet adopte une configuration de type série. Dans cette architecture, la pile à combustible (PAC), les panneaux photovoltaïques (PV) et la batterie fournissent de l'énergie électrique à deux moteurs électriques (M1 et M2), seuls responsables de la traction. Il n'existe aucun couplage mécanique entre les sources d'énergie et les roues, c'est-à-dire aucun lien direct par engrenage ou arbre de transmission. La PAC joue le rôle de prolongateur d'autonomie, en générant de l'électricité lorsque la batterie est déchargée, sans jamais entraîner directement les roues. Ce type de configuration est particulièrement adapté aux applications à basse vitesse, car il permet une gestion énergétique souple, un fonctionnement silencieux, une conception mécanique simplifiée et une réduction significative des émissions.

2.5 Degrés d'hybridation dans les VHE

Au-delà des architectures, les véhicules hybrides se distinguent également par leur degré d'hybridation, défini par la contribution du système électrique à la traction. On distingue généralement quatre niveaux : micro-hybrides, semi-hybrides (mild-hybrids), hybrides complets (full-hybrids) et hybrides rechargeables (plug-in hybrids), chacun associé à des performances, des fonctionnalités et des coûts spécifiques.

- **Micro-hybrides (micro-hybrids)** : ces véhicules intègrent un système *stop & start*,

le système de gestion d'énergie au sein de ces véhicules éteint automatiquement le moteur à combustion interne lors des arrêts et assure son redémarrage automatique à l'aide d'un alerno-démarreur alimenté par la batterie. Bien qu'ils n'assurent pas la traction électrique, ils permettent de réduire la consommation de carburant et les émissions, notamment en milieu urbain où les arrêts sont fréquents. Malgré un rendement inférieur à celui des autres formes d'hybridation, ils représentent une solution intermédiaire économiquement accessible. La puissance de la machine électrique est généralement comprise entre 3 et 5 kW [15,23].

- **Semi-hybrides (mild-hybrids)** : ces véhicules intègrent un moteur électrique sous-dimensionné qui n'assure pas la propulsion, mais assiste le moteur thermique lors des phases d'accélération et récupère de l'énergie au freinage ou à la décélération pour recharger la batterie. Cette configuration améliore l'efficacité énergétique en réduisant la sollicitation du moteur thermique, tout en limitant le surpoids et l'encombrement du système. La puissance électrique est généralement comprise entre 10 et 20 kW [15,23].
- **Hybrides complets (full-hybrids)** : dotés d'un moteur électrique suffisamment puissant pour assurer seul la propulsion sur de courtes distances, ces véhicules peuvent fonctionner en mode 100 % électrique, notamment en milieu urbain à faible vitesse, réduisant ainsi la consommation de carburant et les émissions polluantes. Lorsque la batterie est déchargée, le moteur thermique prend le relais et peut également assurer sa recharge. Cette architecture optimise l'efficacité énergétique tout en offrant une grande flexibilité d'utilisation. La puissance du moteur électrique est généralement comprise entre 30 et 50 kW [15,23].

- **Hybrides rechargeables (plug-in hybrids)** : ces véhicules disposent d'une batterie de capacité élevée (généralement entre 5 et 20 kWh) pouvant être rechargée via le réseau électrique. Ils offrent ainsi une autonomie étendue en mode 100 % électrique, ce qui permet de réduire significativement la consommation de carburant et les émissions, en particulier en environnement urbain. Une fois la batterie déchargée, le moteur thermique prend le relais et peut également assurer la recharge. Cette architecture combine les avantages des véhicules électriques et hybrides, en offrant à la fois souplesse d'utilisation et efficacité énergétique [24].

Bien que les degrés d'hybridation soient couramment utilisés pour classer les véhicules combinant motorisation thermique et électrique, ils ne s'appliquent pas au système étudié dans ce projet. Celui-ci repose sur une motorisation entièrement électrique, alimentée par une architecture multi-sources, sans recours à un moteur thermique. Il s'inscrit ainsi dans la catégorie des véhicules électriques hybrides à basse vitesse (VEHBV). Il convient dès lors d'en caractériser les spécificités techniques et d'en identifier les principaux domaines d'application.

2.6 Les véhicules à basse vitesse : vers une hybridation énergétique (VEHBV)

Les véhicules électriques à basse vitesse (VEBV), ou *Low-Speed Vehicles* (LSV), désignent une catégorie de véhicules motorisés conçus pour une vitesse maximale de 40 km/h, conformément aux normes nord-américaines [25]. Principalement destinés aux déplacements de courte distance, ils s'intègrent dans des contextes urbains ou semi-urbains, tels que les campus universitaires, les complexes résidentiels, les zones industrielles ou touristiques. Leur conception repose sur une architecture mécanique simplifiée, un coût d'entretien réduit et une faible consommation énergétique, ce qui en

fait une solution attractive pour une mobilité locale durable. À la différence des voitures électriques classiques, les VEBV relèvent d'un cadre réglementaire distinct, caractérisé par des exigences de sécurité allégées et des restrictions d'usage à des environnements protégés [25,26].

Malgré ces avantages, ce mode de transport présente certaines limites techniques qui freinent son adoption à grande échelle. En particulier, plusieurs études ont mis en évidence des problèmes de fiabilité liés aux composants critiques. Selon une enquête publiée en 2019 [27], plus de la moitié des utilisateurs ont rencontré des dysfonctionnements techniques, principalement associés aux batteries (51 %) et aux pièces endommagées (22 %). D'autres systèmes essentiels sont également concernés, tels que le freinage, la direction ou les équipements électriques. La Figure 2.6 illustre la répartition des différentes pannes rapportées par les répondants.

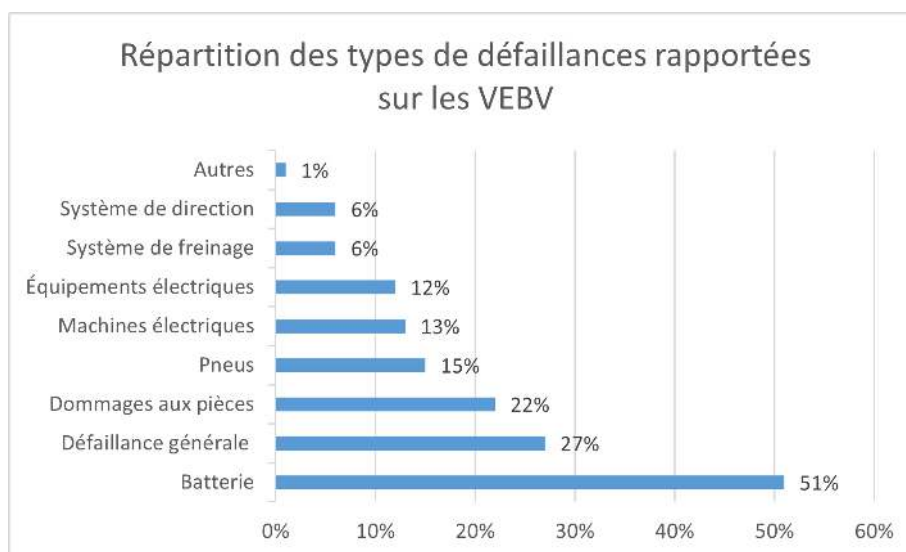


Figure 2.6 Répartition des principales défaillances observées sur les véhicules électriques à basse vitesse (VEBV), adaptée de [27].

Les limitations techniques des VEBV, notamment en termes d'autonomie, de fiabilité et de durabilité des composants, mettent en évidence la nécessité de recourir à

des architectures énergétiques plus robustes. L'hybridation apparaît ainsi comme une solution pertinente pour surmonter ces défis. En combinant plusieurs sources d'énergie complémentaires, cette approche permet de compenser les faiblesses propres à chaque technologie, de garantir une continuité de fonctionnement en cas de défaillance et d'optimiser le rendement global grâce à une gestion intelligente des flux énergétiques. Dans le cadre de ce projet, plutôt que d'utiliser un modèle commercial existant, nous développons des prototypes de VEHBV, illustrés à la Figure 2.7, conçus sur mesure afin d'optimiser leurs performances énergétiques et de les adapter à l'application visée.



Figure 2.7 Prototypes de VEHBV développés à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR).

2.7 Contraintes et défis inhérents aux architectures énergétiques multi-sources dédiées aux VEHBV

Dans les architectures énergétiques multi-sources, telles que celle retenue pour notre VEHBV, l'intégration de différentes technologies de production et de stockage vise à tirer parti de la complémentarité de leurs performances. Toutefois, cette hybridation soulève plusieurs défis techniques et stratégiques, notamment lors du couplage et de la gestion coordonnée de ces unités. Dans ce cadre, deux principaux axes d'enjeux peuvent être distingués et sont détaillés dans les sections suivantes.

2.7.1 Inexistence d'un cycle de conduite normalisé spécifique aux VEHBV

À l'échelle internationale, plusieurs cycles de conduite ont été développés afin de reproduire différents contextes de circulation. Parmi les plus connus figurent les cycles européens (NEDC), américains (FTP-75, HWFET, US06, SC03, NYCC, cycle froid) et japonais (JC08, 10–15 mode). Conçus initialement pour évaluer la consommation de carburant et les émissions polluantes des véhicules thermiques, ces profils demeurent largement théoriques et ne traduisent pas toujours fidèlement les conditions réelles d'exploitation [15, 28]. La Figure 2.8 présente quelques exemples représentatifs de ces cycles normalisés.

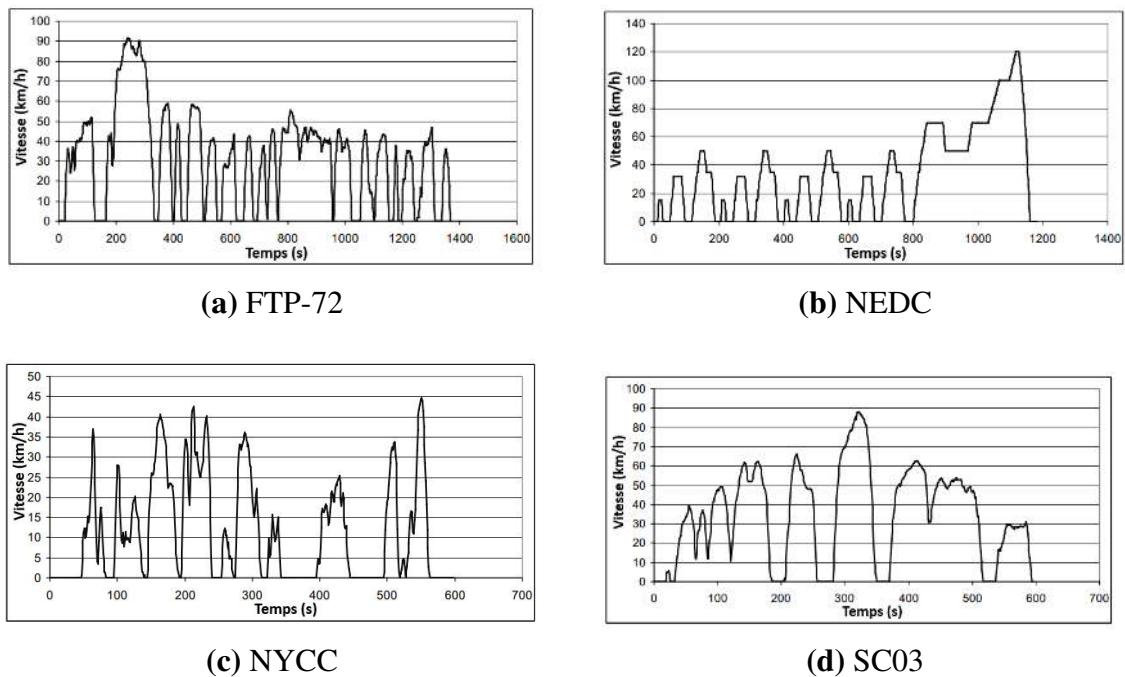


Figure 2.8 Cycle FTP-72 (a), Cycle NEDC (b), Cycle NYCC (c) et Cycle SC03 (d) [28].

Dans une optique d'amélioration de leur représentativité, le cycle mondial harmonisé WLTP a été introduit. Son profil vitesse–temps est illustré à la Figure 2.9. Celui-ci intègre notamment des paramètres tels que la puissance massique, afin de mieux caractériser les

situations de conduite et d'harmoniser les essais à l'échelle internationale [15, 28].

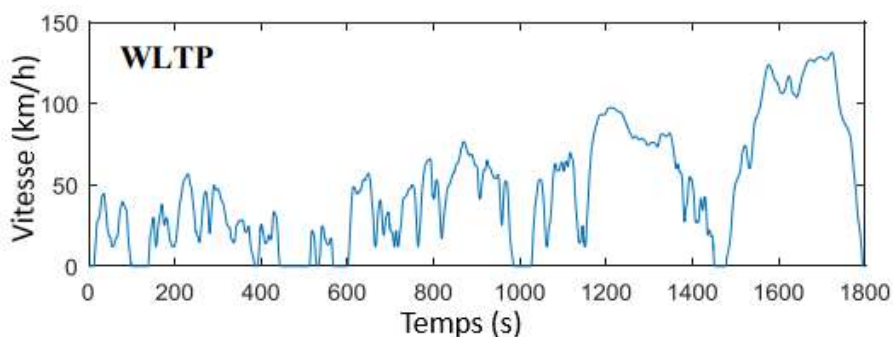


Figure 2.9 Cycle WLTP [29].

Dans le cadre des VEHBV, le profil d'utilisation diffère significativement de celui des véhicules routiers conventionnels. Principalement destinés à des environnements urbains restreints, ces véhicules circulent à basse vitesse, avec des accélérations modérées et des arrêts fréquents. Or, les cycles de conduite standards ne reflètent pas fidèlement ces conditions particulières d'usage. Il apparaît donc essentiel, pour simuler de manière réaliste leur comportement énergétique et dynamique, de recourir à un cycle de conduite spécifique, représentatif des contraintes réelles d'exploitation.

2.7.2 Variabilité de la demande et compromis énergétiques

Dans un VEHBV, la demande de puissance varie selon le style de conduite, les conditions de circulation, la topographie ou encore la météo. Ces fluctuations peuvent être soudaines (accélérations, freinages) ou progressives (montée prolongée), et exigent une réponse adaptée du système énergétique. Chaque source possède toutefois des limites. La batterie réagit rapidement, mais son vieillissement s'accélère en cas de fortes sollicitations. La pile à combustible fournit une puissance stable, mais sa réponse aux variations de puissance est plus lente. Le générateur photovoltaïque dépend des conditions d'ensoleillement, tandis que le réseau assure la recharge hors conduite. La

gestion énergétique doit donc concilier autonomie, puissance instantanée et longévité des composants, en coordonnant judicieusement ces ressources pour répondre aux besoins tout en optimisant le rendement global. Ces constats mettent en évidence la nécessité de stratégies de gestion énergétique capables de coordonner efficacement les différentes sources, sujet que nous traiterons dans la section suivante.

2.8 Stratégies de gestion énergétique des véhicules hybrides électriques

Les stratégies de gestion énergétique des véhicules hybrides et hybrides rechargeables se divisent en deux grandes familles : les approches en ligne et les approches hors ligne [30]. Les approches en ligne sont conçues pour fonctionner en temps réel et s'adapter directement aux conditions de conduite, cherchant ainsi à assurer un compromis entre réactivité et efficacité énergétique [30, 31]. Les approches hors ligne, quant à elles, reposent sur des calculs effectués en amont et permettent d'atteindre un niveau d'optimalité élevé, bien qu'elles soient difficilement applicables directement en temps réel [30–33]. Comme le montre la Figure 2.10, cette classification illustre la diversité des approches disponibles pour gérer l'énergie. Chaque méthode présente des avantages et des limites, et leur choix dépend des objectifs visés ainsi que des contraintes du système.

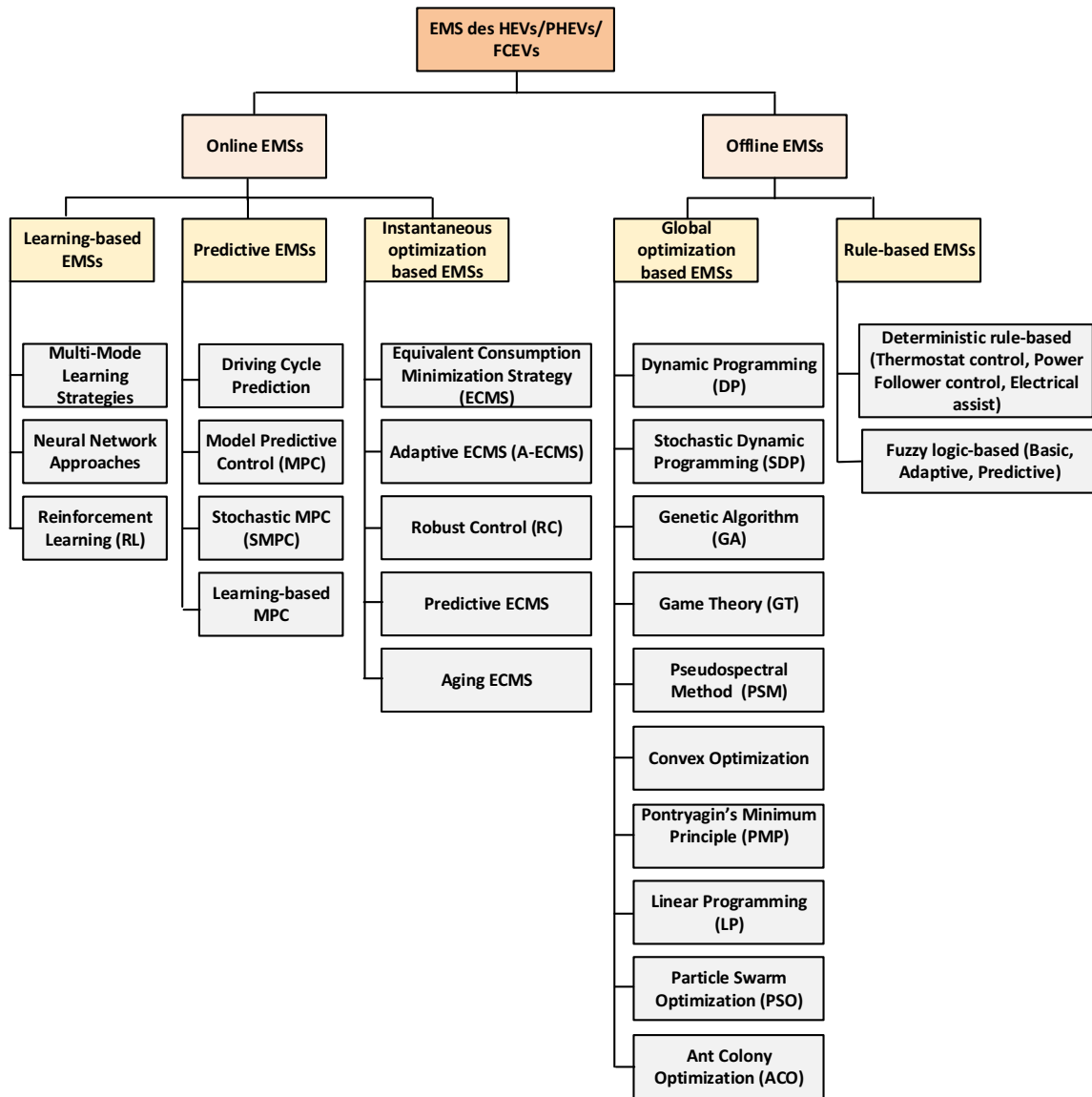


Figure 2.10 Classification des stratégies de gestion énergétique, adaptée de [30–32, 34].

2.8.1 Stratégies basées sur des règles

Les systèmes de gestion énergétique à base de règles sont largement utilisés grâce à leur simplicité d'intégration dans les contrôleurs embarqués et leur fiabilité [31, 35]. Ils reposent sur l'établissement de règles logiques de type « si-alors » (IF-THEN), prenant

en compte des paramètres tels que l'état de charge (SOC) de la batterie, la demande de puissance et la vitesse du véhicule [31]. Ces règles s'appuient sur l'analyse des flux de puissance, les cartes d'efficacité ou de consommation du moteur thermique, ainsi que sur l'expérience de conduite [31]. Leur mise en œuvre se fait généralement au moyen de tables de correspondance permettant de partager la demande de puissance entre le moteur thermique et le moteur électrique de traction [35]. Ces systèmes se déclinent principalement en deux catégories :

- Les stratégies déterministes : Elles reposent sur un ensemble prédéfini de règles, implémentées notamment par des machines à états finis et des tables de correspondance pour gérer les flux d'énergie [32, 33]. Les approches les plus courantes incluent le contrôle marche/arrêt (On/Off), le contrôle thermostatique (TCS) et le contrôle suiveur de puissance (PFC) [30, 32]. Elles permettent de réduire la consommation d'hydrogène et de maintenir le SOC de la batterie ou du supercondensateur [31]. Toutefois, ces stratégies restent limitées par leur simplicité et leur faible adaptabilité aux conditions réelles de conduite [30].

- Les stratégies à logique floue : Ces stratégies reposent sur la théorie des ensembles flous introduite par Zadeh et utilisent des règles de type « si-alors » associées à des fonctions d'appartenance pour répartir la puissance entre les sources [30, 34]. La structure générale d'un contrôleur à logique floue est illustrée à la Figure 2.11. Simples à mettre en œuvre, elles sont robustes, insensibles aux incertitudes de modèle et adaptées aux systèmes non linéaires et variables dans le temps [32, 34]. Les approches principales incluent le contrôle flou traditionnel, où les points de fonctionnement du moteur à combustion interne et de la batterie sont définis à partir du couple demandé et de l'état de charge [34, 35], ainsi que le contrôle flou adaptatif, qui ajuste les pondérations et les règles afin de concilier

l'économie de carburant et la réduction des émissions [34]. Le contrôle flou prédictif exploite, quant à lui, des informations issues du trajet et du GPS afin d'anticiper les besoins énergétiques [34, 35]. Ces méthodes permettent une meilleure flexibilité et une réduction notable des émissions, mais restent limitées par la difficulté de concevoir des fonctions d'appartenance adaptées et par leur forte dépendance aux profils de conduite [30, 32, 34].

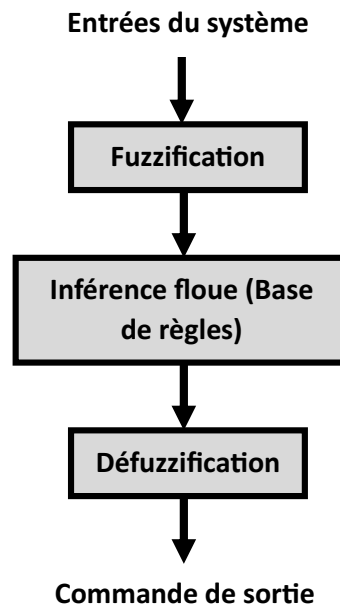


Figure 2.11 Schéma fonctionnel d'un contrôle à logique floue, adapté de [32].

2.8.2 Stratégies basées sur l'optimisation

Les stratégies de gestion énergétique basées sur l'optimisation reposent sur des formulations analytiques ou numériques visant à minimiser une fonction de coût, en assurant une répartition optimale de la puissance entre les différentes sources d'énergie. Elles se distinguent en deux grandes familles : l'optimisation globale (offline) et l'optimisation instantanée (online) [36]. Les méthodes globales telles que la programmation dynamique (DP), la programmation dynamique stochastique (SDP), la programmation linéaire (LP), les algorithmes génétiques (GA), l'optimisation par essaim

de particules (PSO), l'optimisation par colonie de fourmis (ACO), le principe du minimum de Pontryagin (PMP) et la théorie des jeux (GT) cherchent l'optimum global d'un système sur un cycle de conduite donné. Leur principal atout est de garantir une solution optimale de référence, mais elles sont limitées par leur caractère non causal et par leur complexité computationnelle élevée, ce qui les rend difficilement applicables en temps réel [31, 36].

À l'opposé, les méthodes instantanées comme la stratégie de minimisation équivalente de la consommation (ECMS), l'ECMS adaptative (A-ECMS) et l'ECMS prédictive exploitent les variables disponibles en temps réel pour minimiser une fonction de coût. Elles permettent une répartition dynamique et robuste de la puissance entre la pile à combustible, la batterie et le supercondensateur. Bien qu'elles ne permettent qu'une optimisation instantanée, elles offrent un compromis intéressant entre performance énergétique et faisabilité pratique, avec des résultats souvent supérieurs aux stratégies à base de règles [31]. Ainsi, les stratégies d'optimisation occupent une place centrale dans la littérature : les méthodes globales servent de référence théorique, tandis que les méthodes instantanées assurent une implémentation réaliste dans les systèmes embarqués, souvent en combinaison avec d'autres approches pour surmonter leurs limites intrinsèques [31, 36]. La Figure 2.12 illustre la proportion des principales approches d'optimisation étudiées dans la littérature récente. Il ressort que la programmation dynamique occupe une place importante au début de la période considérée en tant que méthode de référence théorique. En revanche, l'ECMS et les approches basées sur la commande prédictive gagnent progressivement en importance, en raison de leur capacité à être implémentées en temps réel et à offrir un compromis pertinent entre performance énergétique et faisabilité embarquée.

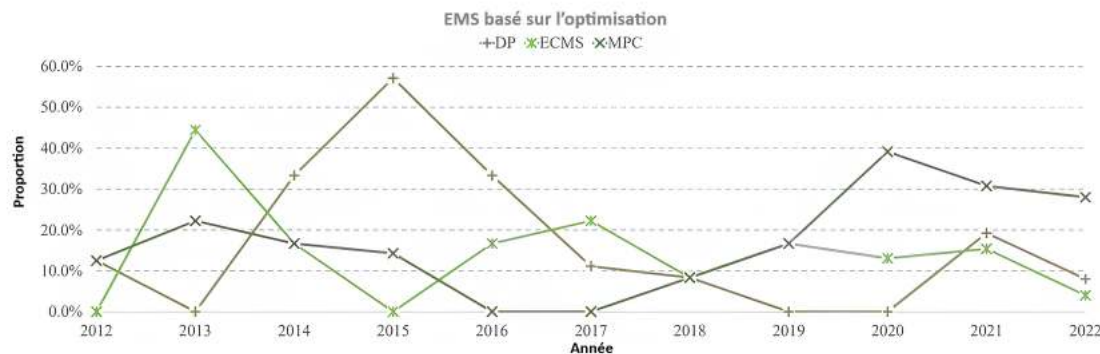


Figure 2.12 Proportion des principales stratégies de gestion énergétique basées sur l'optimisation (DP, ECMS, MPC) dans la littérature entre 2012 et 2022 [32].

2.8.3 Stratégies prédictives

Les EMS prédictives ont pour objectif d'optimiser la répartition de puissance en utilisant des informations anticipées liées aux incertitudes et perturbations d'un cycle de conduite. Leur performance dépend largement de la précision des données prédictives, notamment la vitesse future du véhicule, qui est généralement estimée à partir des conditions de route, du trafic et du comportement du conducteur [30]. Une prévision inexacte peut dégrader l'efficacité de la stratégie, d'où l'importance de considérer davantage d'informations contextuelles. Le Model Predictive Control (MPC) constitue l'une des approches les plus utilisées [37]. Elle transforme un problème d'optimisation global en une série de problèmes locaux résolus sur un horizon glissant, en tenant compte explicitement des contraintes du système. Des variantes telles que le SMPC (Stochastic MPC), intégrant des chaînes de Markov, ou encore le Learning-based SMPC, combinant MPC et apprentissage automatique, permettent de mieux gérer l'incertitude et d'adapter la stratégie en temps réel aux conditions changeantes [37, 38]. Enfin, des méthodes de prédiction du cycle de conduite (reconnaissance de profils, modélisation de trafic, systèmes ITS, intelligence artificielle) sont souvent intégrées aux EMS prédictives pour

améliorer l'exactitude de la vitesse anticipée et d'optimiser le rendement énergétique global [30].

2.8.4 Stratégies basées sur l'apprentissage

Les stratégies de gestion énergétique basées sur l'apprentissage (Learning-Based EMS) visent à surmonter les limites des approches prédictives classiques en offrant une capacité d'auto-apprentissage et d'adaptation en temps réel, sans nécessiter de modèle explicite. Elles permettent d'ajuster dynamiquement la répartition de puissance afin d'améliorer l'économie d'énergie et la durabilité du système, mais exigent généralement une grande quantité de données réelles pour l'entraînement et font encore face à des défis liés à la validation matérielle. Deux grandes familles dominent la littérature : les EMS basées sur les réseaux de neurones (NN), utilisées principalement pour la classification des conditions de conduite et la prévision de vitesse, et celles reposant sur l'apprentissage par renforcement (RL), qui apprennent directement une stratégie optimale à partir des interactions agent–environnement. Parmi les méthodes RL les plus étudiées, le Q-learning, le Deep Q-Network (DQN), le Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) et le Twin Delayed DDPG (TD3) se distinguent par leurs améliorations progressives en termes de robustesse, de gestion des espaces continus et de stabilité de convergence. Ainsi, bien que prometteuses, les EMS basées sur l'apprentissage nécessitent encore des validations expérimentales et un cadre de référence commun afin de faciliter leur comparaison et leur mise en œuvre pratique dans les véhicules hybrides à pile à combustible [31, 32].

2.9 Conclusion

La revue de littérature a permis de mettre en évidence les limites des véhicules purement électriques, l'intérêt de l'hybridation énergétique ainsi que les enjeux

spécifiques aux VEHBV, notamment la variabilité de la demande et la nécessité de stratégies de gestion adaptées. Ces constats soulignent l'importance d'une modélisation précise du véhicule et de ses principales composantes afin de développer et de valider des stratégies de gestion énergétique pertinentes. Le chapitre suivant est donc consacré à la description et à la modélisation des différents sous-systèmes du VEHBV, incluant le cycle de conduite représentatif, le modèle dynamique, la batterie, les sources renouvelables et l'architecture globale du véhicule.

Chapitre 3 - Description et modélisation des composants du système multi-sources du VEHBV

3.1 Introduction

Ce chapitre présente la modélisation énergétique du VEHBV à partir de conditions d'utilisation réelles. Un cycle de conduite représentatif est d'abord élaboré à partir d'essais expérimentaux réalisés sur le campus de l'UQTR. Sur cette base, un modèle dynamique longitudinal du véhicule est développé afin d'estimer les besoins en force, en puissance et en énergie. Enfin, les modèles des principales sources d'énergie (batterie, générateur photovoltaïque et pile à combustible) sont présentés, constituant le socle des simulations ainsi que du dimensionnement du système hybride.

3.2 Conception et expérimentation d'un cycle de conduite représentatif pour le VEHBV

La diversité des cycles de conduite, qu'ils soient établis à partir de protocoles normalisés ou issus de relevés expérimentaux, met en évidence la variété des conditions d'utilisation rencontrées par les véhicules hybrides électriques. Cette hétérogénéité conduit à des exigences et des méthodes de modélisation et de gestion énergétique adaptées à chaque contexte d'exploitation. Cependant, comme mentionné précédemment dans la revue de la littérature, les cycles actuellement disponibles, généralement conçus pour des véhicules routiers conventionnels, ne sont pas adaptés aux VEHBV. Ils ne reflètent pas fidèlement leurs profils d'utilisation réels, caractérisés par une vitesse réduite, des accélérations modérées et de fréquents arrêts, ce qui peut entraîner des écarts significatifs entre les résultats de simulation et les performances observées en exploitation.

Dans ce contexte, il est apparu essentiel de définir un cycle de conduite spécifique,

capable d'intégrer les contraintes réelles d'usage du VEHBV. Ce cycle, exprimé sous forme d'une courbe vitesse–temps, constitue un outil fondamental pour reproduire de manière réaliste le comportement énergétique et dynamique du véhicule, évaluer ses performances globales et valider la pertinence des stratégies de gestion énergétique envisagées. Pour concevoir un cycle représentatif, plusieurs essais expérimentaux ont été conduits sur le campus de l'UQTR, environnement représentatif des conditions d'utilisation typiques des VEHBV. Les trajets GPS réalisés lors de ces essais sont illustrés à la Figure 3.1. Les parcours définis combinent :

- Des segments linéaires parcourus à une vitesse moyenne d'environ 16 km/h, simulant un déplacement continu entre deux points. La consigne était de maintenir une vitesse proche de 30 km/h, bien que certaines variations au-dessus de cette valeur aient pu survenir en conditions réelles.
- Des séquences de type « stop-and-go » avec arrêts fréquents.
- Des sections à pente modérée, reproduisant les variations topographiques locales.

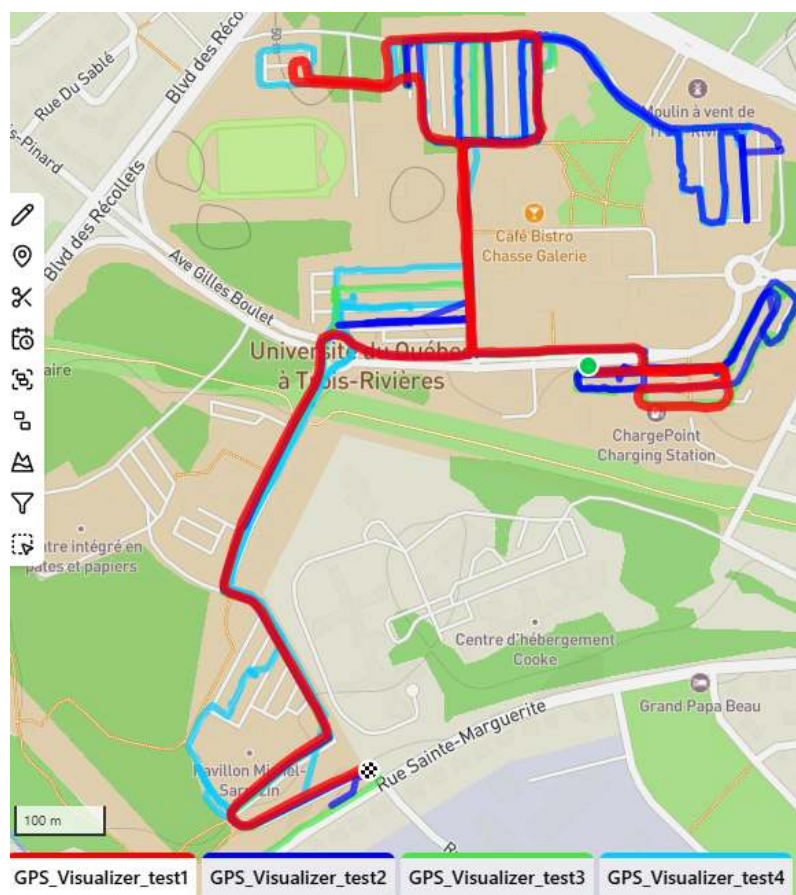


Figure 3.1 Trajets GPS réalisés lors des quatre essais expérimentaux sur le campus de l'UQTR.

Les données de position et de vitesse ont été enregistrées à l'aide d'une application GPS utilisée comme enregistreur embarqué durant les essais, assurant une résolution temporelle suffisante pour reconstituer fidèlement le profil cinématique de chaque parcours. Outre la vitesse instantanée, les informations relatives à la distance parcourue, à la durée du trajet, aux dénivelés cumulés (ascension et descente), ainsi qu'aux vitesses moyenne et maximale ont été extraites. Bien que plusieurs parcours aient été effectués, quatre essais représentatifs ont été retenus pour l'analyse. La Figure 3.2 présente le profil vitesse-temps ainsi que l'évolution de la pente pour l'essai #2.

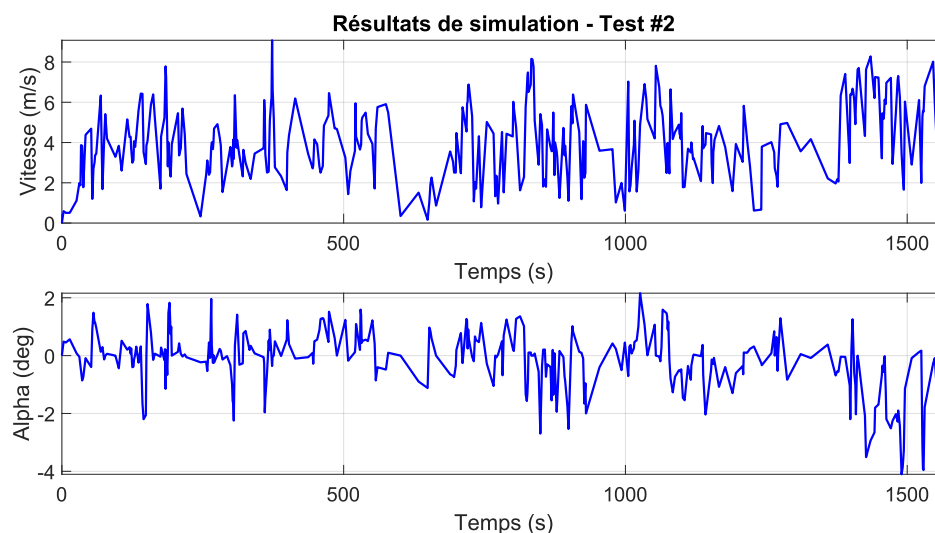


Figure 3.2 Évolution de la vitesse et de la pente (alpha) – Essai #2.

Tableau 3-1 Caractéristiques principales des quatre essais de conduite réalisés sur le campus de l'UQTR.

Essai	Durée (s)	Distance (km)	Vitesse moyenne (km/h)	Ascension (m)	Descente (m)
Essai 1	672	2.89	15.5	5	17
Essai 2	1568	5.74	13.2	6	23
Essai 3	867	3.94	16.4	5	21
Essai 4	1608	6.49	14.5	23	28

Dans notre étude, la sélection d'un cycle de conduite représentatif des conditions réelles d'exploitation du VEHBV constitue un élément déterminant. Les essais réalisés permettent d'extraire les profils de vitesse et de pente, qui sont ensuite utilisés comme entrées du modèle dynamique. Ce dernier permet de calculer la puissance de traction requise et l'énergie consommée au cours des cycles de travail. Ces résultats sont enfin exploités pour estimer les besoins énergétiques, affiner les stratégies de gestion et dimensionner de manière optimale les composants du système.

3.3 Modèle dynamique du VEHBV

3.3.1 Représentation mathématique du modèle dynamique du VEHBV

Dans la modélisation dynamique du VEHBV, l'objectif est d'évaluer la puissance et l'énergie nécessaires à l'exécution du cycle de mission en tenant compte de paramètres tels que la masse du véhicule, la surface frontale, la vitesse du vent, la pente de la route et les forces de résistance au roulement. Pour simplifier l'analyse, le véhicule est assimilé à une masse équivalente concentrée au centre de gravité, et l'étude se limite au mouvement longitudinal, les mouvements latéraux et les interactions avec les suspensions étant négligés. Le bilan des forces appliquées au centre de gravité est illustré à la Figure 3.3, où la force de traction $\vec{F}_{tr}$ représente l'effort requis pour assurer la propulsion du véhicule tout au long du cycle de mission; les différentes composantes de cette force seront ensuite détaillées afin de mettre en évidence les phénomènes de propulsion et de résistance rencontrés par le véhicule [15, 39].

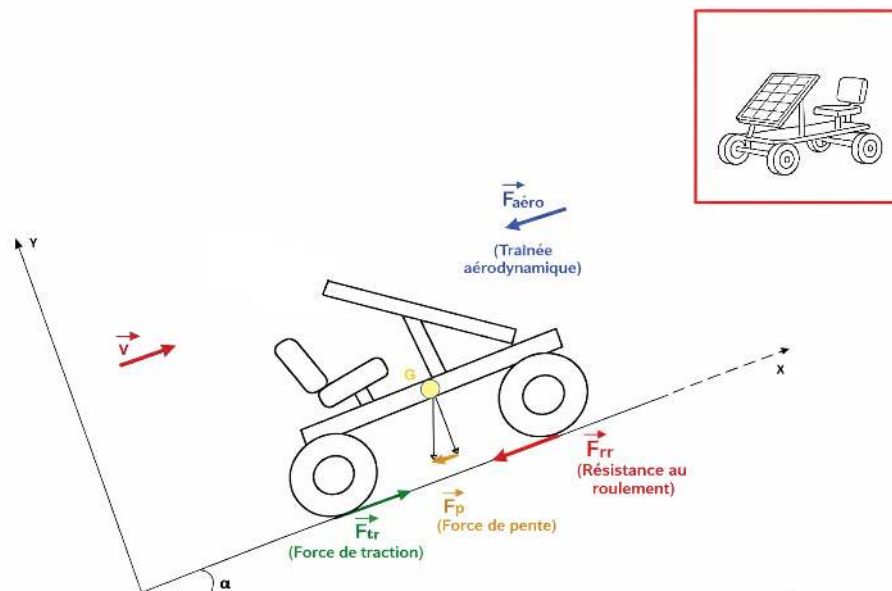


Figure 3.3 Représentation des efforts agissant sur le véhicule en montée.

Les pentes rencontrées sur le trajet ont une influence notable sur la demande énergétique d'un véhicule électrique, en augmentant la puissance requise et en affectant la consommation globale. Cela a un impact direct sur le dimensionnement des systèmes de stockage d'énergie. Pour représenter cet effet, la force $\vec{F}_p$ est introduite comme la composante gravitationnelle que le véhicule doit surmonter lors d'un déplacement en montée. Son expression mathématique est donnée dans l'équation (3.1).

$$\vec{F}_p = -M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot \vec{x} \quad (3.1)$$

où :

- M est la masse totale du véhicule (en kg),
- g est l'accélération due à la gravité (en m/s^2),
- α est l'angle d'inclinaison de la pente (en radians),
- $\vec{x}$ est le vecteur unitaire dans la direction longitudinale du mouvement.

À cette force s'ajoute la résistance au roulement, qui découle des pertes d'énergie causées par la déformation des pneus et les interactions avec les éléments de suspension. Elle est généralement modélisée par une relation linéaire impliquant le coefficient C_{rr} comme indiqué dans l'équation (3.2). Cette résistance dépend de plusieurs paramètres, tels que la conception des pneus, leur pression, la vitesse du véhicule et l'état de la chaussée. Une surface de roulement plus régulière tend à réduire son influence.

$$\vec{F}_{rr} = -C_{rr} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \vec{x} \quad (3.2)$$

En plus des résistances mécaniques, le véhicule doit également surmonter la résistance de l'air. Lors de son déplacement, il traverse la masse d'air environnante, ce qui génère

une force opposée à son mouvement, appelée résistance aérodynamique. Celle-ci dépend de la densité de l'air ρ_{air} , de la surface frontale du véhicule A_f , du coefficient de traînée C_d , ainsi que de la vitesse relative entre le véhicule et le vent $V + V_w$. Elle est modélisée par l'équation (3.3) :

$$\vec{F}_{\text{aéro}} = -\frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot C_d \cdot A_f \cdot (V + V_w)^2 \cdot \vec{x} \quad (3.3)$$

Les valeurs du coefficient de traînée aérodynamique varient en fonction de la forme et du type de véhicule. Le Tableau 3-2 présente des exemples typiques pour différents types de carrosseries, tandis que la Figure 3.4 en propose une visualisation comparative. Les véhicules présentant des formes peu profilées, tels que les carrosseries de type ponton, se caractérisent par des coefficients de traînée plus élevés que ceux des véhicules légers profilés, généralement compris entre 0,4 et 0,55. Dans le cas du VEHBV étudié, la structure ouverte ainsi que la présence d'éléments exposés (roues, châssis, panneau photovoltaïque) conduisent à un comportement aérodynamique moins favorable, comparable à celui de ces véhicules.

Tableau 3-2 Exemples de coefficients de traînée aérodynamique selon le type de véhicule [39].

Type de véhicule	Coefficient de traînée aérodynamique (–)
Autobus	0,6 – 0,7
Camions	0,8 – 1,5
Motos	0,6 – 0,7
Fourgonnettes	0,5 – 0,7
Carrosserie ponton	0,4 – 0,55

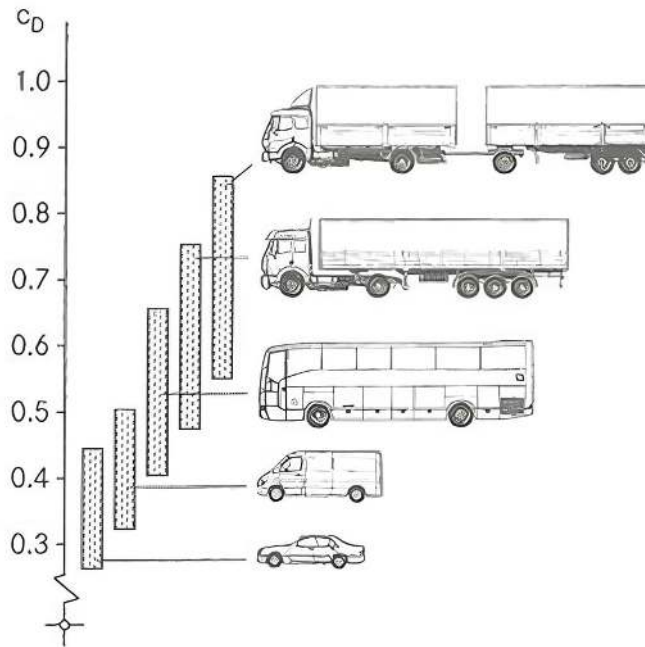


Figure 3.4 Visualisation comparative des coefficients C_d pour différents types de véhicules [40].

L'ensemble de ces forces externes permet de déterminer la force de traction (ou de propulsion) $\vec{F}_{tr}$, qui représente l'effort nécessaire pour faire avancer le véhicule. En appliquant le principe fondamental de la dynamique, et en tenant compte de l'inertie équivalente des éléments rotatifs à travers un coefficient sans dimension σ , on obtient l'équation (3.4) :

$$\sigma \cdot M \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_{ext} = \vec{F}_p + \vec{F}_{rr} + \vec{F}_{aéro} + \vec{F}_{tr} \quad (3.4)$$

En projetant l'équation précédente sur l'axe x , on obtient une expression scalaire décrite par l'équation (3.5), qui regroupe toutes les contributions des forces opposées au mouvement du véhicule.

$$\sigma \cdot M \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{x} = \left(-M \cdot g \cdot \sin(\alpha) - M \cdot g \cdot C_{rr} \cdot \cos(\alpha) - \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_f \cdot C_d \cdot (V + V_w)^2 - F_{tr} \right) \cdot \vec{x} \quad (3.5)$$

Finalement, en isolant la force de traction $\vec{F}_{tr}$, on obtient l'expression finale présentée dans l'équation (3.6), qui servira de base au calcul des puissances requises pour le dimensionnement énergétique du véhicule :

$$F_{tr} = \sigma \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} + M \cdot g \cdot \sin(\alpha) + M \cdot g \cdot C_{rr} \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_f \cdot C_d \cdot (V + V_w)^2 \quad (3.6)$$

3.3.2 Caractéristiques du prototype de VEHBV étudié

Dans le but d'obtenir des résultats réalistes et de dimensionner adéquatement les unités de stockage d'énergie, nous combinons le modèle mécanique détaillé dans la première partie avec les paramètres spécifiques à notre prototype de VEHBV. Les différents paramètres utilisés dans l'expression de la force de traction sont présentés dans le Tableau 3-3.

Tableau 3-3 Paramètres du modèle mécanique du véhicule.

Paramètres	Symbole	Valeur
Masse du véhicule	M	90 Kg
Constante gravitationnelle	g	9,81 m/s ²
Densité volumique de l'air	ρ_{air}	1,225 Kg/m ³
Surface frontale du véhicule	A_f	0,8 m ²
Coefficient de résistance au roulement	C_{rr}	0,015
Coefficient de traînée	C_d	0,4
Coefficient sans dimension permettant de prendre en compte les moments d'inertie des masses tournantes	σ	1,05
Rayon de la roue	r	0,135 m

Un modèle dynamique a été élaboré sous Simulink afin d'exploiter les paramètres mécaniques du véhicule et d'estimer les efforts requis en conditions réelles. Ce modèle permet de calculer la force de traction nécessaire à partir des sollicitations auxquelles le véhicule est soumis. Il permet également de déduire la puissance instantanée et l'énergie consommée au cours d'un trajet, sur la base du profil de conduite imposé.

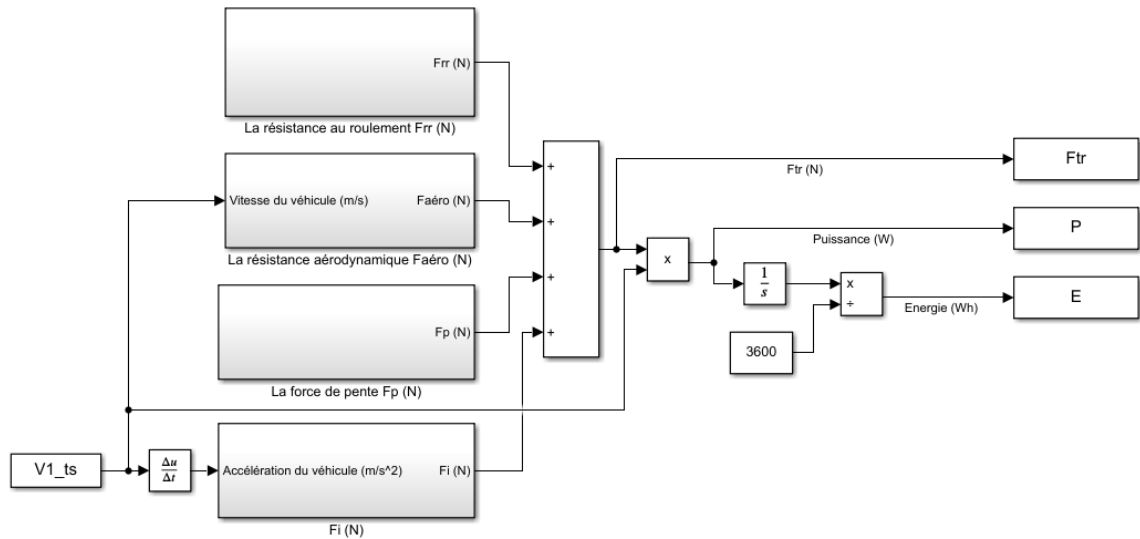


Figure 3.5 Architecture du modèle dynamique du VEHBV développé sous Simulink.

Un aspect déterminant de l'étude concerne l'accélération du véhicule. Celle-ci est directement déduite du profil temporel de la vitesse. Comme indiqué précédemment, en l'absence d'un cycle de conduite existant réellement adapté à notre application, des profils de conduite spécifiques ont été élaborés. Ces derniers ont ensuite été exploités comme entrées du modèle dynamique du VEHBV, lequel a été simulé pour chacun des trajets en respectant fidèlement leur durée réelle. Les simulations ont ainsi été réalisées sur des intervalles de 672, 1568, 867 et 1608 secondes. Les trajectoires correspondantes sont présentées à la Figure 3.6.

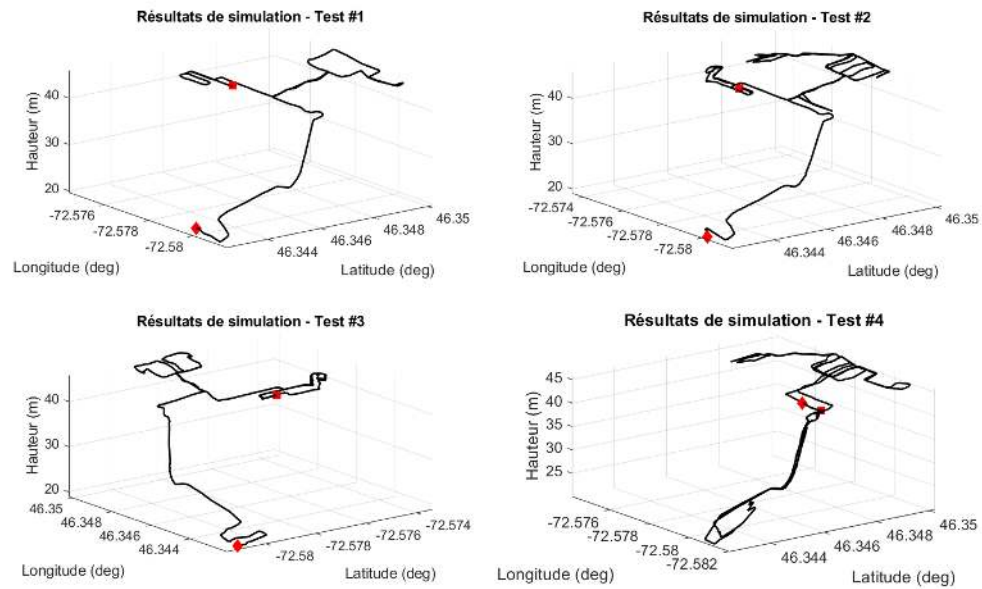


Figure 3.6 Trajectoires des 4 essais réalisés autour du campus de l'UQTR.

Les grandeurs de puissance et d'énergie obtenues à partir du modèle dynamique du véhicule varient en fonction du profil de conduite suivi. Les figures présentées ci-après illustrent respectivement l'évolution de la puissance mécanique de traction et de l'énergie cumulée pour le Test #2. Ce profil de conduite intègre une combinaison de phases d'accélération, de décélération, de roulage à vitesse constante et de variations de pente. La puissance instantanée est déterminée à partir du produit de la force de traction et de la vitesse du véhicule, tandis que l'énergie est obtenue par intégration de cette puissance au cours du temps. L'analyse de ces courbes permet d'appréhender de manière précise les sollicitations énergétiques du VEH BV dans un scénario réaliste, et constitue un élément clé pour la validation de la stratégie de gestion énergétique ainsi que pour le dimensionnement des composants du système embarqué.

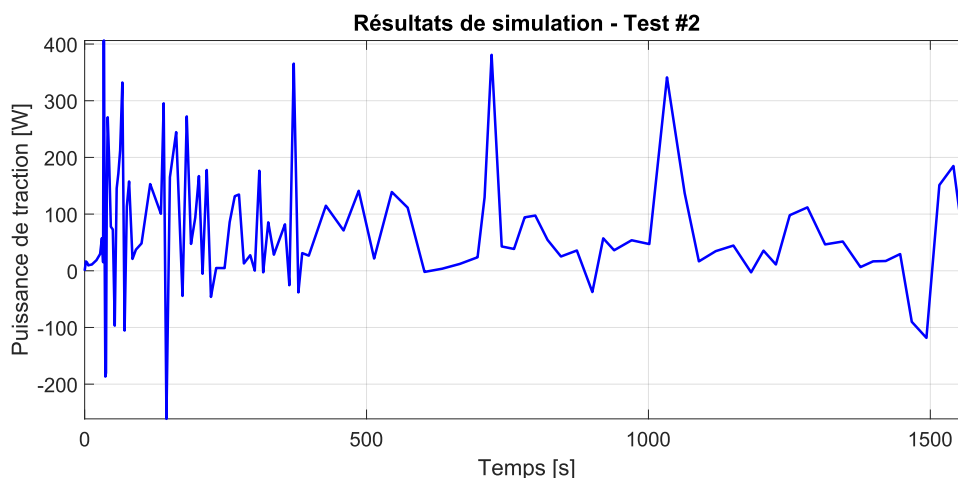


Figure 3.7 Évolution de la puissance de traction pour le Test #2.

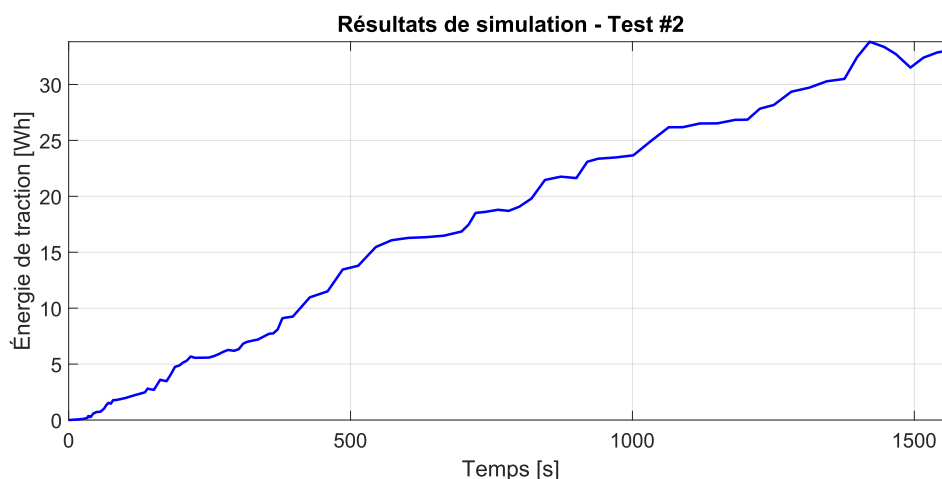


Figure 3.8 Évolution de l'énergie de traction pour le Test #2.

En ce qui concerne les essais de conduite réalisés dans cette étude, les courbes de puissance et d'énergie ont été obtenues à partir du même modèle dynamique du VEH BV, les paramètres du véhicule étant conservés constants. Seuls les profils de vitesse et de pente varient d'un test à l'autre, en fonction des conditions de conduite mesurées sur le terrain. Il convient de souligner que les simulations ont été effectuées sur des durées relativement courtes (entre 672 et 1608 secondes). La puissance de traction demandée par le véhicule évolue majoritairement entre 100 W et 200 W, avec des pics transitoires pouvant atteindre

environ 400 W lors des phases dynamiques, notamment lors des accélérations et des variations de pente. Toutefois, l'amplitude de ces pics peut être légèrement accentuée par la sensibilité du calcul de l'accélération, obtenue par dérivation numérique du signal de vitesse, ce qui peut amplifier les variations locales sans remettre en cause la cohérence globale des résultats. Les résultats obtenus suggèrent que le modèle dynamique du VEHBV, associé aux paramètres retenus, parvient à estimer de manière cohérente les besoins en puissance et en énergie du véhicule pour les différents profils de conduite étudiés. Néanmoins, ces estimations restent soumises à certaines limites, en raison des simplifications inhérentes aux équations utilisées et aux hypothèses formulées lors de la modélisation.

3.4 Modélisation du système de stockage d'énergie (Batterie)

L'électrification des véhicules représente un enjeu stratégique pour l'industrie automobile, favorisant l'essor et l'évolution des technologies de stockage d'énergie. Les batteries conventionnelles, telles que celles au plomb, au nickel-cadmium et au nickel-hydrure métallique, bien que matures, ne répondent pas aux exigences des systèmes de traction électrique en raison de leurs performances limitées. À l'inverse, les batteries lithium-ion offrent de meilleures caractéristiques, mais nécessitent encore des améliorations en termes de coût, de sécurité et de densité énergétique pour répondre pleinement aux attentes du marché [15].

Les études montrent que les batteries lithium-ion restent dominantes sur le marché actuel des batteries de puissance pour VE à court terme. Cependant, certaines technologies de pointe, telles que les batteries tout-solide et les batteries à base de silicium, sont fortement susceptibles de constituer la prochaine génération de batteries embarquées pour VE, offrant à la fois une puissance spécifique plus élevée et une meilleure sécurité [41].

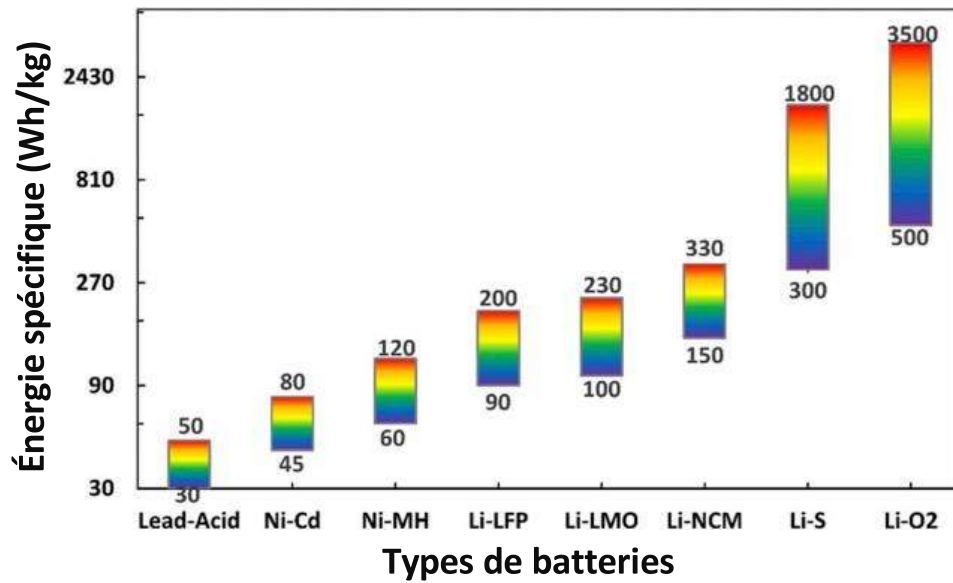


Figure 3.9 Valeurs de densité d'énergie spécifique des batteries utilisées et des technologies futures pour les véhicules électriques [41].

L'estimation de l'état de charge (State of Charge – SOC) constitue une étape essentielle pour assurer une gestion efficace des batteries dans un système hybride. Ce paramètre joue un rôle déterminant non seulement dans l'évaluation de l'autonomie du véhicule, mais aussi dans la prévention des dégradations liées aux cycles de charge et de décharge extrêmes. Parmi les différentes approches proposées dans la littérature, la méthode du comptage de Coulomb est largement utilisée en raison de sa simplicité et de son efficacité. Elle repose sur l'intégration du courant traversant la batterie, selon l'expression suivante [15, 42–44]:

$$SoC = SoC_0 - \int_0^t \frac{I_{Bat} \cdot dt}{3600 \cdot Q_{cell}} \quad (3.7)$$

où SoC_0 représente l'état de charge initial, Q_{cell} la capacité nominale de la batterie, et I_{Bat} le courant traversant celle-ci.

Pour ce travail, un modèle équivalent de batterie déjà validé dans la littérature est retenu, l'objectif de ce mémoire ne portant pas sur la caractérisation approfondie de la batterie. Le modèle à deux constantes de temps proposé dans [45] est adopté, et l'ensemble des paramètres associés est extrait de cette même référence. Ce type de modèle permet de représenter de manière satisfaisante le comportement dynamique des batteries lithium lors des phases transitoires, ce qui le rend approprié pour les simulations de gestion d'énergie des systèmes multi-sources. Dans ce cadre, le modèle repose sur une représentation électrique équivalente intégrant une résistance interne R_{SBat} et une source de tension à circuit ouvert $V_{OC}(SOC)$. Il comprend également deux branches de type RC, utilisées pour distinguer les dynamiques de court et de long termes, associées respectivement aux variations rapides de courant et aux phénomènes de relaxation observés après l'arrêt de la sollicitation.

Conformément à l'approche basée sur un modèle électrique équivalent dépendant de l'état de charge, décrite dans [46], la puissance totale de la batterie est évaluée à partir de la tension à circuit ouvert et des pertes internes associées à la résistance de la batterie. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_{Bat} = V_{oc} I_{Bat} - I_{Bat}^2 R_{Bat} \quad (3.8)$$

où R_{Bat} désigne la résistance interne de la batterie, identifiée à partir d'essais expérimentaux, et V_{OC} la tension à circuit ouvert.

Cette puissance est échangée avec le bus continu du véhicule, où l'équilibre énergétique se traduit naturellement par une répartition des courants entre les différentes sources et charges. La loi des courants de Kirchhoff est utilisée pour modéliser la connexion en

parallèle entre la batterie, le sous-système de traction, les systèmes auxiliaires et le système d'énergie renouvelable, comme exprimé par :

$$I_{Load} + I_{Aux} = I_{Bat} + I_{PV} + I_{PAC} \quad (3.9)$$

où I_{Load} et I_{Aux} désignent respectivement les courants demandés par la traction et par les systèmes accessoires, tandis que I_{Bat} , I_{PV} et I_{PAC} représentent les courants fournis par la batterie, le générateur photovoltaïque et la pile à combustible. La puissance fournie par la batterie est considérée positive, tandis que la puissance absorbée est prise négative. Ainsi, un courant positif de la batterie correspond à une phase de décharge, alors qu'un courant négatif traduit une phase de recharge lorsque la puissance fournie par le PV et/ou la PAC est excédentaire [35].

Ainsi, en s'appuyant sur le modèle dynamique présenté dans les sections précédentes, il a été possible d'estimer la quantité d'énergie nécessaire à partir d'un cycle de conduite représentatif. Les résultats issus de cette modélisation permettent d'évaluer les besoins énergétiques du véhicule et, en tenant compte de l'énergie disponible dans la batterie, de dimensionner les autres sources d'énergie embarquées. Toutefois, en raison du caractère fortement variable et transitoire de la demande de puissance, ainsi que des interactions dynamiques entre les différentes sources d'un système hybride multi-sources, une approche purement analytique s'avère peu adaptée. Le recours à des outils de simulation est ainsi indispensable pour analyser le comportement énergétique global du véhicule et valider les choix de dimensionnement avant toute phase de réalisation.

3.5 Modélisation des panneaux photovoltaïques (PV)

L'intégration de panneaux photovoltaïques (PV) dans un VEHBV permet de tirer parti d'une source d'énergie renouvelable afin d'accroître l'autonomie et d'optimiser l'efficacité énergétique du système. La modélisation de ce composant est indispensable pour prédire ses performances en fonction des conditions environnementales, notamment l'irradiation solaire et la température ambiante. Dans cette étude, un modèle simplifié de cellule photovoltaïque, tel que présenté à la Figure 3.10, est retenu afin de représenter le comportement du module. Celui-ci repose sur un circuit électrique équivalent constitué d'une source de courant en parallèle avec une diode de jonction. Pour prendre en compte les pertes internes, le modèle intègre également une résistance série et une résistance parallèle. Cette approche permet de décrire de manière réaliste la production électrique du module PV dans diverses conditions d'exploitation [26, 47–50].

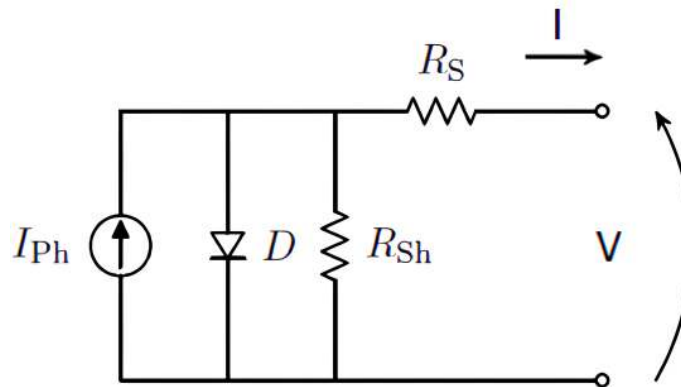


Figure 3.10 Modèle PV à une diode [47].

Le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque peut être modélisé à partir de l'application de la loi des nœuds de Kirchhoff au circuit équivalent. Le courant de sortie I_{pv} est alors exprimé comme la différence entre le courant photogénéré I_{ph} et le courant traversant la diode I_d , diminuée du courant de fuite circulant dans la résistance parallèle I_p .

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (3.10)$$

Le courant photogénéré dépend de l'irradiation solaire et de la température de fonctionnement, étant influencé par le courant de court-circuit I_{sc} , le coefficient de température du courant de court-circuit K_i et l'irradiation solaire nominale G_n . Il s'exprime selon la relation suivante :

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T_{op} - T_{ref})) \times \frac{G}{G_n} \quad (3.11)$$

Le courant traversant la diode est régi par la loi des semi-conducteurs et dépend du courant de saturation inverse I_0 , de la charge élémentaire q , de la constante de Boltzmann K , du facteur d'idéalité de la diode a et du nombre de cellules en série N_s . Il est exprimé par la relation suivante :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{aKT_{op}N_s}} - 1 \right) \quad (3.12)$$

Le courant de saturation inverse I_0 dépend fortement de la température de fonctionnement T_{op} , ce qui influence le comportement de la diode en régime inverse. L'augmentation de T_{op} accroît la génération de porteurs intrinsèques, ce qui entraîne une augmentation de I_0 . Ce courant dépend également de la bande d'énergie interdite E_g et du courant de saturation inverse de référence I_{rs} , défini à une température nominale T_{ref} . Il s'exprime comme suit :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{op}} \right)} \quad (3.13)$$

Enfin, le courant circulant dans la résistance parallèle R_{Sh} s'exprime par :

$$I_p = \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_{Sh}} \quad (3.14)$$

En intégrant ces différentes contributions, l'équation caractéristique de la cellule photovoltaïque prend la forme :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{aKT_{op}N_s}} - 1 \right) - I_p \quad (3.15)$$

L'analyse de cette équation montre que les performances de la cellule photovoltaïque sont directement influencées par plusieurs paramètres intrinsèques, notamment la résistance série R_s et la résistance parallèle R_{Sh} , ainsi que par des facteurs environnementaux tels que l'irradiation solaire G et la température de fonctionnement T_{op} .

Ainsi, la modélisation du système photovoltaïque s'appuie sur les caractéristiques techniques du panneau solaire ainsi que sur des données environnementales spécifiques au site d'application. Dans cette étude, le système photovoltaïque embarqué repose sur un panneau solaire Renogy 100 Watt 12 Volts monocristallin pliable (RNG-KIT-STCS-100D-VOY20), montré à la Figure 3.11. Ce panneau, aux dimensions de 69,1 cm × 50,6 cm × 7,1 cm, offre une puissance de crête de 100 W.



Figure 3.11 Panneau solaire Renogy 100 W monocristallin pliable (RNG-KIT-STCS-100D-VOY20).

Nous avons implémenté le modèle sous Simulink. L'irradiance G et la température de cellule T_{op} sont appliquées en entrée, et permettent d'obtenir V_{pv} , I_{pv} ainsi que $P_{pv} = V_{pv}I_{pv}$ pour l'analyse. Les paramètres utilisés proviennent de la fiche du module Renogy 100 W (voir annexe A). Les caractéristiques I-V et P-V obtenues sous Standard Test Conditions (STC), ou conditions d'essai standard, sont présentées à la Figure 3.12.

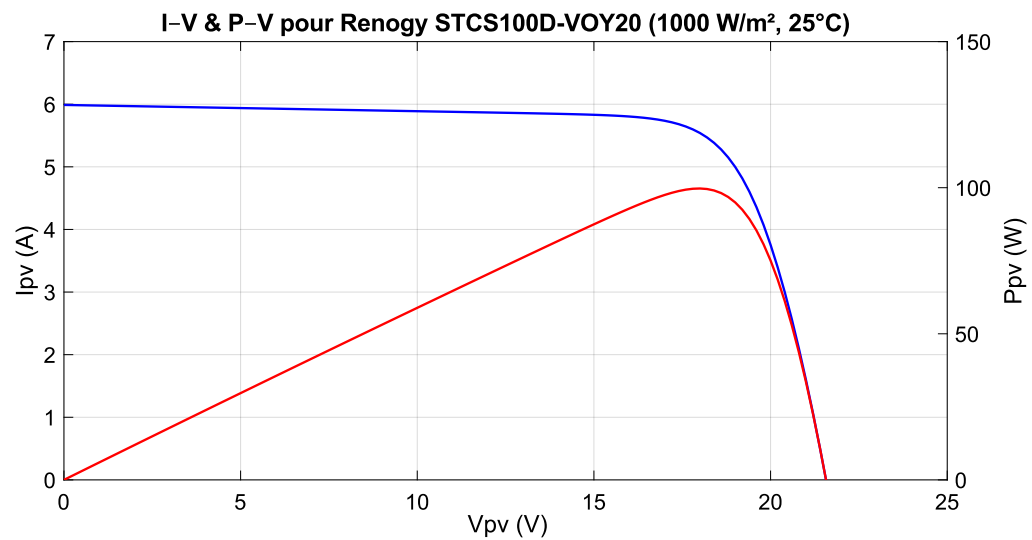


Figure 3.12 Caractéristiques I-V et P-V du module (1000 W/m², 25°C).

Afin de compléter la validation aux STC, nous avons étudié l'influence de l'irradiance G et de la température T sur les caractéristiques I-V et P-V du module. Les résultats confirment le comportement attendu des modules au silicium : à 25°C , l'augmentation de G entraîne une hausse quasi linéaire de I_{sc} et, par conséquent, de la puissance au point de fonctionnement maximal P_{mpp} , tandis que V_{oc} varie peu ; les courbes I-V se déplacent surtout verticalement et le maximum des courbes P-V croît à peu près proportionnellement à G . À irradiance constante (1000 W/m^2), l'élévation de la température diminue V_{oc} et V_{mp} , augmente légèrement I_{sc} et réduit P_{mpp} . Ces tendances valident le modèle simulé et justifient l'intégration d'un contrôleur *MPPT* pilotant un convertisseur DC-DC pour maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale malgré les variations de G et de la température. Ces constats sont illustrés aux Figures 3.13 et 3.14.

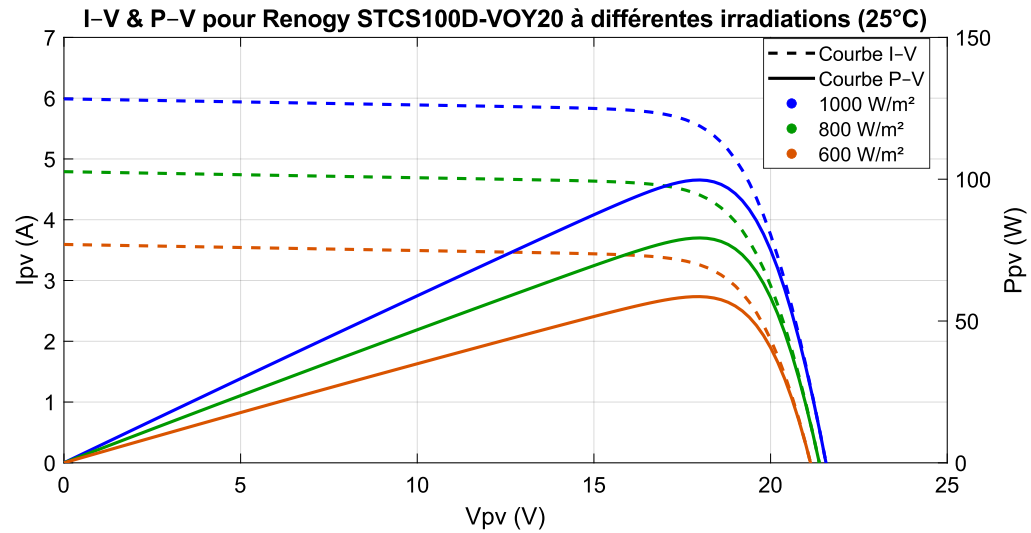


Figure 3.13 Influence de l'irradiance sur les courbes I-V et P-V du module.

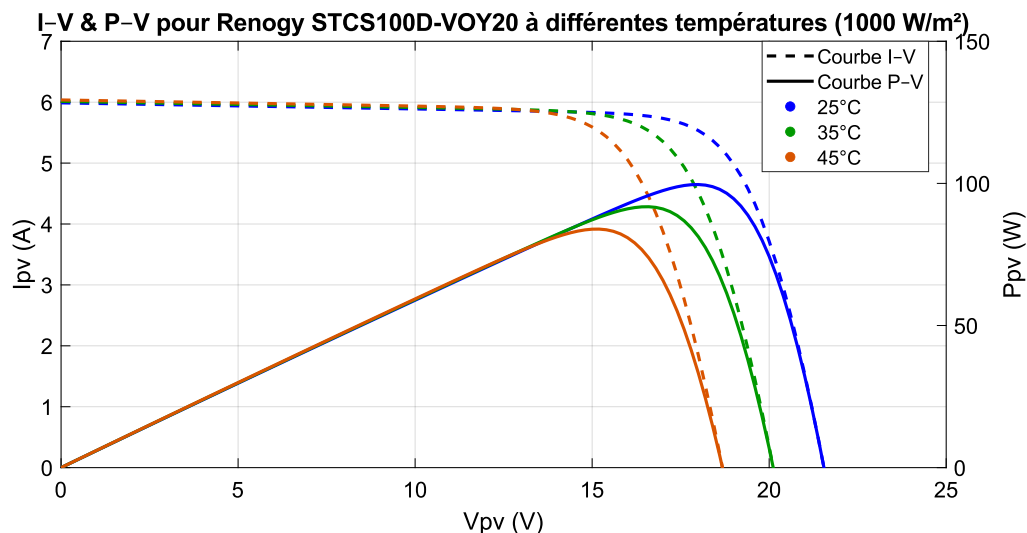


Figure 3.14 Influence de la température sur les courbes I-V et P-V du module.

L'ensemble des tests expérimentaux a été réalisé sur le site de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), situé aux coordonnées 46.3483° N et 72.5811° O. Afin de caractériser les conditions environnementales du site, les données d'irradiation solaire et de température ont été extraites de la plateforme PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), qui fournit des estimations basées sur des données satellitaires et des modèles climatiques. Les résultats détaillés issus de PVGIS sont présentés en annexe B, tandis que l'évolution de l'irradiation mensuelle pour le site étudié est illustrée à la Figure 3.15.

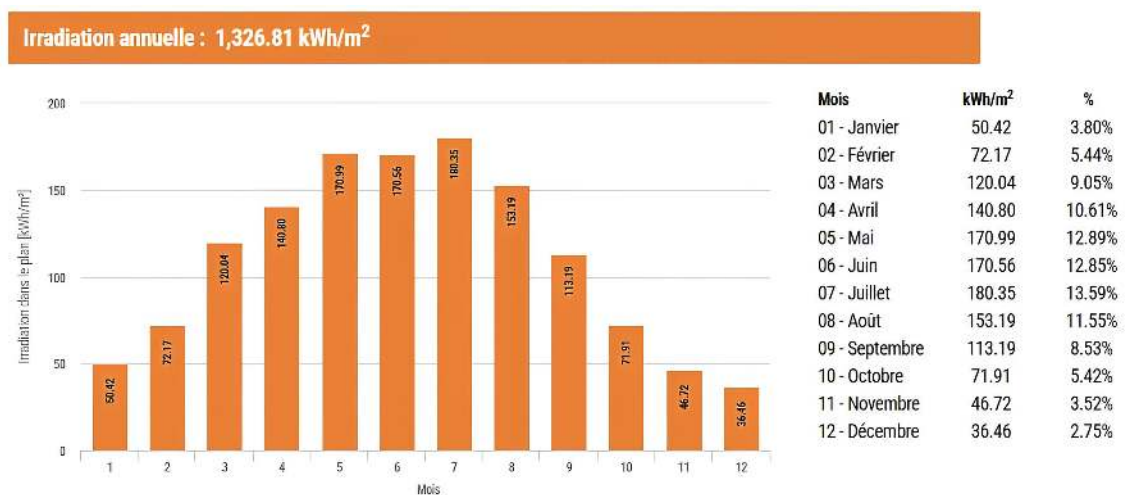


Figure 3.15 Irradiation mensuelle obtenue à partir de PVGIS pour le site de l'UQTR.

Dans le cadre de cette étude, les données spécifiques au mois de juin, période correspondant aux tests, ont été exploitées afin d'identifier des plages réalistes d'irradiation solaire et de température pour le site considéré. Ces valeurs servent de référence pour le paramétrage du modèle photovoltaïque et pour l'analyse de l'influence des conditions environnementales sur la production énergétique du système. Les profils temporels correspondants sont présentés à la Figure 3.16.

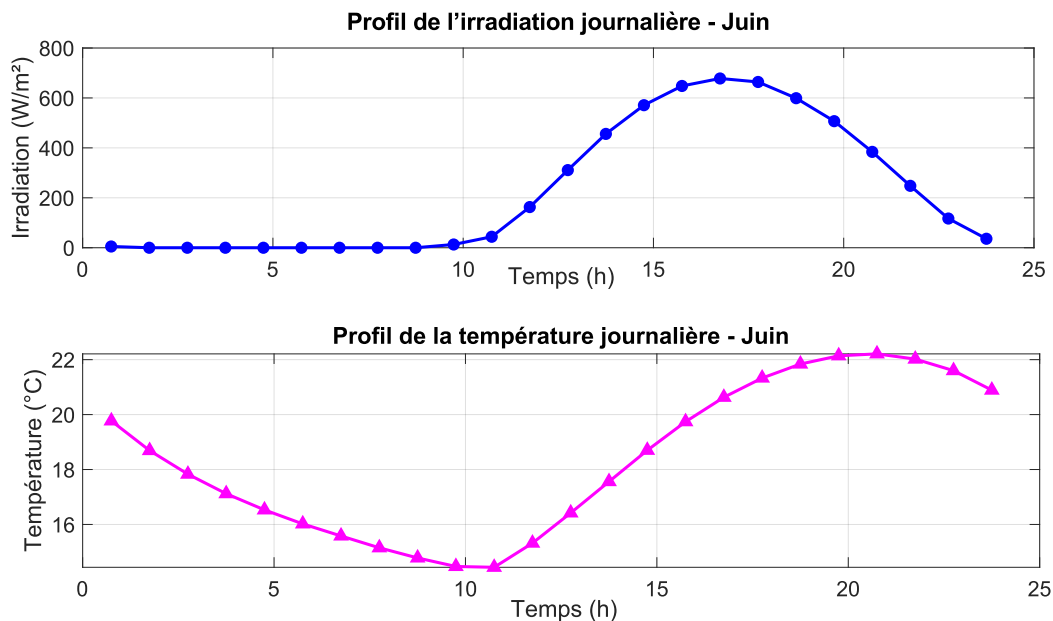


Figure 3.16 Profils temporels d'irradiation solaire et de température ambiante issus des données climatiques du mois de juin.

3.6 Modélisation de la pile à combustible (PAC)

3.6.1 Généralités et choix technologique de la pile à combustible

Les piles à combustible constituent des technologies de conversion énergétique particulièrement prometteuses, en raison de leur rendement élevé et de leurs avantages environnementaux. Elles se déclinent en plusieurs types, classés notamment selon leur température de fonctionnement ou la nature de l'électrolyte utilisé, chaque technologie répondant à des domaines d'application spécifiques [51].

Dans le domaine du transport, les piles à combustible à basse température s'imposent comme les plus adaptées [15]. Parmi celles-ci, les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) représentent aujourd'hui la technologie prédominante dans les véhicules hybrides à hydrogène. Cette position s'explique par leur capacité à offrir un compromis favorable entre de bonnes performances à basses températures

et basses pressions, une densité de puissance élevée, un temps de démarrage réduit, une durée de vie concurrentielle, ainsi qu'une bonne compatibilité avec les contraintes d'intégration embarquée [52]. Le Tableau 3-4 présente une synthèse comparative des principales technologies de piles à combustible, afin de justifier le choix technologique retenu dans le cadre de cette étude.

Tableau 3-4 Caractéristiques comparatives des principales technologies de piles à combustible adaptées de [15] [51] [53].

Technologie	Ion / électrolyte	Température de fonctionnement	Gamme de puissance	Applications typiques	Rendement électrique
AFC	OH^- / potasse liquide (KOH)	50–200 °C	1 W – 100 kW	Applications spatiales (ex. Apollo, navette spatiale)	55–60 %
PEMFC	H^+ / membrane polymère solide	30–100 °C	10 mW – 1 MW	Véhicules et applications mobiles, cogénération de faible puissance	30–45 %
DMFC	H^+ / membrane polymère solide	20–90 °C	10 mW – 1 MW	Électronique portable de faible puissance, fonctionnement longue durée	30–45 %
PAFC	H^+ / acide phosphorique liquide	~220 °C	200 kW – 10 MW	Cogénération : systèmes $\approx$ 200 kW	35–45 % (jusqu'à 75 % en cogénération)
MCFC	CO_3^{2-} / carbonate fondu	~650 °C	1 kW – 10 MW	Cogénération de moyenne à grande puissance, jusqu'à MW	50–60 %
SOFC	O^{2-} / céramique solide	500–1000 °C	1 kW – 10 MW	Cogénération sur une large plage de puissance, de 2 kW à plusieurs MW	50–55 % (jusqu'à 70 % en cogénération)

Sur le plan électrique, les performances d'une PEMFC sont classiquement évaluées à partir de ses caractéristiques tension–courant, rendement–courant et puissance–courant. Parmi celles-ci, la courbe de polarisation, reliant la tension de la cellule à la densité de courant, met en évidence l'écart significatif entre la tension réelle de la PEMFC et le potentiel thermodynamique théorique, également appelé potentiel standard réversible. Cet écart s'accroît avec l'augmentation du courant. Cette diminution progressive

de la tension résulte de différentes pertes électrochimiques, notamment la surtension d'activation liée à la cinétique des réactions aux électrodes, la surtension ohmique associée aux résistances internes de conduction ionique et électronique, ainsi que la surtension de concentration due aux limitations de transport de masse [52, 54].

3.6.2 Modélisation électrochimique et dynamique de la pile à combustible PEM

La modélisation électrochimique d'une pile à combustible PEM permet de prédire son comportement dynamique [52, 55]. Le modèle retenu [55] repose sur un circuit électrique équivalent à double couche variable permettant de représenter les phénomènes électrochimiques transitoires. Dans ce modèle, le comportement électrochimique statique de l'empilement est décrit par les équations présentées ci-après, tandis que le comportement dynamique est modélisé à l'aide d'un circuit électrique équivalent, tel qu'illustré à la Figure 3.17.

La tension de sortie d'une cellule unique V_{FC} peut être exprimée comme suit :

$$V_{FC} = E_{\text{Nernst}} - (V_{\text{act}} + V_{\text{ohmic}} + V_{\text{con}}) \quad (3.16)$$

où E_{Nernst} est le potentiel thermodynamique, V_{act} la perte d'activation, V_{ohmic} la perte ohmique et V_{con} la perte de concentration.

Pour un empilement de n cellules, la tension totale est donnée par :

$$V_s = n V_{FC} \quad (3.17)$$

Chaque terme de V_{FC} est défini par des équations spécifiques prenant en compte des paramètres tels que la température de fonctionnement de la pile T_{FC} (en kelvins),

les pressions partielles des gaz réactifs P_{H_2} et P_{O_2} , correspondant respectivement à l'hydrogène et à l'oxygène, ainsi que la densité de courant J . Le potentiel thermodynamique est défini par :

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - (0.85 \times 10^{-3})(T_{FC} - 298.15) + (4.31 \times 10^{-5}) T_{FC} [\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})] \quad (3.18)$$

La perte d'activation est calculée à l'aide de :

$$V_{\text{act}} = -(\xi_1 + \xi_2 T_{FC} + \xi_3 T_{FC} \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T_{FC} \ln(i_{FC})) \quad (3.19)$$

où ξ_i ($i \in \{1, 2, 3, 4\}$) sont des coefficients d'ajustement empiriques, I_{FC} désigne le courant délivré par la pile, et C_{O_2} représente la concentration d'oxygène au niveau de la cathode. Cette dernière est calculée à partir de la relation suivante :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp\left(-\frac{498}{T_{FC}}\right)} \quad (3.20)$$

La perte ohmique V_{ohmic} est exprimée par l'équation (3.21). La résistance de contact R_c est supposée constante, tandis que R_m correspond à la résistance équivalente de la membrane, calculée à partir de l'équation (3.22).

$$V_{\text{ohmic}} = i_{FC} (R_m + R_c) \quad (3.21)$$

$$R_m = \frac{\rho_m l}{A} \quad (3.22)$$

Dans cette expression, l et A désignent respectivement l'épaisseur de la membrane

et la surface active de la cellule, tandis que ρ_m représente la résistivité spécifique de la membrane. Cette dernière dépend de la température et de la densité de courant, et peut être estimée à l'aide de la relation suivante :

$$\rho_m = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T_{FC}}{303} \right)^2 \left(\frac{i_{FC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_M - 0.634 - 3 \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T_{FC} - 303}{T_{FC}} \right) \right]} \quad (3.23)$$

Le paramètre λ_M correspond à la teneur moyenne en eau au sein de la membrane.

Enfin, la perte de concentration s'exprime par :

$$V_{con} = -B \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (3.24)$$

où J représente la densité de courant réelle de la cellule, incluant la densité de courant permanente J_n , J_{max} désigne la densité de courant maximale de la cellule, et le coefficient B est une constante dépendant du type de cellule et de ses conditions de fonctionnement.

Dans ce circuit équivalent, un condensateur est placé en parallèle avec les chutes de tension d'activation et de concentration afin de prendre en compte leur dynamique, l'ensemble étant connecté en série avec le potentiel de Nernst et la chute de tension ohmique.

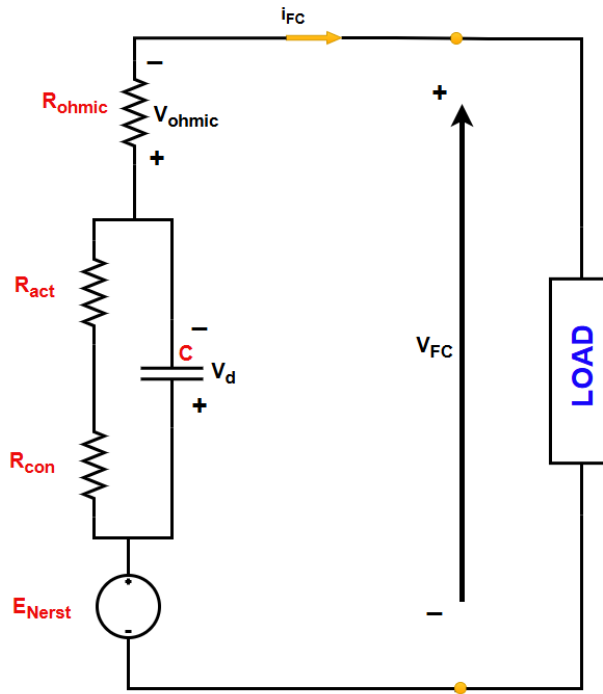


Figure 3.17 Circuit électrique équivalent dynamique d'une PEMFC.

L'équation dynamique du modèle est donnée par :

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{1}{C}i_{FC} - \frac{1}{\tau}v_d \quad (3.25)$$

où v_d représente la tension dynamique aux bornes du condensateur équivalent, associée aux surtensions d'activation et de concentration, C la capacité équivalente, et τ la constante de temps électrique de la pile, définie par :

$$\tau = C(R_{act} + R_{con}) \quad (3.26)$$

En tenant compte de ce comportement dynamique, la tension de sortie de la PEMFC s'écrit :

$$V_{FC} = E_{\text{Nernst}} - V_{\text{ohmic}} - v_d \quad (3.27)$$

La Figure 3.18 présente les courbes de polarisation et de puissance obtenues à partir de ce modèle. Les résultats reproduisent les caractéristiques classiques d'une PEMFC, notamment la diminution de la tension avec l'augmentation du courant et l'existence d'un point de puissance maximale, ce qui confirme la cohérence du modèle mathématique utilisé. Les paramètres numériques employés sont issus de la littérature de référence. Le modèle a été implémenté et simulé sous MATLAB/Simulink afin de vérifier la cohérence du comportement obtenu.

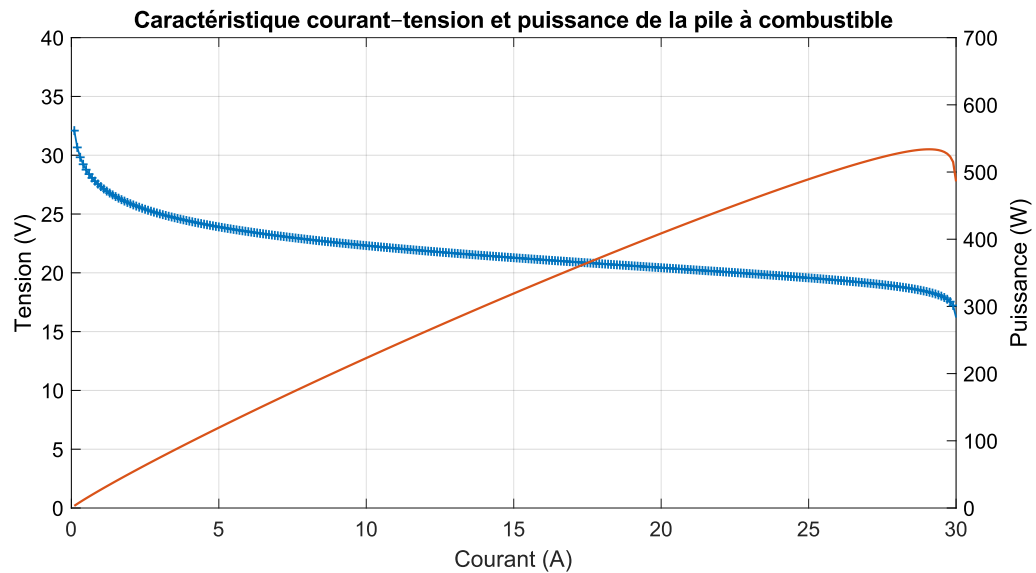


Figure 3.18 Tension et puissance du modèle de la pile à combustible PEM (500 W).

3.7 Configuration énergétique et méthodologie de dimensionnement du VEHV

Comme mentionné précédemment, une configuration hybride électrique série rechargeable PV/FC est retenue pour le VEHV, telle qu'illustrée à la Figure 3.19.

Cette architecture repose sur une propulsion différentielle assurée par deux moteurs électriques entraînant les roues motrices, alimentés par une chaîne énergétique combinant une batterie, des convertisseurs de puissance, un système photovoltaïque embarqué et une pile à combustible. Dans le cadre de cette application à basse vitesse, le freinage régénératif n'est pas pris en compte, son apport énergétique étant jugé négligeable au regard des profils de conduite étudiés. Cette configuration vise à assurer une autonomie étendue du véhicule tout en autorisant une recharge via le réseau électrique ou des sources renouvelables.

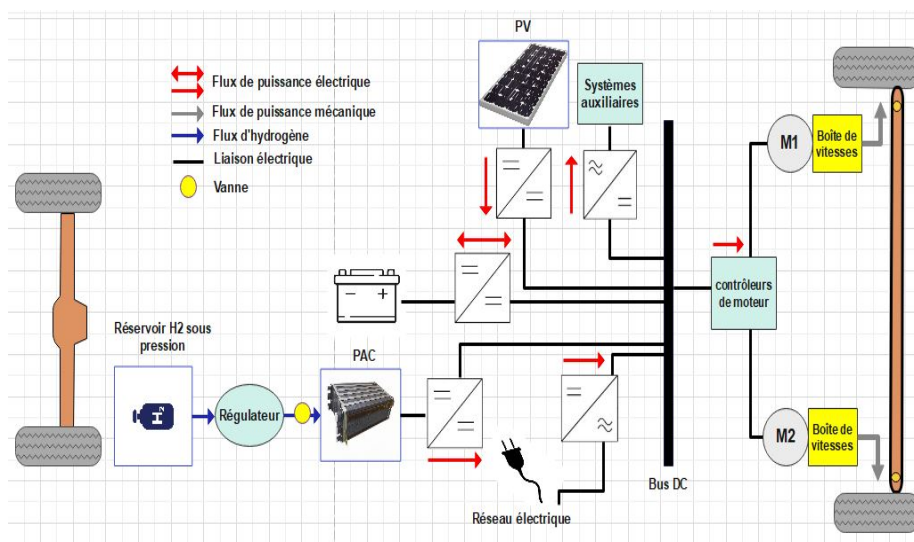


Figure 3.19 Schéma de l'architecture énergétique du véhicule électrique hybride basse vitesse (VEHBV).

Le dimensionnement et le prototypage d'une chaîne de traction hybride pour un VEHBV constituent des tâches complexes en raison de multiples contraintes de conception et d'une littérature encore limitée. Dans ce contexte, le modèle énergétique développé a été ajusté et validé à partir de données expérimentales. Sur cette base, les principaux composants du système de traction, notamment le moteur électrique et la batterie, ont été dimensionnés en priorité, la batterie assurant la prise en charge des puissances transitoires.

Le système photovoltaïque et la pile à combustible ont ensuite été dimensionnés comme sources d'énergie complémentaires afin de limiter la sollicitation de la batterie et d'assurer l'autonomie requise du véhicule. La pile à combustible est principalement dimensionnée pour couvrir la demande de puissance continue.

L'analyse des profils de puissance issus des essais met en évidence une sollicitation fortement variable, caractérisée par des pics transitoires dépassant ponctuellement 400 W lors des phases d'accélération, tandis que la puissance demandée en régime soutenu se situe majoritairement autour de 200 W. Cette valeur est retenue comme puissance continue de référence pour le dimensionnement du prolongateur d'autonomie. En tenant compte d'un rendement global de la chaîne énergétique $\eta = 0,85$, la puissance électrique à fournir par la pile à combustible est estimée à environ 235 W. L'introduction d'une marge de conception de 20 % conduit à une puissance nominale d'environ 282 W. Toutefois, des travaux antérieurs ont démontré que des piles à combustible de puissance nominale de l'ordre de 300 W s'avéraient insuffisantes pour satisfaire durablement les pics de puissance en mode décharge de la batterie, conduisant à privilégier des niveaux de puissance plus élevés [35]. Ce constat conduit à retenir, dans le présent travail, une pile à combustible de puissance nominale de 500 W afin d'assurer la robustesse du système face aux pointes de puissance, aux conditions de fonctionnement dégradées et à l'évolution future du prototype. La batterie prend quant à elle en charge les régimes transitoires et les pics de puissance. Le système de stockage d'hydrogène est enfin dimensionné en fonction de l'autonomie visée.

Sur la base des résultats du dimensionnement du système énergétique, la chaîne de traction du VEHBV intègre un générateur photovoltaïque monocristallin de 100 W, correspondant à une surface active d'environ 0,7 m² (voir annexe A), ainsi qu'une

pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) de 500 W (H-500, Horizon Educational), dont les spécifications techniques sont regroupées en annexe C. L'architecture comprend également une batterie lithium-ion de 24 V–25 Ah et un réservoir d'hydrogène comprimé, dimensionné à environ 0,20 kg sous une pression de 300 bar.

Afin de compléter la démarche de dimensionnement technico-énergétique du VEHBV, une estimation du coût d'acquisition des principaux composants du système de production et de gestion énergétique embarqué est réalisée. Cette estimation a pour objectif de fournir un ordre de grandeur du budget de prototypage, en cohérence avec les puissances et capacités retenues (PV 100 W, PAC 500 W, batterie 24 V–25 Ah, stockage H₂ d'environ 0,20 kg à 300 bar). Les coûts présentés correspondent à des estimations issues de prix catalogue et/ou de prix moyens observés sur le marché des composants de prototypage. Les valeurs indiquées ont été relevées en février 2026 et sont fournies à titre indicatif afin d'évaluer l'ordre de grandeur du budget associé au système énergétique embarqué. Le coût total, obtenu par la somme des sous-totaux du Tableau 3-5, constitue un indicateur préliminaire de faisabilité économique à l'échelle du prototype.

Tableau 3-5 Estimation de l'ordre de grandeur du coût d'acquisition des principaux composants de la chaîne énergétique du VEHBV dans le cadre du prototypage expérimental (prix catalogue observés en février 2026).

Composant	Référence / Modèle	Caractéristiques principales	Qté	Prix unitaire (CAD)	Sous-total (CAD)
Module photovoltaïque	Renogy (Annexe A)	Puissance nominale : 100 W	1	233	233
Pile à combustible PEM	Horizon H-500 (Annexe C)	Puissance nominale : 500 W	1	5 400	5 400
Batterie lithium (pack)	LiFePO ₄ (24 V / 25 Ah)	Énergie nominale : 640 Wh	1	729	729
Système de stockage H ₂	Réservoir 300 bar + régulateur HP + vanne d'isolement	≈ 0,20 kg H ₂ (300 bar)	1	1 300	1 300
Convertisseurs de puissance et protections	Architecture bus continu 48 V	Interfaces DC/DC et AC/DC avec sécurisation électrique	1	1 700	1 700
Électronique et supervision	Capteurs et unité de commande (EMS)	Contrôle et supervision du système énergétique	1	450	450
Coût total estimé (budget prototype)					9 812

3.8 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir un cadre de modélisation pour l'analyse énergétique du VEHBV. Les essais expérimentaux ont conduit à la définition d'un cycle de conduite représentatif, tandis que le modèle dynamique a permis d'évaluer les sollicitations en puissance et en énergie. La modélisation des sources d'énergie a ensuite justifié la configuration hybride retenue et le dimensionnement des composants principaux. Une

estimation budgétaire simplifiée du système énergétique embarqué a également été réalisée afin d'apprécier l'ordre de grandeur du coût de prototypage et d'en vérifier la cohérence économique. Ces travaux constituent une base essentielle pour la simulation globale du système et le développement des stratégies de gestion énergétique présentées dans la suite du mémoire.

Chapitre 4 - Gestion optimisée de l'énergie dans les véhicules électriques hybrides à basse vitesse

4.1 Introduction

Ce chapitre présente la stratégie de gestion énergétique développée pour le VEHBV multi-sources. Une logique heuristique de supervision est d'abord formalisée afin de décrire les conditions d'activation et de coordination des différentes sources énergétiques en fonction de l'état de charge de la batterie et des conditions de fonctionnement du système. Des simulations représentatives sont ensuite réalisées pour analyser le comportement énergétique du véhicule et évaluer la répartition de la puissance entre la batterie, le générateur photovoltaïque et la pile à combustible. Enfin, une approche décisionnelle basée sur un algorithme génétique est introduite pour optimiser la sélection de la borne de recharge et améliorer la gestion globale de l'autonomie du véhicule.

4.2 Conception et logigramme de la stratégie heuristique de gestion énergétique

La stratégie de gestion énergétique (EMS) développée pour le VEHBV repose sur une logique hiérarchisée inspirée des principes généraux rapportés dans la littérature pour les véhicules hybrides électriques multi-sources, tout en étant spécifiquement adaptée à l'architecture énergétique multi-sources de type PV/PAC/Batterie développée dans cette étude. Elle vise à optimiser l'exploitation des ressources disponibles, à limiter la dégradation des composants électrochimiques et à garantir la sécurité ainsi que la continuité du fonctionnement du système dans l'ensemble des scénarios d'exploitation. La philosophie générale consiste à exploiter prioritairement l'énergie renouvelable disponible, à maintenir la pile à combustible dans des zones de fonctionnement favorables à son rendement global, et à utiliser la batterie comme élément tampon destiné à absorber

les variations rapides de charge et à couvrir les pics de puissance.

Initialisation et adaptation au profil de mission : Au démarrage, le système procède à l'initialisation des paramètres essentiels nécessaires à son bon fonctionnement. Le mode de fonctionnement est sélectionné en fonction du scénario de mission identifié à partir de l'analyse expérimentale préalable des cycles représentatifs du VEHBV. Chaque mode est associé à une plage spécifique de l'état de charge de la batterie (SOC_{Min} et SOC_{Max}), garantissant une adaptation cohérente de la gestion énergétique aux conditions de conduite prévues. En cas d'activation du mode « retour vers borne », une politique conservatrice est appliquée afin de maximiser l'autonomie résiduelle.

Surveillance du stockage électrochimique : L'état de charge de la batterie (SOC_{Bat}) constitue la variable centrale du processus décisionnel. Lorsque SOC_{Bat} dépasse le seuil supérieur (SOC_{Max}), la recharge est interrompue afin d'éviter toute surcharge et de limiter les phénomènes de dégradation du système de stockage. À l'inverse, lorsque SOC_{Bat} devient inférieur au seuil inférieur (SOC_{Min}), le système de gestion énergétique active la pile à combustible, tandis que le générateur photovoltaïque continue de contribuer naturellement à l'alimentation du bus continu, assurant ainsi la continuité de fonctionnement du VEHBV.

Contribution du générateur photovoltaïque : Le générateur photovoltaïque constitue une source d'énergie renouvelable prioritaire au sein du VEHBV. Il fonctionne en mode « MPPT » afin d'extraire la puissance maximale disponible en fonction des conditions d'irradiance. La puissance produite (P_{PV}) est injectée sur le bus continu et contribue naturellement à l'alimentation du système. Lorsque l'état de charge de la batterie atteint sa limite supérieure, la recharge est limitée afin d'éviter toute surcharge et de préserver la durée de vie du stockage.

Rôle de la pile à combustible et stratégie de commande: La pile à combustible intervient comme source auxiliaire d'énergie lorsque l'état de charge de la batterie devient inférieur au seuil défini par la stratégie de gestion énergétique. Le superviseur vérifie alors la disponibilité du réservoir d'hydrogène (SOC_{H_2}). Si le niveau d'hydrogène est suffisant et que les conditions opérationnelles sont respectées, la PAC est activée afin de soutenir l'alimentation du bus continu, seule ou en complément du générateur photovoltaïque. Dans un souci d'amélioration du rendement global du système et de limitation du vieillissement prématuré de la pile, la PAC est commandée autour d'un niveau de puissance quasi stationnaire, tandis que la batterie assure la compensation des variations rapides de la charge.

La commande de la PAC repose sur une stratégie d'activation supervisée par l'EMS, comme illustré à la Figure 4.1. Le superviseur s'appuie sur l'état de charge de la batterie SOC_{Bat} et du réservoir d'hydrogène SOC_{H_2} afin d'autoriser ou non l'activation de la pile à combustible. Lorsque les conditions sont satisfaites, une puissance de fonctionnement prédéfinie P_{PAC}^* , correspondant à la puissance électrique que l'on souhaite injecter sur le bus continu, est appliquée à la PAC. Dans ce travail, P_{PAC}^* est choisie en cohérence avec la puissance moyenne de traction du véhicule. Cette approche, couramment adoptée dans la littérature, permet de limiter les transitoires de la PAC, d'améliorer son rendement et de préserver sa durée de vie [56]. À partir de cette puissance de référence, une consigne de courant I_{PAC}^* est déterminée en tenant compte de la tension instantanée de fonctionnement de la pile ainsi que du rendement du convertisseur DC/DC associé. Des mécanismes de saturation sont intégrés afin de respecter les contraintes physiques et sécuritaires de la PAC, tandis que la boucle de régulation interne assure le suivi dynamique de la consigne.

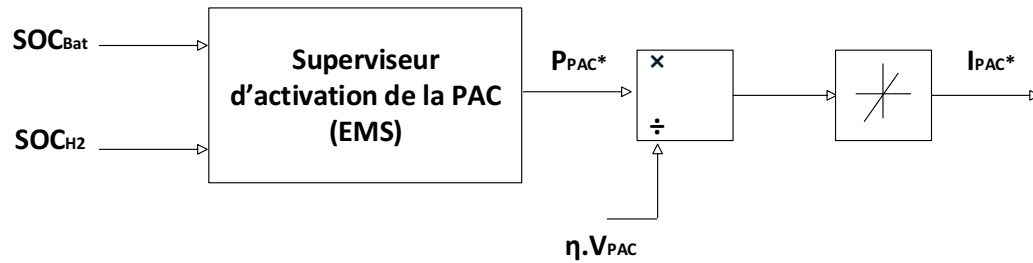


Figure 4.1 Schéma fonctionnel de la commande de la PAC.

Logique à hystérésis pour la stabilité opérationnelle : Comme indiqué précédemment, l'activation de la pile à combustible résulte d'une évaluation globale des ressources énergétiques disponibles. Afin de stabiliser cette décision dans le temps et d'éviter des commutations répétées dues aux fluctuations rapides de la demande de puissance ou de l'état de charge de la batterie, une logique à seuils différenciés est intégrée dans la stratégie EMS. Une fois enclenchée, la PAC demeure active jusqu'à ce que la batterie atteigne un niveau de charge supérieur ou qu'une condition de sécurité impose son arrêt. L'écart entre les seuils d'activation et de désactivation introduit un effet d'hystérésis opérationnelle garantissant un fonctionnement plus stable du système [57]. Le principe de cette logique est illustré à la Figure 4.2.

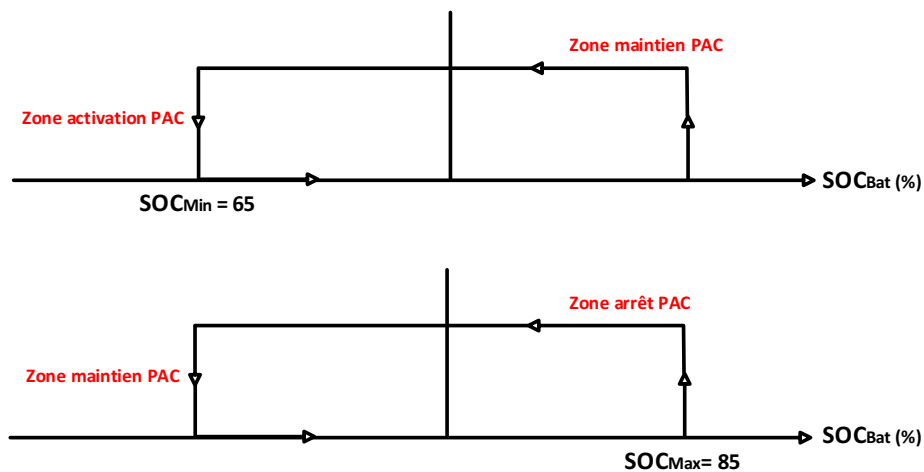


Figure 4.2 Principe de la logique à hystérésis appliquée à la PAC, adapté de [57, 58].

Modes d'alerte et gestion de l'autonomie résiduelle : Lorsque SOC_{Bat} franchit le seuil d'alerte (SOC_{Alerte}), la stratégie EMS entre dans une phase de surveillance renforcée visant à préserver l'autonomie résiduelle. Dans cette situation, l'autonomie du véhicule est évaluée et la capacité à atteindre une borne de recharge est estimée à l'aide de l'algorithme génétique développé. Si une station est jugée accessible, le mode « retour vers borne » est activé afin d'identifier la borne optimale. Dans le cas contraire, lorsque aucune borne n'est atteignable ou que le niveau de charge atteint un seuil critique, un arrêt de sécurité ($STOP_sécurité$) est déclenché afin de protéger la batterie, la pile à combustible et l'ensemble des composants du véhicule.

Cette logique décisionnelle assure une exploitation rationnelle des sources d'énergie, une gestion efficace de l'autonomie et une protection durable des composants, garantissant la performance et la fiabilité du VEHBV dans divers scénarios d'exploitation. La stratégie a été implémentée et validée sous l'environnement Simulink/Stateflow. L'organigramme présenté à la Figure 4.3 synthétise la séquence complète des décisions mises en œuvre par le superviseur énergétique.

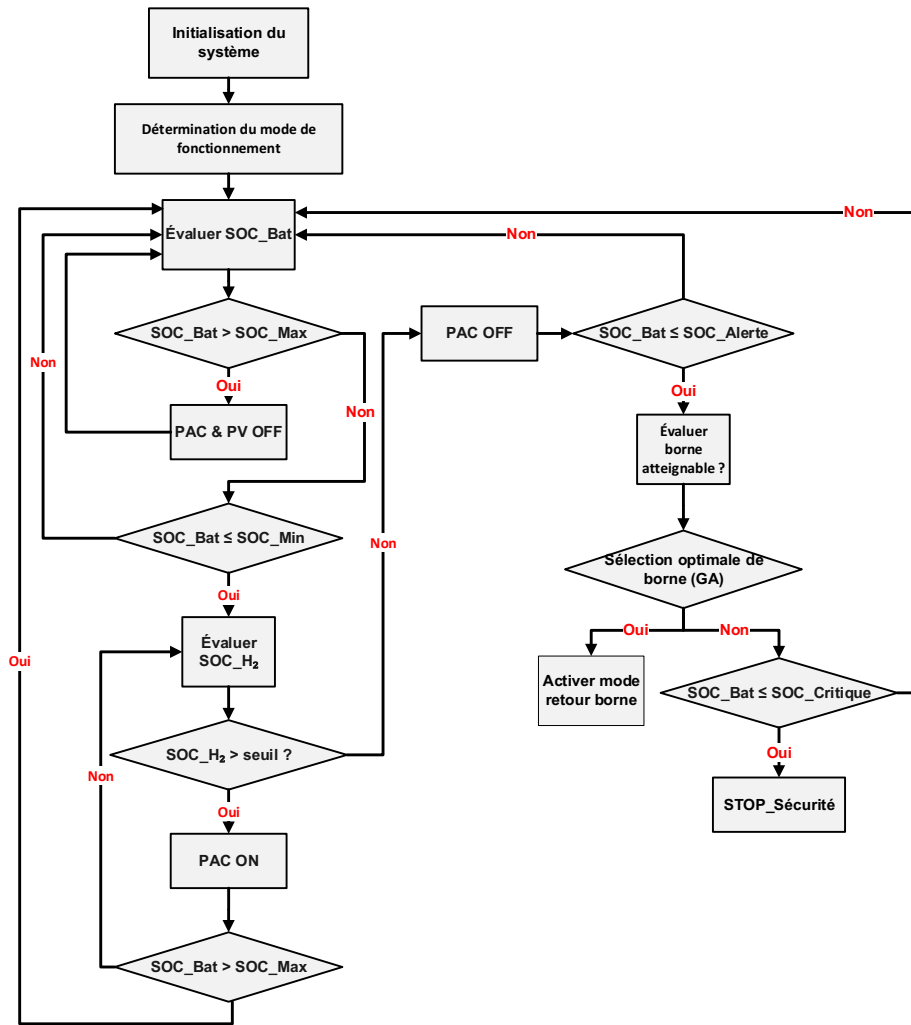


Figure 4.3 Logigramme de la stratégie heuristique de gestion énergétique du VEH BV.

4.3 Analyse et résultats de simulation du système multi-sources du VEH BV sous conditions de fonctionnement représentatives

4.3.1 Performance du système multi-sources en régime nominal avec contribution photovoltaïque

La présente sous-section présente les résultats de simulation du système multi-sources du VEH BV pour le cycle associé au Test #1. Dans ce scénario, les conditions d'irradiance

sont favorables et l'état de charge de la batterie demeure dans la plage nominale, de sorte que la pile à combustible n'est pas sollicitée. Dans un premier temps, le profil du courant de la charge est déterminé à partir de la relation suivante, issue de [9] :

$$I_{Load} = \frac{P_{tr}}{\eta V_{DC_Bus}} \quad (4.1)$$

où $P_{tr} = F_{tr} v$ représente la puissance mécanique de traction demandée au véhicule, η le rendement global du convertisseur, et V_{DC_Bus} la tension du bus continu. La Figure 4.4. présente ainsi le courant absorbé par la charge au cours du cycle associé au Test #1.

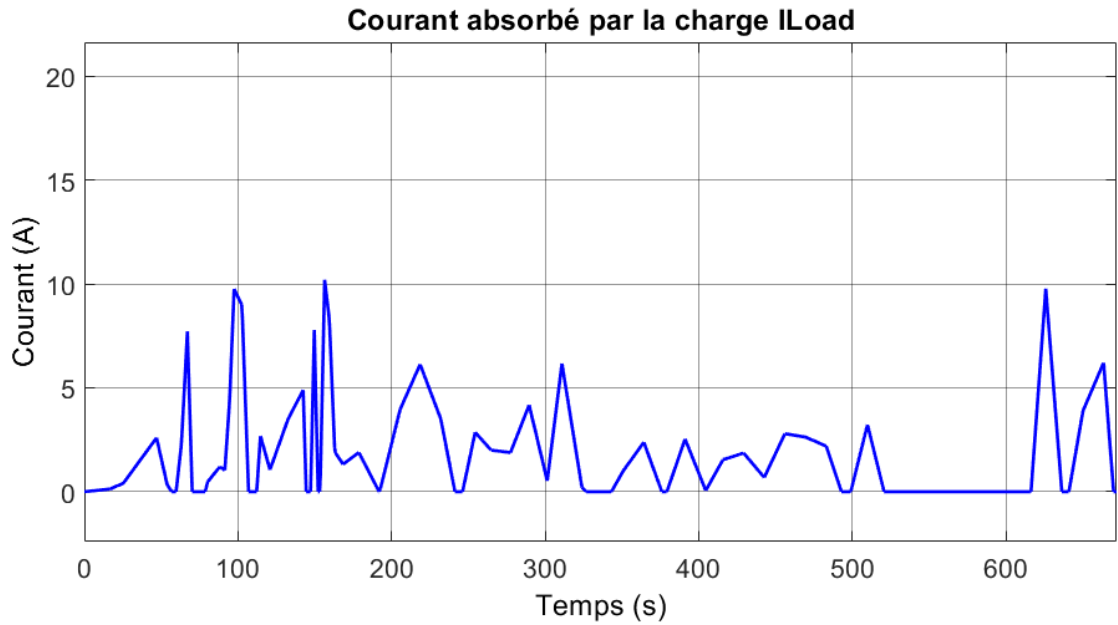


Figure 4.4 Courant absorbé par la charge au cours du cycle associé au Test #1.

Dans le cadre du fonctionnement nominal du VEHBV, la tension du bus continu est maintenue autour d'une valeur constante afin d'assurer une alimentation stable des

convertisseurs et des charges. Afin d'évaluer la robustesse du régulateur, des variations de la tension de référence ont été introduites durant la simulation. Les résultats présentés à la Figure 4.5 montrent que la tension du bus suit correctement les consignes appliquées, confirmant les bonnes performances du système de contrôle.

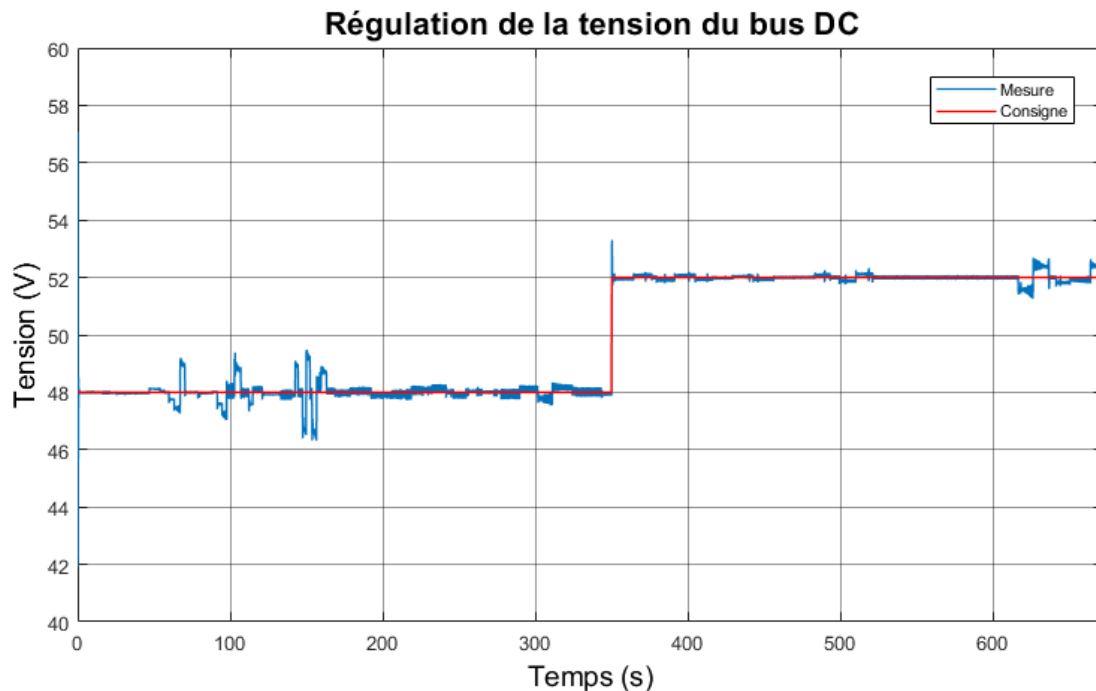


Figure 4.5 Évolution de la tension du bus continu et de sa référence au cours du Test #1.

Dans le cas présent, le cycle débute avec un état de charge de la batterie d'environ 70 %, valeur comprise entre les seuils du mode « conduite normale », fixés à $SOC_{Min} = 65 \%$ et $SOC_{Max} = 85 \%$. La Figure 4.6 montre que le SOC reste globalement stable au cours du cycle, avec des variations limitées qui ne conduisent ni à l'atteinte de SOC_{Min} ni de SOC_{Max} . Ces conditions traduisent une batterie suffisamment chargée pour éviter la sollicitation de la pile à combustible, le générateur photovoltaïque constituant alors la principale source d'énergie, tandis que la batterie intervient principalement pour amortir

les transitoires de puissance. Afin de compléter cette analyse, la Figure 4.7 présente l'évolution de la tension de la batterie au cours du cycle. Celle-ci demeure proche de sa valeur nominale, avec des chutes ponctuelles liées aux appels de puissance, confirmant le rôle tampon de la batterie dans la gestion dynamique du système.

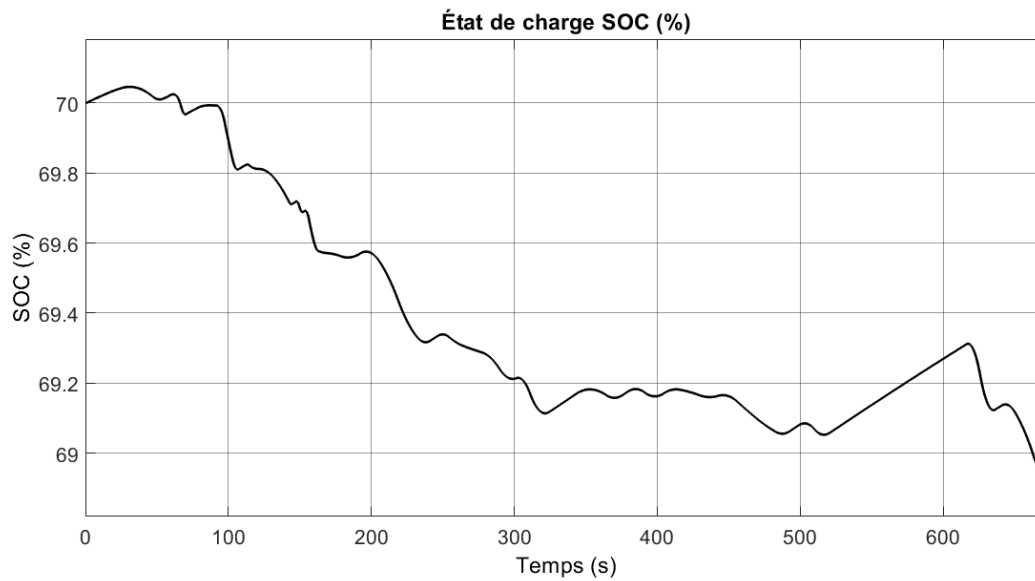


Figure 4.6 Évolution de l'état de charge de la batterie SOC_{Bat} au cours du Test #1.

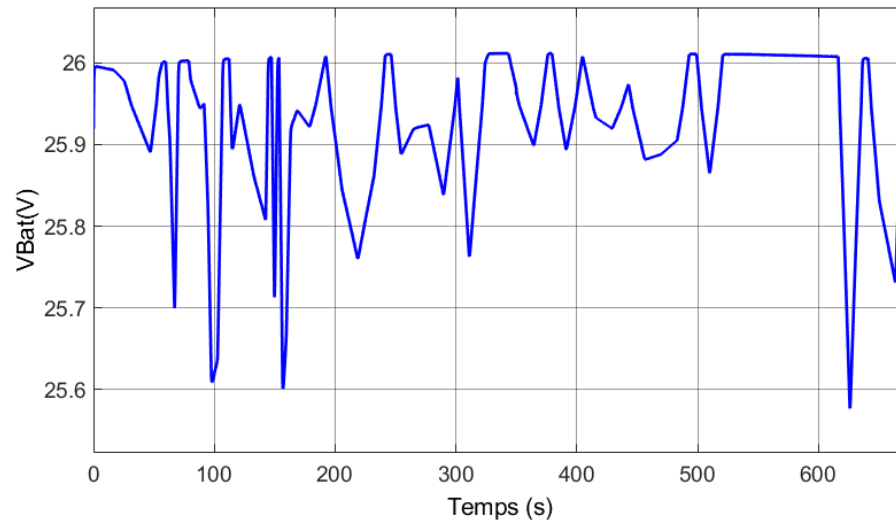


Figure 4.7 Évolution de la tension batterie V_{Bat} au cours du Test #1.

Dans la suite, l'analyse se concentre sur le comportement du générateur photovoltaïque et de son système de poursuite du point de puissance maximale sous les profils climatiques considérés, comme illustré à la Figure 4.8. En effet, nous avons extrait un segment des profils réels déjà présentés et l'avons implémenté dans le bloc *Signal Builder* afin de simuler des conditions climatiques réalistes sur la durée du cycle du Test #1. L'irradiance incidente et la température évoluent de manière progressive au cours de la simulation; ces variations se traduisent directement par une adaptation du courant produit par le champ photovoltaïque, tandis que la tension à ses bornes demeure relativement stable autour de sa valeur optimale de fonctionnement. L'indice de performance du MPPT reste proche de l'unité tout au long du cycle, indiquant une poursuite efficace du point de puissance maximale malgré les changements de conditions atmosphériques. La puissance maximale extraite au cours du test atteint environ 67 W, valeur cohérente avec les niveaux d'irradiance imposés. La comparaison entre la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque et la puissance idéale met en évidence une très bonne concordance,

confirmant la robustesse du convertisseur DC–DC ainsi que la capacité de la stratégie de commande à exploiter de façon optimale l'énergie solaire disponible.

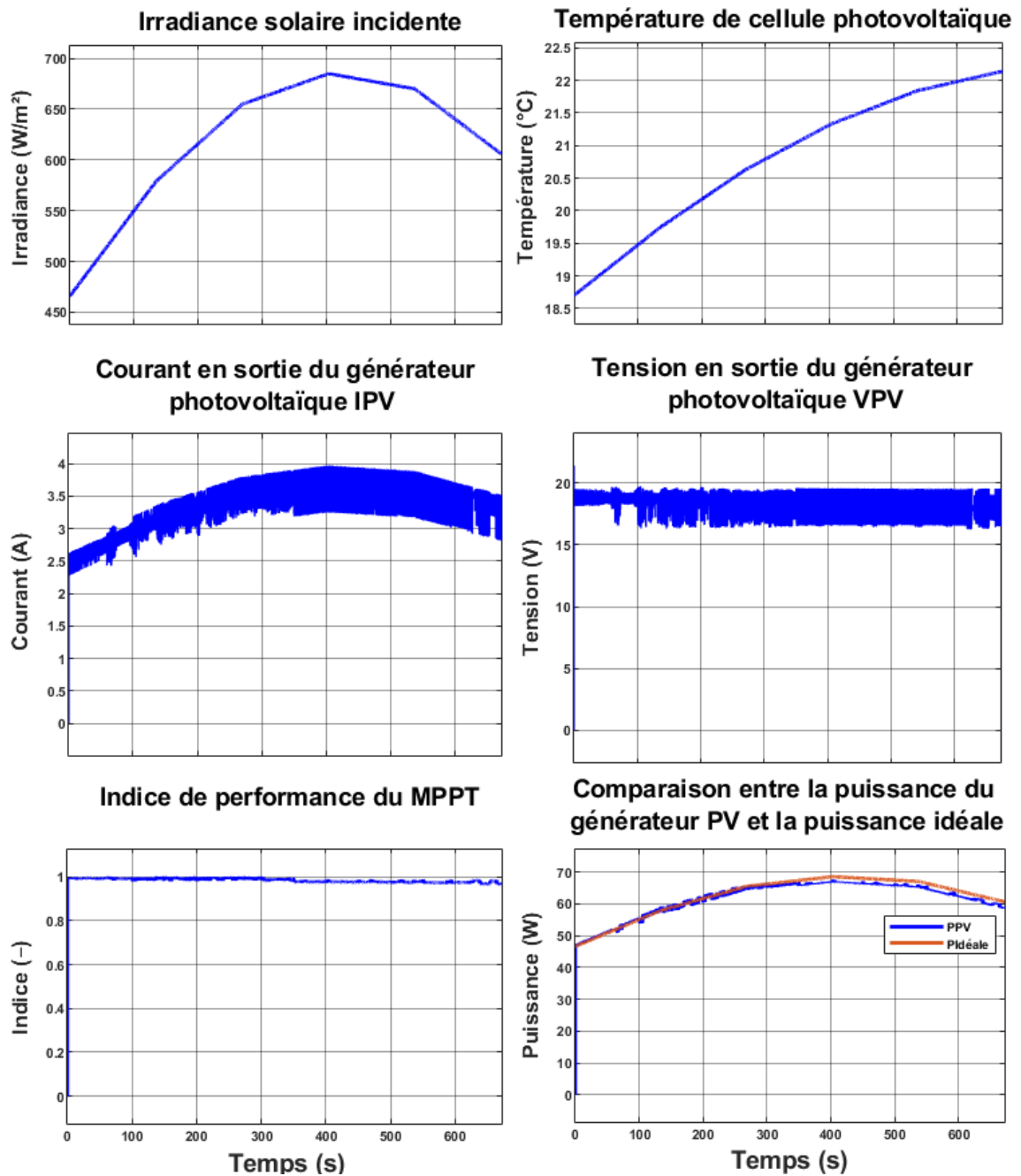


Figure 4.8 Résultats de simulation du générateur photovoltaïque au cours du Test #1: profils d'irradiance solaire incidente et de température de cellule, évolution du courant I_{PV} et de la tension V_{PV} en sortie du champ PV, indice de performance du MPPT, et comparaison entre la puissance fournie P_{PV} et la puissance idéale $P_{Idéale}$.

Afin de compléter cette analyse, la Figure 4.9 illustre l'évolution des puissances des différentes sources du système multi-sources au cours du cycle du Test #1. Les résultats mettent en évidence un fonctionnement en régime photovoltaïque favorable, la pile à combustible demeurant inactive sur l'ensemble du cycle. La production photovoltaïque constitue une contribution énergétique de base relativement stable, tandis que la batterie assure la majeure partie de la dynamique de puissance en suivant les variations de la charge : elle fournit les pics de puissance lorsque P_{PV} est insuffisante et absorbe l'excédent énergétique lors des phases de faible demande.

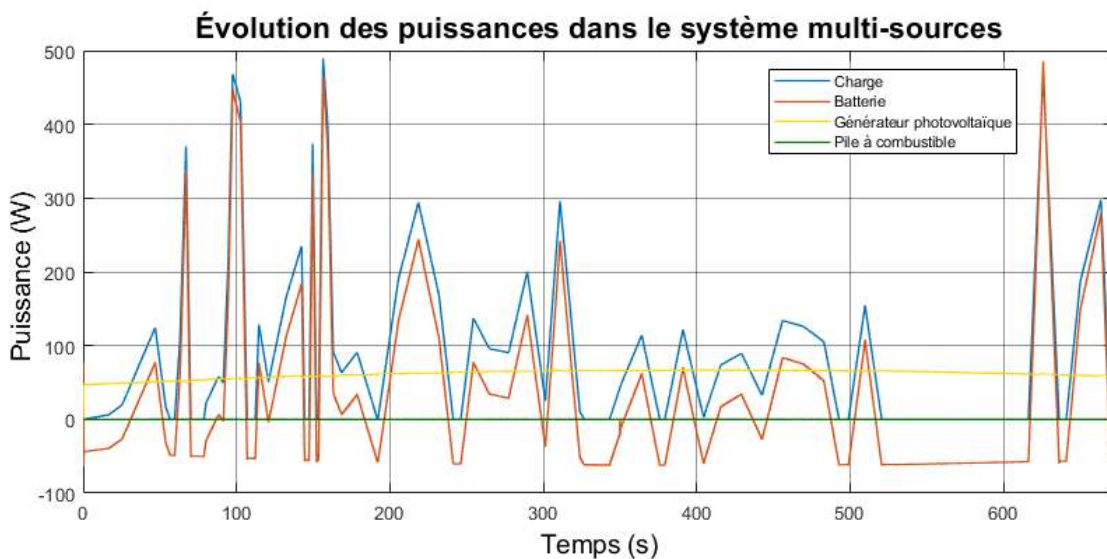


Figure 4.9 Évolution des puissances de la charge, du générateur photovoltaïque, de la batterie et de la pile à combustible au cours du Test #1.

4.3.2 Comportement du système multi-sources avec sollicitation de la pile à combustible

Dans ce scénario, la diminution progressive du SOC conduit à l'activation de la pile à combustible afin de soutenir l'alimentation du bus continu. Après une phase

initiale reposant sur les sources embarquées, une tendance à la décharge est observée, jusqu'à l'atteinte du seuil SOC_{Min} qui déclenche l'intervention de la pile et limite la décharge de la batterie. La Figure 4.10 met en évidence cette logique de supervision en montrant clairement l'autorisation d'activation de la pile par l'EMS après cette phase initiale. Par ailleurs, l'absence d'activation du mode « retour vers borne » et du mode « arrêt de sécurité » indique que le système demeure dans une zone de fonctionnement nominale, avec un niveau d'énergie suffisant pour assurer la poursuite du trajet.

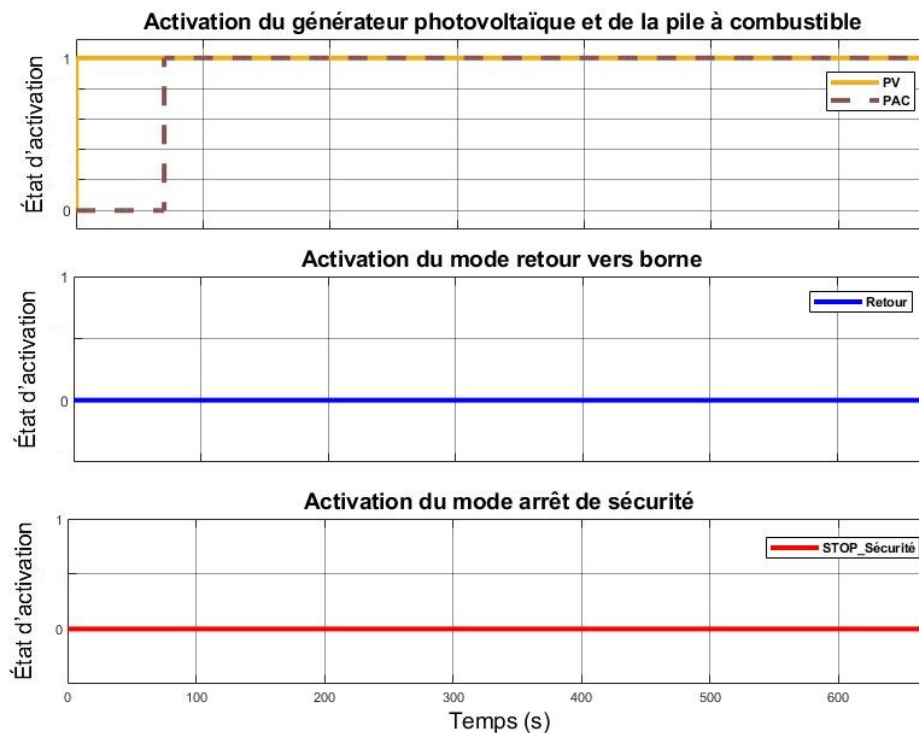


Figure 4.10 Activation des sources énergétiques et des modes EMS lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #1.

L'évolution du SOC illustrée à la Figure 4.11 confirme ce mécanisme de supervision. À partir d'environ $t \approx 80$ s, l'activation de la pile à combustible devient effective. Cette activation se traduit par une inversion progressive de la tendance à la décharge, le SOC amorçant alors une augmentation graduelle. Ce comportement met en évidence que la pile

ne se limite pas à couvrir la charge instantanée, mais participe également à la recharge partielle de la batterie, contribuant ainsi à la stabilisation énergétique globale du système.

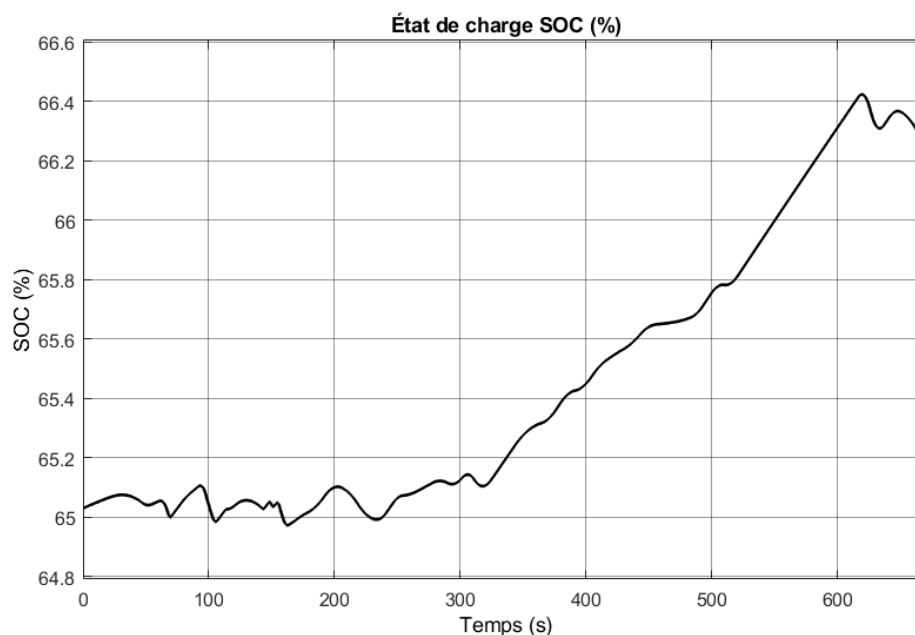


Figure 4.11 Évolution de l'état de charge de la batterie SOC_{Bat} lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #1.

L'analyse des puissances présentée à la Figure 4.12 met en évidence la complémentarité des sources du système multi-sources, où la puissance demandée par la charge est assurée conjointement par les contributions photovoltaïque, pile à combustible et batterie. La pile à combustible délivre une puissance relativement stable, tandis que la production photovoltaïque demeure plus faible et évolue progressivement. La batterie assure quant à elle l'équilibrage instantané entre production et demande, compensant les écarts dynamiques afin de satisfaire la relation énergétique du système. Ce comportement est cohérent avec la logique EMS adoptée, dans laquelle l'activation puis le maintien de la pile traduisent l'effet d'hystérésis et contribuent à la stabilité globale du système. Ces

résultats confirment ainsi la pertinence de la stratégie de gestion énergétique développée, en assurant un compromis entre soutien énergétique, limitation de la décharge de la batterie et exploitation coordonnée des sources embarquées.

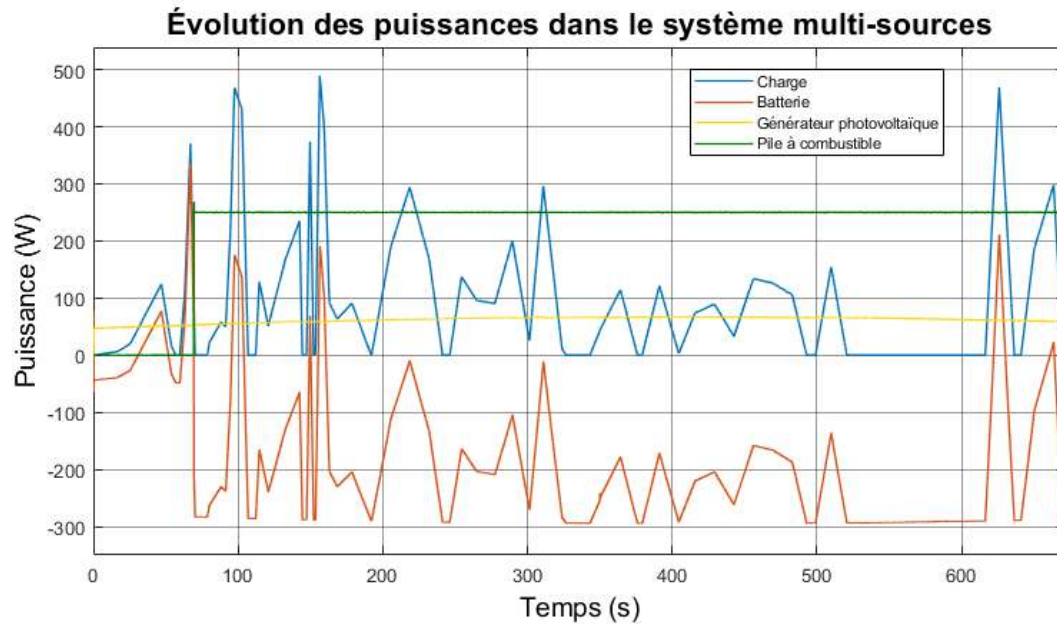


Figure 4.12 Évolution des puissances des différentes sources du système multi-sources lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #1.

Afin de vérifier la reproductibilité du comportement observé lors du Test #1, un second cycle associé au Test #2 a été simulé avec le même scénario et la même stratégie EMS. Les résultats confirment l'activation de la pile à combustible autour d'un SOC d'environ 65 %, suivie d'une augmentation du SOC_{Bat} et d'une diminution du niveau d'hydrogène. L'analyse des puissances met en évidence une répartition énergétique similaire à celle du Test #1, confirmant ainsi la cohérence du fonctionnement du système multi-sources. Ces résultats sont illustrés à la Figure 4.13.

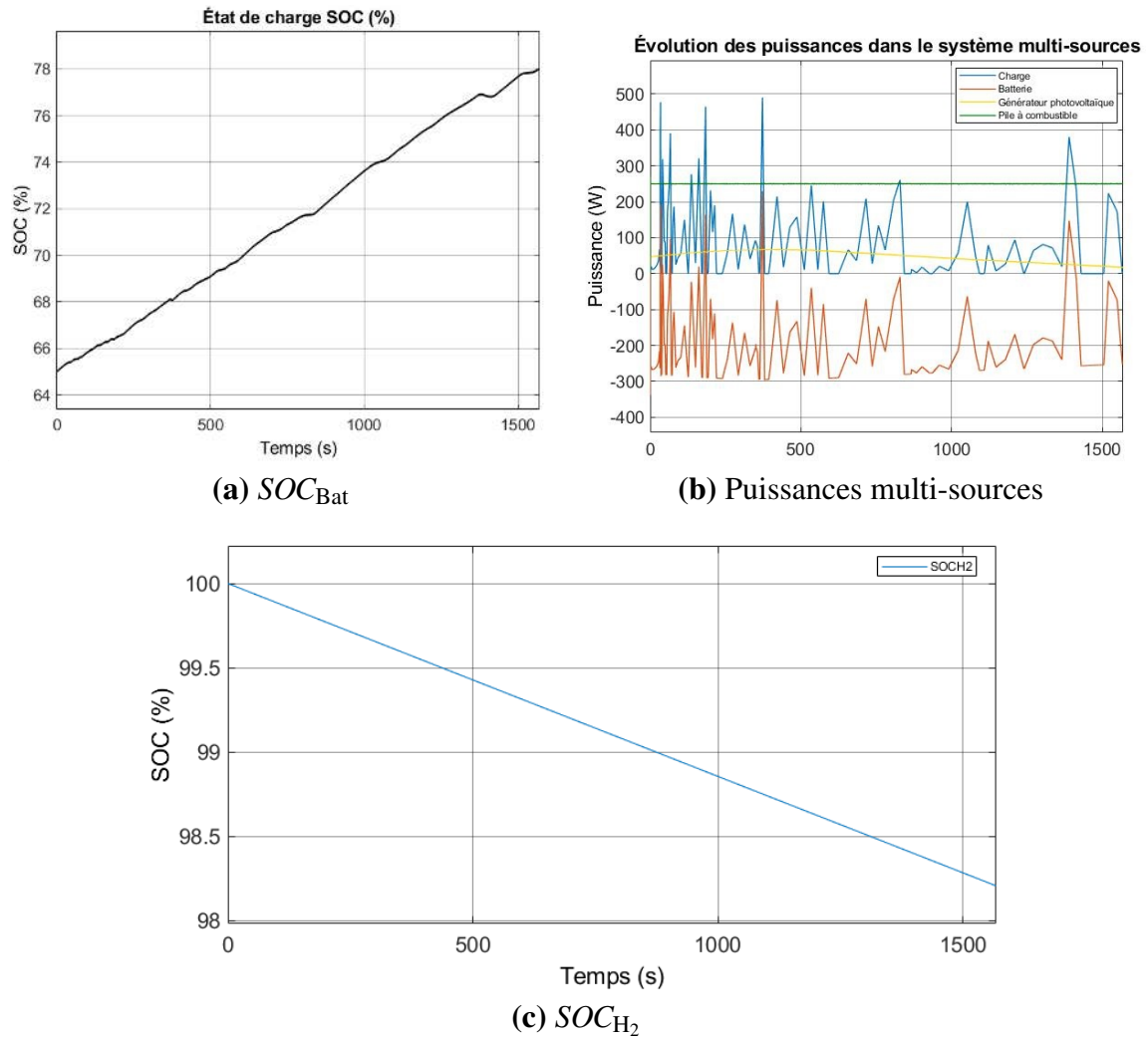


Figure 4.13 Évolution conjointe du SOC_{Bat} (a), des puissances multi-sources (b) et du SOC_{H_2} (c) lors de la sollicitation de la pile à combustible au cours du Test #2.

4.4 Algorithme génétique pour la sélection optimale de la borne de recharge

4.4.1 Description générale de l'algorithme génétique

Selon Goldberg et Holland (1988), les algorithmes génétiques sont des procédures de recherche probabilistes opérant sur de vastes espaces de solutions représentés par des chaînes de caractères. En évaluant simultanément une population d'individus, ils

favorisent la combinaison de sous-structures performantes (building blocks), ce qui permet une exploration efficace et parallèle de l'espace des solutions [59]. Inspirés du processus d'évolution biologique naturelle, ces algorithmes utilisent les principes de sélection, de croisement et de mutation pour générer et améliorer continuellement de nouvelles solutions. Chaque individu, appelé chromosome, représente une solution potentielle évaluée à l'aide d'une fonction d'adaptation (fitness function) mesurant sa performance par rapport aux objectifs fixés. Cette stratégie évolutionnaire permet d'explorer simultanément plusieurs régions de l'espace de recherche, d'accélérer la convergence vers une solution globalement optimale et d'éviter le piégeage dans des minima locaux [60,61]. Le logigramme de la Figure 4.14 illustre le fonctionnement global de ces étapes.

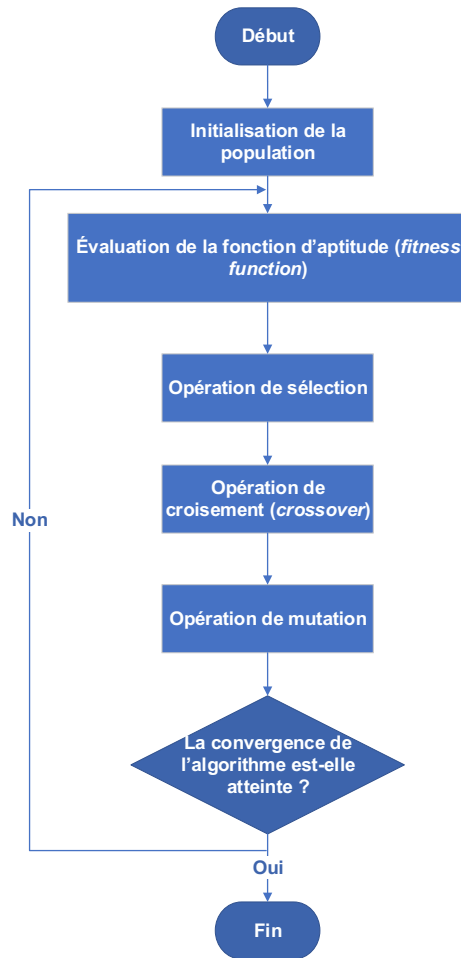


Figure 4.14 Logigramme de l’algorithme génétique standard (GA), adapté de [62].

4.4.2 Adaptation de l’algorithme au problème étudié

Afin d’assurer une décision de recharge fiable lorsque le système de gestion énergétique (EMS) bascule en mode « retour vers borne » à la suite du franchissement du seuil SOC_{Alerte} , la logique heuristique temps réel est complétée par un algorithme génétique (GA). Ce dernier a pour rôle de sélectionner, parmi l’ensemble des stations admissibles, la borne de recharge optimale au sens d’une fonction de coût orientée mission.

Lorsque le niveau d'énergie disponible devient insuffisant pour atteindre directement la destination finale, l'EMS doit identifier une borne de recharge permettant de poursuivre le trajet tout en optimisant les critères de coût, de distance et de temps. Les stations candidates sont d'abord filtrées selon des contraintes énergétiques garantissant leur atteignabilité avec l'énergie disponible, ainsi que selon des contraintes géométriques assurant la cohérence du trajet. Dans certaines configurations, ce filtrage peut conduire à l'absence de bornes admissibles lorsque ces contraintes ne sont pas satisfaites. Dans ce cas, l'algorithme génétique n'est pas appliqué et une stratégie de secours consiste à identifier la borne géographiquement la plus proche afin d'alimenter la supervision EMS dans la prise de décision. Les bornes admissibles sont ensuite évaluées par l'algorithme génétique. Chaque individu de la population code deux variables de décision : l'indice de la borne sélectionnée et la quantité d'énergie à recharger.

Ces solutions sont évaluées par une fonction objectif pondérée combinant le temps total de trajet (conduite, attente et recharge), le coût énergétique et les pénalités liées au non-respect de contraintes opérationnelles. Les solutions les plus performantes sont conservées d'une génération à l'autre jusqu'à convergence vers un optimum. L'algorithme ainsi développé permet de déterminer, de manière dynamique et robuste, la borne de recharge la plus appropriée en fonction de la position du véhicule, de son état de charge et des conditions de déplacement réelles, assurant un compromis optimal entre coût, rapidité et sécurité énergétique.

4.4.3 Formulation du problème d'optimisation

L'algorithme génétique (GA) est appliqué pour minimiser un coût global de mission intégrant le temps total de déplacement, le coût énergétique de recharge ainsi que les pénalités associées aux contraintes de faisabilité énergétique. Chaque individu de

la population représente une solution candidate définie par un vecteur de décision comprenant l'indice discret de la borne sélectionnée S_i et une variable continue E_{chg} correspondant à la quantité d'énergie à recharger :

$$X = [S_i, E_{\text{chg}}] \quad (4.2)$$

La fonction d'adaptation (fitness) évalue chaque individu selon la performance de la stratégie associée, en combinant plusieurs critères pondérés.

La fonction objectif retenue pour cette optimisation est définie comme suit :

$$J = J_t + J_c + J_p \quad (4.3)$$

où :

- J_t correspond au coût temporel global (temps de déplacement, d'attente et de recharge),
- J_c traduit le coût associé à la recharge (tarification horaire),
- J_p regroupe les pénalités liées à la faisabilité énergétique, telles que l'épuisement de la batterie ou un niveau de SOC final insuffisant.

Ces termes sont détaillés par :

$$\begin{cases} J_t = \alpha (t_{A \rightarrow S_i} + t_{S_i \rightarrow D} + t_{\text{att}} + t_{\text{chg}}) \\ J_c = \beta C_{\text{chg}} = \beta C_i t_{\text{chg}} \\ J_p = \gamma (P_{\text{empty}} + P_{\text{SOC}}) \end{cases} \quad (4.4)$$

où α , β et γ sont des coefficients de pondération permettant d'ajuster l'influence relative de chaque critère et C_i désigne le tarif horaire de la borne (CAD/h). Le coût de recharge est estimé à partir des tarifs typiques des bornes publiques de niveau 2 du réseau Circuit Électrique, utilisés comme référence dans les simulations.

L'algorithme minimise la fonction objectif J tout en respectant une contrainte de faisabilité énergétique garantissant que l'énergie disponible après recharge permet d'atteindre la destination avec une réserve minimale fixée par SOC_{Min} . Cette contrainte assure que le véhicule conserve un niveau de charge suffisant à l'arrivée, en tenant compte de l'énergie consommée sur l'ensemble du trajet.

Les distances géographiques considérées dans la présente étude sont évaluées à l'aide de la formule de Haversine, particulièrement appropriée au traitement de coordonnées GPS et largement adoptée dans les travaux d'optimisation spatiale [63]:

$$a = \sin^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right) \quad (4.5)$$

$$d = 2R \arctan\left(\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{1-a}}\right) \quad (4.6)$$

où $R = 6371$ km représente le rayon moyen de la Terre, et (ϕ, λ) les coordonnées géographiques en latitude et longitude. Ces équations sont implémentées dans la fonction MATLAB `distance_haversine()` afin de déterminer les distances $d_{A \rightarrow S_i}$ et $d_{S_i \rightarrow D}$ utilisées dans la fonction objectif.

Le processus d'optimisation se poursuit de manière itérative selon les étapes classiques du GA : évaluation, sélection, croisement, mutation et élitisme. À chaque génération, les individus les plus performants sont conservés tandis que de nouvelles combinaisons sont

produites pour explorer efficacement l'espace de recherche. L'algorithme s'arrête lorsque la valeur de la fonction objectif se stabilise ou qu'un nombre maximal de générations est atteint. La solution optimale fournit alors la borne de recharge sélectionnée, la quantité d'énergie à recharger, et les paramètres temporels et économiques associés.

4.4.4 Résultats de simulation et validation du GA

Après avoir défini la formulation du problème d'optimisation et la structure de l'algorithme génétique (GA), une série d'essais numériques a été menée afin d'évaluer son efficacité, sa stabilité et sa pertinence dans des conditions représentatives du fonctionnement du VEHBV. Les coordonnées GPS des bornes de recharge proviennent de la base réelle du réseau public Circuit Électrique, géré par Hydro-Québec, et ont été intégrées au modèle afin de reproduire fidèlement la répartition géographique des infrastructures dans la ville de Trois-Rivières. Les résultats obtenus sous MATLAB illustrent le comportement global de l'algorithme lors de la recherche de la borne optimale.

La Figure 4.15 présente la distribution spatiale des distances minimales aux bornes de recharge. Pour chaque position possible du véhicule dans la zone d'étude, la distance géographique à la borne de recharge la plus proche du réseau a été calculée. Cette cartographie fournit ainsi une première estimation de la couverture spatiale du réseau existant. La distance maximale observée entre une position du véhicule dans la zone étudiée et la borne de recharge la plus proche atteint 4,05 km. Cette valeur correspond au cas le plus défavorable du point de vue de l'accessibilité géographique au réseau de recharge, c'est-à-dire à la distance maximale séparant un point de la zone étudiée de la borne la plus proche, en considérant uniquement le critère de distance.

Carte 3D de la distance minimale aux bornes de recharge dans la zone d'étude

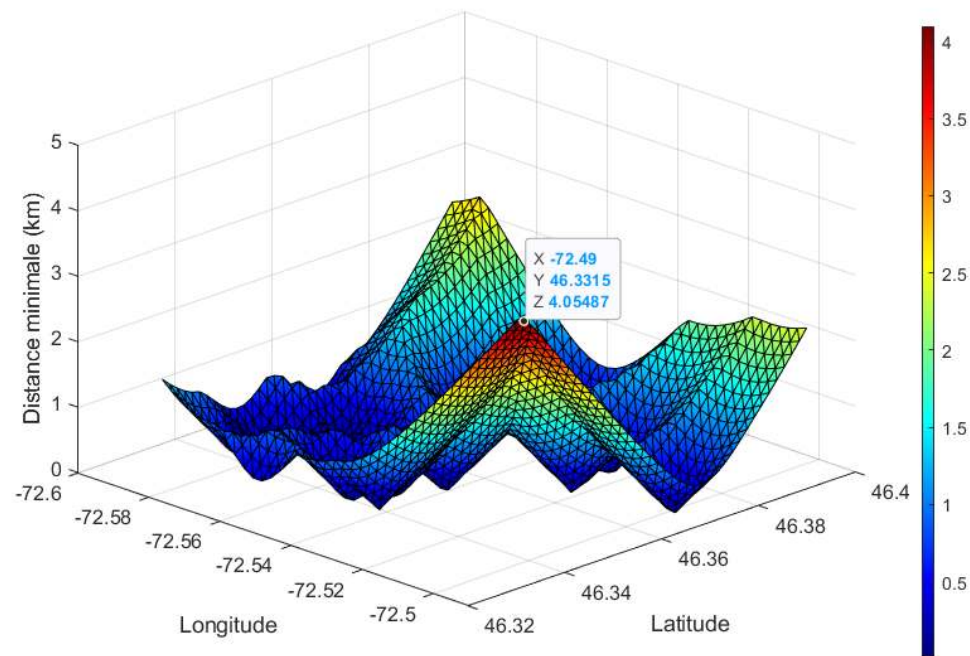


Figure 4.15 Distance minimale aux bornes de recharge dans la zone étudiée.

La dynamique de convergence de l'algorithme génétique est analysée à partir de l'évolution de la fonction objectif au cours des générations. La Figure 4.16 présente l'évolution de la valeur moyenne de la population, reflétant la qualité globale des solutions à chaque génération. Après plusieurs itérations, la stabilisation progressive de cette courbe confirme la convergence du processus évolutif vers une solution optimale stable pour le Cas 4.

Bien que la convergence soit observée dès les premières itérations, l'optimisation est poursuivie jusqu'à la 195^e génération, correspondant à la satisfaction du critère d'arrêt de l'algorithme, basé sur la stabilisation de la fonction objectif au cours de plusieurs

générationns consécutives. À cette itération, la valeur moyenne de la fonction objectif atteint 1,02563, tandis que la meilleure solution obtenue s'établit à 0,01269. L'écart réduit entre ces deux valeurs traduit l'atteinte d'un équilibre entre exploration et exploitation de l'espace de recherche. La solution finale retenue correspond ainsi à la borne de recharge optimale identifiée pour la configuration étudiée.

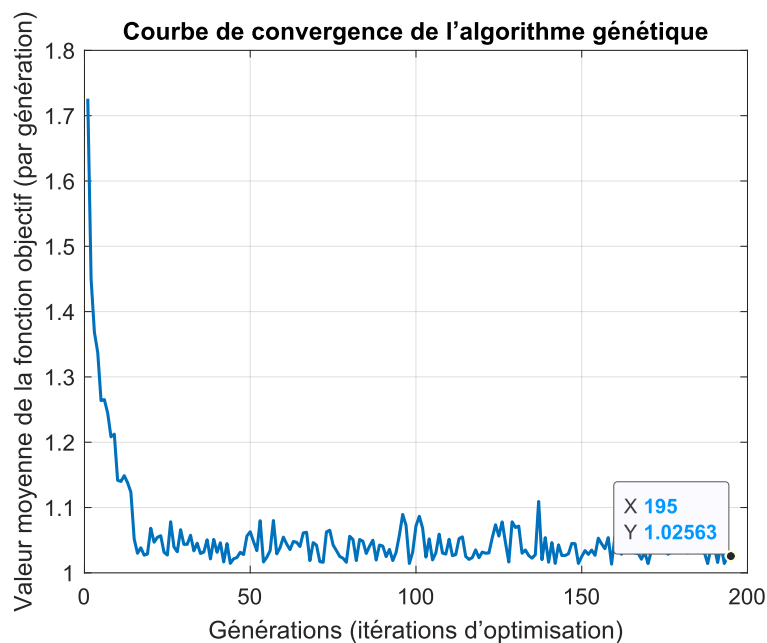
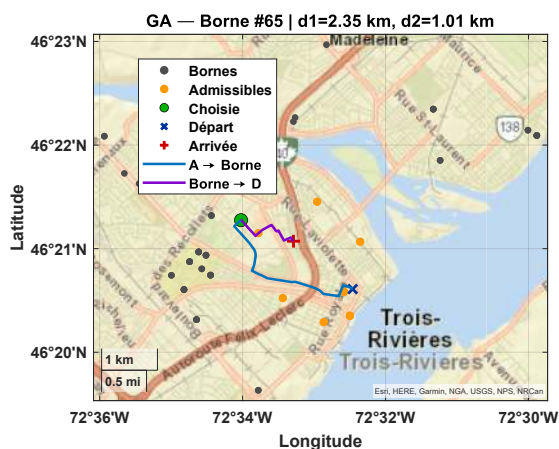


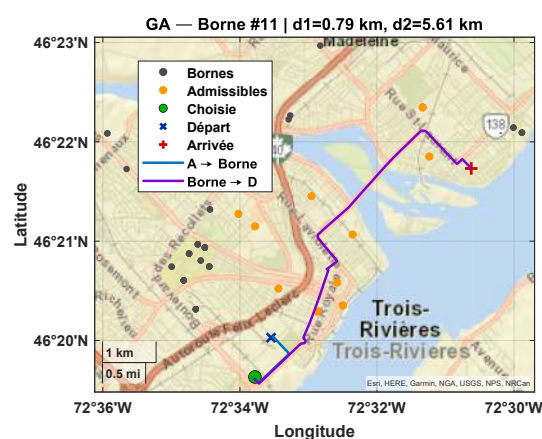
Figure 4.16 Évolution de la valeur moyenne de la fonction objectif au cours des générations pour le Cas 4.

Afin d'approfondir l'analyse et d'évaluer le comportement spatial du GA dans des situations concrètes, plusieurs scénarios de déplacement ont été simulés en faisant varier les positions de départ et d'arrivée du véhicule à l'échelle de la ville de Trois-Rivières. Les paramètres d'optimisation, la base de bornes issue du réseau public Circuit Électrique ainsi que les contraintes énergétiques du VEHBV ont été maintenus constants afin d'isoler l'effet de la configuration spatiale. Les cartes associées illustrent, pour chaque scénario, la répartition de l'ensemble des bornes disponibles, les bornes admissibles au regard de

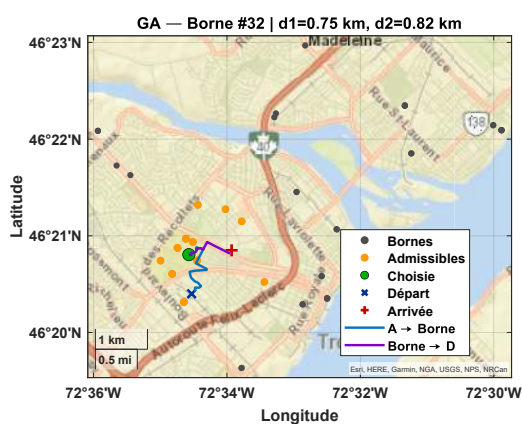
l'autonomie estimée à partir du *SOC* disponible, du détour maximal autorisé, ainsi que la borne optimale retenue par l'algorithme génétique. Cette analyse met en évidence la capacité du processus décisionnel à adapter dynamiquement la stratégie de recharge à la position du véhicule et à la destination visée, tout en respectant les contraintes énergétiques et les critères temporels et économiques intégrés à la fonction objectif. Les différents scénarios de variation spatiale considérés sont illustrés à la Figure 4.17.



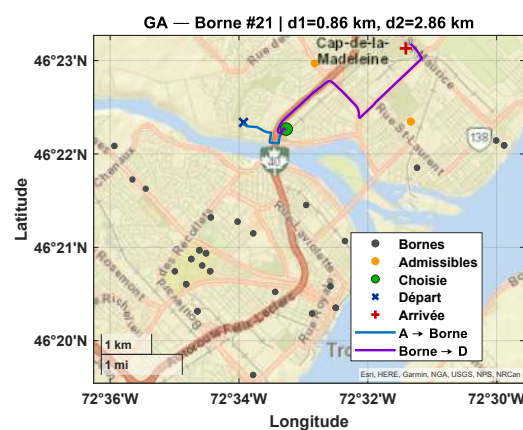
(a) Cas 1



(b) Cas 2

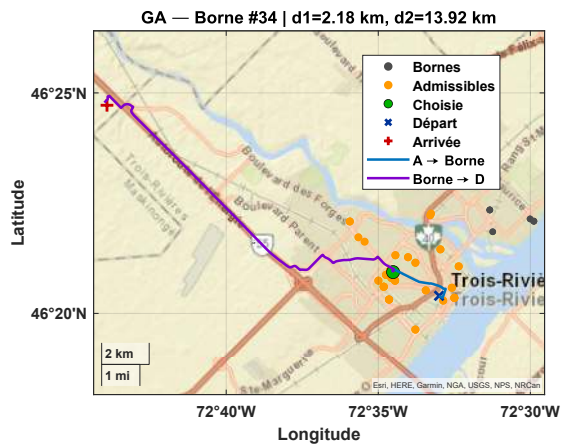


(c) Cas 3

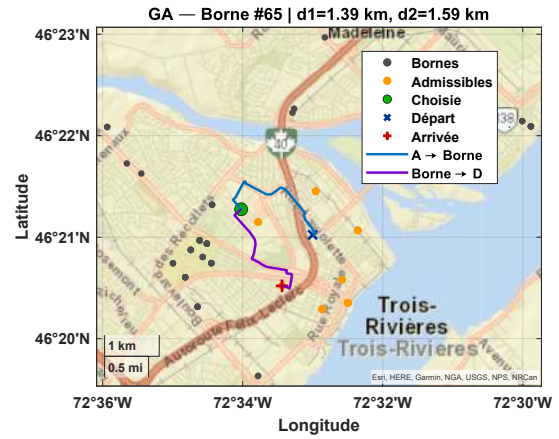


(d) Cas 4

Figure 4.17 Cartes illustrant les scénarios de variation spatiale : répartition des bornes de recharge, identification des bornes admissibles et sélection de la borne optimale pour différentes positions de départ et d'arrivée.



(e) Cas 5



(f) Cas 6

Figure 4.17 (suite).

Une fois la borne sélectionnée, deux scénarios de recharge ont été étudiés : (i) une recharge minimale optimisée correspondant à l'énergie strictement nécessaire pour atteindre la destination avec un état de charge cible, et (ii) une recharge prolongée jusqu'au SOC_{Max} autorisé, permettant d'augmenter la réserve énergétique du véhicule. Les tableaux suivants présentent respectivement les résultats spatiaux de l'optimisation (borne sélectionnée, distances et valeur de la fonction objectif) ainsi que les performances énergétiques et temporelles associées aux deux scénarios de recharge.

Tableau 4-1 Résultats comparatifs des décisions spatiales obtenues par l'algorithme génétique.

Cas	Départ (Lat, Lon)	Destination (Lat, Lon)	Borne	Coord. borne (Lat, Lon)	d_1 (km)	d_2 (km)	J
1	(46.3435, -72.5410)	(46.3512, -72.5548)	65	(46.3546, -72.5670)	2.35	1.01	1.0132
2	(46.3338, -72.5591)	(46.3622, -72.5104)	11	(46.3272, -72.5630)	0.79	5.61	1.0667
3	(46.3400, -72.5755)	(46.3475, -72.5655)	32	(46.3467, -72.5762)	0.75	0.82	0.5143
4	(46.3723, -72.5655)	(46.3855, -72.5235)	21	(46.3658, -72.5305)	0.86	2.86	1.0127
5	(46.3400, -72.5500)	(46.4120, -72.7320)	34	(46.3489, -72.5752)	2.18	13.92	2.5268
6	(46.3435, -72.5410)	(46.3420, -72.5573)	65	(46.3512, -72.5548)	1.39	1.59	0.9677

Tableau 4-2 Comparaison des performances énergétiques des scénarios de recharge minimale et de recharge jusqu'au SOC_{Max} avec prise en compte du coût de la borne.

Cas	C _{borne} (CAD/h)	Recharge (Wh)	Temps (h)				Coût (CAD)	SOC (%)		
			Total (h)	Conduite (h)	Attente (h)	Recharge (h)		Départ (%)	Avant rech. (%)	Destination (%)
Scénario 1 : Recharge minimale optimisée										
1	2.00	294	0.69	0.21	0.15	0.33	0.65	30.0	20.2	65.0
2	1.00	370	0.86	0.40	0.05	0.41	0.41	30.0	26.7	65.0
3	1.00	249	0.38	0.10	0.00	0.28	0.28	30.0	26.9	65.0
4	1.00	303	0.84	0.23	0.28	0.34	0.34	30.0	26.4	65.0
5	1.00	600	2.17	1.01	0.50	0.67	0.67	30.0	20.9	62.9
6	2.00	284	0.65	0.19	0.15	0.32	0.63	30.0	24.2	65.0
Scénario 2 : Recharge jusqu'au SOC _{Max}										
1	2.00	389	0.79	0.21	0.15	0.43	0.86	30.0	20.2	80.8
2	1.00	370	0.86	0.40	0.05	0.41	0.41	30.0	26.7	65.0
3	1.00	349	0.49	0.10	0.00	0.39	0.39	30.0	26.9	81.6
4	1.00	351	0.90	0.23	0.28	0.39	0.39	30.0	26.4	73.1
5	1.00	600	2.17	1.01	0.50	0.67	0.67	30.0	20.9	62.9
6	2.00	365	0.74	0.19	0.15	0.41	0.81	30.0	24.2	78.4

Les résultats des Tableaux 4-1 et 4-2 confirment la cohérence de l'approche proposée. Le Tableau 4-1 montre que l'algorithme génétique identifie des bornes globalement proches du trajet, avec une fonction objectif minimale pour le cas 3, traduisant le meilleur compromis distance-coût. Tandis que le cas 5 présente la performance la plus faible en

raison de l'éloignement de la borne par rapport à la destination. Cette décision spatiale se répercute sur les performances énergétiques du Tableau 4-2, où la recharge minimale optimisée permet de limiter le temps d'arrêt et le coût tout en garantissant un SOC à destination suffisant pour la poursuite du trajet. À l'inverse, la recharge jusqu'au SOC_{Max} améliore la réserve énergétique, mais au prix d'un temps et d'un coût plus élevés. Ainsi, la recharge minimale apparaît comme la stratégie la plus efficiente en conditions nominales, tandis que la recharge complète constitue une stratégie plus conservatrice permettant d'augmenter la robustesse face aux incertitudes de consommation.

Il convient également d'examiner le comportement du système dans le cas particulier déjà évoqué précédemment, où aucune borne de recharge ne satisfait les contraintes imposées. À cet effet, un scénario de simulation spécifique a été considéré, dans lequel la position du véhicule est volontairement éloignée du réseau de bornes de recharge. Cette situation correspond à une configuration spatiale défavorable, dans laquelle la borne la plus proche se situe à une distance de 13,00 km, supérieure à l'autonomie disponible du véhicule, estimée à environ 7,2 km. Ainsi, aucune borne ne peut être retenue comme admissible. La borne géographiquement la plus proche est toutefois identifiée à titre informatif, sans pouvoir être considérée comme une solution admissible au regard des contraintes imposées.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer la stratégie de gestion énergétique développée pour le VEHBV à travers différents scénarios de fonctionnement représentatifs. Les résultats de simulation ont mis en évidence la capacité de l'EMS à assurer une répartition cohérente de la puissance entre les sources, en exploitant prioritairement l'énergie photovoltaïque et en sollicitant la pile à combustible lorsque l'état de charge de la batterie atteint la zone

d'activation définie. Cette coordination contribue à limiter la décharge profonde de la batterie, à stabiliser le bus continu et à garantir la continuité d'alimentation du système.

Par ailleurs, l'intégration de l'algorithme génétique a permis d'introduire une dimension décisionnelle liée à la recharge, en identifiant la borne la plus pertinente parmi les stations atteignables selon des critères énergétiques, spatiaux et économiques. Les résultats obtenus confirment ainsi la robustesse de l'approche proposée et démontrent l'intérêt d'une gestion énergétique couplée à un processus d'optimisation pour améliorer l'autonomie et la fiabilité du VEHBV.

Chapitre 5 - Conclusion générale et perspectives

Dans le contexte actuel de transition énergétique, l'un des défis majeurs en génie électrique consiste à produire, convertir, stocker et gérer l'énergie de manière intelligente afin d'assurer des systèmes fiables, flexibles et durables. Ce défi se manifeste particulièrement dans l'électrification des transports, où la disponibilité limitée des ressources embarquées et la variabilité des conditions d'exploitation imposent le développement d'architectures hybrides et de stratégies de gestion adaptées.

Les véhicules électriques hybrides à basse vitesse s'inscrivent dans cette dynamique par leur capacité à intégrer des sources d'énergie complémentaires et à répondre aux besoins de mobilité locale avec un impact environnemental réduit. Toutefois, contrairement aux véhicules hybrides conventionnels largement étudiés, les VEHBV restent encore peu explorés, notamment en matière de modélisation énergétique et de stratégies de gestion adaptées à leurs contraintes spécifiques, ce qui justifie l'intérêt des travaux présentés dans ce mémoire.

Dans la continuité des travaux antérieurs du laboratoire, portant notamment sur la conception et la validation de véhicules hybrides multi-sources intégrant des piles à combustible et des batteries, ainsi que sur le développement de stratégies de gestion énergétique visant à optimiser la répartition de puissance entre les sources, le présent travail s'articule autour de la modélisation et de l'analyse énergétique d'un VEHBV multi-sources. Un modèle dynamique du véhicule, développé sous MATLAB/Simulink à partir d'essais expérimentaux réalisés sur le campus de l'UQTR, a permis d'établir un cycle de conduite représentatif et d'estimer les profils de puissance et d'énergie nécessaires au dimensionnement du système. Sur cette base, une stratégie heuristique de gestion énergétique, implémentée sous Stateflow, a assuré une répartition cohérente

de la puissance entre les sources, garantissant la continuité d'alimentation et limitant les fluctuations de la batterie. Enfin, une dimension décisionnelle liée à l'autonomie a été introduite via un algorithme génétique de sélection de bornes, déclenché en zone d'alerte du SOC et validé sur le réseau réel de Trois-Rivières, ce qui démontre l'intérêt d'une approche intégrée pour la gestion et l'optimisation de l'autonomie du VEHBV.

De manière générale, les résultats obtenus montrent que le système multi-sources fonctionne de manière stable sur des cycles de conduite d'une durée comprise entre environ 600 s et 1600 s, avec une puissance demandée de l'ordre de 100 à 200 W en régime moyen et des pics pouvant atteindre environ 400 W lors des phases transitoires. En régime nominal, le générateur photovoltaïque fournit une puissance de l'ordre de 60 à 70 W, assurant une contribution énergétique significative, tandis que la batterie joue un rôle de tampon pour absorber les fluctuations rapides de la charge. L'état de charge de la batterie reste globalement stable autour de 70 %, avec des variations limitées, traduisant une gestion énergétique efficace. En cas de décharge, la pile à combustible est activée à partir d'un seuil de SOC d'environ 65 %, permettant de compenser la baisse d'énergie et de rétablir progressivement le niveau de charge. Par ailleurs, la tension du bus continu est maintenue dans une plage comprise entre 48 et 52 V, confirmant la robustesse de la régulation et la stabilité du système.

En complément, l'intégration de l'algorithme génétique a permis d'optimiser la sélection des bornes de recharge en tenant compte de critères spatiaux, énergétiques et économiques. Les résultats ont montré que l'algorithme est capable d'identifier efficacement des solutions pertinentes, en privilégiant des bornes globalement proches du trajet et en assurant un compromis satisfaisant entre distance, coût et disponibilité énergétique. Par ailleurs, l'analyse des scénarios de recharge a mis en évidence un

compromis clair entre performance et robustesse. La stratégie de recharge minimale permet de limiter le temps total, compris entre environ 0.38 h et 2.17 h, ainsi que le coût de recharge, tout en maintenant un SOC à destination d'environ 65 %, ce qui offre une marge de sécurité énergétique et évite toute décharge critique de la batterie. En revanche, la recharge jusqu'au SOC_{Max} permet d'augmenter la réserve énergétique jusqu'à environ 78 à 80 %, au prix d'un temps d'arrêt et d'un coût plus élevés. Ces résultats confirment la pertinence de l'approche proposée et démontrent l'efficacité du GA pour l'optimisation de l'autonomie dans un contexte réel d'exploitation.

L'ensemble de ces résultats valide la cohérence du modèle multi-sources et l'efficacité de la stratégie de gestion énergétique pour assurer la continuité d'alimentation, limiter la sollicitation de la batterie et maintenir un équilibre énergétique global, renforçant ainsi la robustesse énergétique du VEHBV.

Sur cette base, les résultats obtenus ouvrent plusieurs axes de recherche visant à renforcer l'intégration des sources renouvelables et la planification énergétique des solutions de mobilité locale durable. Parmi ceux-ci figurent le développement de stratégies de gestion énergétique prédictives, l'étude du vieillissement des composants énergétiques et la validation expérimentale sur prototype complet en conditions réelles. Par ailleurs, l'algorithme d'optimisation proposé pour la sélection de la borne de recharge, validé sur le réseau réel de Trois-Rivières, a démontré la pertinence de l'approche dans un contexte opérationnel caractérisé par des capacités énergétiques limitées et un nombre restreint de bornes. Son extension à des environnements disposant d'infrastructures de recharge plus denses constitue une perspective prometteuse, ouvrant la voie à l'élargissement de l'espace de recherche et à l'étude de problématiques avancées liées à la planification territoriale et à l'optimisation multi-bornes. À terme, l'intégration de ces approches dans

des systèmes embarqués intelligents pourrait contribuer au développement de solutions de mobilité autonome, durable et optimisée, adaptées aux contraintes énergétiques et environnementales futures.

Références

- [1] IPCC, “Climate change 2023: Synthesis report,” Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, Tech. Rep., 2023.
- [2] United Nations Regional Information Centre (UNRIC), “New ipcc report: Emissions can be halved by 2030,” 2022.
- [3] Ministère de la Transition Écologique, “Changement climatique : causes, effets et enjeux,” 2025.
- [4] H. Jiang, L. Jia, D. Su, and X. Li, “Prediction of carbon emission reductions from electric vehicles instead of fuel vehicles in urban transportation,” *Processes*, vol. 13, no. 9, p. 2692, 2025.
- [5] D. Trinko, N. Horesh, E. Porter, J. Dunckley, E. Miller, and T. Bradley, “Transportation and electricity systems integration via electric vehicle charging-as-a-service: A review of techno-economic and societal benefits,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 175, p. 113180, 2023.
- [6] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, “Progress in electrical energy storage system: A critical review,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.
- [7] M. A. Hannan, F. A. Azidin, and A. Mohamed, “Hybrid electric vehicles and their challenges: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 135–150, 2014.
- [8] K. J. Djromadji, “Étude d’un système hybride pour l’alimentation d’un site isolé et optimisation de la charge : cas du camp esker,” Master’s thesis, Université du Québec à Rimouski, 2022.
- [9] M. B. Camara, “Gestion d’énergie électrique multi-source dans les véhicules et les systèmes à énergies renouvelables,” Ph.D. dissertation, Université Le Havre Normandie, 2014.
- [10] C. Eisenmann, J. Gruber, M. Brost, A. Ewert, S. Stieler, and K. Gicklhorn, “Fields of applications and transport-related potentials of small electric vehicles in germany,” in *Small Electric Vehicles*. Springer International Publishing, 2021, pp. 127–140.
- [11] M. M. Rahman, I. Khan, D. L. Field, K. Techato, and K. Alameh, “Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications,” *Renewable Energy*, vol. 188, pp. 731–749, 2022.
- [12] F. Fall, “Développement d’un outil d’analyse fonctionnelle des réseaux d’eaux pluviales,” Ph.D. dissertation, Polytechnique Montréal, 2021. [Online]. Available: <https://publications.polymtl.ca/6340/>
- [13] C. D. Anderson and J. Anderson, *Electric and Hybrid Cars: A History*. McFarland, 2005.
- [14] Car and Driver, “A Brief History of The Electric Cars,” 2023.

- [15] I. Oukkacha, "Approche systémique de la gestion d'énergie électrique par stockage électrochimique dédié aux applications de transport," Ph.D. dissertation, Normandie Université, 2019. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-03080962>
- [16] J. Chong, "Les véhicules électriques au Canada et ailleurs dans le monde," Bibliothèque du Parlement, Ottawa, Canada, Tech. Rep. 2017-27-F, 2017.
- [17] L'Echo, "Bond des ventes mondiales de voitures électriques en 2024," 2024.
- [18] Gouvernement du Québec, "Réduire les émissions de gaz à effet de serre (ges) en transport."
- [19] Transports Canada, "Émissions de gaz à effet de serre provenant du transport," 2023.
- [20] M. Wan. (1997) Toyota prius.
- [21] S. Farhani, "Conception et réalisation des convertisseurs de puissance dédiés aux véhicules électriques," Ph.D. dissertation, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis (ENSIT), 2019.
- [22] K. Maalej, "Méthodes de gestion d'énergie pour un véhicule électrique hybride et un véhicule électrique à batteries utilisant l'estimation en ligne de la masse," Master's thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Canada, 2014.
- [23] A.-L. Allegre, "Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie des systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques hybrides," Ph.D. dissertation, Université de Lille I, 2010.
- [24] M. Sanchez Pantoja, "Conception et commande de véhicules hybrides," Ph.D. dissertation, Université Polytechnique Hauts-de-France, France, 2020. [Online]. Available: <https://theses.fr/2020UPHF0036>
- [25] K. M. Hunter-Zaworski, "Impacts of low-speed vehicles on transportation infrastructure and safety," *Journal of Transport and Land Use*, vol. 5, no. 2, pp. 68–76, 2012.
- [26] B. M. Ahmed and N. F. F. Alhialy, "Optimum efficiency of pv panel using genetic algorithms to touch proximate zero energy house (nzeH)," *Civil Engineering Journal*, vol. 5, no. 8, pp. 1832–1845, 2019.
- [27] Y. Fan, Y. Wang, L. Xiao, W. Zhao, and H. Sun, "Investigation and analysis on traffic safety of low-speed electric vehicles," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 688, no. 4, p. 044055, 2019.
- [28] T. J. Barlow, S. Latham, I. S. McCrae, and P. G. Boulter, "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions," Transport Research Laboratory (TRL), Crowthorne, UK, Tech. Rep. PPR 354, 2009, prepared for the Department for Transport, Cleaner Fuels & Vehicles.
- [29] N. Degrenne and S. Molloy, "Real-life vs. standard driving cycles and implications on ev power electronic reliability," in *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*. Florence, Italy: IEEE, 2016, pp. 2177–2182.
- [30] F. Zhang, L. Wang, S. Coskun, H. Pang, Y. Cui, and J. Xi, "Energy management strategies for hybrid electric vehicles: Review, classification, comparison, and outlook," *Energies*, vol. 13, no. 13, p. 3352, 2020.

- [31] M. Rasool, M. A. Khan, and R. Zou, "A comprehensive analysis of online and offline energy management approaches for optimal performance of fuel cell hybrid electric vehicles," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3325, 2023.
- [32] X. Zhao, L. Wang, Y. Zhou, B. Pan, R. Wang, L. Wang, and X. Yan, "Energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Classification, comparison, and outlook," *Energy Conversion and Management*, vol. 270, p. 116179, 2022.
- [33] J. Peng, H. He, and R. Xiong, "Rule-based energy management strategy for a series-parallel plug-in hybrid electric bus optimized by dynamic programming," *Applied Energy*, vol. 185, pp. 1633–1643, 2017.
- [34] A. Panday and H. O. Bansal, "A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle," *International Journal of Vehicular Technology*, vol. 2014, pp. 1–19, 2014.
- [35] A. Ghobadpour, "Conception et développement d'un véhicule hybride tout-terrain et fabrication d'un système de gestion de l'énergie pour l'évaluation du cycle de travail," Ph.D. dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières, 2023.
- [36] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 82–102, 2013.
- [37] H. He, J. Zhang, and G. Li, "Model predictive control for energy management of a plug-in hybrid electric bus," *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 901–907, 2016.
- [38] H. Jung, T. H. Oh, H. M. Park, H. Lee, and J. M. Lee, "Hybrid model predictive control for hybrid electric vehicle energy management using an efficient mixed-integer formulation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 7, pp. 501–506, 2022.
- [39] S. Zoroofi, "Modeling and simulation of vehicular power systems," Master's thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2008.
- [40] H. Chowdhury, R. Juwono, M. Zaid, R. Islam, B. Loganathan, and F. Alam, "An experimental study on the effect of various deflectors used for light trucks in indian subcontinent," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 34–39, 2019.
- [41] G. Zhao, X. Wang, and M. Negnevitsky, "Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management," *iScience*, vol. 25, p. 103744, 2022.
- [42] A. Ghobadpour, H. Mousazadeh, S. Kelouwani, A. Sharifi Malvajerdi, and S. Rafiee, "Design, development, and evaluation of a pv-bio-gen range extender for an off-road electric vehicle," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 10, no. 1, pp. 389–400, 2020.
- [43] R. Xu, "Lithium-ion battery modeling and soc estimation," Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2023.
- [44] M. Souaihia, B. Belmadani, R. Taleb, and K. Tounsi, "State of charge estimation by using extended kalman filter based on improved open circuit voltage model," *International Journal of Applied Power Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2021.

- [45] K. Bellache, M. B. Camara, and B. Dakyo, "Characterization and electric behavior modeling of lithium battery using temporal approach for parameters computing," in *Proceedings of the 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. Paris, France: IEEE, 2018, pp. 1330–1335.
- [46] M. Wu, L. Qin, and G. Wu, "State of power estimation of power lithium-ion battery based on an equivalent circuit model," *Journal of Energy Storage*, vol. 51, p. 104538, 2022.
- [47] S. Vergura, "A complete and simplified datasheet-based model of pv cells in variable environmental conditions for circuit simulation," *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 326, 2016.
- [48] H. Bellia, R. Youcef, and M. Fatima, "A detailed modeling of photovoltaic module using matlab," *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 3, no. 1, pp. 53–61, 2014.
- [49] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using matlab/simulink," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, 2008, pp. 22–24.
- [50] Z. Huang, C. Zhang, T. Zeng, C. Lv, and S. H. Chan, "Modeling and energy management of a photovoltaic-fuel cell-battery hybrid electric vehicle," *Energy Storage*, vol. 1, 2019.
- [51] I. Hachemi, "Développement et optimisation d'électrolytes pour piles à combustible à conduction protonique de type pcfc," Ph.D. dissertation, Université de Montpellier, 2021. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-03631607v1>
- [52] N. Noura, "Une stratégie de gestion énergétique adaptative pour un véhicule hybride à hydrogène basée sur l'identification en ligne de paramètres," Ph.D. dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières, 2022.
- [53] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel cell systems explained*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2003.
- [54] J. Zhang, Z. Xia, and L. Dai, "Carbon-based electrocatalysts for advanced energy conversion and storage," *Science Advances*, vol. 1, no. 7, p. e1500564, 2015.
- [55] J. M. Corrêa, F. A. Farret, V. A. Popov, and M. G. Simões, "Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 211–218, 2005.
- [56] S. Cosso, S. Kissling, M. Carpita, M. Marchesoni, A. Benevieri, M. Passalacqua, A. Formentini, and L. Vaccaro, "Energy storage configuration in fuel cell electric vehicle: An analysis on a real urban mission profile," *Energies*, vol. 18, no. 6136, 2024.
- [57] P. Garcia, L. M. Fernandez, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Comparative study of pem fuel cell models for integration in propulsion systems of urban public transport," *Fuel Cells*, vol. 10, no. 6, p. 1024, 2010.
- [58] V. Mounica and Y. P. Obulesu, "Hybrid power management strategy with fuel cell, battery, and supercapacitor for fuel economy in hybrid electric vehicle application," *Energies*, vol. 15, no. 12, p. 4185, 2022.

- [59] D. E. Goldberg and J. H. Holland, "Genetic algorithms and machine learning," *Machine Learning*, vol. 3, no. 2-3, pp. 95–99, 1988.
- [60] Z. Shao, Z. Ma, S. Liu, and T. Lv, "Optimization of a traffic control scheme for a post-disaster urban road network," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, p. 68, 2018.
- [61] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, 2021.
- [62] M. A. Albadr, S. Tiun, M. Ayob, and F. T. Al-Dhief, "Genetic algorithm based on natural selection theory for optimization problems," *Symmetry*, vol. 12, no. 11, p. 1758, 2020.
- [63] M. Akbari, M. Brenna, and M. Longo, "Optimal locating of electric vehicle charging stations by application of genetic algorithm," *Sustainability*, vol. 10, no. 4, p. 1076, 2018.

Annexe A - Fiche technique du PV Renogy 100 W

Technical Specifications

Solar Panel Parameters

Description	100 W Parameters
Maximum Power	100 W
Open Circuit Voltage (Voc)	21.6 V
Short Circuit Current (Isc)	6 A
Maximum Power Voltage (Vmp)	18.0 V
Maximum Power Current (Imp)	5.56 A
Cell Type	Monocrystalline
Operating Temperature	-40°F to +185°F
Folded Size	19.9 x 27.2 x 2.8 inches
Net Weight	25.6 lbs

Charge Controller Parameters

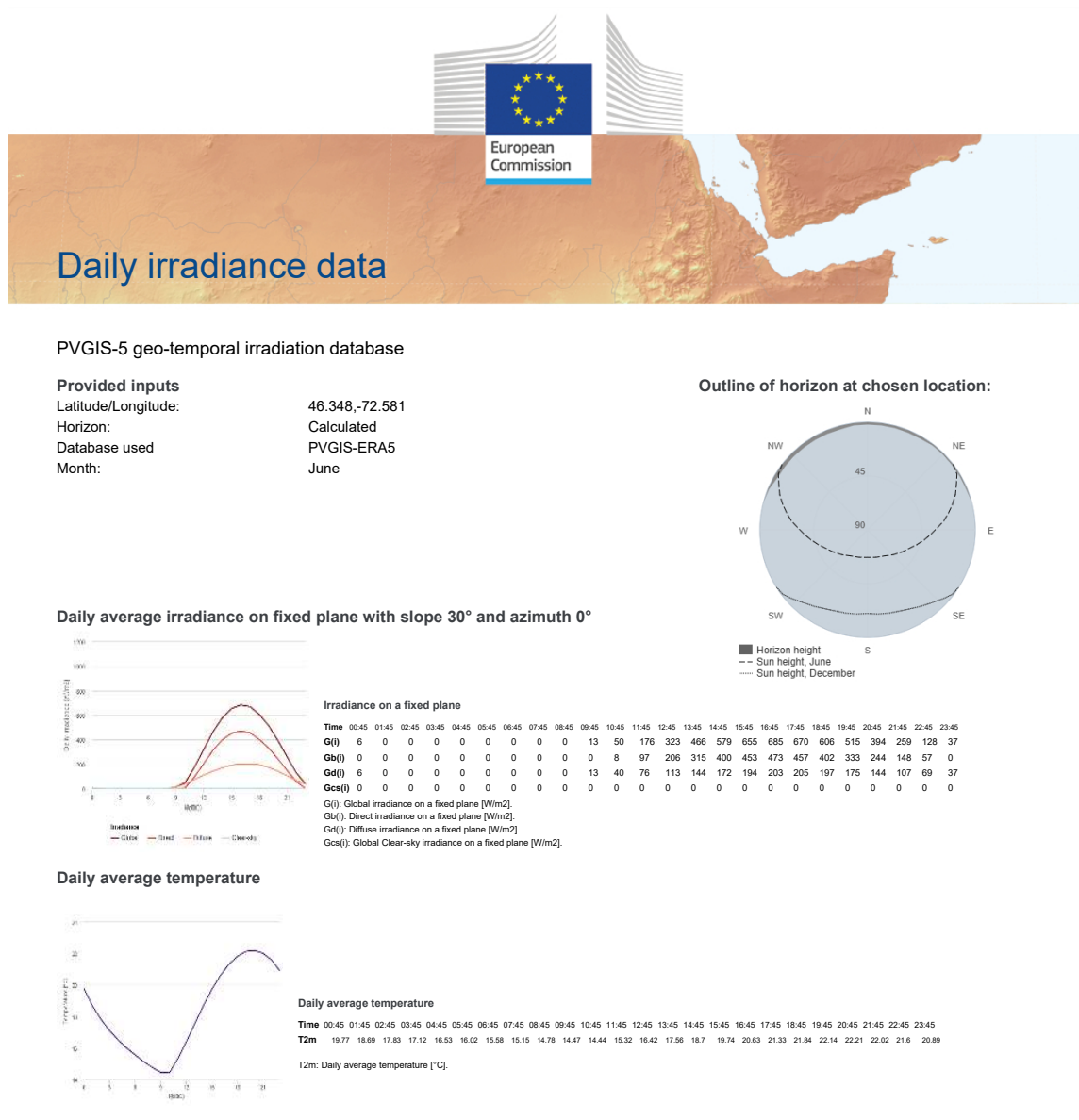
Electrical Parameters	
Model Rating	20A
Normal Battery Voltage	12V
Maximum Solar Voltage(OCV)	26V
Maximum Battery Voltage	17V
Rated Charging Current	20A
Battery Start Charging Voltage	3V
Electrical Protection and Feature	Spark-free protection. Reverse polarity solar and battery connection Reverse current from battery to solar panel protection at night Over temperature protection with derating charging current Transient overvoltage protection, at the solar input and battery output protects against surge voltage
Grounding	Common Negative
EMC Conformity	FCC Part-15 class B compliant; EN55022:2010;
Self-consumption	< 8mA
Mechanical Parameters	
Dimensions	L6.38 x W3.82 x H1.34 inches
Weight	0.88 lbs.
Mounting	Vertical Wall Mounting
Ingress Protection Rating	IP65
Maximum Terminals Wire Size	10AWG (5 mm ²)
Terminals Screw Torque	13 lbf·in
Operating Temperature	-40 °F to +140 °F

Meter Operating Temperature	-4 °F to +140 °F
Storage Temperature Range	-40 °F to +185 °F
Temp. Comp. Coefficient	-24mV / °C
Temp. Comp. Range	-4°F ~ 122°F
Operating Humidity	100% (No condensation)

La documentation technique du panneau photovoltaïque Renogy 100 W utilisée dans ce travail provient du manuel constructeur. Le produit est présenté sur le site officiel du fabricant ¹.

1. <https://ca.renogy.com/collections/solar-panels>

Annexe B - Données climatiques du site expérimental issues de PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), qui s'appuie sur les données climatiques ERA5 issues de la réanalyse du Centre européen ECMWF



Source : PVGIS © Commission européenne, données issues de la base PVGIS-ERA5.

Annexe C - Fiche technique de la pile à combustible PEM 500 W (H-500)

H-Series Fuel Cell Stacks

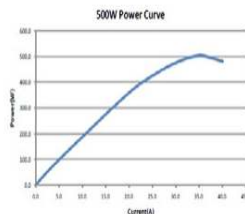
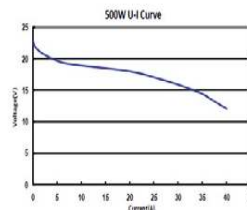
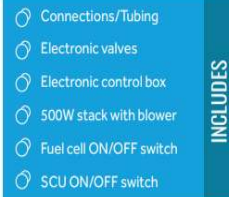


H-500 500W

FCS-C500



Semi-integrated 500W fuel cell system



Type of fuel cell	PEM
Number of cells	24
Rated power	500W
Rated performance	14.4V at 35A
Hydrogen supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	12 V
Reactants	Hydrogen and Air
Ambient temperature	5 - 30°C (41-86°F)
Max stack temperature	65°C (149°F)
Hydrogen pressure	0.45-0.55 Bar
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Stack weight (with fan and casing)	2520g (±50g)
Controller weight	400g (±30g)
Stack size	130x268x123mm
Flow rate at max. output	6.5L/min
Hydrogen purity	≥99.995% dry H ₂
Start up time	≤30s (ambient temperature)
Efficiency of system	40% at 14.4V
Low voltage protection	12V
Over current protection	42A
Over temperature protection	65°C
External power supply	13V(±1V), 5A

La documentation technique de la pile à combustible PEM 500 W (H-500) utilisée dans ce travail provient de la fiche constructeur Horizon Educational. Le produit est présenté sur le site officiel du fabricant ¹.

1. <https://horizoneducational.com/>