

ECAM-EPMI

Établissement d'enseignement supérieur associatif reconnu par l'État
Habilité par la CTI à délivrer le Diplôme d'Ingénieur et le Grade de Master

Membre de la Conférence des Grandes Ecoles

Membre de la Fédération des Établissements d'Enseignement Supérieur d'Intérêt Collectif (FESIC)

Membre de CY Alliance - Cergy Paris Université

RAPPORT DE STAGE PROFESSIONNEL

VENOT Bastien

Élève ingénieur de 3ème année, Option Ingénierie des Systèmes Electriques
Promotion 2021

Intégration des spécificités d'une motorisation électrique pour le modèle d'optimisation énergétique de la solution NAVeco

Année 2020/2021

Stage de fin d'études effectué au sein de la société : EXPLEO

Sous la responsabilité de :

- M. Cédric Lefebvre, Responsable Métier Test et Validation Logiciel ;
- M. Grégory Bisserier, tuteur pédagogique ECAM-EPMI ;

SOMMAIRE

Remerciements.....	3
Avant-propos	4
Résumé.....	5
Abstract.....	5
Liste des tableaux, figures et équations.....	6
I- Introduction générale	8
I.1. CONTEXTE	8
I.2. PRÉSENTATION DU POSTE	8
I.3. LES APPORTS DU SUJET POUR L'ENTREPRISE	9
II- L'entreprise	10
II.1. PRÉSENTATION	10
II.1.1. Généralités.....	10
II.1.2. Secteurs d'activité.....	11
II.1.3. Les filiales	11
II.2. HISTOIRE	12
II.3. ORGANISATION DE L'ENTREPRISE.....	12
II.4. QUELQUES CAS CLIENT	13
III- Missions	15
III.1. PRÉSENTATION DE LA SOLUTION NAVECO	15
III.2. ETAT DU PROJET À MON ARRIVÉE	15
III.3. PROBLÉMATIQUE ET DESCRIPTION DES MISSIONS	16
III.4. ANALYSE THÉORIQUE	17
III.4.1. Bilan des puissances de la chaîne de traction électrique.....	17
III.4.2. Rendement des moteurs électriques	18
III.4.3. Efficacité du freinage régénératif	20
III.4.4. Problème de contrôle optimal et méthodes d'optimisation dynamiques	21
III.4.5. Méthodologie de test proposée pour le choix de la fonction de coût	27
III.5. BILAN	28
IV- Résultats	29
IV.1. INTÉGRATION AU MODÈLE D'UN RENDEMENT VARIABLE	29
IV.2. INTÉRÊT DE LA STRATÉGIE DE FREINAGE RÉGÉNÉRATIF POUR LA SOLUTION NAVECO	
31	
IV.2.1. Influence du type de conduite.....	31
IV.2.2. Influence de la pente	32
IV.3. PARAMÉTRAGE EFFICIENT DU MODÈLE D'OPTIMISATION DYNAMIQUE	34
IV.3.1. Etude des fonctions de coût	34
IV.3.2. Etude de la restriction de vitesse minimale	37
IV.3.3. Récapitulation des résultats.....	39
IV.3.4. Limite à l'utilisation de la méthode MPC pour notre problème	40
IV.4. PROPOSITION D'UN MODÈLE D'OPTIMISATION À MÉTHODE HYBRIDE	41
IV.5. PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT.....	42

V- Conclusion	43
Bibliographie	44
ANNEXES	45
ANNEXE 1 : MODÈLE D'OPTIMISATION ANALYTIQUE.....	45
ANNEXE 2 : DISTRIBUTION DES FORCES DE FREINAGE.....	45
Courbe de distribution idéale	45
Freinage en série – confort optimal	47
Freinage en série – récupération optimale de l'énergie	48
Freinage parallèle	50
ANNEXE 3 : CARACTÉRISTIQUES UTILES DE LA PEUGEOT E-208	50
ANNEXE 4 : CONSTRUCTION DES ESSAIS SUR LES FONCTIONS DE COÛT	51
ANNEXE 5 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSE NORMALISÉS NEDC ET WLTP	51
NEDC 51	
WLTP 53	
Résultats numériques des deux cycles	54
ANNEXE 6 : COMPARAISON DES APPROXIMATIONS VARIABLE ET CONSTANTE DU RENDEMENT DE LA CHAÎNE DE TRACTION.	54
Calcul de l'énergie avec un rendement variable.....	54
Calcul de l'énergie avec un rendement constant.....	55
Erreur relative de l'énergie.....	56
ANNEXE 7 : OBSERVATIONS ET INTERPRÉTATIONS DES COMPORTEMENTS	57
Maximisation de la distance.....	57
Maximisation de la vitesse.....	58
Minimisation de l'erreur quadratique de distance	59
Minimisation de l'erreur quadratique de vitesse	59
Comportement de la formulation de Bolza avec la méthode MPC.....	61
ANNEXE 8 : TABLEAUX DE MESURES POUR LES TESTS DE FONCTION DE COÛT	62
ANNEXE 9 : COMPORTEMENT OBTENU AVEC LES TROIS CRITÈRES SÉLECTIONNÉS EN BOUCLE OUVERTE DANS LA PREMIÈRE PHASE DE TESTS	63
ANNEXE 10 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES TESTS EFFECTUÉS SUR LES FONCTIONS DE COÛT	63

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à adresser toute ma gratitude à mon maître de stage, Cédric Lefebvre, responsable Métier Test et Validation Logiciel chez EXPLEO, qui a mené sa mission d'encadrant avec professionnalisme, pédagogie et bienveillance. Je le remercie pour la confiance accordée, ainsi que pour m'avoir permis de profiter pleinement de son expérience dans le secteur de l'industrie automobile grâce à sa disponibilité tout au long du stage.

Je souhaite également remercier Yesid Bello Ceferino, ingénieur-docteur chez EXPLEO, pour son accompagnement continu et son suivi rigoureux à travers chaque étude menée, ainsi que pour le partage de ses connaissances en optimisation énergétique, domaine pour lequel je porte un intérêt particulier.

Merci à Hugo Duchemann et Clément Alexandre, stagiaires de l'équipe NAVeco, qui ont su aider dans les moments de réflexion et accompagner avec dynamisme ces six mois de travail. Merci également à Syndia Goindin, chargée de projet chez EXPLEO, pour son aide dans les démarches administratives et pour les découvertes des bons plans du CSE.

Je remercie EXPLEO pour l'attention portée à l'intégration de ses stagiaires dans l'entreprise au travers d'entretiens de suivi, ainsi qu'avec l'organisation du challenge LEO.

Pour finir, j'adresse mes remerciements à mon école, l'ECAM-EPMI, pour l'aide proposée dans la recherche de stage au travers de son forum des entreprises et de son réseau. Merci pour son accompagnement tout au long de mon cursus.

AVANT-PROPOS

Ce document rapporte les éléments essentiels, qu'ils soient l'objet d'études théoriques ou de réalisations pratiques, qui ont permis la réalisation du stage de fin d'études intervenant dans le cadre de la validation du diplôme d'ingénieur généraliste - parcours « ingénierie des systèmes électriques » - de l'ECAM-EPMI. Ce stage a été effectué au sein du service « Electronic & Embedded Systems » de l'entreprise EXPLEO, du 1^{er} février au 31 juillet 2021, sur le site de Montigny-Le-Bretonneux, sous l'encadrement de mon maître de stage, Cédric Lefebvre, responsable métier test et validation logiciels et pilote projet R&D, ainsi que de Cristhian Yesid Bello Ceferino, ingénieur-docteur.

Ma candidature à ce stage avait été motivée par le sujet d'étude qui traite du développement d'un système favorisant l'écoconduite en optimisant la consommation énergétique sur un trajet routier à l'aide d'un calculateur embarqué. En effet, je souhaite utiliser mes compétences d'ingénieur pour participer à la recherche de solutions innovantes qui permettraient aux industriels et aux états de converger vers les objectifs internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mes ambitions professionnelles vont donc dans le sens de ce sujet qui, de surcroît, a renforcé mon envie de m'orienter vers des projets contribuant à la transition énergétique.

RESUME

Titre : Intégration des spécificités d'une motorisation électrique pour le modèle d'optimisation dynamique de la solution NAVeco

Ce stage intervient dans le cadre de la validation du diplôme d'ingénieur généraliste, option ingénierie des systèmes électriques, de l'ECAM-EPMI et s'est déroulé au sein de la société EXPLEO du 1^{er} février au 31 juillet 2021 en tant qu'ingénieur Recherche & Développement. Le sujet d'étude est un calculateur embarqué permettant d'optimiser la consommation d'énergie sur un trajet routier. Au commencement de mon stage, le développement de la solution s'appliquait uniquement pour les véhicules thermiques. Or, la solution finale cible tous les types de véhicules. Mon rôle dans ce projet est alors d'intégrer les spécificités des motorisations électriques dans le développement de NAVeco. Ce document rapporte les points importants du stage, et partage notamment les étapes d'analyse théorique, les solutions retenues, ainsi que les résultats relatifs aux différentes études menées. Mon travail sur ce projet se décompose en deux grands axes. Le premier est l'intégration de la fonctionnalité de régénération d'énergie dans le modèle dynamique longitudinal existant pour permettre d'évaluer l'intérêt de la stratégie de freinage régénératif pour la solution NAVeco. Le second axe est la participation au développement d'un modèle d'optimisation dynamique qui sera appliqué, dans ce document, au déplacement d'un véhicule électrique. Pour cet axe, mon travail se concentre sur la détermination d'une fonction de coût optimale selon l'énergie consommée, l'objectif de distance et les temps de calcul. Pour finir, nous proposerons un modèle d'optimisation à méthode hybride permettant d'exploiter les bénéfices des deux méthodes d'optimisation dynamiques que nous étudierons, soit la boucle ouverte et la commande prédictive.

Mots clés : Automobile, véhicules électriques, optimisation dynamique, optimisation d'énergie

ABSTRACT

Title: Integration of the specificities of an electric motor for the dynamic optimization model of the NAVeco solution

This internship is part of the validation of the ECAM-EPMI's General Engineer Diploma, Electrical Systems Engineering option, and took place within EXPLEO from 1 February to 31 July 2021 as a Research & Development Engineer. The subject of the study is an on-board calculator that optimises energy consumption on a road journey. At the beginning of my internship, the development of the solution applied only to thermal vehicles. The final solution targets all types of vehicles. My role in this project is to integrate the specificities of electric motors in the development of NAVeco. This document reports the important points of the internship, and shares in particular the steps of theoretical analysis, the solutions chosen, as well as the results of the various studies conducted. My work on this project is divided into two main areas. The first is the integration of energy regeneration functionality into the existing longitudinal dynamic model to assess the relevance of the regenerative braking strategy to the NAVeco solution. The second axis is the participation in the development of a dynamic optimization model that will be applied, in this document, to the movement of an electric vehicle. For this axis, my work focuses on determining an optimal cost function according to the energy consumed, the distance objective and the calculation times. Finally, we will propose a hybrid method optimization model to exploit the benefits of the two dynamic optimization methods we will study, open loop and predictive control.

Key words : Automotive, electric vehicles, dynamic optimization, energy optimization

LISTE DES TABLEAUX, FIGURES ET EQUATIONS

Tableau 1 : Paramètres de simulation.....	27
Tableau 2 : Comparaison des résultats pour les différents types de route	32
Tableau 3 : Formulations et critères d'optimisation testés	34
Tableau 4 : Critères sélectionnés à l'issue de la première phase de tests	37
Tableau 5 : Comparaison entre la génération de profil en BO et le suivi avec MPC	42
Tableau 6 : Résumé de la stratégie de distribution pour le confort optimal	48
Tableau 7 : Résumé de la stratégie de distribution pour la récupération optimale de l'énergie	50
Tableau 8 : Caractéristiques de la Peugeot e-208	50
Tableau 9 : Comparaison des cycles NEDC et WLTP	54
Tableau 10 : Résultats de distance parcourue et d'énergie consommée en Boucle Ouverte	62
Tableau 11 : Résultats de distance parcourue et d'énergie consommée avec le MPC.....	62
Tableau 12 : Récapitulation des essais sur les fonctions de coût.....	63
Figure 1 : Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre en France en 2019 [1]	8
Figure 2 : Présence du groupe EXPLEO dans le monde.....	10
Figure 3 : Principaux clients du groupe EXPLEO.....	11
Figure 4 : Architecture de la solution NAVeco.....	15
Figure 5 : Bilan des puissances de la chaîne de traction électrique	17
Figure 6 : Graphique type du rendement moteur selon le couple et la vitesse de rotation [2].....	18
Figure 7 : Rendement en mode motorisation Figure 8 : Carte du rendement de motorisation.....	19
Figure 9 : Rendement en mode régénération	19
Figure 10 : Exemple de schéma bloc d'une commande prédictive (a) et principe de fonctionnement (b)	25
Figure 11 : Hiérarchisation de la conception du modèle d'optimisation dynamique	26
Figure 12 : Modèle énergétique de la roue à la batterie sur Simulink.....	29
Figure 13 : Modèle Simulink du rendement moteur	30
Figure 14 : Profil de vitesse WLTP sur 100 secondes	30
Figure 15 : Observation du couple sur 100 secondes.....	30
Figure 16 : Rendement variable sur 100 secondes	31
Figure 17 : Observation de l'énergie sur 100 secondes.....	31
Figure 18: Phases de conduite qui composent le cycle WLTP	32
Figure 19 : Consommation et régénération kilométrique selon la pente.....	33
Figure 20 : Efficacité de régénération selon la pente.....	33
Figure 21 : Graphiques des résultats de distance parcourue et d'énergie consommée selon la méthode d'optimisation et selon la formulation de la fonction de coût.....	35
Figure 22 : Temps de calcul en boucle ouverte	36
Figure 23 : Temps de calcul par itération avec la méthode MPC	36
Figure 24 : Distance parcourue et énergie consommée en boucle ouverte selon la restriction de vitesse minimale et selon la vitesse initiale	38
Figure 25 : Temps de calcul en boucle ouverte selon la restriction de vitesse minimale et selon la vitesse initiale.....	38
Figure 26 : Résultats de distance, d'énergie et de temps de calcul (a) et comportement du véhicule (b)	39
Figure 27 : Commande prédictive avec l'erreur quadratique de distance sous la formulation de Bolza avec restriction de distance (a) et sans restriction de distance (b)	40
Figure 28 : Génération du profil de vitesse optimal avec la boucle ouverte (a) e suivi du profil avec le MPC (b)	41
Figure 29 : Modèle d'optimisation analytique	45
Figure 30 : Illustration des forces appliquées sur le véhicule lors du freinage [8].....	46
Figure 31 : Courbe de distribution idéale des forces de freinage [8].....	47
Figure 32 : Stratégie de distribution pour le confort optimal [9].....	48
Figure 33 : Stratégie de distribution pour la récupération optimale de l'énergie [9]	49
Figure 34 : Courbe idéale de la distribution et courbe de régulation ECE 13 [11]	49
Figure 35 : Schéma de la construction des essais sur les fonctions de coût.....	51

Figure 36 : Profile de vitesse NEDC	51
Figure 37 : Puissances fournie et absorbée par la batterie sur NEDC	52
Figure 38 : Energies consommée réelle et régénérée sur NEDC	52
Figure 39 : Observations des puissances et énergies sur NEDC pour intervalle de temps réduit	52
Figure 40 : Profil de vitesse WLTP	53
Figure 41 : Puissances fournie et absorbée par la batterie sur WLTP.....	53
Figure 42 : Energies consommée et régénérée sur WLTP.....	53
Figure 43 : Profil de vitesse WLTP	55
Figure 44 : Couple pour un rendement variable.....	55
Figure 45 : Energie consommée avec rendement variable.....	55
Figure 46 : Evolution du rendement variable.....	55
Figure 47 : Couple pour un rendement constant.....	56
Figure 48 : Evolution du rendement pour des valeurs constantes	56
Figure 49 : Evolution de l'énergie pour des rendements constants	56
Figure 50 : Maximisation de la distance sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)	57
Figure 51 : Maximisation de la vitesse sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)	58
Figure 52 : Minimisation de l'erreur quadratique de distance sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)	59
Figure 53 : Minimisation de l'erreur quadratique de distance sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)	60
Figure 54 : Minimisation de l'erreur quadratique de distance sous Bozla en boucle ouverte (a) et avec MPC (b)	61
Figure 55 : Maximisation de distance sous Bolza (a), minimisation de l'erreur quadratique de distance sous Bolza (b), maximisation de la vitesse sous Lagrange (c)	63

Équation 1 : Force de traction selon le Principe Fondamental de la Dynamique	15
Équation 2 : Expression de l'énergie de traction	16
Équation 3 : Puissance consommée	17
Équation 4 : Puissance absorbée par la batterie.....	17
Équation 5 : Approximation du rendement du moteur électrique	18
Équation 6 : Fréquence de rotation du moteur.....	18
Équation 7 : Couple appliqué sur l'arbre du rotor	19
Équation 8 : Efficacité du véhicule pour la régénération d'énergie	21
Équation 9 : Fonction d'état de la distance parcourue	22
Équation 10 : Force de traction selon le couple moteur	22
Équation 11 : Fonction d'état de la vitesse du véhicule	22
Équation 12 : Fonction d'état de la puissance consommée	23
Équation 13 : Fonctions de coût retenues	40
Équation 14 : Fonctions de coût utilisées par le modèle à méthode hybride	41
Équation 15 : Force de freinage maximale.....	46
Équation 16 : Décélération du véhicule	46
Équation 17 : Forces normales aux roues.....	46

I- INTRODUCTION GENERALE

I.1. Contexte

La gestion efficiente de la consommation énergétique est un objectif majeur pour tous les secteurs industriels. Les véhicules routiers, circulant en très grand nombre à travers le monde, nécessitent de consommer de l'énergie principalement fossile ou électrique. Que leur fonctionnement soit basé sur une motorisation thermique, électrique ou hybride, la plupart des véhicules que l'on peut rencontrer sur le marché de l'automobile ne permettent que trop peu l'utilisation optimale des ressources énergétiques. Le transport est l'activité qui contribue le plus aux émissions de gaz à effet de serre (GES) de la France [1]. En 2019, il représente 31 % des émissions françaises de GES. Depuis 1990, les GES des transports ont augmenté de 9 %. Les transports routiers contribuent à la quasi-totalité (94 %) des émissions du secteur des transports. Les émissions liées à la circulation routière incombent à hauteur de 54 % aux véhicules particuliers, de 24 % aux poids lourds et de 20 % aux véhicules utilitaires légers.

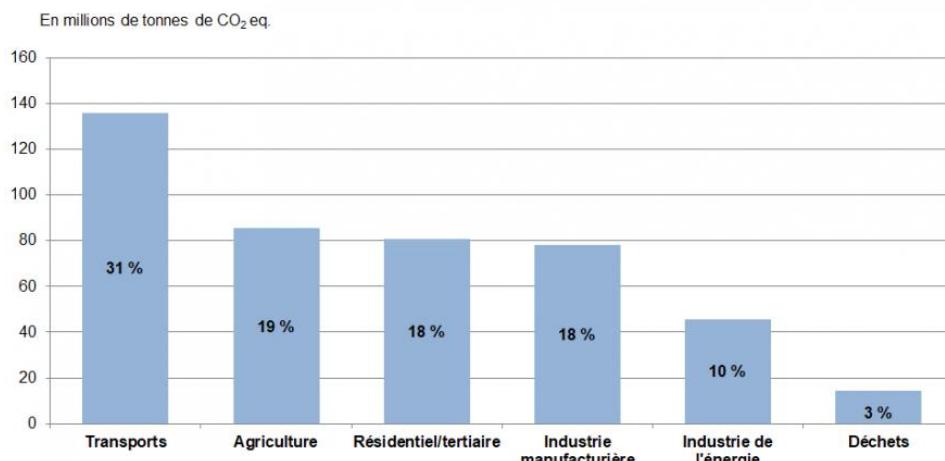


Figure 1 : Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre en France en 2019 [1]

En 2019, le transport est le secteur émettant le plus de GES en France, avec 136 Mt CO₂ eq., soit 31 % de l'inventaire national de GES, devant l'agriculture qui occupe la seconde place et le secteur résidentiel / tertiaire qui occupe la troisième. En 1990, la part des transports, deuxième des secteurs les plus émetteurs, représentait 22 % du total national.

Au regard des données présentées, il convient d'admettre l'intérêt de développer des solutions permettant d'optimiser la consommation énergétique pour les transports, et notamment pour les véhicules routiers. C'est dans ce contexte que le groupe EXPLEO entreprend le développement de la solution *NAVeco*, avec pour objectif de généraliser l'écoconduite autonome ou assisté sur le trajet à l'aide d'un calculateur.

I.2. Présentation du poste

Ma mission au sein du groupe EXPLEO consiste à travailler en tant qu'ingénieur en Recherche & Développement sur le projet *NAVeco*, qui est un calculateur embarqué permettant d'optimiser la consommation énergétique sur un trajet routier. Cette solution innovante cible tous les types de véhicule, qu'il s'agisse de disparités au niveau de la motorisation, de la transmission ou du mode de conduite, et nécessite donc, pour son développement, un apport de connaissances dans diverses disciplines afin de

considérer toutes les spécificités des différents véhicules et ainsi rendre le calculateur générique. Etant étudiant ingénieur généraliste avec une spécialisation dans l'ingénierie des systèmes électriques, j'interviens sur ce projet pour permettre la prise en compte des particularités d'une motorisation électrique dans le développement du calculateur, mais aussi pour permettre à l'équipe en charge du projet de profiter de l'aspect généraliste de ma formation, en m'amenant à la réalisation d'une étude liée au développement d'un modèle d'optimisation énergétique qui demande une compréhension plus générale des phénomènes physiques intervenant sur le véhicule.

L'équipe avec laquelle je travaille est composée d'un pilote projet R&D, qui est mon manager et maître de stage, responsable de la direction que prend le projet, ainsi que du suivi de l'avancement ; d'un ingénieur-docteur en charge des moyens techniques à mettre en œuvre et de la supervision scientifique ; et de trois stagiaires ingénieurs dont je fais partie. Chaque stagiaire est assigné à un sujet différent mais non sans dépendance. Les réflexions communes et le partage de résultats entre les stagiaires sont nécessaires pour tendre vers l'objectif final de chacun des trois sujets. Le travail se décompose en plusieurs tâches corrélées qui nécessitent de la recherche bibliographique, des moments de réflexion et de discussion, une disposition à mettre en place des méthodologies de test, ainsi qu'une capacité d'analyse des résultats et de compréhension des comportements physiques résultant des essais menés. La capacité d'être force de proposition est nécessaire pour pousser le projet au-delà de l'horizon défini et permettre à l'équipe de s'orienter vers des axes d'étude qui pourraient s'avérer avantageux, voir essentiel, pour le développement de la solution finale. A l'issue de chaque étude, un compte-rendu est rédigé puis révisé avec l'équipe. Ce compte rendu est destiné à la diffusion interne et peut servir de référence, autant pour des tâches futures du projet que pour d'autres travaux entrepris par EXPLEO utilisant des outils, des méthodes ou des notions similaires. Des qualités de rédaction et de synthèse sont, en conséquence, nécessaires pour le bon déroulement du stage.

I.3. Les apports du sujet pour l'entreprise

Avec l'aspect générique de la solution *NAVeco*, EXPLEO cible l'ensembles des véhicules que l'on peut rencontrer sur le marché de l'automobile. Pour cela, tous les cas envisageables doivent être considérés dans le développement du projet. Mon travail permet, d'une part, d'enrichir les productions existantes pour les rendre applicables aux véhicules électriques et, d'autre part, de progresser sur la conception du modèle d'optimisation. Ces missions qui m'ont été attribuées permettront à l'équipe d'explorer de nouvelles pistes, ainsi que d'utiliser, potentiellement, les productions réalisées pour le développement de la solution finale. De manière plus générale, l'intérêt de l'industrialisation de la solution *NAVeco* pour EXPLEO est de se démarquer davantage dans le secteur de l'automobile, en proposant à divers constructeurs l'intégration du calculateur dans leurs véhicules. Bien que EXPLEO soit un partenaire de confiance dans ce secteur, avec divers services réalisés, ainsi qu'en cours de réalisation, pour des constructeurs tels que les groupes PSA et Renault, un gain en fiabilité se ferait ressentir et pourrait amener à renforcer les liens avec ces grands groupes.

II- L'ENTREPRISE

II.1. Présentation

II.1.1. Généralités

EXPLEO, société par actions simplifiée, est un groupe industriel français représenté par plus de 13500 collaborateurs répartis dans 30 pays. Le groupe a généré un chiffre d'affaires de 903 millions d'euros en 2020 et se démarque dans une multitude de secteurs d'activité en proposant des services de prestation pour de grandes entreprises à travers le monde. Le groupe accompagne ses clients sur toute la chaîne de valeur avec :

- Du conseil pour de la transformation digitale, de la conduite du changement, et de la business agility ;
- De l'ingénierie en proposant ses services pour la conception de produits, la production, la supply chain et les services post développement ;
- De la qualité avec de l'ingénierie et du management de la qualité, ainsi que la réalisation et la supervision de tests qualité.

En plus de ses activités de prestation, EXPLEO entreprend des projets de Recherche & Développement dans divers domaines d'études correspondant aux secteurs d'activité sur lesquels l'entreprise se démarque.

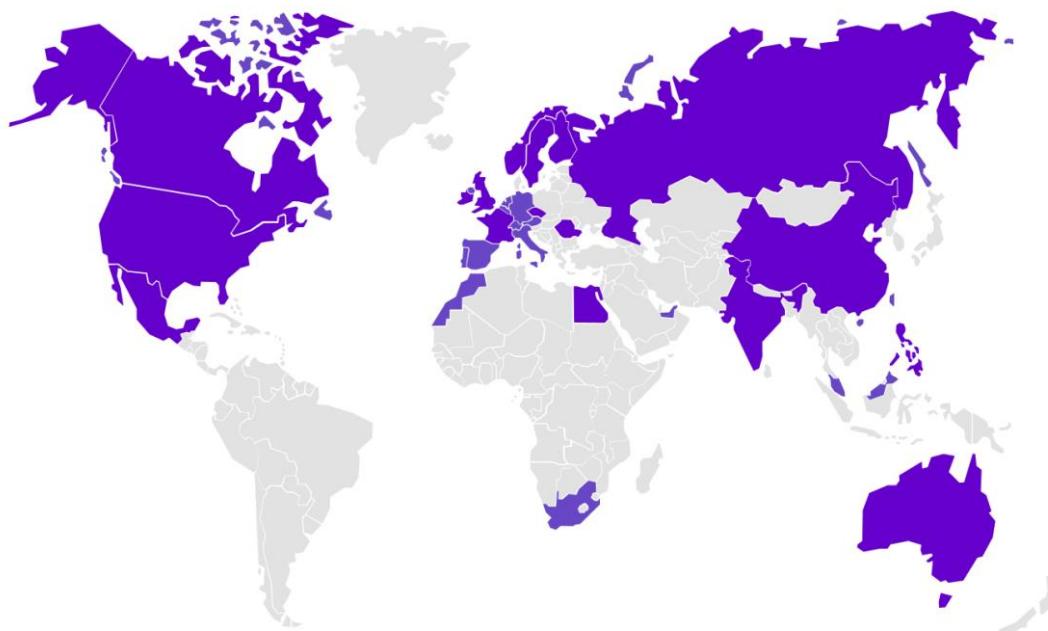


Figure 2 : Présence du groupe EXPLEO dans le monde

II.1.2. Secteurs d'activité

Le groupe EXPLEO accompagne des entreprises qui se positionnent parmi les leaders dans leur domaine. EXPLEO se démarque ainsi comme un acteur incontournable dans un grand nombre de secteurs :

- Aéronautique
- Automobile
- Spatial et Défense
- Transport ferroviaire
- Naval
- Energie & Utilities
- Industrie
- Banque & Services financiers
- Assurance
- Secteur public
- Distribution & Logistique
- Santé & Pharma
- Média
- Télécommunications



Figure 3 : Principaux clients du groupe EXPLEO

II.1.3. Les filiales

Avec l'acquisition d'entreprises, EXPLEO a pu se créer un réseau international de filiales spécialisées pour proposer davantage de services avancés. Les entreprises acquises se positionnent dans divers secteurs :

- *Aerotec (France)* : Conception, modification et certification d'avions.
- *Athos Aéronautique (France)* : Services d'ingénierie et de production pour l'industrie aéronautique.
- *Double Consulting (Italie)* : Leader italien du conseil en management.
- *Edison Technical Recruitement (Royaume-Uni)* : Recrutement et placement de profils techniques de tous niveaux dans les secteurs de l'automobile, de l'électronique, des logiciels et des moteurs.
- *Moorhouse (Royaume-Uni)* : Cabinet de conseil en transformation.

- *Silver Atena (Allemagne)* : Systèmes électroniques de sécurité.
- *Sud Aviations Services (France)* : Conception, certification et soutien aux modifications d'avions.
- *Stirling Dynamics (Royaume-Uni)* : Service d'ingénierie dans les secteurs de l'aérospatiale et de la marine.
- *Trissential (Etats-Unis)* : Cabinet de conseil en management spécialisé dans la business agility et la qualité.
- *Vista technologies (France)* : Analyse, essais et inspection.

II.2. Histoire

En 1966, La société d'ingénierie ATEM (qui deviendra Assystem en 1995) est créée à Paris, pour accompagner le développement de nouvelles usines dans les secteurs sidérurgique et nucléaire. En 2017, La division R&D externalisée d'Assystem SA, Global Product Solutions (GPS), prend son indépendance et devient Assystem Technologies, créant ainsi de nouvelles opportunités de croissance. En 2018, Assystem Technologies acquiert deux sociétés britanniques : Moorhouse société de conseil en management ainsi que Stirling Dynamics, spécialiste de l'ingénierie aéronautique et maritime. Elle est également rejointe par le groupe allemand SQS. C'est en 2019 que le groupe change de nom pour « EXPLEO », terme latin qui signifie « compléter » et « satisfaire ».

II.3. Organisation de l'entreprise

II.4. Quelques cas client

Expertise électrique pour l'Airbus A350

Projet

Des demandes de changement au traitement des non-conformités, nous EXPLEO a accompagné Airbus dans l'installation du système électrique et les activités électriques fonctionnelles du programme A350, sur les parties française et allemande du fuselage.

Services

- Suivi des sous-traitants d'Airbus : planning, vérification et validation des activités de conception
- Configuration des schémas électriques
- Conception des équipements électriques
- Gains de productivité : outils d'automatisation et d'optimisation des procédés

Résultats

- Réduction des coûts d'environ 25% sur les trois dernières années
- Fiabilité de livraison OTD (On-Time Delivery) supérieure à 98%

Conception et industrialisation de la Renault Megane Estate

Projet

Lorsque Renault a décidé d'enrichir sa gamme Megane, le constructeur automobile français s'est tourné vers EXPLEO pour prendre en charge la gestion de projet de ce modèle très apprécié, de la conception à l'industrialisation.

Services

- Conception, simulation et validation de la carrosserie et des aménagements
- Gestion des fournisseurs
- Industrialisation du véhicule et production des premiers modèles

Résultats

- Gestion de projet "clé en main"
- Agilité et optimisation des coûts grâce à la mobilisation d'équipes dans 3 pays (France, Espagne, Roumanie).

Assemblage, intégration et tests pour le CNES

Projet

Le Centre National des Etudes Spatiales (CNES) avait besoin de construire un sismomètre de 30 kg appelé SEIS (Seismic Experiment for Interior Structures) embarqué à bord de la sonde InSight de la NASA. EXPLEO a aidé le client à intégrer et tester tous les modèles de sismomètre SEIS, effectuer les

essais et les qualifications et anticiper de façon réaliste les conditions réelles de déploiement et d'exploitation du sismomètre.

Services

- Assemblage, intégration et activités de tests
- Charge utile pour plusieurs modèles SEIS
- Amélioration du module de soutien électrique au sol EGSE (Electrical Ground Support Equipment)
- Développement du module de soutien mécanique au sol MGSE (Mechanical Ground Support Equipment)

Résultats

- Intégration et test de tous les modèles SEIS
- Anticipation réaliste des conditions réelles de déploiement et de fonctionnement du sismomètre

III- MISSIONS

III.1. Présentation de la solution NAVeco

La solution NAVeco a pour but de permettre à tout type de véhicule d'optimiser la consommation de carburant et/ou d'électricité selon les caractéristiques géographiques et signalétiques. Elle peut se présenter sous deux formes. La première consiste en une extension aux applications de navigation (Waze, Google Map, etc.) pour fournir l'itinéraire optimal. La seconde forme consiste en un programme embarqué associé au système de navigation pour les véhicules autonomes, ou associé au régulateur de vitesse intelligent pour les véhicules non autonomes munis de ce système. Dans ce cas, le rôle est de fournir, en plus de l'itinéraire optimal, les consignes de vitesse permettant de minimiser l'énergie consommée. Dans un premier temps, un processus de segmentation de l'itinéraire est réalisé à partir des caractéristiques du trajet. La segmentation permet d'assigner à chaque segment un temps de parcours de référence et un objectif de distance. Ces paramètres serviront au modèle d'optimisation dont le rôle est de fournir les consignes de vitesse optimales permettant de minimiser l'énergie consommée tout en respectant les contraintes de parcours.

La figure 4 présente l'architecture de la solution NAVeco. Les blocs verts désignent les parties sur lesquelles j'ai travaillé durant mon stage.

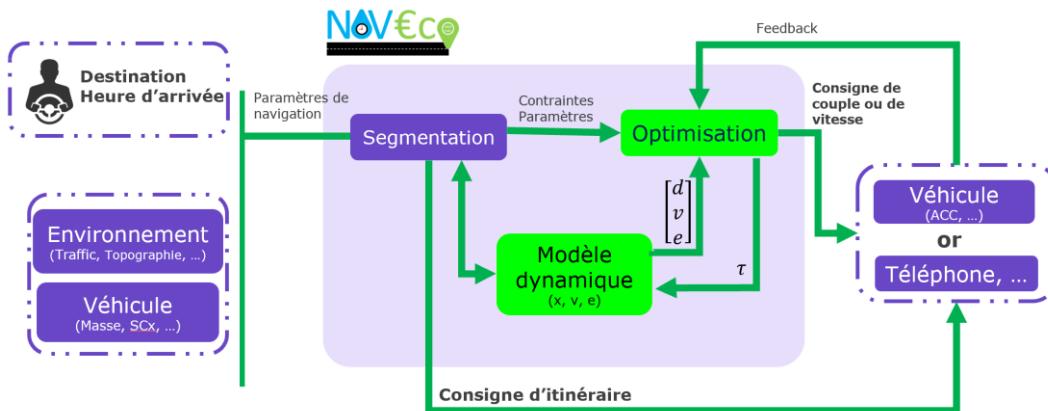


Figure 4 : Architecture de la solution NAVeco

III.2. Etat du projet à mon arrivée

L'optimisation effectuée par la solution NAVeco nécessite, dans un premier temps, le développement d'un modèle décrivant la dynamique du véhicule. Ce modèle a été développé avec l'outil Matlab / Simulink et permet d'obtenir la consommation d'énergie selon la force de traction et la vitesse longitudinale.

Selon le principe fondamental de la dynamique, la force de traction F_{trac} admise sur les roues motrices du véhicule vaut la somme de la force d'inertie F_{iner} et des forces ralentissant le véhicule, telles que la force aérodynamique F_{aero} , la force de résistance au roulement F_{rr} et la force gravitationnelle F_g .

$$\text{Équation 1 : Force de traction selon le Principe Fondamental de la Dynamique}$$

$$\overrightarrow{F_{trac}}(t) = \overrightarrow{F_{aero}}(t) + \overrightarrow{F_{rr}}(t) + \overrightarrow{F_g}(t) + \overrightarrow{F_{iner}}(t)$$

Avec

$$F_{aero}(t) = \frac{1}{2} \rho S C_x v^2(t)$$

$$F_{rr}(t) = mgC_r \cos(\theta)$$

$$F_g(t) = mg \sin(\theta)$$

$$F_{iner}(t) = m \cdot a(t)$$

ρ	: la masse volumique de l'air	[kg/m ³]
S	: la surface frontale du véhicule	[m ²]
C_x	: le coefficient de traînée aérodynamique,	[s.u]
v	: la vitesse du véhicule	[m/s]
m	: sa masse	[kg]
g	: l'accélération gravitationnelle	[m/s ²]
C_r	: le coefficient de résistance au roulement ;	[s.u]
θ	: l'angle d'inclinaison de la route	[rad]
a	: l'accélération du véhicule	[m/s ²]

Le produit de la force de traction et de la vitesse permet d'obtenir la puissance de traction, qui elle-même permet d'exprimer l'énergie de traction. Cette fonction sera donc à minimiser tout en prenant en compte le temps de parcours assigné au segment et l'objectif de distance.

Équation 2 : Expression de l'énergie de traction

$$E_{traction}(t) = \int_0^T \frac{1}{2} \rho S C_x v(t)^3 dt + \int_0^T m \cdot g C_r \cdot \cos(\alpha) \cdot v(t) dt + \int_0^T m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v(t) dt + \int_0^T m \cdot a \cdot v(t) dt$$

La première méthode d'optimisation étudiée par l'équipe NAVeco, avant mon stage, fut une méthode analytique. Cette méthode consiste à prévoir des stratégies de profils de vitesse selon les combinaisons de force de traction et d'accélération du véhicule dans le but de minimiser la fonction d'énergie de traction. La méthode analytique développée est brièvement présentée en annexe 1.

III.3. Problématique et description des missions

Dans la section précédente, nous avons présenté l'état du projet à mon arrivée dans l'entreprise. Nous avions donc à disposition le modèle dynamique longitudinal du véhicule, ainsi qu'un modèle d'optimisation analytique.

Toutefois, le modèle du véhicule ne prenait pas en compte la possibilité de régénération d'énergie, rendue possible par les moteurs électriques lors du freinage, qui peut être utile dans les stratégies d'optimisation de la solution lorsque celle-ci sera intégrée sur ce type de véhicule. La première mission consiste alors à enrichir le modèle dynamique longitudinal pour prendre en compte la fonction de freinage régénératif offerte par les véhicules électriques. Pour cela, nous devrons modifier le point d'observation de l'énergie en passant d'une observation à la roue vers une observation à la source (à la batterie). Il est donc prévu d'intégrer le rendement de la chaîne de traction électrique dans le modèle pour le mode en motorisation et pour le mode en régénération.

Une fois le modèle enrichi avec la prise en compte du freinage régénératif, il sera nécessaire d'étudier l'efficacité de la régénération selon différents scénarios afin de déterminer l'intérêt de cette stratégie pour la solution NAVeco.

Lorsque les spécificités de la motorisation électrique seront intégrées au modèle, nous pourrons étudier le processus d'optimisation. La méthode analytique, étudiée avant mon arrivée dans l'équipe NAVeco, n'est pas la seule méthode d'optimisation envisageable. Il existe des méthodes dites dynamiques dont le fonctionnement évite de devoir prévoir tous les cas possibles avec un nombre relativement élevé de conditions et d'équations diverses comme le nécessite la méthode analytique. Nous travaillerons donc sur le développement d'un modèle répondant à un problème de contrôle optimal, et plus particulièrement sur le paramétrage efficient de ce modèle d'optimisation dynamique en termes d'énergie consommée et de respect de l'objectif de distance.

III.4. Analyse théorique

Cette section présente les notions théoriques nécessaires à la réalisation des missions présentées dans la section III.3. Nous présenterons, dans un premier temps, le bilan des puissances de la chaîne de traction électrique. Nous expliquerons ensuite la manière dont s'exprime le rendement d'un moteur électrique, ainsi que la façon dont nous l'intégrerons dans le modèle dynamique longitudinal. Nous décrirons, dans la seconde partie, comment nous exprimerons l'efficacité du freinage régénératif et le rôle de cette notion dans notre travail. Enfin, nous présenterons la notion de problème de contrôle optimal, ainsi que les méthodes d'optimisation dynamique que nous étudierons.

III.4.1.Bilan des puissances de la chaîne de traction électrique

Une force de traction positive signifie que la puissance associée est délivrée aux roues par la chaîne de traction pour le déplacement du véhicule. Il y a donc une consommation d'énergie. A contrario, une force de traction négative indique que la puissance est partiellement absorbée par la chaîne de traction de manière à régénérer de l'énergie électrique et la stocker. Nous appellerons l'énergie délivrée par la source « Energie consommée réelle » et l'énergie absorbée par la batterie « Energie régénérée ». La somme de ces énergies (de signes opposés) nous donne l'énergie consommée nette, vue par le conducteur. Nous considérons un véhicule 100% électrique à batterie.

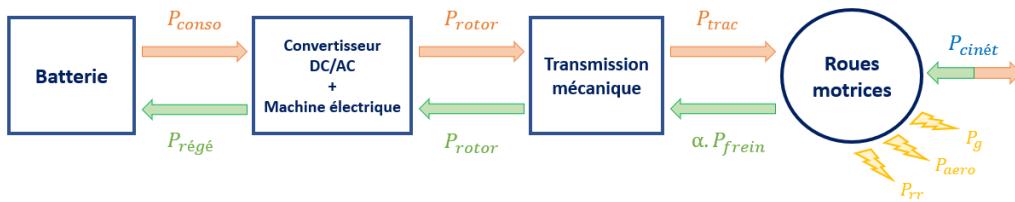


Figure 5 : Bilan des puissances de la chaîne de traction électrique

La figure 5 schématisé le bilan des puissances de la chaîne de traction électrique. Avec P_{cons} la puissance consommée (électrique), $P_{rége}$ la puissance régénérée (électrique), P_{rotor} la puissance développée sur l'arbre du rotor (mécanique), P_{trac} la puissance de traction (mécanique), P_{frein} la puissance de freinage (mécanique) et $P_{cinét}$ la puissance cinétique. P_g , P_{aero} et P_{rr} correspondent aux puissances perdues, respectivement par les forces gravitationnelle, aérodynamique et de résistance au roulement. Ces pertes sont causées par l'ensemble du véhicule mais se font ressentir au niveau des roues motrices au regard du bilan des puissances. La puissance de freinage est pondérée par un coefficient (α sur la figure 5) représentant la part de la force de freinage régénératif utilisée sur la force de freinage totale (couple de régénération + friction mécanique). La distribution des forces de freinage est présentée dans l'annexe 2.

Soit η_m le rendement global de la chaîne de traction en mode motorisation (sens des flèches orange sur la figure 5) et η_r en mode régénération (sens des flèches vertes sur la figure 5). En considérant que le coefficient de pondération α de la puissance totale de freinage est inclus dans le rendement global en mode régénération, les puissances consommée et régénérée s'expriment par :

$$\text{Équation 3 : Puissance consommée}$$

$$P_{cons}(t) = \frac{1}{\eta_m} \cdot P_{trac}(t)$$

$$\text{Équation 4 : Puissance absorbée par la batterie}$$

$$P_{rége}(t) = \eta_r \cdot P_{frein}(t)$$

Tout le travail présenté dans ce rapport s'appuiera sur les caractéristiques du modèle e-208 de la marque Peugeot indiquées dans l'annexe 3.

III.4.2. Rendement des moteurs électriques

Un rendement exprime le rapport entre l'énergie utile et l'énergie absorbée par le système. Dans le cas d'une machine électrique, l'énergie utile est mécanique en mode moteur ou électrique en mode générateur et inversement pour l'énergie absorbée. La puissance mécanique développée sur l'arbre du rotor dépend du couple et de la vitesse angulaire de ce dernier. De ce fait, le rendement du moteur varie selon le point de fonctionnement couple-vitesse. La courbe en gras, sur la figure 6, indique le couple maximal selon la vitesse de rotation.

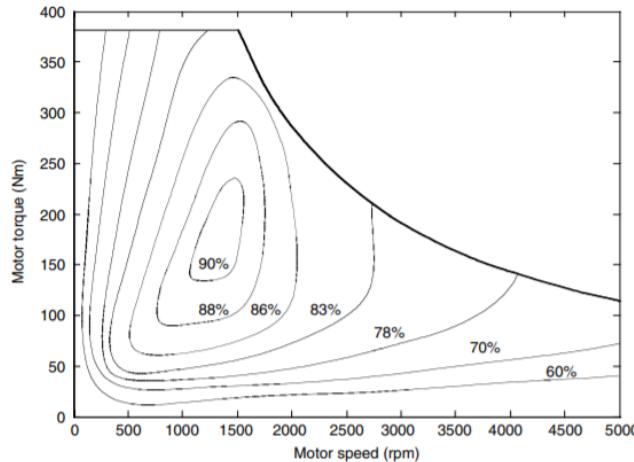


Figure 6 : Graphique type du rendement moteur selon le couple et la vitesse de rotation [2]

D'après les travaux de Cristhian Yesid Bello Ceferino réalisés dans le cadre de sa thèse de doctorat [3], nous pouvons supposer que le rendement correspond à un paraboloïde d'équation :

$$\text{Équation 5 : Approximation du rendement du moteur électrique}$$

$$\eta(T_m, N_m) = \hat{\eta} - k_N \cdot (N_m - N_{opt})^2 - k_T \cdot (T_m - T_{opt})^2$$

Avec $\hat{\eta}$ la valeur maximale du rendement (échelle unitaire), T_m le couple appliqué sur l'arbre du rotor et T_{opt} le couple optimal (en N.m), N_m la fréquence de rotation du rotor et N_{opt} la fréquence de rotation optimale (en tr/min). k_N et k_T sont des constantes qui caractérisent la forme de la fonction, respectivement selon l'axe de la fréquence de rotation et l'axe du couple.

La fréquence de rotation du moteur varie selon la vitesse du véhicule v et dépend du rayon de la roue R_w , du rapport de transmission à la vitesse maximale i_g et du produit des rapports de transmission supplémentaires i_0 utilisés à l'instant t. L'équation est la suivante :

$$\text{Équation 6 : Fréquence de rotation du moteur}$$

$$N_m(t) = \frac{30}{\pi \cdot R_w} \cdot i_g \cdot i_0 \cdot v(t)$$

Le rapport de transmission i_g correspond au rapport de transmission unique à vitesse maximale, le rapport i_0 vaut donc 1 puisque les autres transmissions ne sont pas utilisées. Pour déterminer la valeur de i_g , il suffit d'appliquer l'équation précédente avec les caractéristiques maximales du véhicule. Dans le cas de la Peugeot e-208, avec une fréquence de rotation rotorique maximale de 10000 tr/min et une vitesse maximale du véhicule de 41,67 m/s (150 km/h), nous obtenons un rapport de transmission i_g de 7,74. Donc la vitesse angulaire du moteur est 7,74 fois supérieure à celle de la roue. Pour simplifier la suite de l'étude, nous considérerons que la sortie du moteur se caractérise par un seul rapport de transmission. Ainsi le rapport i_0 sera toujours égale à 1.

Le couple appliqué sur l'arbre du rotor correspond au couple appliqué sur les roues divisées par le rapport de transmission. Le couple de traction au niveau des roues correspondant au produit de la force de traction et du rayon de la roue, le couple moteur s'exprime par :

Équation 7 : Couple appliqué sur l'arbre du rotor

$$Tm(t) = \frac{F_{trac}(t) \cdot R_w}{i_g \cdot i_0}$$

Notons que nous avons ici négligé les pertes mécaniques lors de la transmission.

Le rendement du moteur dépend donc indirectement de la vitesse du véhicule et de la force de traction appliquée sur les roues. En se référant à la figure 6, nous utiliserons un rendement maximal de 90% en mode moteur. Pour déterminer les valeurs optimales de fréquence de rotation et de couple, nous nous référons aux paramètres présentés dans le tableau 1 de la Peugeot e-208 que nous utilisons comme base d'étude. Au regard de la figure 6, qui représente une carte de rendement typique d'un moteur électrique, nous pouvons approximer les valeurs optimales à 1/3 de sa valeur maximale pour la fréquence de rotation et à 2/5 de sa valeur maximale pour le couple. Les constantes k_N et k_T ont été déterminés par l'expérimentation en observant et en comparant le résultat du calcul avec la figure 6, de manière à obtenir une représentation rapprochée.

Les figures 7 et 9 montrent les fonctions approximant les rendements, respectivement en mode motorisation et en mode régénération, dans un espace tri-dimensionnel selon le couple et la fréquence de rotation. La figure 8 présente les courbes de niveau du rendement de motorisation.

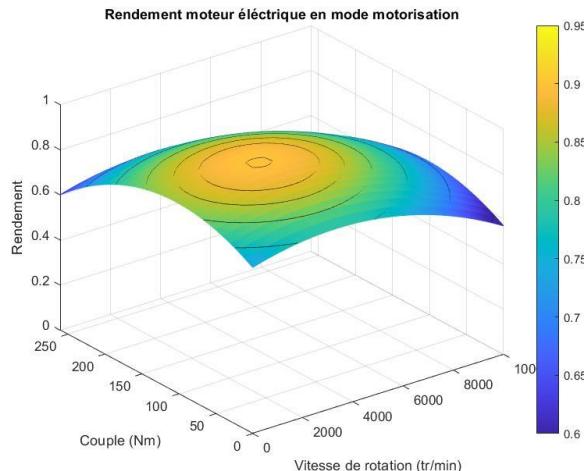


Figure 7 : Rendement en mode motorisation

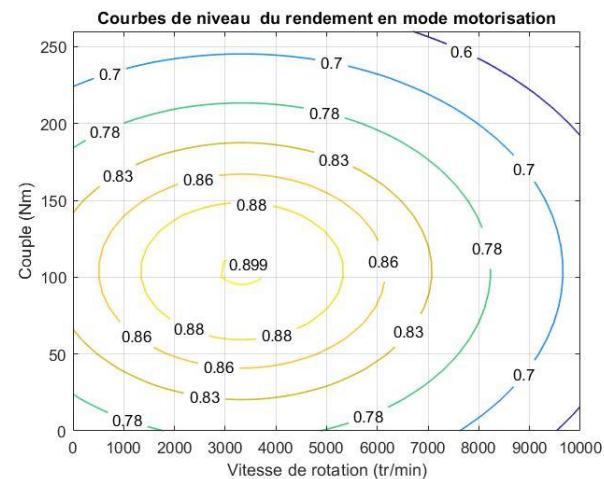


Figure 8 : Carte du rendement de motorisation

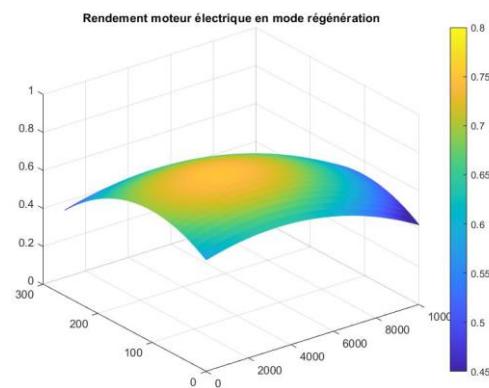


Figure 9 : Rendement en mode régénération

L'étude de Lars-Henrik Björnsson et Sten Karlsson (Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology) [4] présente un rendement moyen de 80% pour le mode motorisation (Avec un rendement maximal de 90% selon la figure 6) et une moyenne de 64% pour le mode régénératif, à partir de plusieurs mesures en conditions réelles. Nous avons alors extrapolé la différence de 10% entre la valeur moyenne et la valeur maximale du mode moteur (respectivement 80 et 90%) pour estimer sur le mode régénératif un rendement maximal de 74%.

Cette différence entre les deux modes peut s'expliquer, d'une part, par les limites d'absorption de puissance imposées par la batterie (voir section III.4.3) et, d'autre part, par le fait que la force de freinage du véhicule n'est pas toujours appliquée à 100% par le couple du freinage régénératif. Selon le mode de distribution des forces de freinage (voir annexe 2) et les consignes de décélération, une partie de la puissance peut être perdue par le freinage à friction mécanique. Ces pertes ne sont pas caractéristiques du moteur électrique, mais pour simplifier le modèle nous les définissons à ce niveau.

Les équations présentées dans cette section seront intégrées au modèle dynamique longitudinal existant pour le rendre applicable aux véhicules électriques qui permettent la régénération d'énergie. À la suite de cette intégration, nous étudierons l'intérêt de la stratégie de régénération d'énergie pour la solution NAVeco. Nous présenterons dans la section suivante la manière dont nous définissons l'efficacité de cette stratégie.

III.4.3. Efficacité du freinage régénératif

Dans cette partie, nous allons définir la manière dont nous exprimerons l'efficacité du système pour la régénération d'énergie. Nous verrons que l'efficacité dépend des rendements de la chaîne de traction en mode motorisation et en mode régénération, de l'énergie de freinage et de l'énergie de traction. Pour rappel, nous considérons que le ratio exprimant la part de la force de freinage régénératif sur la force de freinage totale est compris dans le rendement global de régénération η_r . Dans un second temps, nous décrirons les limites imposées par les caractéristiques physiques de la batterie sur le rendement en mode régénération.

Soit E_{conso} l'énergie délivrée par la batterie et $E_{régré}$ l'énergie absorbée par la batterie.

$$E_{conso} = \frac{1}{\eta_m} \cdot \int P_{trac}(t) \cdot dt$$

$$E_{régré} = \eta_r \cdot \int P_{frein}(t) \cdot dt$$

Avec η_m le rendement de la chaîne de traction en mode motorisation et η_r en mode régénération, P_{trac} la puissance de traction à la roue et P_{frein} la puissance de freinage.

$$P_{trac}(t) = F_{trac}(t) \cdot v(t) \cdot b(t)$$

$$P_{frein}(t) = F_{trac}(t) \cdot v(t) \cdot (1 - b(t))$$

Avec F_{trac} la force de traction et $v(t)$ la vitesse du véhicule.

$$b(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } F_{trac}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{si } F_{trac}(t) < 0 \end{cases}$$

Considérons γ le rapport d'efficacité de régénération par rapport à la consommation, γ s'exprime par :

$$\gamma = \frac{E_{régré}}{E_{conso}} = \frac{\eta_r \cdot \int P_{frein}(t) \cdot dt}{\frac{1}{\eta_m} \cdot \int P_{trac}(t) \cdot dt}$$

Donc l'efficacité de régénération s'écrit :

Équation 8 : Efficacité du véhicule pour la régénération d'énergie

$$\gamma = \eta_r \eta_m \frac{E_{frein}}{E_{trac}}$$

Avec E_{frein} l'énergie de freinage et E_{trac} l'énergie de traction, toutes deux au niveau des roues. L'efficacité de la régénération d'énergie dépend alors des rendements de la chaîne de traction électrique en mode motorisation et en mode régénération. Ces rendements varient selon la vitesse angulaire du rotor et selon le couple appliqué sur son arbre. Le rapport de l'énergie de freinage sur l'énergie de traction sera influencé par le profil de vitesse. Par ailleurs, comme nous allons le voir dans la section suivante, l'état de charge de la batterie exercera une influence sur l'utilisation du freinage régénératif.

Limites imposées par la batterie

La batterie impose quelques limites à l'utilisation du freinage régénératif. Lorsque celle-ci est pleine, le stockage d'énergie supplémentaire devient impossible, il ne peut donc pas y avoir de régénération. De plus, lorsque l'état de charge est supérieur à 80%, la résistance interne de la batterie croît de manière exponentielle. En dessous, elle est relativement constante. Donc pour un état de charge supérieur à 80%, la régénération n'est généralement pas utilisée de manière à éviter une surtension aux bornes de la batterie [5]. Le rendement de la chaîne de traction en fonctionnement régénératif dépend alors de l'état de charge de la batterie, en plus de dépendre de la fréquence de rotation rotorique et du couple appliquéd.

Nous avons vu, dans cette section, que l'efficacité du système à régénérer de l'énergie dépend des rendements de la chaîne de traction en fonctionnement moteur et en fonctionnement régénératif, qui eux-mêmes varient selon le couple et la vitesse angulaire du moteur. En mode régénératif, le rendement sera aussi influencé par l'état de charge de la batterie. La notion d'efficacité du freinage régénératif nous permettra de mener une étude sur l'intérêt de la stratégie de freinage régénératif pour la solution NAVeco. A la suite de cette étude, les spécificités d'une motorisation électriques auront été traitées. Ce qui nous autorisera à entamer le développement du modèle d'optimisation appliquéd aux véhicules électriques.

III.4.4. Problème de contrôle optimal et méthodes d'optimisation dynamiques

Le modèle d'optimisation peut être conçu de diverses manières selon la méthode, le type de problème, les algorithmes d'exploration de la solution optimale, les types de restriction, la fonction de coût, etc. Dans notre cas, l'optimisation de la consommation énergétique du véhicule sur le trajet se fait en déterminant un profil de vitesse optimal. Le véhicule devant suivre ce profil, notre sujet correspond à un problème de contrôle optimal. Cette section permettra de comprendre la manière de construire ce type de problème. Nous présenterons ensuite les deux méthodes d'optimisation dynamiques que nous étudierons.

Les calculs d'optimisation dynamique s'appuient sur un modèle composé de divers éléments caractéristiques comme la fonction de coût, les critères d'optimisation qui composent cette fonction ou encore des contraintes classifiées par leur niveau d'importance (soft, hard) et par leur nature (contraintes de conception, contraintes physiques). Pour un problème de contrôle optimal, le principe est de minimiser une fonction à multiples variables, appelée fonction de coût, en satisfaisant un ensemble de contraintes. La fonction doit être optimisée en respectant les limitations imposées sur les variables d'état et sur l'entrée du système (variable de contrôle). Nous exprimerons donc l'évolution des variables d'état ainsi que les restrictions imposées. Ensuite, nous présenterons les différentes manières de formaliser la fonction de coût. Pour finir sur la présentation du problème de contrôle optimal, nous définirons les possibilités d'expression des critères d'optimisation pour notre cas d'étude.

Dans notre cas, les variables qui caractérisent l'état du véhicule sont la distance parcourue, la vitesse et l'énergie consommée. La variable de commande (ou de contrôle) correspond au couple appliqué sur l'arbre du moteur. De manière générale, les variables d'état sont représentées par la lettre « x », tandis que « u » désigne la variable de contrôle.

III.4.4.1. Expression des variables d'état

Le modèle dynamique s'exprime sous forme vectorielle. Le vecteur x rassemble les variables d'état et le vecteur u les variables de contrôle. Dans notre modèle, la dynamique du véhicule est décrite par trois variables : la distance parcourue x_1 , la vitesse longitudinale x_2 et l'énergie consommée x_3 ; et le contrôle est effectué par une grandeur : le couple moteur u_1 . L'évolution des variables d'état est décrite par des équations différentielles, appelées fonctions d'état, dont la forme générale est :

$$\dot{x} = f(x, u, t)$$

Avec \dot{x} la dérivée de la variable x par rapport au temps.

$$\text{Si } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{(Distance)} \\ \text{(Vitesse)} \\ \text{(Energie)} \end{array} \quad \Rightarrow \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{(Vitesse)} \\ \text{(Accélération)} \\ \text{(Puissance)} \end{array}$$

La dérivée de la distance par rapport au temps correspond à la vitesse du véhicule. La fonction d'état de la distance s'écrit donc simplement :

Équation 9 : Fonction d'état de la distance parcourue

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

La fonction d'état de la vitesse correspond à sa dérivée par rapport au temps, donc à l'accélération. Au regard de l'équation 1, nous pouvons exprimer l'accélération de cette manière :

$$\dot{x}_2(t) = \frac{1}{m}(F_{trac}(t) - F_{aero}(t) - F_{rr}(t) - F_g(t))$$

Notre variable de commande étant le couple moteur, nous devons exprimer la force de traction selon ce dernier. La force de traction s'exprime alors par :

Équation 10 : Force de traction selon le couple moteur

$$F_{trac}(t) = u_1(t) \cdot \frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{R_w}$$

Avec i_g le rapport de multiplication de la transmission mécanique à vitesse maximale, i_0 le rapport de transmission final, η_t le rendement de la transmission et R_w le rayon des roues.

Dans notre étude, nous considérerons un seul rapport de transmission (i_g), comme présenté dans la section III.4.2. De plus, nous considérons un rendement total pour toute la chaîne de traction (voir sections III.4.1 et III.4.2). Donc le rendement de la transmission η_t sera compris dans le rendement global. Nous ne l'exprimerons pas au travers de cette équation, en le considérant unitaire. A partir du principe fondamental de la dynamique appliqué sur l'équation XX, nous pouvons exprimer la fonction d'état de la vitesse :

Équation 11 : Fonction d'état de la vitesse du véhicule

$$\dot{x}_2(t) = \frac{1}{m} \cdot [u_1(t) \cdot \frac{i_g}{R_w} - F_{aero}(t) - F_{rr}(t) - F_g(t)]$$

Pour finir, nous allons exprimer la fonction d'état de l'énergie consommée. La variation de l'énergie consommée correspond à l'expression de la puissance consommée. La puissance de traction étant le produit de la force de traction (équation 3) et de la vitesse, nous pouvons exprimer la fonction d'état de l'énergie consommée (côté batterie) comme ceci :

Équation 12 : Fonction d'état de la puissance consommée

$$\dot{x}_3(t) = \frac{i_g}{R_w} \cdot u_1(t) \cdot x_2(t) \cdot \eta_{CT}(t)$$

Avec η_{CT} le rendement global de la chaîne de traction (de la batterie aux roues motrices) caractérisant les différentes pertes de puissance. En mode motorisation, nous considérons que η_{CT} est supérieur à 1 car l'énergie consommée x_3 (côté batterie) est supérieure à l'énergie utile (de traction). En mode régénération, le rendement est inférieur à 1 car l'énergie régénérée (côté batterie) est inférieure à l'énergie de freinage.

Nous avons exprimé l'évolution de chacune des variables d'état. Toutefois, ces variables sont soumises à des restrictions liées à l'environnement dans lequel se trouve le véhicule ou à ses contraintes physiques.

III.4.4.2. Restrictions

Les variables d'état et de contrôle peuvent être bornées pour, d'une part, spécifier des cas particuliers sur l'optimisation (contraintes de conception) et, d'autre part, prendre en compte les contraintes réelles du système et de l'environnement étudiés (contraintes physiques). Dans notre cas, des restrictions s'appliqueront sur la vitesse, la distance à parcourir, ainsi que sur le couple moteur. La vitesse maximale sera déterminée par la signalisation, nous supposerons 22,5 m/s (environ 80 km/h), et sa valeur minimale sera définie à 0 km/h pour le moment. Les limites du couple sont déterminées selon les caractéristiques techniques de la Peugeot e-208, soit -260 Nm pour la valeur minimale et +260 Nm pour la valeur maximale. Nous pourrions définir des restrictions sur l'énergie consommée, liées à l'état de charge de la batterie, mais cette étude se basera sur un segment de route relativement court donc les limites sur l'énergie ne sont pas nécessaires pour le moment. Tout au long de l'étude, nous considérerons un segment de route d'une longueur de 1 km. Les restrictions sont donc les suivantes :

Contraintes de conception :

$$\begin{aligned} 0 \leq x_1 &\leq 1000 & [\text{m}] \\ 0 \leq x_2 &\leq 22,5 & [\text{m/s}] \end{aligned}$$

Contrainte physique :

$$-260 \leq u_1 \leq +260 \quad [\text{Nm}] \quad \text{pour la Peugeot e-208}$$

Il est possible de spécifier des contraintes sur les valeurs initiale et finale d'une variable. Dans notre cas, nous utiliserons une restriction finale sur la variable de temps définissant le temps de parcours assigné au segment de route (voir section III.4.5), ainsi qu'une restriction sur la vitesse initiale (0 m/s dans la première partie de l'étude).

III.4.4.3. Formulation de la fonction de coût

La fonction de coût se compose d'une ou plusieurs variables définies dans notre problème. Dans chaque cas que nous étudierons, nous chercherons à minimiser l'énergie consommée (x_3) qui est notre premier critère. A cela s'ajoutent un ou plusieurs critères caractérisés par la distance parcourue (x_1), la vitesse (x_2) ou le couple rotorique du moteur (u_1). Il existe plusieurs manières de formuler la fonction de coût, telles que la formulation de Lagrange, de Mayer ou de Bolza. Nous verrons dans cette section les différentes formulations possibles, avec $F(t)$ la fonction rassemblant les critères intégrés et $G(t_f)$ la fonction exprimant les critères à leurs états initial et final.

Formulation de Lagrange

La formulation de Lagrange correspond à l'intégrale du ou des critères à optimiser sur le temps de simulation. Pour résoudre l'optimisation avec cette formulation, la fonction de coût s'écrit de cette manière :

$$\min J(x, u, t) = \int_{t_0}^{t_f} F(x, u, t) . dt$$

Avec $F(t)$ qui exprime les critères d'optimisation et t_0, t_f les instants de temps initial et final du problème. La représentation des critères dans une intégrale signifie que l'optimisation s'effectue pour chaque instant de temps.

Formulation de Mayer

La formulation de Mayer consiste à exprimer la fonction de coût de manière à optimiser la valeur terminale et / ou la valeur initiale ou des critères. La fonction s'exprime de cette manière :

$$\min J(x, u, t_0, t_f) = G_0(x_0, u_0, t_0, x_f, u_f, t_f)$$

Avec $G_0(x_0, u_0, t_0)$ et $G(x_f, u_f, t_f)$ les fonctions exprimant les critères à optimiser, respectivement sur l'instant initial et l'instant final.

Formulation de Bolza

La formulation de Bolza correspond à la somme des formulations de Mayer et de Lagrange. Soit $F(x, u, t)$ la fonction intégrée dans la formulation de Lagrange et $G(x_f, u_f, t_f)$ la formulation de Mayer, la fonction de coût s'exprime de cette manière :

$$\min J(x, u, t) = G(x_0, u_0, t_0, x_f, u_f, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} F(x, u, t) . dt$$

Ainsi, avec cette formulation nous avons la possibilité d'optimiser certains critères sur leurs états initial et final uniquement et d'autres sur l'intervalle de temps complet pour le même problème d'optimisation.

Le coût du problème d'optimisation peut s'exprimer de différentes manières selon le but recherché. La fonction de coût peut dépendre des états terminaux, de chaque instant de temps ou des deux à la fois. Nous verrons dans la section suivante que les critères d'optimisation qui composent cette fonction peuvent aussi s'exprimer de différentes manières.

III.4.4.4. Expression des critères d'optimisation

La fonction de coût se construit selon sa formulation, que nous avons vu dans la section précédente, mais aussi selon l'expression des critères d'optimisation qu'elle contient. L'expression de ces critères peut avoir une influence sur l'efficacité de l'optimisation. Dans cette section, nous introduirons les deux types d'expression qui diffèrent par leur convergence.

Convergence du critère vers une borne

Nous avons vu dans la section III.4.4 que les variables d'état et de contrôle peuvent être restreintes. Les limites d'une variable à contrôler peuvent permettre d'orienter l'optimisation. De cette manière, il suffit d'exprimer le critère simplement par la variable signée positivement ou négativement pour tendre vers la borne souhaitée. Considérons y une unique variable à optimiser qui est bornée par des limites inférieure et supérieure, alors la fonction de coût peut s'exprimer de deux manières :

$$\min J(y, t) = \pm \int_{t_0}^{t_f} y(t) . dt \quad \text{Pour la formulation de Lagrange.}$$

$$\min J(y, t_f) = \pm y(t_f) \quad \text{Pour la formulation de Mayer.}$$

Avec $Y_{Min} \leq y(t) \leq Y_{Max}$

Donc selon le signe attribué au critère, l'optimisation fera converger la variable vers une de ses restrictions.

Convergence du critère vers zéro

Une autre manière d'exprimer le critère consiste à orienter la variable vers une valeur de consigne au moyen d'une erreur absolue ou d'une erreur quadratique. Cette méthode permet de distinguer la consigne de la restriction de manière à obtenir une meilleure précision sur le contrôle de la variable. Dans ce cas-ci, le critère qui est une erreur doit converger vers zéro. L'intérêt de l'erreur quadratique par rapport à l'erreur absolue est que plus la différence entre la variable et la consigne est grande, plus le critère est pénalisé. Nous préférerons donc l'utilisation de l'erreur quadratique dans le reste de l'étude.

Supposons que z est une unique variable à contrôler et que le critère s'exprime par l'erreur quadratique selon la consigne Z_0 , alors la fonction de coût peut s'exprimer de cette manière :

$$\min J(z, t) = \int_{t_0}^{t_f} (z(t) - Z_0)^2 \cdot dt \quad \text{Pour la formulation de Lagrange.}$$

$$\min J(z, t_f) = (z(t_f) - Z_0)^2 \quad \text{Pour la formulation de Mayer.}$$

III.4.4.5. Méthodes d'optimisation étudiées

Boucle ouverte

L'optimisation en boucle ouverte consiste à effectuer les calculs sans boucle de rétroaction depuis la sortie du système. La commande ne s'adapte pas selon la sortie, ce qui implique une absence de correction sur les potentielles perturbations comme la présence d'un embouteillage non prévu au départ de l'itinéraire. Cependant, l'avantage de cette méthode est l'absence de charge calculatoire durant le trajet puisque l'intégralité des calculs est réalisée en amont.

Boucle fermée

L'optimisation en boucle fermée consiste à placer une boucle de rétroaction pour récupérer les variables d'état en sortie du système et les utiliser dans les calculs d'optimisation afin de permettre la réalisation de corrections et ainsi adapter la commande aux perturbations. L'avantage de cette méthode est donc sa capacité d'adaptation. Cependant, elle nécessite une charge calculatoire relativement importante pendant le fonctionnement du système.

Dans notre cas, nous étudierons la méthode MPC (Model Predictive Control), ou commande prédictive, qui consiste à utiliser un modèle dynamique du processus au sein d'un contrôleur en temps réel pour anticiper les futurs états du système.

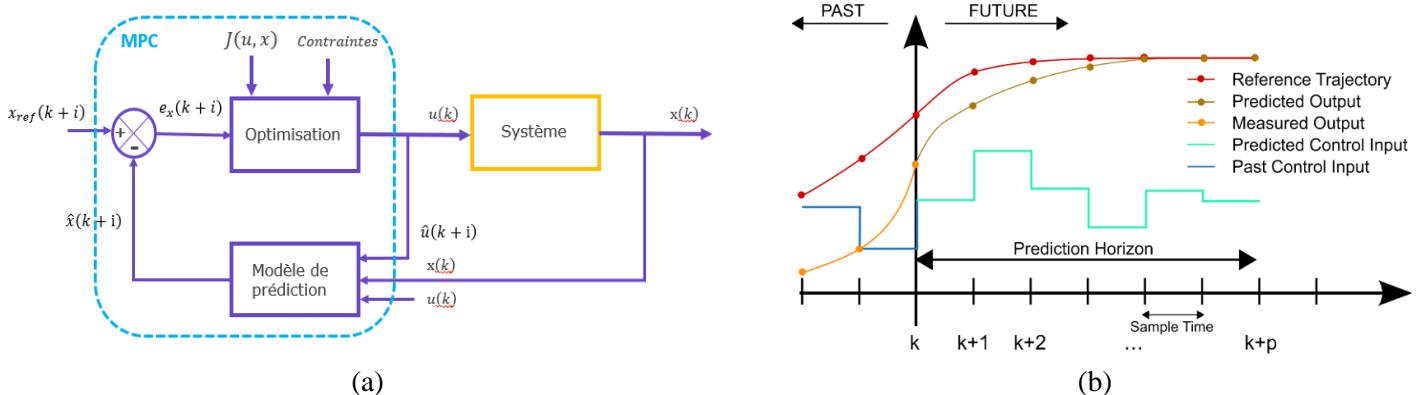


Figure 10 : Exemple de schéma bloc d'une commande prédictive (a) et principe de fonctionnement (b)

La commande prédictive réalise à chaque période d'échantillonnage du contrôleur les mêmes étapes (figure 10.b) :

1. Calcul des prédictions des variables contrôlées jusqu'à un horizon de temps grâce au modèle interne.
2. Élaboration d'une trajectoire de référence à suivre.
3. Calcul de la future loi de commande à appliquer sur les variables manipulées jusqu'à un horizon temporel.
4. Seul le premier élément de la loi de commande calculée est appliqué sur le système au coup d'horloge suivant. Toutes ces étapes se répéteront ensuite, c'est le principe de l'horizon fuyant.

III.4.4.6. Synthèse de la modélisation du problème

Dans cette section, nous avons présenté les éléments nécessaires à la conception de notre modèle d'optimisation et qui feront l'objet de cette étude. Le système étudié est un véhicule électrique dont la dynamique longitudinale est régie par les équations décrites dans la section III.4.4.1. Notons que les équations de forces sont valables pour tout autre type de véhicule. Le modèle d'optimisation que l'on cherche à développer répond à un problème de commande optimale. Nous avons vu dans la section III.4.4.2 que la variable de commande représente le couple du moteur, tandis que la distance, la vitesse et l'énergie représentent l'état du système et peuvent être soumises à des restrictions. On parle alors d'optimisation avec contraintes. Une variable d'état ou de commande peut caractériser un critère d'optimisation. Il est possible d'exprimer ces critères de différentes manières (cf. section III.4.4.4) selon leur rôle et selon la précision recherchée (existence d'une consigne, intensité de la pénalisation). Un critère peut être représenté par la variable à optimiser pour une orientation vers une restriction, ou par l'erreur absolue ou l'erreur quadratique pour une convergence vers zéro avec l'existence d'une consigne. Ces critères composent la fonction de coût qui exprime l'objectif global de l'optimisation. Nous avons pu voir dans la section III.4.4.3 qu'il existe plusieurs formulations de la fonction de coût. La figure 11 propose une hiérarchisation de la conception du modèle d'optimisation dynamique.

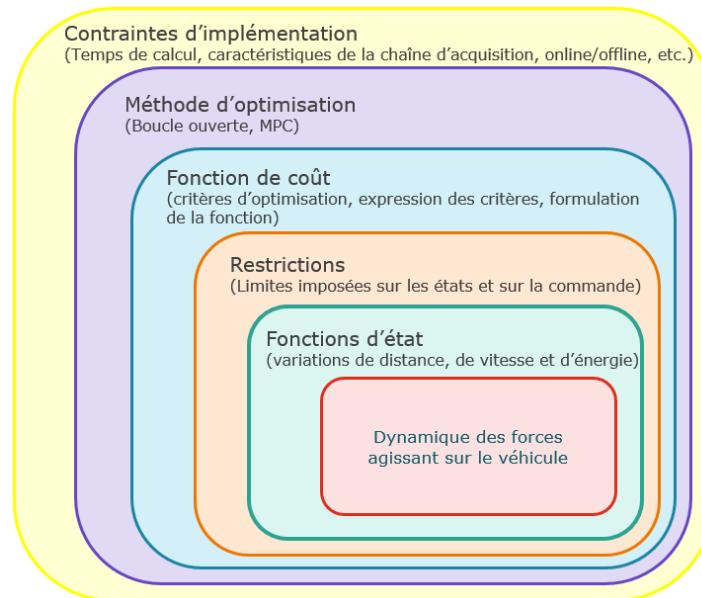


Figure 11 : Hiérarchisation de la conception du modèle d'optimisation dynamique

Cette étude se concentre sur l'analyse de différentes formulations de la fonction de coût et de différentes manières d'exprimer les critères d'optimisation. L'objectif étant de déterminer les formulations et expressions les mieux adaptées à notre problème et ainsi nous fournissant les meilleurs résultats d'optimisation. Le chapitre qui suit décrit la réalisation des essais.

III.4.5. Méthodologie de test proposée pour le choix de la fonction de coût

Cette section présente le cadre fixé pour la réalisation des essais. Sont spécifiés, la problématique, les conditions de test, ainsi que les indicateurs de performance qui nous guiderons dans les observations et orienterons nos conclusions.

III.4.5.1. Problématique

La fonction de coût est, à ce stade de l'étude, composée d'un critère primaire et d'un critère secondaire. La puissance consommée, qui représente le critère primaire, est présente dans chaque fonction de coût que nous testons et son expression reste inchangée. Concernant le critère secondaire, nous avons pu remarquer que selon son expression et selon la variable qui le caractérise, les résultats diffèrent. L'objectif est alors de déterminer le ou les critères secondaires qui permettront au véhicule d'obtenir les meilleurs résultats d'optimisation énergétique et de distance parcourue pour chacune des méthodes (boucle ouverte et MPC).

III.4.5.2. Conditions des tests

Les essais se baseront sur un segment de route d'une longueur de 1000 mètres à parcourir dans un temps imparti que nous ferons varier. Nous supposons que la signalisation impose une vitesse maximale de 22,5 m/s (81 km/h). La vitesse initiale est considérée nulle et la vitesse finale n'est soumise qu'à la contrainte de signalisation. La restriction supérieure de distance est donc déterminée selon la vitesse maximale et le temps donné pour parcourir le segment. Les contraintes sur le couple du moteur sont définies selon les limites physiques du véhicule considéré (Peugeot e-208), soit 260 Nm en valeur absolue.

III.4.5.3. Séries de mesures

Comme indiqué dans les hypothèses de départ, le temps assigné pour parcourir le segment de route est un paramètre que nous ferons varier à chaque nouvelle série de mesures. Nous nous limiterons à trois séries compte tenu des temps de calcul élevés qu'impose l'environnement ICLOCS2. Les huit fonctions de coût seront testées avec les deux méthodes présentées (boucle ouverte et boucle fermée).

En considérant une vitesse constante de 22,5 m/s (limite supérieure) et en faisant abstraction de la contrainte de vitesse initiale nulle (donc de la montée en vitesse), le temps minimal pour atteindre les 1000 mètres à parcourir est de 44,44 secondes. En prenant compte de la vitesse initiale nulle, cette valeur augmente et dépend de l'accélération maximale que peut fournir le couple du moteur pour la phase de montée en vitesse. Afin de permettre une maximisation de la vitesse vers sa limite supérieure (22,5 m/s) tout en donnant la possibilité d'inclure une phase de freinage régénératif sur le segment, nous définirons le temps maximal de la première série de tests à 60 secondes. Nous incrémenterons ce temps de 15 secondes à chaque nouvelle série de mesures pour observer l'influence de ce paramètre sur le comportement des variables d'état.

Le tableau 2 présente les paramètres fixes résultant des conditions établies pour les tests (cf. section III.4.5.2), ainsi que le temps maximal assigné selon la série de mesures.

Tableau 1 : Paramètres de simulation

Paramètre	Série 1	Série 2	Série 3	Unité
Temps segment	60	75	90	s
Vitesse min		0		m/s
Vitesse max		22,5		m/s
Distance min		0		m
Distance max		1000		m
Couple min		-260		N.m
Couple max		+260		N.m

III.4.5.4. Indicateurs de performance

Les grandeurs qui nous permettront d'analyser les performances de chaque fonction de coût sont la distance parcourue, l'énergie consommée et possiblement les temps de calcul. Cependant, les temps de calcul imposés par l'environnement ICLOCS2 pour les essais en boucle ouverte sont particulièrement élevés et donc non représentatifs de ce que nous pourrions obtenir avec un autre outil plus performant. Pour cette méthode, nous observerons donc seulement des tendances sur les temps de calcul. Les résultats de distance parcourue seront comparés avec l'objectif de distance défini dans les hypothèses de départ, soit 1000 mètres. L'indicateur de distance a une importance critique puisque l'arrivée du véhicule à destination est primordiale. Pour l'énergie consommée, les observations se feront de manière relative entre les essais pour déterminer la fonction de coût la plus apte à optimiser ce critère.

La figure 35, en annexe 4, schématise la construction des essais pour la détermination de la fonction de coût optimale pour chacune des méthodes étudiées (boucle ouverte et boucle fermée).

III.5. Bilan

Ce chapitre nous a permis, dans un premier temps, d'introduire la solution NAVeco en présentant son architecture, son principe de fonctionnement et ses possibilités d'intégration. Nous avons ensuite brièvement décrit l'état du projet à mon arrivée dans l'entreprise. Pour finir, l'analyse théorique nous a permis de présenter toutes les notions, ainsi que les solutions retenues, nécessaires à la réalisation des études et tests que nous effectuerons, dans un premier temps, pour l'intégration des spécificités de la motorisation électrique dans le modèle existant et pour l'évaluation de la stratégie de freinage régénératif pour la solution NAVeco. Puis, dans un second temps, pour le développement du modèle d'optimisation dynamique qui permettra de déterminer le profil de vitesse optimisant la consommation d'énergie. Les résultats des travaux sont présentés dans le chapitre suivant.

IV- RESULTATS

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la solution NAVeco qui fait l'objet de ce stage, les problématiques et missions qui structurent mon rôle dans ce projet, ainsi que les notions et les solutions retenues qui nous permettront de répondre aux problématiques formulées. L'analyse effectuée sur le bilan des puissances de la chaîne de traction et sur le rendement du moteur électrique nous aidera à intégrer, dans le modèle dynamique longitudinal du véhicule, un rendement variant selon le couple du moteur et selon sa vitesse de rotation. L'intégration du rendement permettra de considérer, dans le développement de la solution NAVeco, la régénération d'énergie rendue possible par les motorisations électriques. Une fois l'intégration du rendement effective, nous présenterons les résultats de l'étude réalisée sur l'intérêt de la stratégie de freinage régénératif pour NAVeco. A ce stade, le modèle dynamique longitudinal sera applicable aux véhicules électriques avec une observation des flux d'énergie à la source. Nous présenterons alors les résultats des essais menés pour déterminer une fonction de coût optimale selon les critères d'énergie consommée, de respect de l'objectif de distance et de temps de calcul, pour chacune des deux méthodes d'optimisation présentées dans la section III.4.4. Pour rappel, la méthodologie de test a été présentée dans la section III.4.5. Pour finir, nous proposerons un modèle d'optimisation dynamique à méthode hybride dont l'intérêt aura été perçu avec l'observation des profils de vitesse longitudinale et de distance parcourue obtenues lors des essais. Enfin, les perspectives de développement, qui s'inscrivent dans la continuité de mon travail, conclurons ce chapitre.

IV.1. Intégration au modèle d'un rendement variable

Dans la section III.4.2, nous avons effectué une estimation de l'évolution des rendements du moteur en mode motorisation et en mode régénération selon le couple et la vitesse de rotation. La figure 12 présente le modèle utilisé pour les simulations. A l'entrée du schéma bloc, les variables de vitesse, d'accélération et de pente établissent, avec les paramètres associés, la somme des forces qui nous permet d'obtenir la force de traction suivant l'équation XX. En sortie du sommateur, le produit de la force de traction et de la vitesse longitudinale mène à la puissance de traction. L'observation des puissances au niveau de la batterie se fait à l'aide des blocs de rendement. Si la puissance de traction est positive, le rendement de la chaîne de traction en fonctionnement moteur est appliqué ; Si cette première est négative, le rendement en mode régénération est utilisé. En sortie des rendement, l'intégrale de la puissance permet d'observer l'énergie consommée. En fin de compte, une variation positive de l'énergie correspond à une phase de consommation, tandis qu'une variation négative se traduit par une phase d'absorption par la batterie. Notons que dans ce modèle, l'équation d'énergie a été simplifiée pour réduire la charge calculatoire. Cette simplification a été développée et justifiée dans une précédente phase du projet [6].

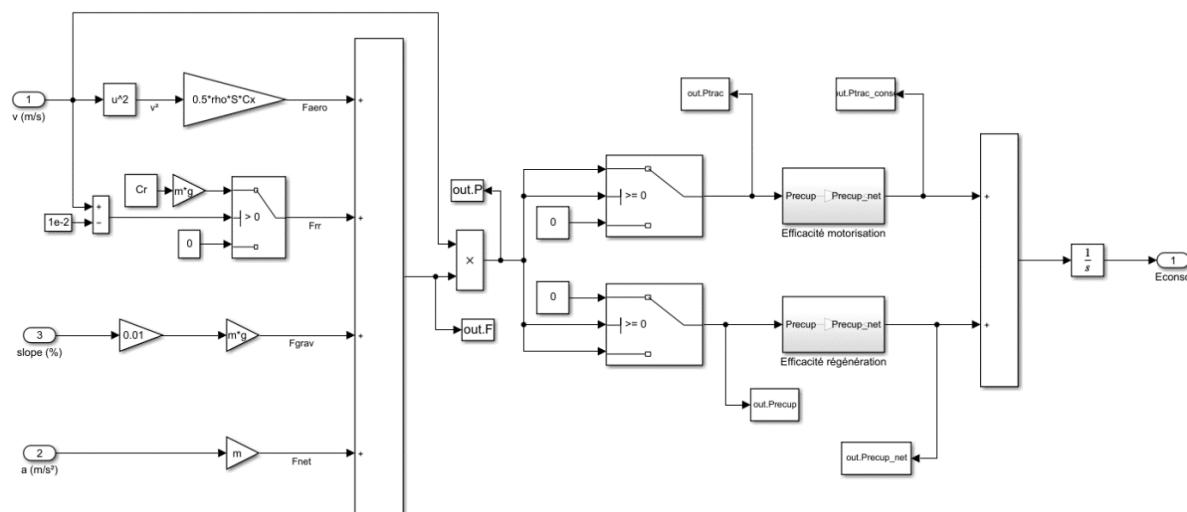


Figure 12 : Modèle énergétique de la roue à la batterie sur Simulink

La figure 13 montre le bloc du rendement moteur que nous utilisons dans le modèle énergétique.

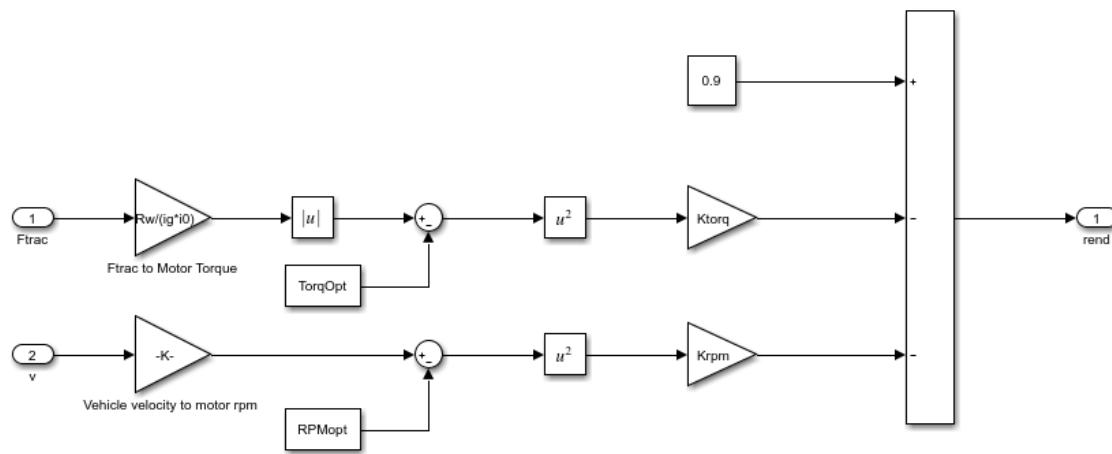


Figure 13 : Modèle Simulink du rendement moteur

Le même modèle de rendement sera utilisé pour le mode motorisation et le mode régénération. Nous ajouterons cependant, pour le mode régénération, un facteur d'atténuation à la sortie du modèle de la figure 13 pour représenter les limites imposées par la batterie (voir section III.4.3), ainsi que les pertes engendrées par le freinage à friction mécanique dans le cas où le moteur ne peut pas fournir un couple de freinage suffisant (voir annexe 2). Ce coefficient a été déterminé à 0,5 de manière que nos résultats de régénération kilométriques calculés sur le cycle WLTP (Tableau 9 de l'annexe 5) concordent avec ceux présentés dans l'étude de Ahmet Onur Kiyakli et Hamit Solmaz (Automotive Engineering Department, Faculty of Technology, Gazi University) [7].

Sur la figure 13, nous pouvons constater que les variables d'entrée, propres à la dynamique du véhicule, qui ont influence sur la valeur du rendement sont la force de traction et la vitesse longitudinale. A partir de cela, nous pouvons déduire que le type de conduite, lié au profil de vitesse, et la pente, qui implique plus ou moins de force de traction, font partie des paramètres externes pouvant avoir une influence sur l'efficacité de régénération (rapport d'énergie régénérée sur énergie consommée).

Vérification de l'estimation

Pour vérifier la bonne intégration de l'estimation de la variation du rendement dans notre programme de calcul, nous pouvons comparer l'évolution de l'énergie et du rendement par rapport à l'évolution de la vitesse du véhicule et du couple appliqué sur l'arbre du moteur. Nous utiliserons les 100 premières secondes du profil normalisé WLTP pour les observations (figure 14). Le choix du profil est justifié dans l'annexe 5.

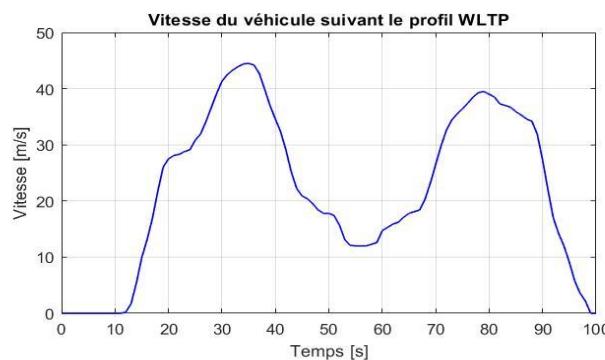


Figure 14 : Profil de vitesse WLTP sur 100 secondes

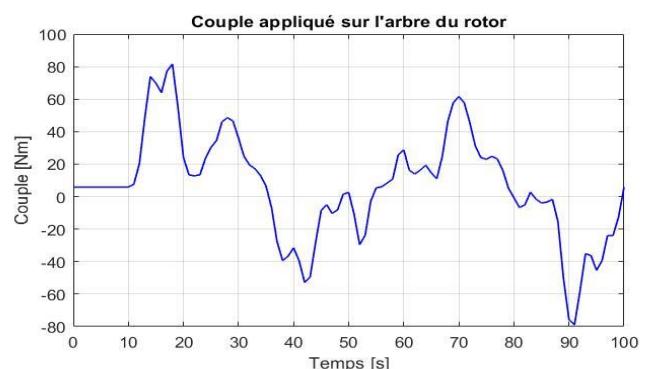


Figure 15 : Observation du couple sur 100 secondes

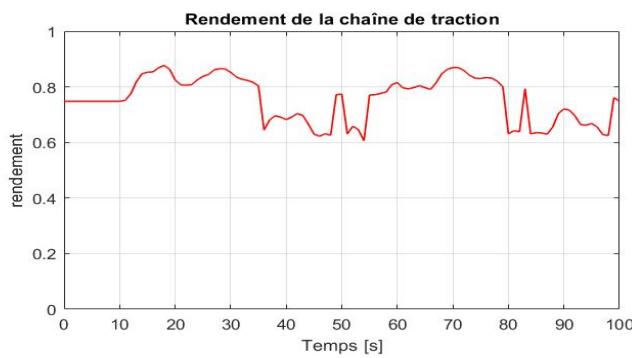


Figure 16 : Rendement variable sur 100 secondes

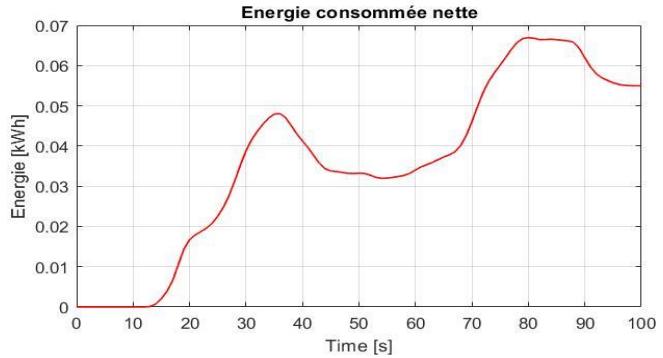


Figure 17 : Observation de l'énergie sur 100 secondes

La figure 14 affiche le couple appliqué sur l'arbre du moteur, la figure 16 présente la consommation nette de l'énergie et la figure 17 montre l'évolution du rendement. Nous pouvons constater que l'énergie consommée nette diminue lorsque le couple moteur devient négatif (figures 15 et 16). Cette phase correspond au freinage régénératif, que l'on peut observer entre 35 et 55 secondes et entre 85 et 100 secondes. Nous remarquons que dans les phases de régénération, le rendement (figure 17) se situe entre 60% et 75%, ce qui correspond bien à sa plage de variation (voir figure 9). Pour les phases de motorisation, il varie entre 78% et 90%. Les observations concordent bien avec l'estimation des rendements sur les figures 7, 8 et 9. La variation du rendement est donc correctement intégrée dans notre modèle. La justification de l'utilisation d'une approximation variable du rendement de la chaîne de traction plutôt qu'une approximation constante est effectuée en annexe 6.

IV.2. Intérêt de la stratégie de freinage régénératif pour la solution NAVeco

La régénération d'énergie permise par les véhicules électriques lors du freinage est une stratégie envisageable pour le processus d'optimisation de NAVeco. Il est donc nécessaire d'évaluer son intérêt pour notre cas d'étude. La solution fournit les consignes de vitesse au système de navigation, pour les véhicules autonomes, ou au régulateur de vitesse intelligent pour les véhicules non autonomes munis de ce type de système. NAVeco est donc plutôt destinée à des environnements à hautes vitesses, telles que les autoroutes, puisque le contrôle autonome de la vitesse devient plus complexe dans les environnements à trafic élevé comme les zones urbaines.

IV.2.1. Influence du type de conduite

Le tableau 9 de l'annexe 5 indique des valeurs de consommation et de régénération kilométriques sur un cycle de conduite complet. Cependant, cela ne nous donne aucune information sur l'intérêt du freinage régénératif par rapport au type de route. Le cycle WLTP est constitué de quatre phases différentes caractérisées par un spectre de vitesse : basse, moyenne, haute, très haute vitesse. Ces phases correspondent respectivement à un cycle de conduite urbaine, extra-urbaine, sur voie rapide (type route nationale), et sur autoroute. Pour étudier l'intérêt de la régénération selon le type de conduite, le cycle WLTP a été découpé selon ses quatre phases. La figure 18 présente les profils de vitesse de chaque phase du cycle.

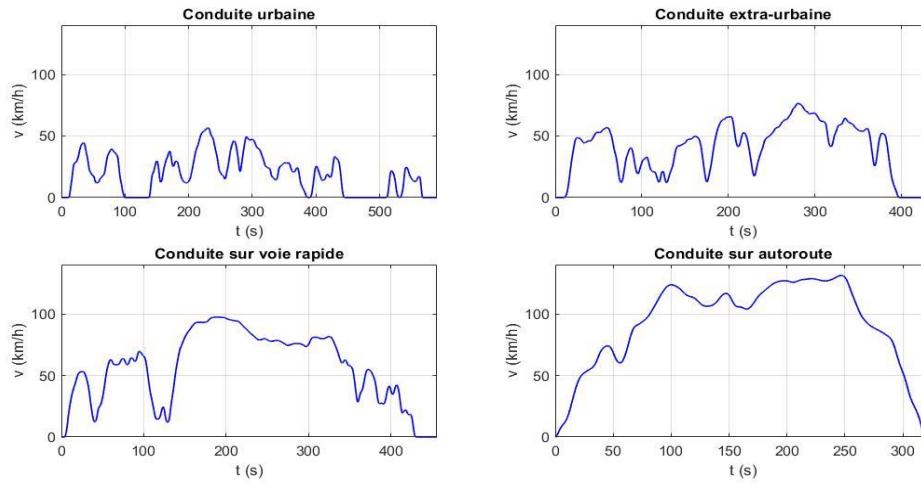


Figure 18: Phases de conduite qui composent le cycle WLTP

Le tableau 5 présente les résultats obtenus selon le type de conduite. Nous pouvons observer que plus la vitesse moyenne est élevée, plus les valeurs de consommation et de régénérations kilométriques sont faibles. Ainsi nous obtiendrions une plus grande quantité d'énergie régénérée en milieu urbain que sur autoroute. Cependant, la consommation serait plus élevée. Ce qui nous amène au rapport d'énergie régénérée sur l'énergie consommée. Les résultats de calculs indiquent une efficacité de régénération bien plus conséquente en milieu urbain que sur autoroute. Plus la vitesse moyenne est élevée, plus l'efficacité de la régénération est importante.

Tableau 2 : Comparaison des résultats pour les différents types de route

	URBAIN	EXTRA-URBAIN	VOIE RAPIDE	AUTOROUTE
Temps [s]	590	434	456	324
Distance [km]	3,09	4,76	7,16	8,25
Vmax [km/h]	56,46	76,49	97,40	131,25
Vmoy [km/h]	18,83	39,41	56,26	91,51
Conso. kilom [Wh/km]	132,28	145,63	144,24	208,35
Régén. kilom. [Wh/km]	25,72	25,54	13,87	7,46
Rapport Régé/Conso γ	0,194	0,175	0,096	0,036

IV.2.2. Influence de la pente

Après avoir analysé numériquement l'efficacité de la régénération selon le type de route, nous pouvons étudier l'influence de la pente sur ce paramètre. La figure 19 montre que la consommation kilométrique croît avec la pente, tandis que l'énergie régénérée décroît. Nous pouvons également constater que plus la vitesse moyenne est élevée (en se référant au type de conduite), plus la régénération sera faible, ce qui correspond aux résultats du tableau XX.

L'influence de la pente peut se déduire par le fait qu'une pente positive nécessitera bien plus d'énergie de traction que de freinage. En effet, un ralentissement sur une pente positive se fera en grande partie à l'aide de la force gravitationnelle. A contrario, une pente négative nécessitera bien plus de freinage que de traction pour maintenir la vitesse du véhicule à la valeur de consigne. La force gravitationnelle joue, dans ce cas, un rôle de force motrice.

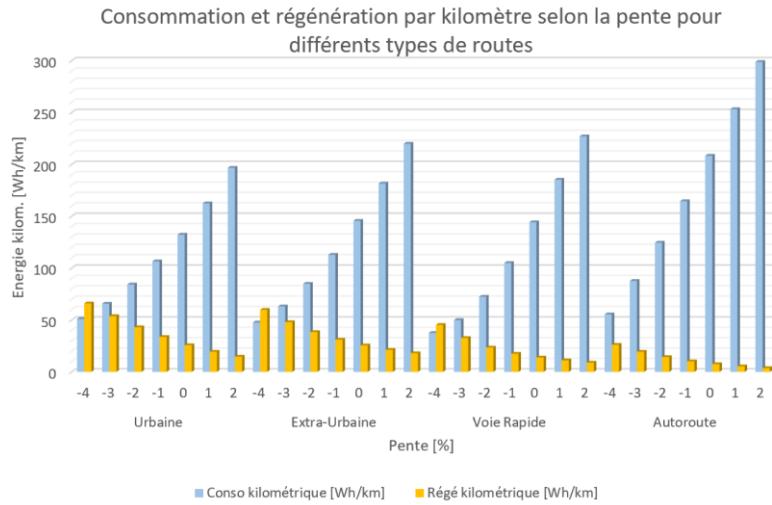


Figure 19 : Consommation et régénération kilométrique selon la pente

La figure 20 montre le rapport de régénération γ selon la pente pour chaque type de route étudié.

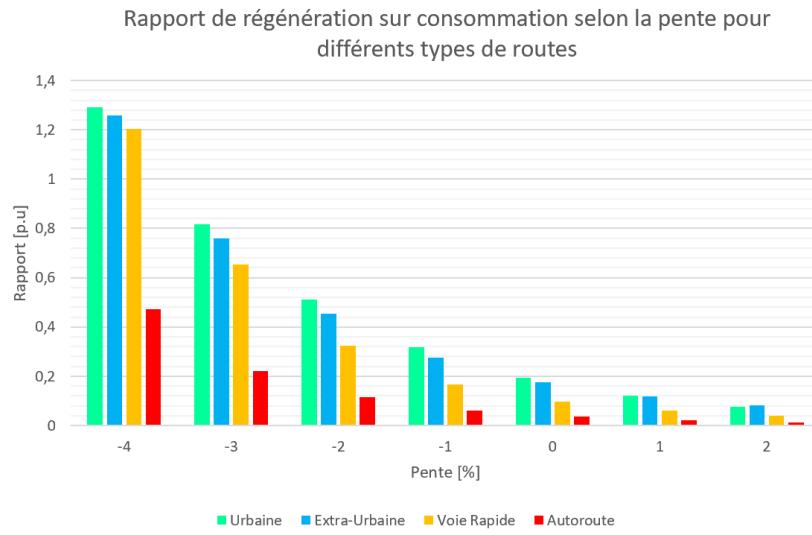


Figure 20 : Efficacité de régénération selon la pente

Nous pouvons constater que plus la pente est élevée, plus l'efficacité de régénération est faible. Ce qui s'explique par le fait que l'énergie de freinage est de moins en moins nécessaire. Avec les paramètres utilisés pour la simulation, nous pouvons constater qu'une pente de -4% permet une efficacité de régénération supérieure à 100% pour des conduites urbaine, extra-urbaine, et sur voie rapide. Le graphique montre bien que l'autoroute est le milieu le moins avantageux pour la régénération. D'autant plus que l'autoroute présente, de manière générale, de faibles pentes. Nous pouvons donc conclure que la stratégie d'utilisation du freinage régénératif ne permettra pas une récupération importante avec NAVeco puisque la solution sera principalement dédiée aux milieux à hautes vitesses, comme expliqué dans l'introduction de la section IV.2. Toutefois, pour assurer un aspect représentatif des véhicules électriques dans le modèle dynamique, la fonctionnalité de régénération sera conservée. Cette conclusion ouvre une perspective d'étude sur l'intérêt de la stratégie de roue libre en comparaison à la régénération, ainsi que sur l'intérêt d'une stratégie mixte avec l'utilisation de la roue libre et du freinage régénératif.

IV.3. Paramétrage efficient du modèle d'optimisation dynamique

Le modèle dynamique du véhicule étant adapté au fonctionnement des motorisations électriques, nous pouvons maintenant travailler sur le paramétrage du modèle d'optimisation dynamique. Dans un premier temps, nous présenterons les résultats des essais menés pour le choix de la fonction de coût selon la méthodologie établie dans la section III.4.5. A partir de ces tests, nous verrons que l'ajout d'une restriction de vitesse minimale non nulle dans le modèle, initialement définie à zéro, aidera à déterminer la fonction de coût optimale pour la méthode en boucle ouverte. Nous constaterons ensuite une limite à l'utilisation de la méthode de commande prédictive (ou MPC) pour notre problème.

IV.3.1. Etude des fonctions de coût

Rappelons que les variables représentant l'état du système sont la distance parcourue (x_1), la vitesse du véhicule (x_2) et l'énergie consommée (x_3). Quant à la variable de commande, elle correspond au couple mécanique du moteur (u_1). Pour les tests en boucle ouverte, nous avons fait le choix de ne pas définir l'énergie comme variable d'état dans notre modèle en raison d'une instabilité trop importante dans les résultats fournis par le programme. Nous supposons que cette limite est imposée par les performances de l'environnement ICLOCS2 et du matériel utilisé. Cependant, l'énergie consommée reste un critère essentiel dans l'expression du coût. Nous favoriserons donc l'utilisation de la puissance consommée sous la formulation de Lagrange qui se caractérise par l'intégrale du critère.

L'emploi de la puissance se fait par le produit du rendement global, de la force de traction et de la vitesse. Ainsi il n'est plus nécessaire de passer par une fonction d'état supplémentaire (qui est supposément la cause du problème d'instabilité évoqué). Cette manipulation nous permet d'inclure indirectement l'énergie consommée dans la fonction de coût pour les essais en boucle ouverte puisque l'intégrale d'une puissance sur un intervalle de temps renvoie l'énergie associée. Toutefois, cela ne nous permet pas d'introduire l'énergie via la formulation de Mayer (optimisation sur l'état terminal).

En ce qui concerne les tests effectués avec la méthode MPC, nous avons définis l'énergie comme variable d'état dans le modèle dynamique.

Nous considérons que l'énergie consommée est le critère primaire. Ce critère sera donc présent dans chacun des essais. Le critère secondaire est l'objet de l'étude et peut être caractérisé par la distance parcourue ou la vitesse. Les essais se baseront sur les expressions présentées dans l'analyse théorique (voir section III.4.4). En définitif, avec un critère primaire, qui est l'énergie consommée, et un critère secondaire, représenté par la distance ou la vitesse, nos essais se limiteront aux formulations de Lagrange et de Bolza, étant donné que la puissance consommée, pour les essais en boucle ouverte, s'exprimera nécessairement dans une intégrale.

Le tableau 1 présente les huit fonctions de coût que nous testons. Avec x_1 la distance parcourue, x_2 la vitesse du véhicule et x_3 l'énergie consommée. x_i^* représente la consigne de la variable associée.

Tableau 3 : Formulations et critères d'optimisation testés

FORMULATION	$G(x_f, u_f, t_f)$	$F(x, u, t)$
BOLZA $\min J(x, u, t) = G(x_f, u_f, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} F(x, u, t) . dt$	$-x_1(t_f)$	$x_3(t)$
	$-x_2(t_f)$	$x_3(t)$
	$(x_1(t_f) - x_1^*)^2$	$x_3(t)$
	$(x_2(t_f) - x_2^*)^2$	$x_3(t)$
LAGRANGE $\min J(x, u, t) = \int_{t_0}^{t_f} F(x, u, t) . dt$	NA	$-x_1(t) + x_3(t)$
	NA	$-x_2(t) + x_3(t)$
	NA	$(x_1(t) - x_1^*)^2 + x_3(t)$
	NA	$(x_2(t) - x_2^*)^2 + x_3(t)$

IV.3.1.1. Analyse des indicateurs de performance

Les indicateurs de performance nous permettent de visualiser l'intérêt de chaque fonction de coût pour notre problème. Rappelons que l'objectif de distance est de 1000 mètres et que l'énergie consommée est analysée de manière comparative. Les observations et interprétations des comportements obtenus selon les formulations, les critères et les méthodes sont présentées en annexe 7.

Distance et énergie

La figure 21 présente les indicateurs de performance mesurés pour chaque fonction de coût étudiée (cf. Tableau 1), selon la formulation et selon la méthode. Pour éviter de tirer des conclusions sur un potentiel cas particulier, nous avons réalisé les essais pour trois valeurs de temps maximal (60s, 75s et 90s).

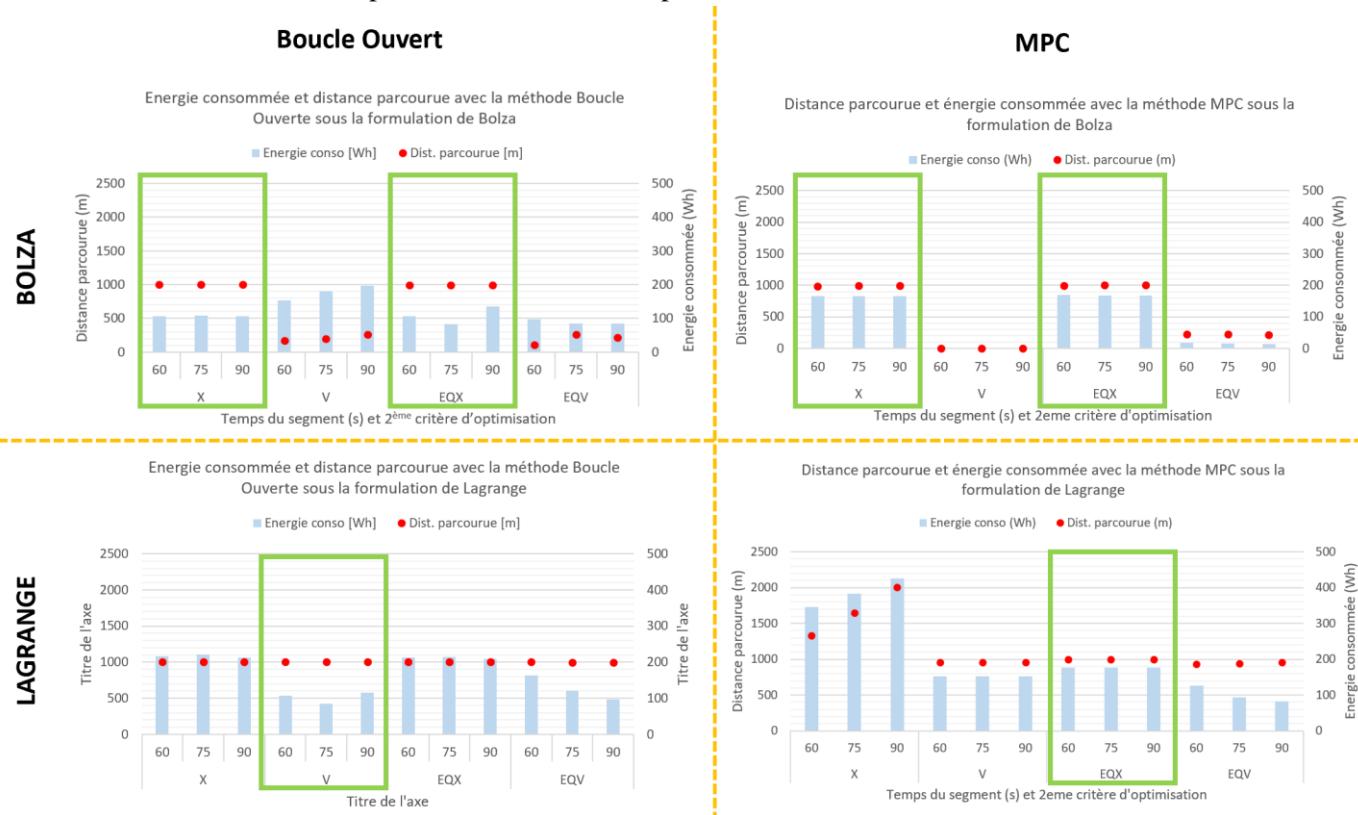


Figure 21 : Graphiques des résultats de distance parcourue et d'énergie consommée selon la méthode d'optimisation et selon la formulation de la fonction de coût

Le critère de distance nous permet d'effectuer un premier filtrage. Les expressions ne permettant pas de respecter une distance parcourue de 1000 mètres sont écartées. En observant les graphiques de la figure 21, nous pouvons écarter la maximisation de la vitesse et la minimisation de l'erreur quadratique de vitesse pour la boucle ouverte. Du côté de la méthode MPC, nous pouvons écarter tous les critères de vitesse. Les mesures sont présentées dans les tableaux 10 et 11 en annexe 8.

L'énergie consommée nous permet de comparer les performances d'optimisation des fonctions de coût retenues après le filtrage effectué avec l'indicateur de distance. Au regard des graphiques, trois critères se démarquent du côté de la boucle ouverte : La maximisation de la distance sous Bolza ; La minimisation de l'erreur quadratique de distance sous Bolza ; La maximisation de la vitesse sous Lagrange (voir les cadres verts sur la figure 21). Ces trois critères nous fournissent des résultats d'énergie du même ordre de grandeur. Nous tenterons de les départager avec de nouveaux tests dans les prochaines sections. Pour la méthode MPC, les critères retenus sont la minimisation de l'erreur quadratique de distance et la maximisation de la distance vers sa restriction haute, chacun sous la formulation de Bolza (voir les cadres verts sur la figure 21). Les temps de calculs mesurés nous aideront à départager ces deux critères.

Temps de calcul

La solution étant destinée à être embarquée au sein d'un véhicule, la prise en compte des temps de calcul dans notre étude est primordiale. Pour les essais effectués en boucle ouverte, les temps de calculs mesurés en l'état actuel du modèle sont bien trop élevés pour permettre une analyse réaliste. Les valeurs n'étant pas représentatif de ce que nous obtiendrions avec la solution finale, nous nous contenterons d'une observation des tendances. Notons que ces valeurs élevées sont causées par la faible performance de l'environnement « open source » ICLOCS2. Toutefois, nous verrons dans la section IV.3.2 qu'il est possible d'optimiser considérablement ces temps de calculs avec l'ajout de restrictions dans le modèle. Pour les tests réalisés avec la méthode MPC, les temps de calcul sont cohérents avec ce que nous pourrions obtenir une fois la solution implémentée. Ces valeurs nous permettront donc de départager les deux critères sélectionnés pour le MPC.

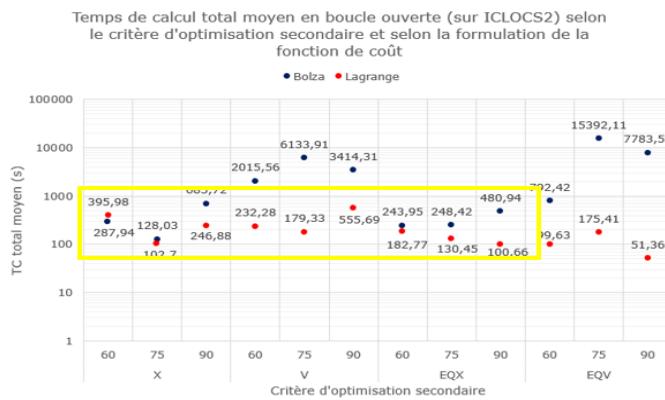


Figure 22 : Temps de calcul en boucle ouverte

En boucle ouverte, nous observons sur la figure 22 le temps de calcul total effectué en amont de l'itinéraire. Nous pouvons constater que les trois critères sélectionnés en boucle ouverte (cf. figure 21) fournissent des temps de calcul du même ordre de grandeur. Nous pouvons aussi constater que la formulation de Bolza implique des temps de calcul plus élevés que la formulation de Lagrange. En effet, la formulation de Bolza qui optimise les états finaux, effectue les calculs pour l'entièreté du segment de route à chaque itération. Tandis que la formulation de Lagrange effectue les calculs du temps initial à l'instant de temps présent simulé pour le même nombre d'itérations paramétré. Ce qui explique des temps de calcul plus faible pour la formulation de Lagrange.

La méthode MPC effectue les calculs d'optimisation en temps réel. Ce qui signifie qu'à chaque période d'échantillonnage les calculs se répètent (voir section III.4.4). Pour cette méthode nous analyserons donc les temps de calculs pour une itération (soit pour les calculs effectués sur une période d'échantillonnage). La période d'échantillonnage paramétrée est de 2 secondes (trait jaune sur la figure 23) et l'horizon de prédiction vaut 6 fois la période d'échantillonnage, soit 12 secondes. Donc un temps de calcul supérieur à 2 secondes n'est pas admissible puisqu'il serait supérieur à la période d'échantillonnage.

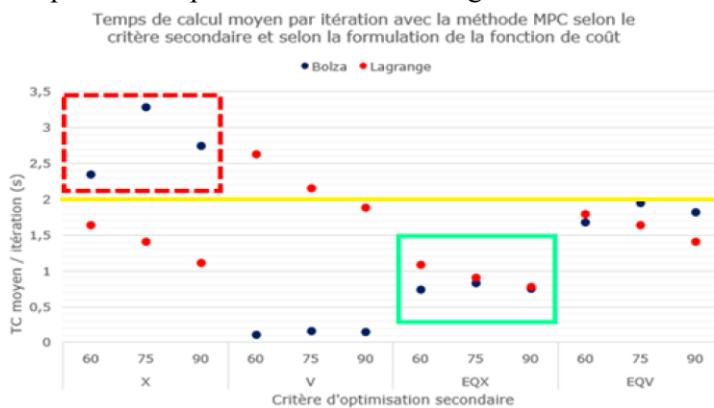


Figure 23 : Temps de calcul par itération avec la méthode MPC

Sur la figure 23, les cadres rouge et vert distinguent les critères retenus avec l'analyse des résultats d'énergie et de distance parcourue. Soit, respectivement, la maximisation de la distance sous Bolza et la minimisation de l'erreur quadratique de distance sous Bolza. Nous pouvons observer des temps de calculs bien trop longs pour ce premier. Pour l'erreur quadratique, les temps sont inférieurs à une seconde, ce qui est satisfaisant pour notre application. Nous retiendrons donc ce critère comme étant le plus optimal.

Bilan préliminaire

En résumé, à l'aide des indicateurs de distance parcourue selon l'objectif, d'énergie consommée et de temps de calcul (pour la méthode MPC), nous avons sélectionnées trois critères pour la méthode en boucle ouverte et un critère pour la méthode MPC (voir tableau 5). Nous départagerons les trois critères de la boucle ouverte dans la section suivante.

Tableau 4 : Critères sélectionnés à l'issue de la première phase de tests

2 ^{ème} CRITERE	FORMULATION	METHODE
$\max v(t)$	Lagrange	Boucle ouverte
$\max d(t)$	Bolza	Boucle ouverte
$\min (d(t) - D_{ref})^2$	Bolza	Boucle ouverte
$\min (d(t) - D_{ref})^2$	Bolza	MPC

En observant les profils de vitesse (voir annexe 9) que fournissent les trois critères sélectionnés en boucle ouverte avec des temps de parcours du segment relativement longs, nous constatons des arrêts ponctuels du véhicule. Ces phases de vitesse nulle ou très basse peuvent s'avérer dangereuses pour les utilisateurs. Ces observations motivent donc l'intégration d'une restriction de vitesse minimale dans le modèle d'optimisation. Notons qu'il pourrait être aussi envisagé d'étudier l'intégration d'une restriction sur la variation de vitesse ou encore d'étudier d'autres algorithme d'exploration de la solution optimale pour résoudre ce problème.

IV.3.2. Etude de la restriction de vitesse minimale

Les profils de vitesses fournis par les critères sélectionnés en boucle ouverte présentent des passages dont la vitesse est trop faible pour assurer la sécurité des utilisateurs. Nous proposons donc d'ajouter au modèle une restriction de vitesse minimale. Dans cette section, nous présenterons des essais effectués avec la restriction de vitesse minimale sur les trois critères sélectionnés en boucle ouverte.

IV.3.2.1. Analyse des indicateurs pour différents cas

La figure 24 présente les valeurs d'énergie consommée et de distance parcourue pour trois cas différents. Le premier cas correspond aux hypothèses initiales de l'étude, soit une restriction de vitesse minimale nulle et une vitesse initiale nulle. Le second cas présente une restriction de vitesse minimale nulle et une vitesse initiale de 70 km/h (19,44 m/s). Le troisième cas consiste en une restriction de vitesse minimale de 60 km/h, ou 16,67 m/s (20 km/h en dessous de la vitesse maximale), avec une vitesse initiale de 70 km/h.

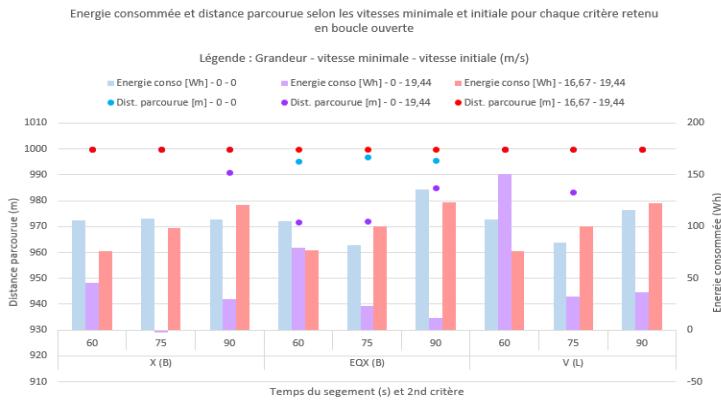


Figure 24 : Distance parcourue et énergie consommée en boucle ouverte selon la restriction de vitesse minimale et selon la vitesse initiale

Nous pouvons observer, sur le graphique de la figure 24, que l'énergie consommée est généralement plus faible dans le second cas (histogrammes violettes). Ceci est dû au fait que le véhicule se laisse ralentir pour atteindre l'objectif de distance. Cependant, nous pouvons constater que la précision sur ce dernier n'est pas assurée dans tous les cas. Comme nous pouvons l'observer, la restriction de vitesse minimale permet d'assurer le respect de l'objectif de distance dans chaque cas (points rouges sur la figure 24).

Pour, l'énergie consommée dans le troisième cas (histogrammes rouges), les valeurs sont équivalentes pour les 3 critères et pour chacun des temps de segment. Ce comportement est causé par un temps de parcours trop élevé pour permettre une différence entre les critères. En effet, si le temps assigné au segment est suffisamment long, alors la solution optimale est une stabilisation de la vitesse à sa valeur minimale et ceci indépendamment du critère utilisé. Donc pour permettre une évolution différente, nous réaliserons de nouveaux essais avec des temps de parcours plus courts afin de presser le véhicule pour départager les trois critères restant en boucle ouverte.

Le graphique de la figure 25 présente les temps de calcul totaux en boucle ouverte pour chaque critère et selon le temps du parcours. Les résultats représentent les trois cas présentés précédemment. Nous pouvons constater que l'utilisation d'une vitesse initiale positive non nulle réduit les temps de calcul, notamment par le fait que l'optimisation est simplifiée puisqu'il suffit au véhicule de ralentir. L'ajout de la restriction de vitesse minimale (marques rouges sur le graphique de la figure 25) diminue aussi les temps de calcul.

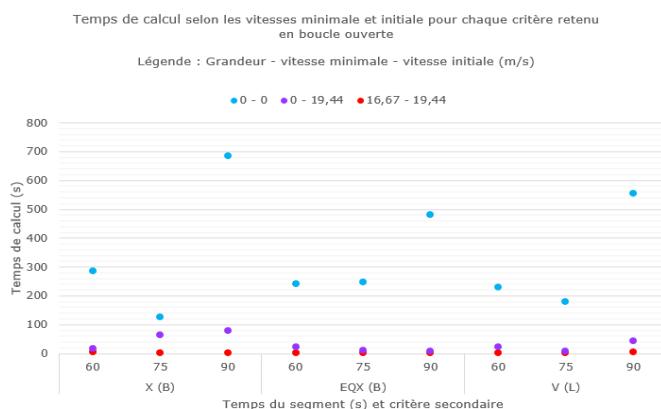


Figure 25 : Temps de calcul en boucle ouverte selon la restriction de vitesse minimale et selon la vitesse initiale

L'intégration d'une restriction de vitesse minimale accompagnée d'une vitesse initiale comprise dans la plage de vitesses admissibles nous a permis de minimiser considérablement les temps de calcul. Ceci s'explique par le fait que l'ajout de restrictions implique une réduction des possibilités d'optimisation et donc une réduction du temps passé lors de l'exploration des solutions. Nous avons maintenant des temps de calcul exploitables pour les industriels et utilisateurs avec la méthode en boucle ouverte.

IV.3.2.2. Comparaison des critères pour des temps de segment faibles

Comme expliqué précédemment, pour départager les trois critères sélectionnés en boucle ouverte, nous effectuons les mêmes essais avec des temps de parcours plus faible afin d'empêcher une stabilisation à la vitesse minimale et ainsi observer des différences de comportement selon les critères. La figure 26.a présente les résultats d'énergie, de distance (graphique du haut) et de temps de calcul (graphique du bas). Nous pouvons constater que le seul critère permettant d'assurer la précision de distance dans chacun des cas (50 sec, 55 sec et 60 sec assigné au segment) est la maximisation de vitesse. Atteindre l'objectif étant primordial, nous retiendrons ce critère pour la méthode en boucle ouverte. De plus, les temps de calcul sont satisfaisants et soutiennent donc son intérêt.

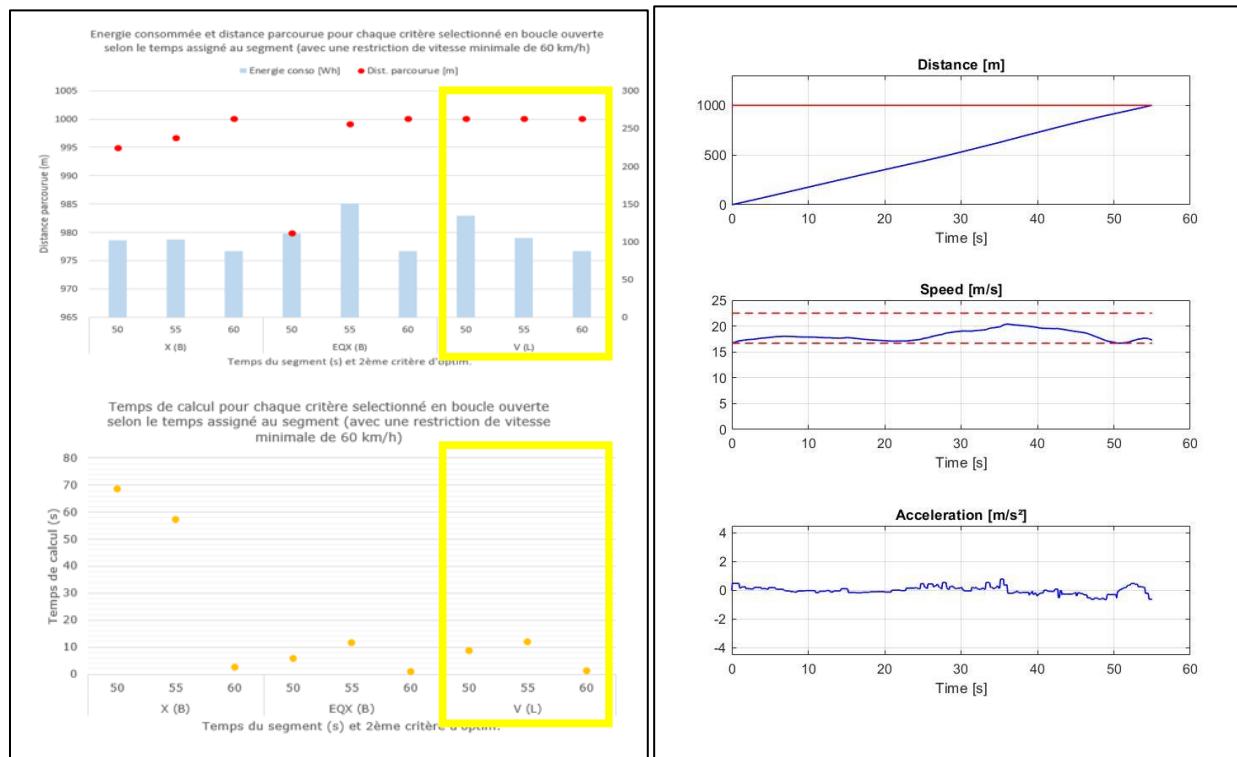


Figure 26 : Résultats de distance, d'énergie et de temps de calcul (a) et comportement du véhicule (b)

En observant le profil de vitesse, sur la figure 26.b, généré par le critère sélectionné (maximisation de vitesse), nous pouvons constater que la vitesse n'est pas simplement maximisée. En effet, la fonction de coût est toujours composée du critère de minimisation de l'énergie. Une balance est donc effectuée par le modèle entre ces deux critères pour obtenir ce profil.

La restriction de vitesse minimale nous a permis de minimiser les temps de calcul de la méthode en boucle ouverte puisque l'ajout de contraintes réduit les possibilités d'optimisation. Cette restriction nous a également permis de départager les trois fonctions de coût sélectionnées en boucle ouverte dans la première partie des tests. Le critère sélectionnée pour la boucle ouverte est donc la maximisation de la vitesse.

IV.3.3.Récapitulation des résultats

Les essais réalisés sur les différentes fonctions de coût nous ont permis de sélectionner la plus optimale pour chacune des méthodes. Le tableau en annexe 10 présente la satisfaction des indicateurs selon chaque fonction de coût. Les formulations notées « B » signifient « Bolza » et celles notées « L » correspondent à « Lagrange ». Les cadres distinguent les fonctions sélectionnées à l'issue de la première phase de tests (avant l'intégration au modèle de la restriction de vitesse minimale). Ceux de couleur jaune relèvent les fonctions adoptées au terme des essais (avec restriction de vitesse minimale).

En fin de compte, les fonctions de coût qui s'accordent le mieux à notre problème d'optimisation sont :

Équation 13 : Fonctions de coût retenues

$$\diamond \min J(x, u, t) = \int_{t_0}^{t_f} [x_3(t) - x_2(t)] . dt \quad \text{En Boucle Ouverte}$$

$$\diamond \min J(x, u, t, x_f, u_f, t_f) = (x_1(t_f) - x_{1Ref})^2 + \int_{t_0}^{t_f} x_3(t) . dt \quad \text{Avec le MPC}$$

Avec les restrictions suivantes :

$$\begin{array}{ll} 0 \leq x_1 \leq 1000 & [\text{m}] \\ 16,67 \leq x_2 \leq 22,5 & [\text{m/s}] \\ -260 \leq u_1 \leq +260 & [\text{Nm}] \end{array}$$

Avec x_1 la distance parcourue, x_2 la vitesse longitudinale du véhicule, x_3 l'énergie, u_1 le couple moteur.

IV.3.4. Limite à l'utilisation de la méthode MPC pour notre problème

Dans la section III.4.4, il est expliqué que, contrairement à la méthode en boucle ouverte, le MPC n'optimise pas sur l'instant final du segment mais sur l'instant final de l'horizon de prédiction (Pour la formulation de Bolza). Les constantes de temps du modèle MPC étant trop faible par rapport à l'évolution des grandeurs d'énergie et de distance, cette méthode n'est pas adéquate à notre problème qui nécessite une meilleure anticipation.

Comme le montre la figure 27 : Dans le cas (a), la restriction de distance est intégrée au modèle (contrainte « hard ») impliquant que, par un manque d'anticipation, la vitesse minimale n'est pas respectée sur la fin du segment ; Dans le cas (b), la restriction de distance n'est pas intégrée au modèle mais est présente au travers de l'erreur quadratique de distance dans la fonction de coût (contrainte « soft »). Dans ce cas-ci, la vitesse minimale est respectée mais pas la distance. Les restrictions de vitesse minimale et de distance maximale sont donc en opposition.

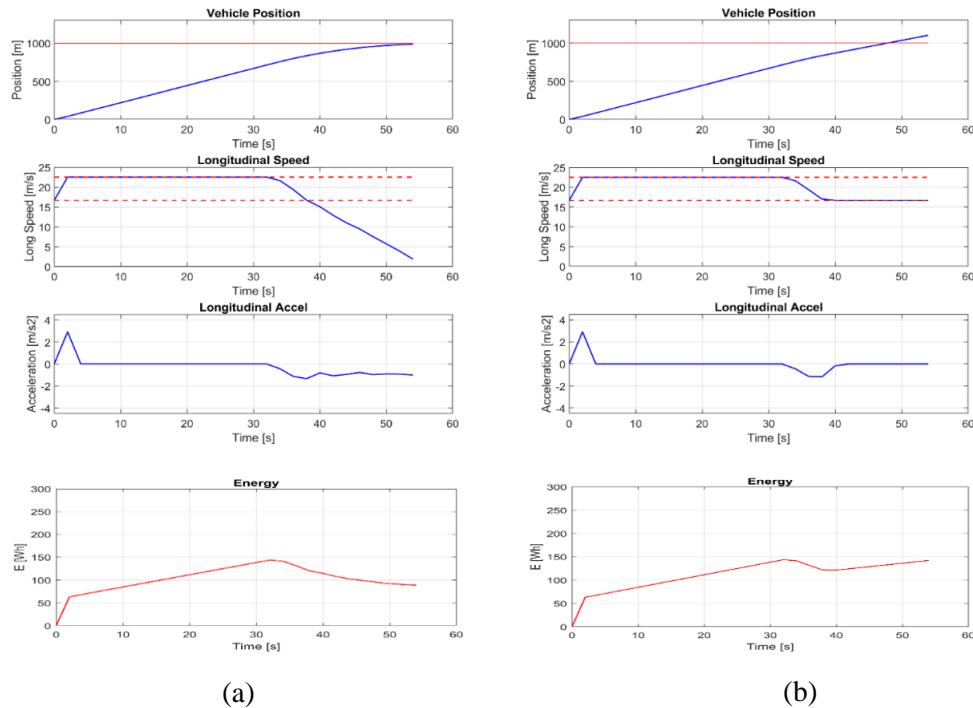


Figure 27 : Commande prédictive avec l'erreur quadratique de distance sous la formulation de Bolza avec restriction de distance (a) et sans restriction de distance (b)

Une solution à ce problème pourrait être l'utilisation d'un modèle hybride en exploitant la capacité d'anticipation de la méthode en boucle ouverte avec la génération d'un profil de vitesse complet, puis en profitant de la capacité d'adaptation en temps réel de la méthode MPC avec le suivi du profil de vitesse généré.

IV.4. Proposition d'un modèle d'optimisation à méthode hybride

Dans la section précédente, nous avons montré que le manque d'anticipation sur le long terme du MPC pouvait entraîner des comportements indésirables sur l'optimisation. Nous avons donc proposé l'utilisation d'un modèle hybride Boucle Ouverte / MPC pour pouvoir profiter de la capacité d'anticipation de la boucle ouverte et de la capacité d'adaptation du MPC. Le principe consiste à générer un profil de vitesse avec la boucle ouverte à partir de la fonction de coût sélectionnée (voir section IV.3.3), puis de suivre ce profil avec le MPC en utilisant une fonction de coût composée seulement d'une erreur quadratique de vitesse (donc différente de celle sélectionnée précédemment).

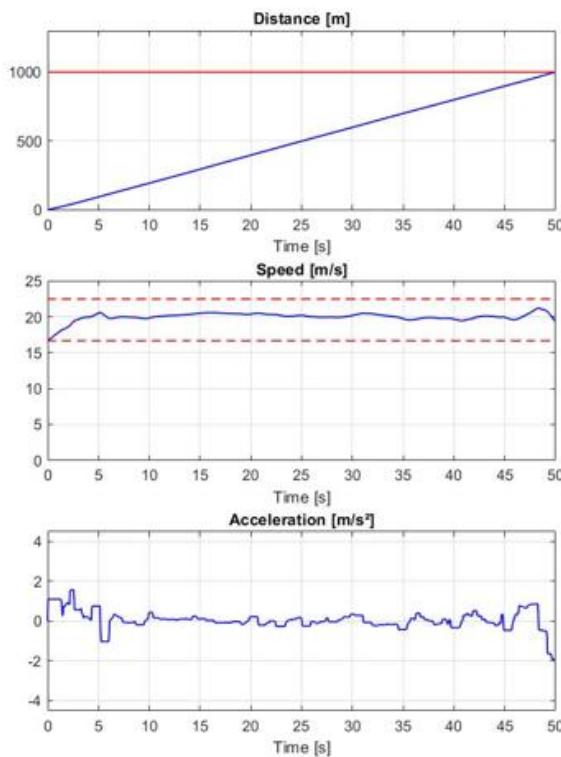
Équation 14 : Fonctions de coût utilisées par le modèle à méthode hybride

$$\diamond \min J(x, u, t) = \int_{t_0}^{t_f} [x_3(t) - x_2(t)] . dt \quad \text{En Boucle Ouverte}$$

$$\diamond \min J(x, u, t, x_f, u_f, t_f) = (x_2(t_f) - x_{2Ref})^2 \quad \text{Avec le MPC}$$

Avec x_2 la vitesse longitudinale du véhicule, x_{2Ref} la référence de vitesse (soit le vecteur généré par la boucle ouverte), x_3 l'énergie consommée.

Boucle ouverte
(Génération du profil de vitesse)



MPC
(Suivi du profil de vitesse)

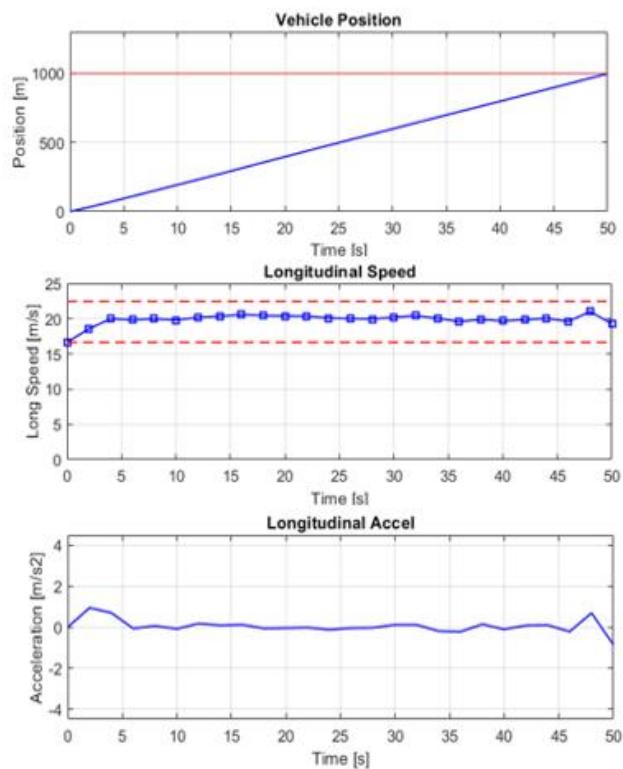


Figure 28 : Génération du profil de vitesse optimal avec la boucle ouverte (a) e suivi du profil avec le MPC (b)

Tableau 5 : Comparaison entre la génération de profil en BO et le suivi avec MPC

	Génération du profil (BO)	Suivi du profil (MPC)
<i>Nombre d'échantillons</i>	1000	26
<i>Erreur relative sur l'objectif de distance (m)</i>	-0,01	-1,87
<i>Vitesse moyenne (m/s)</i>	20,01	19,89
<i>Vitesse maximale (m/s)</i>	21,24	21,02
<i>Energie consommée (Wh)</i>	134,87	130,02
<i>Temps de calcul total (s)</i>	22,97	51,22

Le modèle d'optimisation hybride nous permet bien d'éviter le conflit entre les restrictions de distance maximale et de vitesse minimale tout en profitant des qualités d'adaptation de la méthode MPC (voir figure 28). Cependant, nous pouvons constater une légère perte de précision sur l'objectif de distance (Tableau 7). Ceci est causé par le faible nombre d'échantillons. Avec un segment de 1000 mètres, les résultats sont tout de même satisfaisants et une erreur de -1,87 m est acceptable. Toutefois, nous supposons que l'erreur s'accroît avec la longueur du segment. Cette hypothèse devra être étudiée dans la continuité de cette étude.

IV.5. Perspectives de développement

Bien que les travaux présentés dans ce rapport aient apporté des éléments favorables au développement de NAVeco, certains points peuvent être approfondis. Pour le rendement de la chaîne de traction, son intégration dans le modèle en exploitant une matrice d'efficacité du moteur associé à une méthode d'interpolation, au lieu d'une fonction approximée, serait plus représentatif pour les constructeurs automobiles. La carte de rendement permettrait de favoriser l'applicabilité industrielle de la solution.

Pour les stratégies d'optimisation, nous avons vu dans la section IV.2 que l'intérêt de la stratégie de freinage régénératif n'était pas marquant pour NAVeco. Cette conclusion ouvre une perspective d'étude sur la faisabilité et l'intérêt de la roue libre pour les véhicules électriques en comparaison à la régénération. Des essais sur une stratégie mixte roue libre / freinage régénératif pourraient aussi s'avérer utiles.

Du côté des critères d'optimisation, il serait utile de prendre en compte le confort dans notre modèle d'optimisation. En effet, les consignes fournies au véhicule par NAVeco devront respecter les exigences du constructeur pour le confort, qu'il s'agisse de l'amplitude de l'accélération ou des à-coups. A la suite de ceci, étudier la distribution de l'importance de chaque critère (énergie, distance ou vitesse, ainsi que confort) dans la fonction de coût sera primordial. En effet, l'importance de chaque critère peut être pondérée par des coefficients.

Enfin, une procédure de tests devrait être établie pour effectuer la validation du modèle d'optimisation à méthode hybride proposé dans la section IV.5. Cette validation doit vérifier l'applicabilité du modèle pour différents scénarios et divers segments de route.

V- CONCLUSION

Mon stage de fin d'études a été réalisé au sein de la société EXPLEO en tant qu'ingénieur en Recherche & Développement sur un projet de calculateur embarqué optimisant la consommation énergétique sur un trajet routier. Durant ce stage de six mois, j'ai pu mettre en pratique mes connaissances théoriques acquises durant ma formation, notamment en électrotechnique avec l'analyse du bilan des puissances d'une chaîne de traction électrique et l'analyse du rendement d'un moteur électrique. En plus de mettre en pratique mes acquis, j'ai eu l'occasion d'approfondir certaines notions du domaine de l'optimisation au travers de mes travaux qui ont traités deux méthodes d'optimisation dynamiques, la boucle ouverte et la commande prédictive (en boucle fermée), pour un problème de contrôle optimal. Ce stage m'a donc amené à m'élever sur un plan pluridisciplinaire de la recherche et du développement dans un environnement industriel.

La première mission consistait à enrichir le modèle dynamique longitudinale existant pour le rendre applicable aux véhicules électriques en intégrant la fonctionnalité de régénération d'énergie lors des phases de freinage. Une approximation de la variation du rendement de la chaîne de traction, selon le couple appliqué sur l'arbre du moteur et selon sa vitesse de rotation, a été développée pour palier au manque de données en libre accès des constructeurs concernant les cartes d'efficacité de leurs motorisations.

L'intégration du rendement dans le modèle nous a alors permis d'observer les flux d'énergie à la source, au lieu de les observer à la roue, afin d'évaluer l'intérêt de la stratégie de régénération pour la solution NAVeco qui est principalement dédiée aux environnements à hautes vitesses. A partir de cette étude, nous avons constaté que cette stratégie n'est pas la plus appropriée pour les autoroutes, contrairement aux milieux urbains dans lesquelles elle offre de bons résultats. Il serait alors utile d'étudier la faisabilité et l'intérêt de la stratégie de roue libre en comparaison à la régénération. Toutefois, l'intégration de la régénération dans le modèle dynamique est nécessaire pour assurer une bonne représentation du véhicule électrique dans les calculs du modèle d'optimisation.

Pour le développement du modèle d'optimisation dynamique, mon travail s'est concentré sur la détermination d'une fonction de coût optimale selon l'énergie consommée, l'objectif de distance et les temps de calcul. Les essais menés nous ont permis de définir une fonction de coût efficiente pour chaque méthode étudiée, soit la boucle ouverte et la commande prédictive (en boucle fermée). Les observations sur les états du véhicule nous ont ensuite amené à proposer un modèle d'optimisation à méthode hybride pour répondre au manque d'anticipation de la méthode MPC. Ce modèle hybride profite de la capacité d'anticipation de la méthode en boucle ouverte, tout en exploitant la capacité d'adaptation en temps réel de la commande prédictive (ou MPC).

Avec ce stage, j'ai découvert certaines méthodes appliquées dans l'industrie pour l'organisation, le suivi et l'amélioration continue portés sur les livrables au sein d'une équipe. Le partage des connaissances et les discussions régulières avec les différents membres ont été d'une grande aide pour le bon déroulement du stage et m'ont permis de constater, mieux que jamais, l'importance du travail d'équipe. D'autre part, cette expérience m'a permis d'exercer sur un spectre disciplinaire élargie, en me permettant d'aborder des notions de dynamique, de technique d'optimisation et d'étude énergétique qui viennent s'ajouter aux connaissances appliquées avec mon parcours de spécialisation dans les systèmes électriques. De plus, un gain en aisance à l'utilisation de l'outil Matlab / Simulink s'est fait ressentir. La principale difficulté éprouvée a été le cahier des charges offrant un large champ de possibilités dans le développement de la solution, ce qui caractérise évidemment les projets à l'état de recherche. Chaque problème rencontré offre diverses possibilités de résolution qui doivent être étudiées et justifiées.

Mon implication sur ce projet m'a conforté dans l'idée d'entamer une carrière en Recherche & Développement sur des sujets relatifs à l'optimisation énergétique appliquée aux systèmes électriques. Ce type de projet, répondant à la nécessité pour les secteurs industriels de s'engager dans la transition énergétique, correspond pleinement à mes ambitions professionnelles.

BIBLIOGRAPHIE

1. *Rapport sur l'environnement en France. Les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports.* Disponible à : <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-des-transports>
2. *Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Section 4 “Electric Vehicles”*
3. *Cristhian Yesid Bello Ceferino, Eco-Driving Planification Profile Based on Weather, Driver And Vehicle Parameters for Electric Motorcycles*
4. *Lars-Henrik Björnsson, Sten Karlsson. The potential for brake energy regeneration under Swedish conditions. Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology*
5. *Jiageng Ruan and Paul Walker. An Optimal Regenerative Braking Energy Recovery System for Two-Speed Dual Clutch Transmission-Based Electric Vehicles*
6. *Marion NALEPA. Rapport de stage NAVeco 2020*
7. *Ahmet Onur Kiyakli, Hamit Solmaz. Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink*
8. *Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Section 2.9 “Braking Perfomance”*
9. *Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Section 11 “Fundamentals of Regenerative Braking”*
10. *Règlement no 13-H de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-ONU) - Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des voitures particulières en ce qui concerne le freinage*
11. *Boyi Xiao, Huazhong Lu, Hailin Wang, Jiageng Ruan, Nong Zhang. Enhanced Regenerative Braking Strategies for Electric Vehicles: Dynamic Performance and Potential Analysis*
12. *Directive 70/220/CEE du Conseil, du 20 mars 1970, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les gaz provenant des moteurs à allumage commandé équipant les véhicules à moteur*

ANNEXES

Annexe 1 : Modèle d'optimisation analytique

Le modèle analytique développé par Marion Nalepa dans une précédente phase du projet [7] a été construit en considérant deux phases d'accélération sur un segment de route. La première pouvant être une accélération positive ou négative, tandis que la seconde est toujours négative. Selon l'état du véhicule, le modèle effectue des choix de stratégies anticipées en amont, lors du développement du modèle.

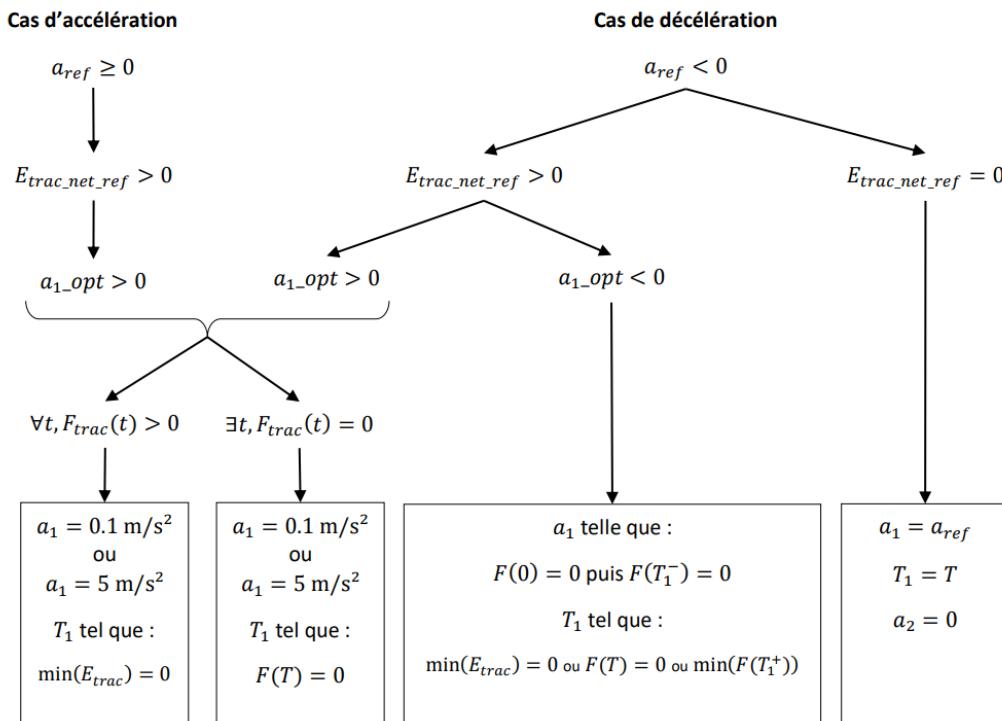


Figure 29 : Modèle d'optimisation analytique

Le nombre de cas spécifiques pouvant s'avérer élevé avec l'intégration des véhicules électriques et, dans le futur, des véhicules hybrides, l'optimisation dynamique pourraient simplifier le développement de la solution. Le travail présenté dans ce rapport s'écartera de la solution analytique pour se concentrer sur l'optimisation dynamique.

Annexe 2 : Distribution des forces de freinage

Nous avons vu que la puissance absorbée par la chaîne de traction, lors de la récupération d'énergie, dépend de la part de force de freinage appliquée par le moteur sur la force de freinage totale. Ce ratio résulte de la stratégie utilisée pour la distribution des forces de freinage. Dans cette partie, nous allons présenter la courbe de distribution idéale, les stratégies de freinage en série (une pour le confort optimal et une pour la récupération optimale de l'énergie) et la stratégie de freinage parallèle.

Courbe de distribution idéale

La performance du système de freinage est un critère de qualité et de sécurité essentiel pour un véhicule. La coordination entre les forces de freinage des roues avant et arrière joue un rôle important pour sa stabilité mais aussi pour l'optimisation de la récupération d'énergie dans le cas d'un véhicule électrique ou hybride.

Les forces de freinage avant et arrière sont limités par l'adhérence du pneu sur la route et sont proportionnelles à la force normale agissant sur le pneu, qui s'oppose à la charge appliquée sur la roue. Ces forces normales sur les roues avant et arrière sont différentes lors de la phase de freinage qui implique un transfert de charge induit par l'énergie cinétique.

Équation 15 : Force de freinage maximale

$$F_{bmax} = \mu \cdot W$$

Avec F_{bmax} la force de freinage maximale, μ le coefficient d'adhérence du pneu sur la route et W la force normale agissant sur le pneu depuis le sol.

En négligeant les forces de freinage extérieures au système (aérodynamique, ralentissement au roulement et gravitation) que l'on considère faibles devant les forces de freinage appliquées par le véhicule, la décélération peut s'exprimer par :

Équation 16 : Décélération du véhicule

$$j = \frac{F_{bf} + F_{br}}{M_v}$$

Avec M_v la masse du véhicule, F_{bf} et F_{br} respectivement les forces de freinage avant et arrière

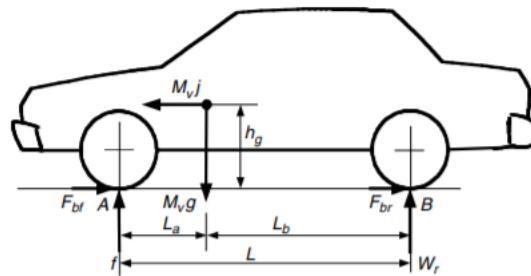


Figure 30 : Illustration des forces appliquées sur le véhicule lors du freinage [8]

En considérant le transfert de charge lors de la décélération, les forces normales W_f pour les roues avant et W_r pour les roues arrière s'expriment comme suit :

Équation 17 : Forces normales aux roues

$$W_f = \frac{M_v \cdot g}{L} \cdot \left(L_b + h_g \cdot \frac{j}{g} \right)$$

$$W_r = \frac{M_v \cdot g}{L} \cdot \left(L_a - h_g \cdot \frac{j}{g} \right)$$

Avec L l'empattement, g l'accélération gravitationnelle, L_a et L_b respectivement les longueurs entre le centre de gravité et les roues avant et arrière, h_g la hauteur du centre de gravité.

La distribution idéale des forces de freinage (figure 31) entre les roues avant et arrière qui caractérise la qualité du freinage en termes de distance d'arrêt et de confort des passagers s'obtient en considérant que les forces de freinage sont proportionnelles à la force normale sur le pneu associé :

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{L_b + h_g \cdot \frac{j}{g}}{L_a - h_g \cdot \frac{j}{g}}$$

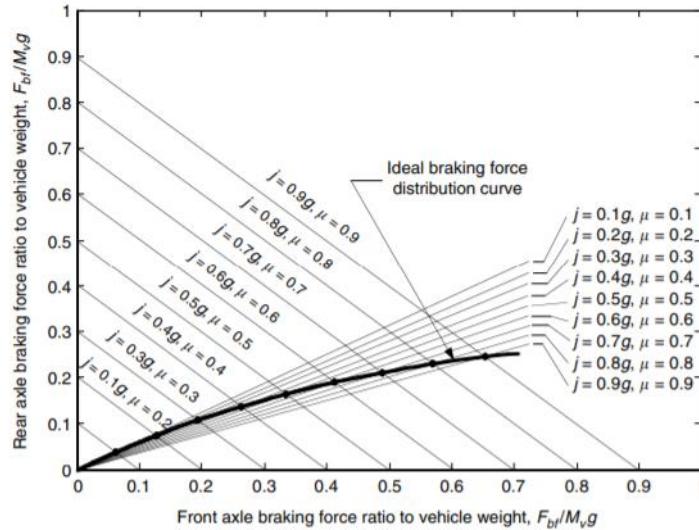


Figure 31 : Courbe de distribution idéale des forces de freinage [8]

La courbe de distribution idéale des forces de freinage est utilisée comme référence pour la stratégie de confort optimal du freinage en série. Elle est aussi utilisée pour certaines conditions sur la consigne de décélération dans le cadre de la stratégie de récupération optimale de l'énergie. Ces stratégies sont décrites dans les sections qui suivent.

Freinage en série – confort optimal

Cette stratégie consiste à contrôler les forces de freinage avant et arrière de manière à minimiser la distance d'arrêt tout en optimisant le confort des passagers. [9]

Dans le cas d'une décélération inférieure à 20% de l'accélération gravitationnelle (g), seul le freinage régénératif est appliqué sur les roues avant.

Dans le cas d'une décélération supérieure à 20% de l'accélération gravitationnelle, les forces de freinage suivent la courbe de distribution idéale. Le freinage par friction mécanique est appliqué sur les roues arrière. La distribution sur les roues avant dépend de la force de freinage totale nécessaire à la consigne de décélération. Si la force de freinage demandée sur les roues avant est inférieure à la force maximale que peut admettre le moteur électrique, alors seul le freinage régénératif est utilisé sur les roues avant. Si la force de freinage demandées sur les roues avant est supérieure à la valeur maximale de la force de freinage régénératif, alors les freins à friction mécanique interviennent pour compléter la force de freinage manquante. La figure 32 illustre graphiquement la distribution pour le confort optimal. Nous pouvons reconnaître la courbe idéale lorsque le rapport de la consigne de décélération sur la valeur de l'accélération gravitationnelle est supérieur à 0,2.

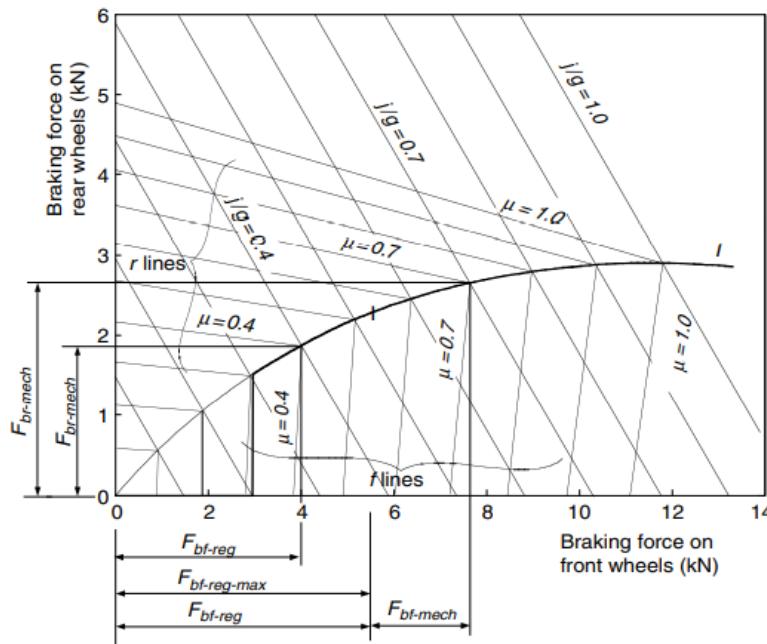


Figure 32 : Stratégie de distribution pour le confort optimal [9]

La force maximale de freinage régénératif produite par le moteur est liée à sa vitesse de rotation. Pour une vitesse faible, le couple maximal est constant et la valeur maximale de la force associée est à sa valeur la plus haute dans la plage de vitesse. Pour une vitesse élevée, le couple maximal décroît de manière hyperbolique, impliquant une force maximale plus faible pour le freinage régénératif. Le tableau 2 résume la stratégie de distribution pour le confort optimal, avec \hat{F}_{breg} la force maximale de régénération.

Tableau 6 : Résumé de la stratégie de distribution pour le confort optimal

Consigne de décélération	Condition de Force	Action
$\frac{j}{g} < 0,2$		Freinage régénératif
$\frac{j}{g} > 0,2$	$F_{bf} \leq \hat{F}_{breg}$	Freinage régénératif + Friction mécanique arrière
	$F_{bf} > \hat{F}_{breg}$	Freinage régénératif + Friction mécanique avant et arrière

Cette stratégie est à considérer si le but est d'optimiser le confort des passagers, ce qui n'est pas notre cas. Notre objectif étant d'optimiser la consommation énergétique du véhicule, la stratégie recherchée pour le freinage régénératif doit répondre à une maximisation de la puissance absorbée par la chaîne de traction. La section suivante décrit la stratégie de freinage en série pour une récupération optimale de l'énergie.

Freinage en série – récupération optimale de l'énergie

L'objectif de cette stratégie est de régénérer un maximum d'énergie tout en fournissant la force de freinage nécessaire à la consigne de décélération [9]. En utilisant le coefficient d'adhérence μ du pneu à la route comme référence pour la consigne de décélération, nous obtenons une plage de points de distribution (segment en gras sur

la figure 33). Cette plage nous permet d'établir le point de distribution qui utilise le plus possible le freinage régénératif et qui puisse permettre de minimiser le freinage par friction mécanique.

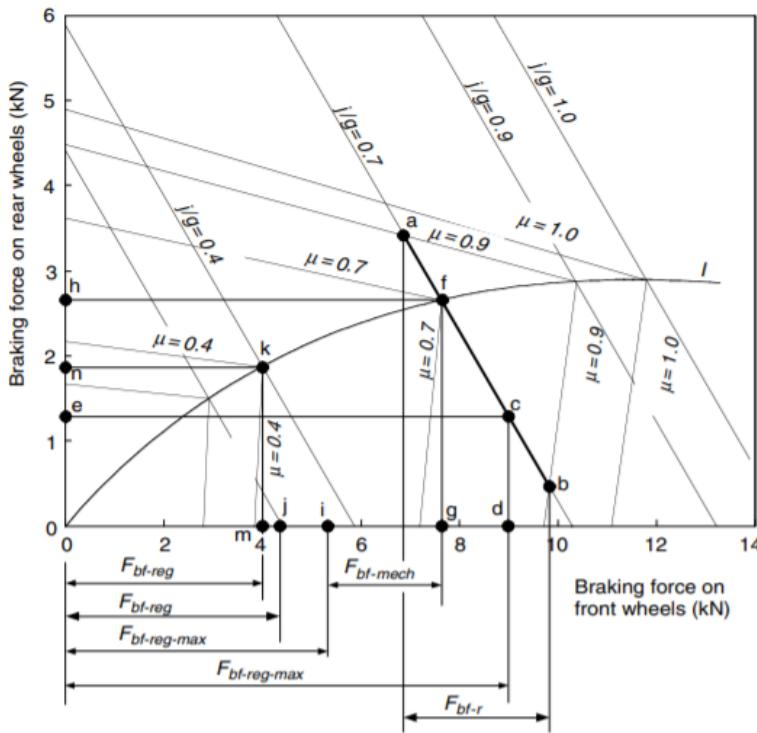


Figure 33 : Stratégie de distribution pour la récupération optimale de l'énergie [9]

Par exemple, on considère la décélération à 0,7. G et un coefficient d'adhérence de 0,9. La plage de distribution des forces de freinage correspond au segment [a ; b] sur la figure 33. Tous les points de ce segment sont une configuration possible de distribution. L'objectif est alors de déterminer le point qui minimisera le freinage par friction mécanique sur les roues avant et arrière en fonction de la force maximale admissible par le freinage régénératif sur les roues avant. Cependant, pour assurer la sécurité sur le freinage, le point de distribution ne doit pas se situer en dessous de la courbe définie par la régulation ECE 13 (figure 34) de la Commission Economique Européenne. [10]

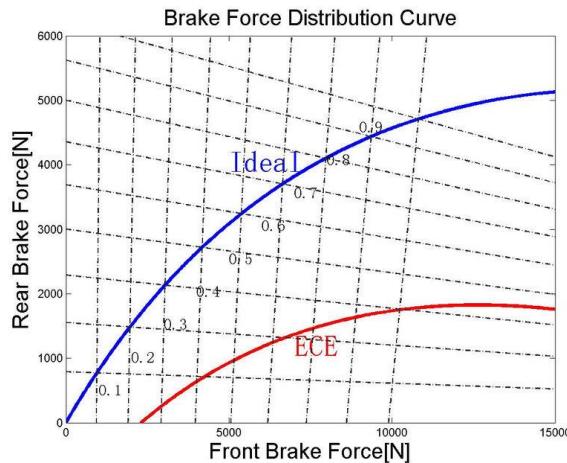


Figure 34 : Courbe idéale de la distribution et courbe de régulation ECE 13 [11]

Tableau 7 : Résumé de la stratégie de distribution pour la récupération optimale de l'énergie

Consigne de décélération	Condition de Force	Action
$\frac{j}{g} \ll \mu$	$F_{btot} \leq \hat{F}_{breg}$	Freinage régénératif
$\frac{j}{g} < \mu$	$F_{bf} < \hat{F}_{breg} < F_b$	Freinage régénératif Max + Friction mécanique arrière minimisée
	$\hat{F}_{breg} < F_{bf} < F_b$	Freinage régénératif Max + Friction mécanique avant et arrière minimisées
$\frac{j}{g} = \mu$		Point de distribution sur la courbe idéale. Mêmes conditions de forces que $\frac{j}{g} < \mu$
$\frac{j}{g} > \mu$		Point de distribution correspond à celui de la consigne $\frac{j}{g} = \mu$

Le tableau 3 résume l'action de freinage effectué selon les conditions de force et de décélération. Avec F_b la force de freinage nécessaire à la consigne de décélération.

Freinage parallèle

Sur cette stratégie de distribution, les forces de freinage par friction mécanique sur les roues avant et arrière suivent un ratio constant. Le freinage régénératif s'ajoute lorsque le ratio ne permet pas d'atteindre la force de freinage nécessaire à la consigne de décélération [9]. Ce système n'est optimal ni pour le confort des passagers, ne suivant pas la courbe de distribution idéale, ni pour l'optimisation de la régénération qui n'est pas priorisée.

Annexe 3 : Caractéristiques utiles de la Peugeot e-208

Tableau 8 : Caractéristiques de la Peugeot e-208

Nom	Symbole	Valeur	Unité
Caractéristiques dimensionnelles			
Masse (à vide)	M_v	1500	Kg
Coefficient de traînée aérodynamique	Cx	0,29	-
Surface frontale	S	2,138	m^2
Vitesse maximale du véhicule	Vmax	150	Km/h
Rayon de la roue	Rw	0,308	m
Motorisation			
Puissance maximale	Pmax	100	kW
Couple maximal	Tmax	260	Nm
Fréquence de rotation maximale	Nmax	10000	tr/min

Annexe 4 : Construction des essais sur les fonctions de coût

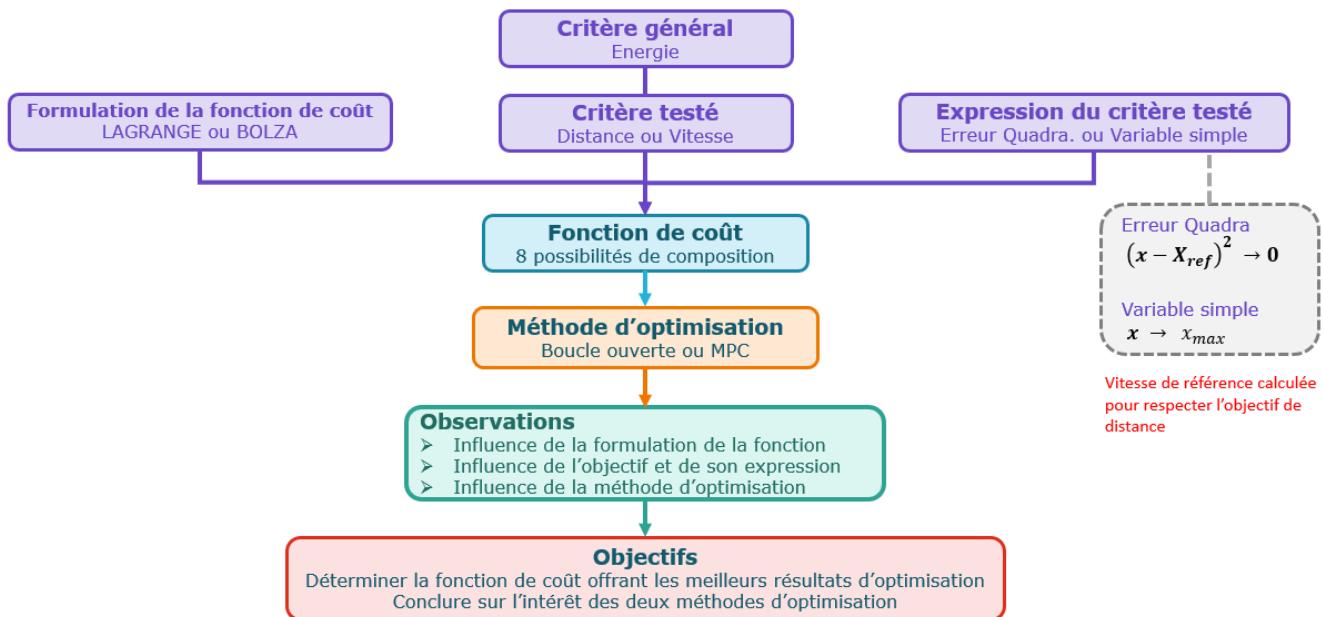


Figure 35 : Schéma de la construction des essais sur les fonctions de coût

Annexe 5 : Comparaison des profils de vitesse normalisés NEDC et WLTP

Dans cette section, nous allons présenter les profils de vitesse NEDC et WLTP. Ces profils permettent, entre autres, aux constructeurs automobiles de mesurer la consommation énergétique de leurs modèles, ainsi que les rejets polluants, en imitant des conditions de circulation. Nous effectuerons avec Simulink une simulation sur chacun des cycles afin de les comparer.

NEDC

NEDC (New European Drive Cycle) est un cycle de conduite établi pour imiter les conditions de circulation sur les routes européennes. Il était principalement utilisé pour la mesure de la consommation et des émissions polluantes selon la procédure définie par la directive 70/220/CEE [12]. Il a été utilisé par la Communauté Economique Européenne de 1973 à 2018. NEDC est composé du cycle urbain ECE-15 sur les 800 premières secondes, puis du cycle extra-urbain EUDC de 800 à 1200 secondes.

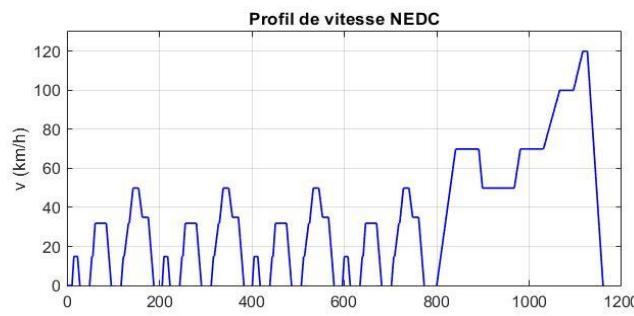


Figure 36 : Profil de vitesse NEDC

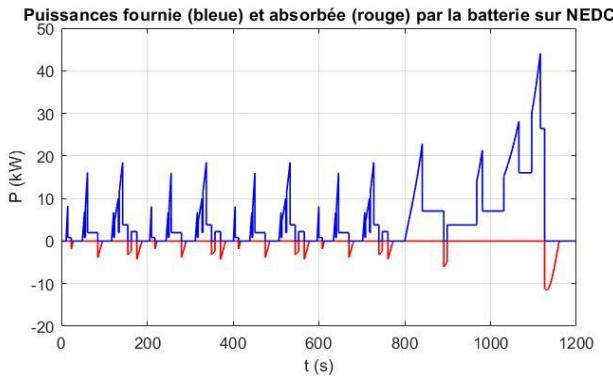


Figure 37 : Puissances fournie et absorbée par la batterie sur NEDC

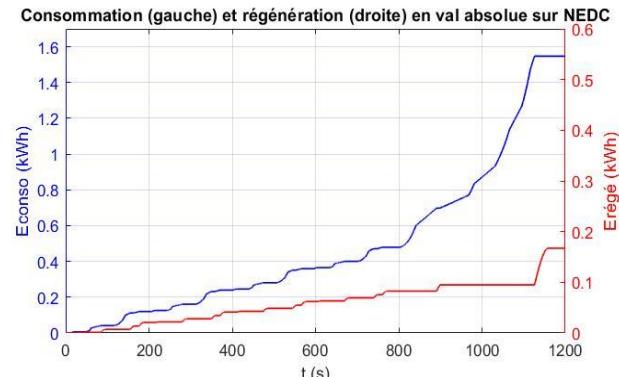


Figure 38 : Energies consommée réelle et réaénérée sur NEDC

La figure 36 représentent le profil de vitesse du cycle NEDC. Le graphique de la figure 37 affiche les puissances fournie et absorbée au niveau de la batterie au cours du temps et suivant le profil de vitesse. La figure 38 montre l'évolution de la consommation réelle et de l'énergie régénérée, relatives aux puissances de la figure 37. Nous pouvons constater sur les graphiques la corrélation entre l'accélération, les puissances et les flux d'énergie au niveau de la batterie. La figure 39 permet d'analyser plus aisément les grandeurs qui nous intéressent avec un intervalle de temps réduit à 200 secondes.

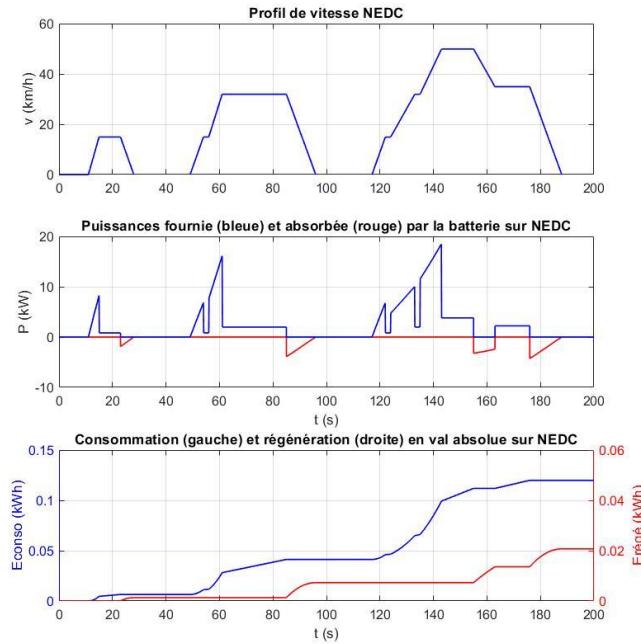


Figure 39 : Observations des puissances et énergies sur NEDC pour intervalle de temps réduit

En premier lieu, nous pouvons observer que la puissance fournie aux roues par la batterie croît selon l'augmentation de la vitesse (donc pour une accélération positive). L'énergie consommée augmente alors aussi. Lorsque la vitesse est constante (pour une accélération nulle), alors la puissance délivrée pour la traction l'est également, impliquant une augmentation linéaire de l'énergie consommée.

Enfin, dans le cas d'une décélération le freinage régénéératif entre en jeu. La puissance fournie est nulle, tandis que l'on peut observer une puissance absorbée par la batterie, qui correspond à la puissance de régénération. Ainsi, le cumul d'énergie consommée est constant sur la décélération pendant que l'énergie régénérée augmente (en valeur absolue : sans prendre en compte le sens du flux d'énergie).

Nous pouvons constater que la régénération est faible par rapport à la consommation du véhicule. Cela s'explique, d'une part, par le faible rendement de régénération. Mais également par le fait que l'énergie fournie aux roues doit compenser les forces qui s'opposent au déplacement du véhicule, tandis que ces mêmes forces caractérisent de l'énergie non récupérable lors du freinage régénératif.

WLTP

La WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures) est une norme d'essai d'homologation des véhicules permettant de mesurer la consommation de carburant, l'autonomie électrique et les rejets de polluants. Cette procédure est appliquée depuis septembre 2018, en Europe, sur tous les véhicules neufs et remplace le cycle NEDC. Elle concerne les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers. Le cycle de conduite de la norme WLTP est appelé WLTC. Il existe trois cycles d'essai WLTC qui sont effectués en fonction de la puissance massique du véhicule. La grande majorité des voitures de particuliers et utilitaires correspondent au cycle de classe 3 relatif à des véhicules de puissance élevée. Nous utiliserons donc cette classe pour notre étude.

Comme le montre la figure 40, Le cycle WLTC-3 se compose de quatre phases : basse, moyenne, haute et très haute vitesse ; Correspondant respectivement à des conduites urbaines, extra-urbaines, sur voie rapide, sur autoroute.

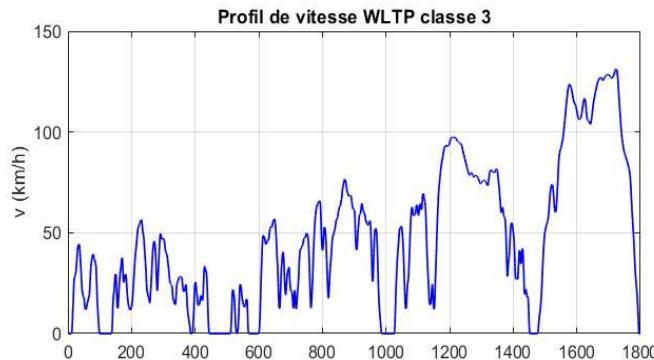


Figure 40 : Profil de vitesse WLTP

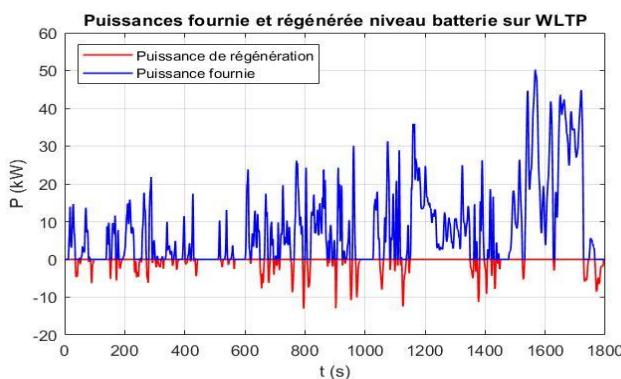


Figure 41 : Puissances fournie et absorbée par la batterie sur WLTP

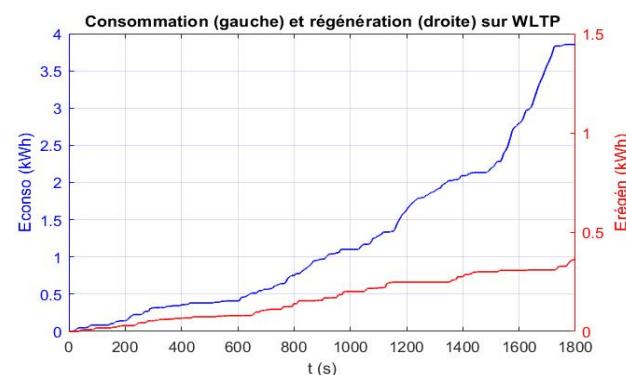


Figure 42 : Energies consommée et régénérée sur WLTP

La figure 41 présente les puissances fournie et absorbée au niveau de la batterie au cours du temps et suivant le profil de vitesse. La figure 42 montre l'évolution de la consommation réelle et de l'énergie régénérée, relatives aux puissances. Les observations concernant les courbes de puissance et d'énergie du cycle WLTP sont similaires à celles du cycle NEDC. Pour se faire une idée plus précise de la régénération et de la consommation sur les deux cycles, nous pouvons déterminer leur valeur kilométrique respectives.

Résultats numériques des deux cycles

Pour son manque de réalisme quant aux styles de conduite et aux variétés de routes qu'une voiture peut rencontrer, le cycle NEDC a été remplacé par le WLTP. Cet inconvénient est aisément identifiable si l'on compare les profils de vitesse des deux cycles.

Nous pouvons constater sur le tableau 4 que la régénération kilométrique est similaire pour les deux cycles. Pour la consommation kilométrique, la différence est d'environ 20 Wh/km avec une valeur plus élevée pour le cycle WLTP. Au regard du rapport de régénération et de la consommation kilométrique, le manque de réalisme pointé sur la procédure de test du cycle NEDC semble avoir une influence sur l'intégrité des mesures effectuées par les constructeurs automobiles en les idéalisaient.

Tableau 9 : Comparaison des cycles NEDC et WLTP

	NEDC	WLTP
Distance (km)	10,77	23,26
Temps (s)	1200,00	1800,00
Vmax (km/h)	119,86	131,25
Vmoy (km/h)	31,89	46,29
Energie conso réelle (kWh)	1,55	3,85
Energie régénérée (kWh)	0,17	0,36
Energie conso nette (kWh)	1,38	3,49
Conso réelle kilométrique (Wh/km)	143,62	165,68
Régénération kilométrique (Wh/km)	15,52	15,56
Rapport Régén / Conso γ	0,108	0,094

Pour se conformer à la norme européenne, l'étude s'appuiera sur le cycle WLTP. De plus, étant caractérisé par 4 sous-profil de vitesse différents, le WLTP est mieux adapté pour l'étude (contrairement au NEDC qui n'en contient que 2).

Annexe 6 : Comparaison des approximations variable et constante du rendement de la chaîne de traction.

Calcul de l'énergie avec un rendement variable

Nous avons présenté, dans la section III.4.2, l'estimation de la fonction de rendement. Cette estimation va maintenant nous permettre de réaliser le calcul de l'énergie consommée nette pour un rendement variable de la chaîne de traction. Nous utiliserons le profil de vitesse WLTP, dont l'utilisation sera justifiée dans le chapitre 12.

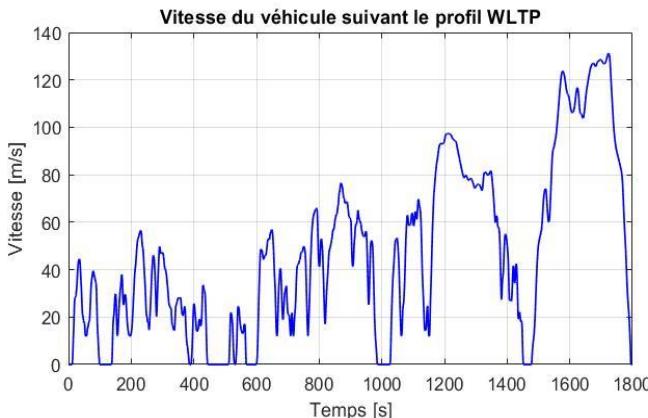


Figure 43 : Profil de vitesse

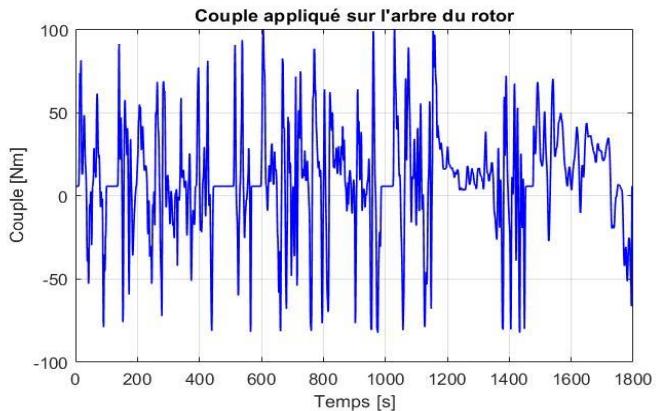


Figure 44 : Couple pour un rendement variable

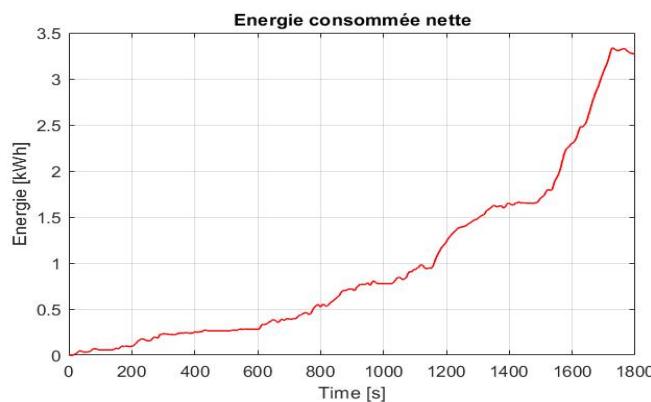


Figure 45 : Energie consommée avec rendement variable

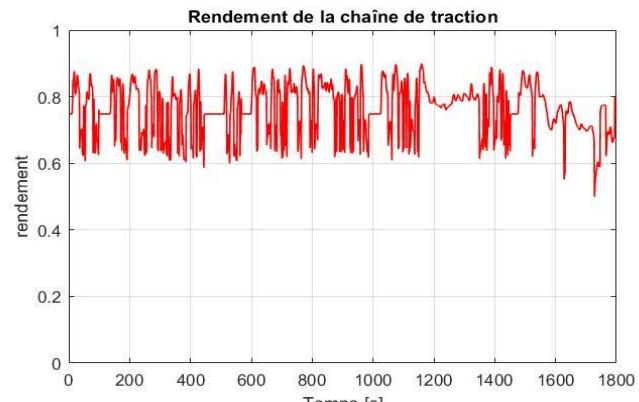


Figure 46 : Evolution du rendement variable

Energie consommée nette :	3,2724 kWh
Rendement moyen en mode traction :	0,7975
Rendement moyen en mode régénération :	0,6611

Les figures 44, 45 et 46 affichent respectivement le couple du moteur, l'évolution de l'énergie consommée nette et l'évolution du rendement selon le profil WLTP complet. L'énergie consommée nette finale est de 3,2724 kWh. Les rendements moyens sont de 0,7975 pour le fonctionnement moteur et de 0,6611 pour le fonctionnement régénératif, ces résultats concordent avec l'étude de Lars-Henrik Björnsson et Sten Karlsson [4]. Nous utiliserons ces valeurs moyennes pour les rendements constants de la section suivante.

Calcul de l'énergie avec un rendement constant

Les rendements constants utilisés dans cette section correspondent aux moyennes des rendements variables en mode motorisation et en mode régénération de l'annexe 5. Les figures 47, 48 et 49 présentent respectivement le couple moteur, l'évolution du rendement de la chaîne de traction qui alterne entre deux valeurs selon le mode de fonctionnement, et enfin l'énergie consommée nette.

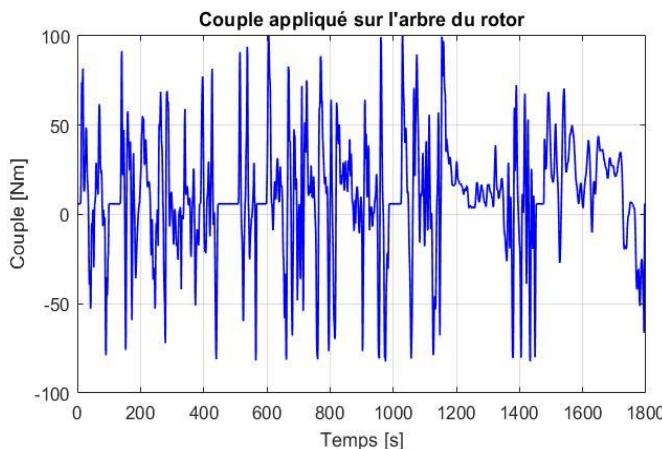


Figure 47 : Couple pour un rendement constant

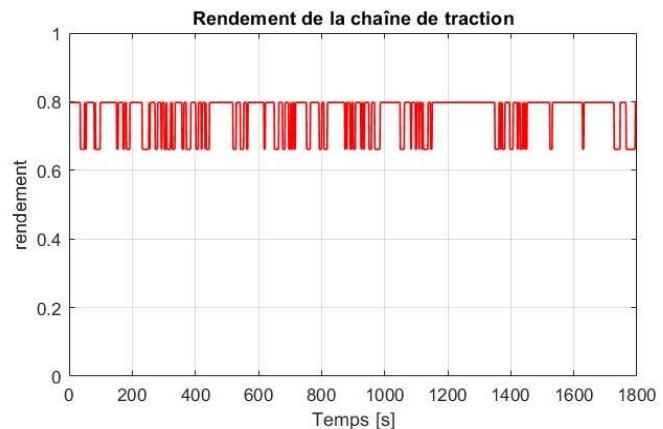


Figure 48 : Evolution du rendement pour des valeurs constantes

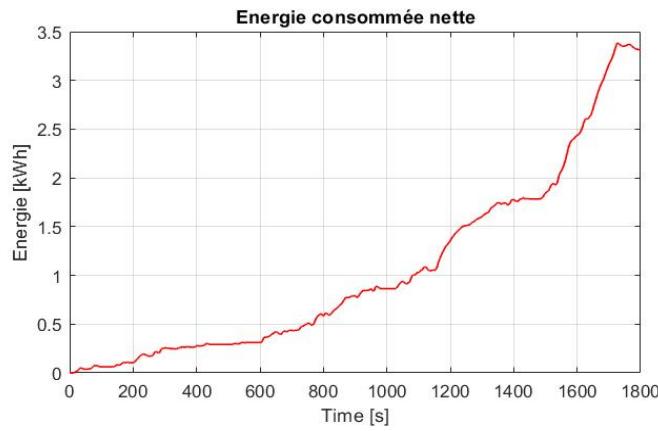


Figure 49 : Evolution de l'énergie pour des rendements constants

Energie consommée nette :
3,316 kWh

L'énergie finale vaut 3,316 kWh. Avec les calculs effectués, nous pouvons désormais déterminer l'erreur sur l'énergie finale selon l'approximation du rendement. Cette erreur nous permettra de conclure sur l'importance d'une estimation de la variation de ce rendement.

Erreur relative de l'énergie

Avec les deux calculs effectués, nous pouvons déterminer l'erreur relative de l'énergie avec rendements constants par rapport au cas avec rendements variables :

$$\varepsilon_E = \frac{E_{Cnet}(\eta_{cte}) - E_{Cnet}(\eta_{var})}{E_{Cnet}(\eta_{var})}$$

Erreur relative :
 $\varepsilon_E = + 1,33 \%$

Avec E_{Cnet} L'énergie consommée nette.

Avec des rendements variables, l'énergie consommée nette est de 3,2724 kWh. Avec les rendements constants, elle vaut 3,316 kWh. L'erreur relative de l'énergie sous rendements constants est alors de +1,33 %. L'erreur est relativement faible sur le profil WLTP. Cependant, elle peut s'amplifier selon le profil de vitesse puisque les rendements variables dépendent de la vitesse du véhicule et de la force de traction. Or, le prochain chapitre se basera sur la comparaison de la consommation et de la régénération entre différents types de conduites caractérisés par différents spectres de vitesses et plusieurs degrés de pente. L'erreur étant variable, utiliser un rendement constant pourrait biaiser nos comparaisons (notamment en considérant un unique rapport de transmission en sortir du moteur). Nous utiliserons donc les rendements variables à partir de l'estimation effectuée dans la section III.4.2.

Annexe 7 : Observations et interprétations des comportements

Les observations se concentrent principalement sur le comportement du véhicule, notamment sur sa vitesse et sur la distance parcourue. Les critères d'optimisation testés étant caractérisés par ces variables, leur évolution nous permettra d'expliquer le fonctionnement des différentes fonctions de coût.

Maximisation de la distance

La maximisation de la distance consiste à utiliser la variable signée négativement comme critère secondaire dans la fonction de coût. La figure 50.a présente (respectivement de haut en bas) la distance parcourue, la vitesse ainsi que l'accélération pour un coût exprimé sous la formulation de Bolza. La figure 50.b montre les mêmes grandeurs mais selon la formulation de Lagrange. Les fonctions de coûts sont présentées dans le Tableau 1.

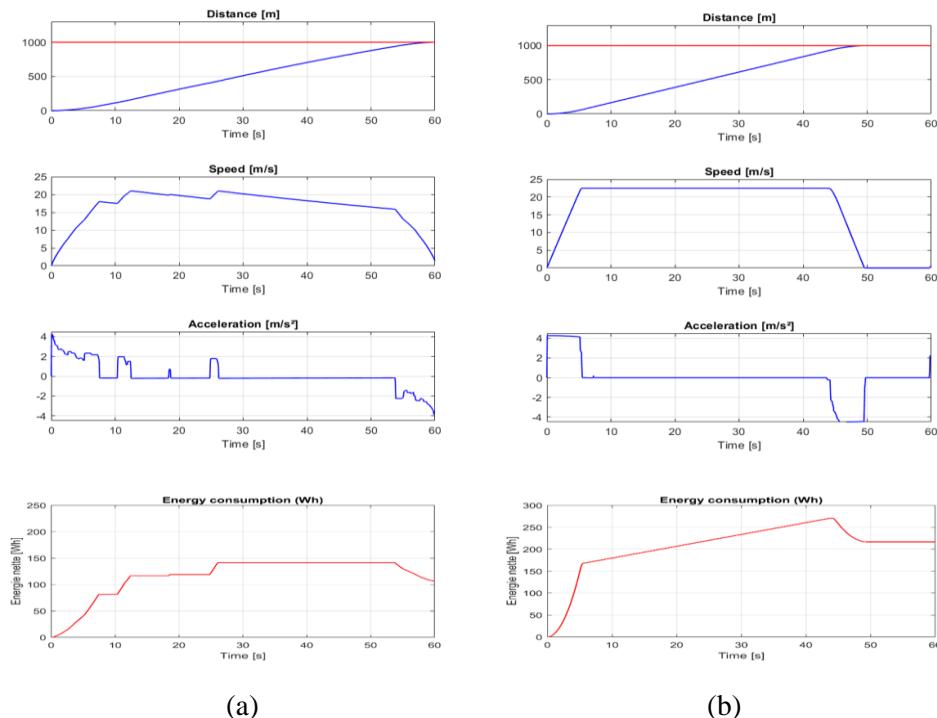


Figure 50 : Maximisation de la distance sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)

Nous pouvons observer sur les figures 50.a et 50.b la différence entre les formulations de Bolza et de Lagrange. La figure 50.a (Bolza) montre un profil de vitesse qui permet au véhicule d'atteindre l'objectif de distance dans le temps exact assigné au segment de route. Tandis que la figure 50.b (Lagrange) présente un profil de vitesse permettant au véhicule d'atteindre la distance souhaitée avec de l'avance. Ce comportement est causé par le fait que la formulation de Lagrange maximise la distance sur chaque échantillon de temps. Alors que la formulation de Bolza maximise la distance pour l'instant de temps final. Nous pouvons, par ailleurs, constater une consommation d'énergie plus élevée avec la formulation de Bolza.

Maximisation de la vitesse

Au même titre que la distance, la maximisation de la vitesse consiste à utiliser la variable correspondante signée négativement comme critère secondaire dans la fonction de coût. La figure 51.a présente la distance, la vitesse et l'accélération pour un coût exprimé sous la formulation de Bolza. La figure 51.b montre les mêmes grandeurs pour la formulation de Lagrange. Ces deux figures illustrent bien la manière dont chaque formulation résout le problème de contrôle optimal.

Pour la formulation de Bolza (figure 51.a), l'optimisation impose uniquement de maximiser la vitesse sur l'instant final. Or, dans la fonction de coût, la puissance consommée est optimisée sur l'intégralité du segment. Donc selon cette formulation, il paraît cohérent que la commande optimale consiste à déplacer le véhicule qu'à la fin du temps imparti. Cependant, conserver une vitesse nulle sur une partie du segment est, d'une part, préjudiciable pour la sécurité des passagers et peut, d'autre part, entraîner un retard considérable. Il est donc légitime d'admettre avec cette observation que la maximisation de la vitesse sous la formulation de Bolza ne sera pas retenue.

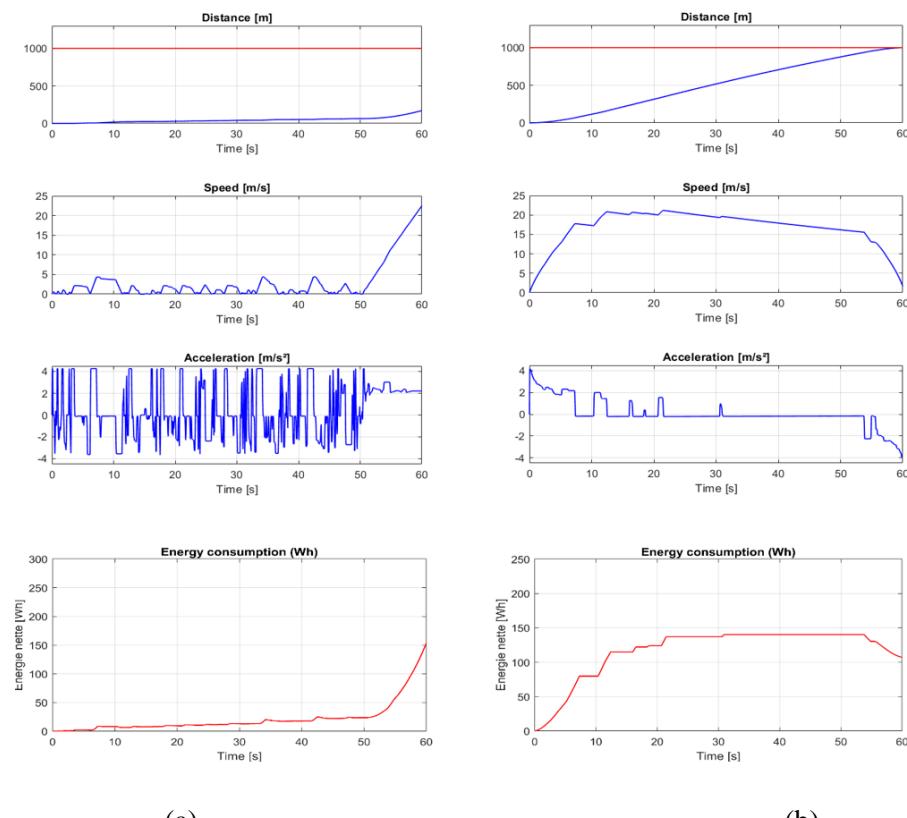


Figure 51 : Maximisation de la vitesse sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)

En ce qui concerne la formulation de Lagrange (figure 51.b), les courbes sont similaires à celles observées pour la maximisation de la distance. La maximisation de la vitesse est effectuée sur chaque échantillon de temps, ce qui correspond bien au mode de fonctionnement de la formulation de Lagrange. Toutefois, la vitesse n'est pas simplement maintenue à sa valeur maximale. En effet, une balance est effectuée entre la maximisation de la vitesse, la minimisation de l'énergie et le respect de la restriction de distance.

Minimisation de l'erreur quadratique de distance

Les figures 52.a et 52.b présentent la distance, la vitesse, et l'accélération obtenues respectivement sous la formulation de Bolza et sous la formulation de Lagrange.

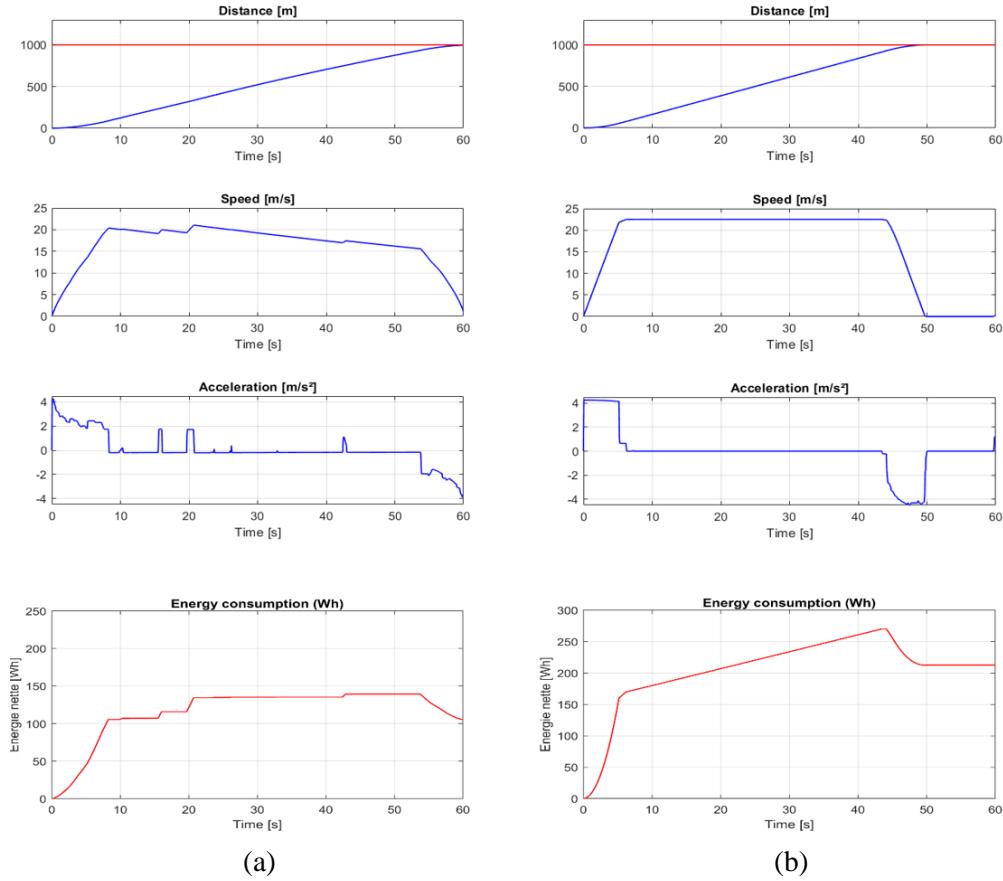


Figure 52 : Minimisation de l'erreur quadratique de distance sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)

Nous pouvons observer un comportement équivalent aux observations effectués sur la maximisation de la variable de distance. Nous pouvons alors constater que la maximisation de la variable vers sa restriction haute est équivalent à la minimisation de l'erreur quadratique de cette même variable avec une référence égale à la restriction haute. Nous pouvons également constater que la formulation de Lagrange implique une consommation d'énergie plus élevée, comme avec la maximisation de distance.

Minimisation de l'erreur quadratique de vitesse

L'erreur quadratique de vitesse nécessite de définir une valeur de référence. Cette consigne est calculée de manière que l'objectif de distance soit atteint dans le temps imparti, en considérant une phase d'accélération positive et constante suivie d'une phase de vitesse stabilisée.

La vitesse de consigne est déterminée à partir du polynôme suivant :

$$-\frac{1}{2a_1} \cdot V_{ref}^2 + \left(t_f + \frac{V_0}{2a_1} \right) \cdot V_{ref} - D_{ref} = 0$$

Avec V_{ref} la vitesse de consigne, V_0 la vitesse initiale, D_{ref} l'objectif de distance, t_f le temps final et a_1 l'accélération moyenne pour rejoindre la vitesse de consigne.

Pour déterminer la valeur de a_1 , nous avons effectué dix simulations, chacune caractérisée par une consigne de vitesse spécifique (de 15,5 m/s à 20 m/s avec un pas de 0,5), de manière à relever l'accélération moyenne sur la phase de montée en vitesse. Nous avons pu déterminer une valeur moyenne de 3,675 m/s² avec une dispersion de 0,04 et une valeur médiane de 3,67 m/s² sur les dix essais. De plus, les mesures suivent une évolution aléatoire (pas de croissance ou de décroissance observée sur les valeurs). Il ne semble donc pas y avoir de lien entre la consigne de vitesse et l'accélération a_1 sur la phase de montée en vitesse.

Les figures 53.a et 53.b présentent la distance, la vitesse, et l'accélération obtenues respectivement sous la formulation de Bolza et sous la formulation de Lagrange. Le profil de vitesse pour l'optimisation sous la formulation de Bolza avec la minimisation de l'erreur quadratique de vitesse est similaire à celui obtenu pour la maximisation de la variable de vitesse.

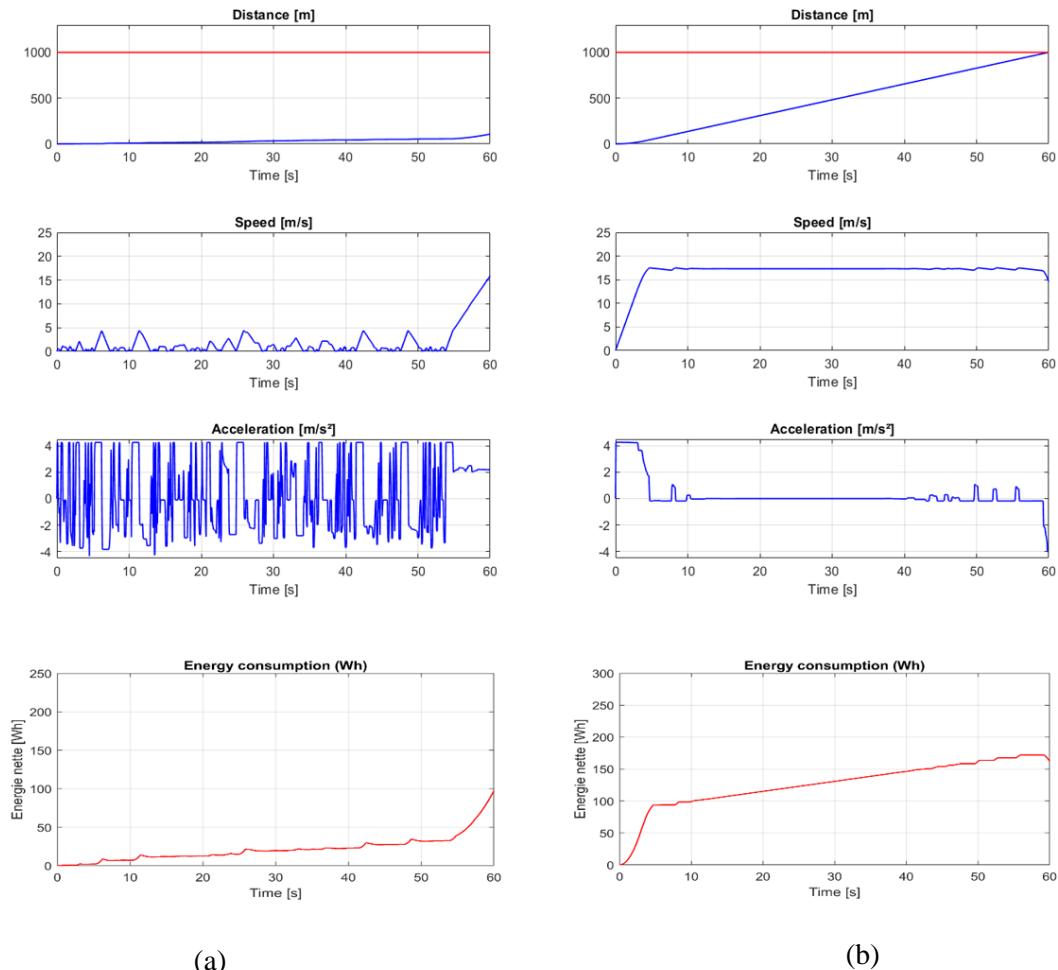


Figure 53 : Minimisation de l'erreur quadratique de distance sous la formulation de Bolza (a) et sous la formulation de Lagrange (b)

Nous pouvons constater, sur la figure 53.b, que la consigne de vitesse adaptive est correctement définie pour nous permettre d'atteindre l'objectif de distance de 1000 mètres. L'objectif est également respecté pour d'autres valeurs de temps final de simulation. Sur le profil d'accélération, nous remarquons une série de variations qui peut s'avérer inconfortable pour les passagers. Cette observation nous permet de motiver une analyse sur le contrôle de la variation du couple moteur avec l'objectif de rendre la fonction de coût applicable à la solution finale.

L'observation des variables de distance, de vitesse et d'accélération nous a permis de constater la différence de traitement effectué par les deux formulations étudiées (Bolza et Lagrange), mais également de remarquer le comportement de ces variables selon l'expression du critère d'optimisation secondaire. Pour mieux distinguer l'intérêt de chaque fonction de coût, nous analyserons les indicateurs de performance dans la section suivante.

Comportement de la formulation de Bolza avec la méthode MPC

Dans les sections précédentes, nous avons constaté que la formulation de Bolza optimise la distance parcourue pour l'instant de temps final. Or, contrairement à la boucle ouverte, la méthode MPC ne traite pas les calculs avec un segment complet mais avec un horizon de prédition (voir section III.4.4). Les figures 54.a (Boucle ouverte) et 8.b (MPC) permettent d'observer la différence dans le traitement de la formulation de Bolza par les deux méthodes avec le critère d'erreur quadratique de distance.

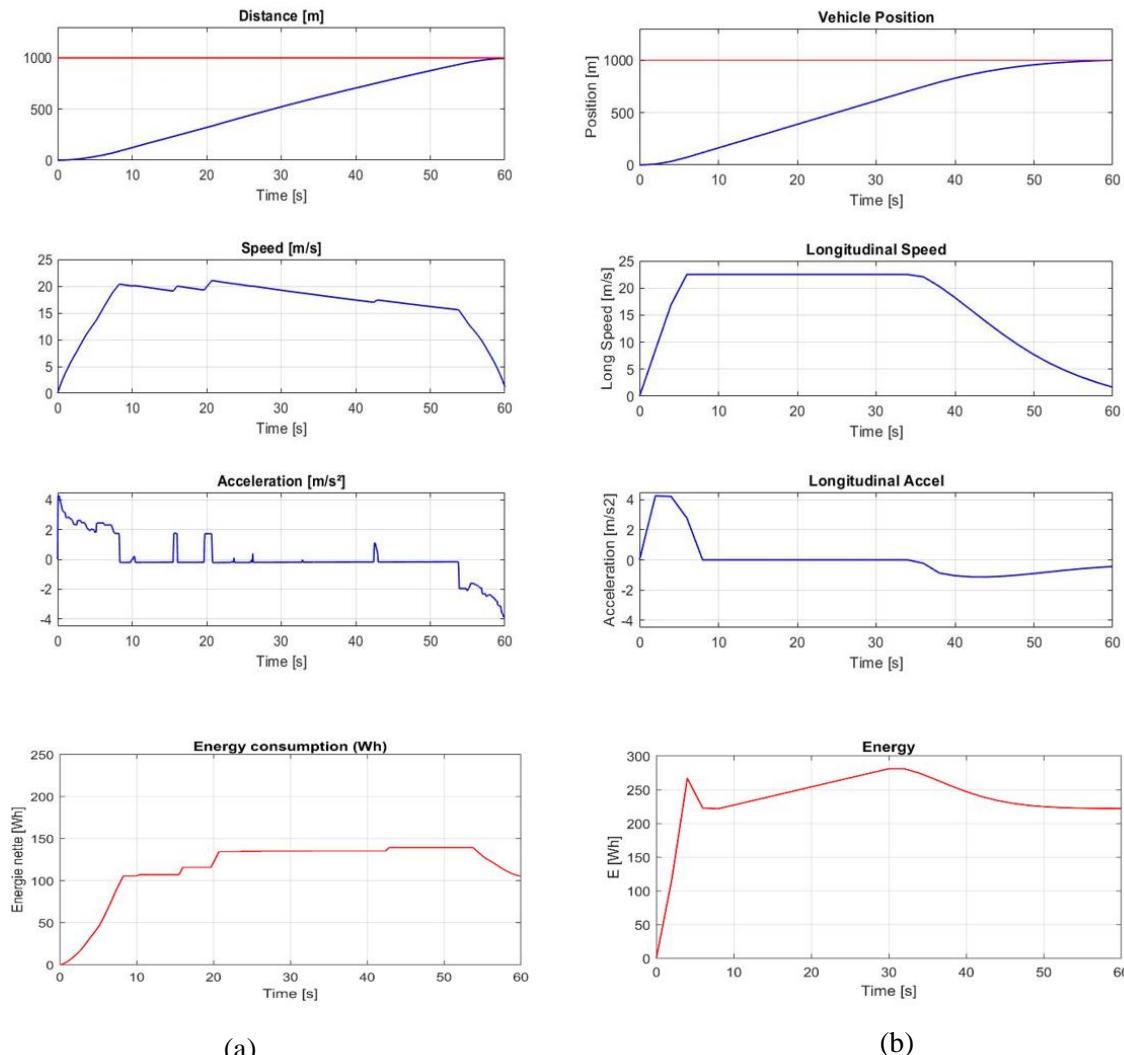


Figure 54 : Minimisation de l'erreur quadratique de distance sous Bolza en boucle ouverte (a) et avec MPC (b)

Nous pouvons constater qu'avec la méthode MPC, la formulation de Bolza offre des résultats qui ressemblent davantage à ceux fournis par la formulation de Lagrange. En effet, l'optimisation sur l'instant final de l'horizon de prédition (principe de Bolza avec MPC) fait que le comportement se rapproche plus d'une optimisation sur un échantillon de temps (principe de Lagrange) que d'une optimisation sur l'intervalle de temps complet (principe de Bolza en boucle ouverte).

Annexe 8 : Tableaux de mesures pour les tests de fonction de coût

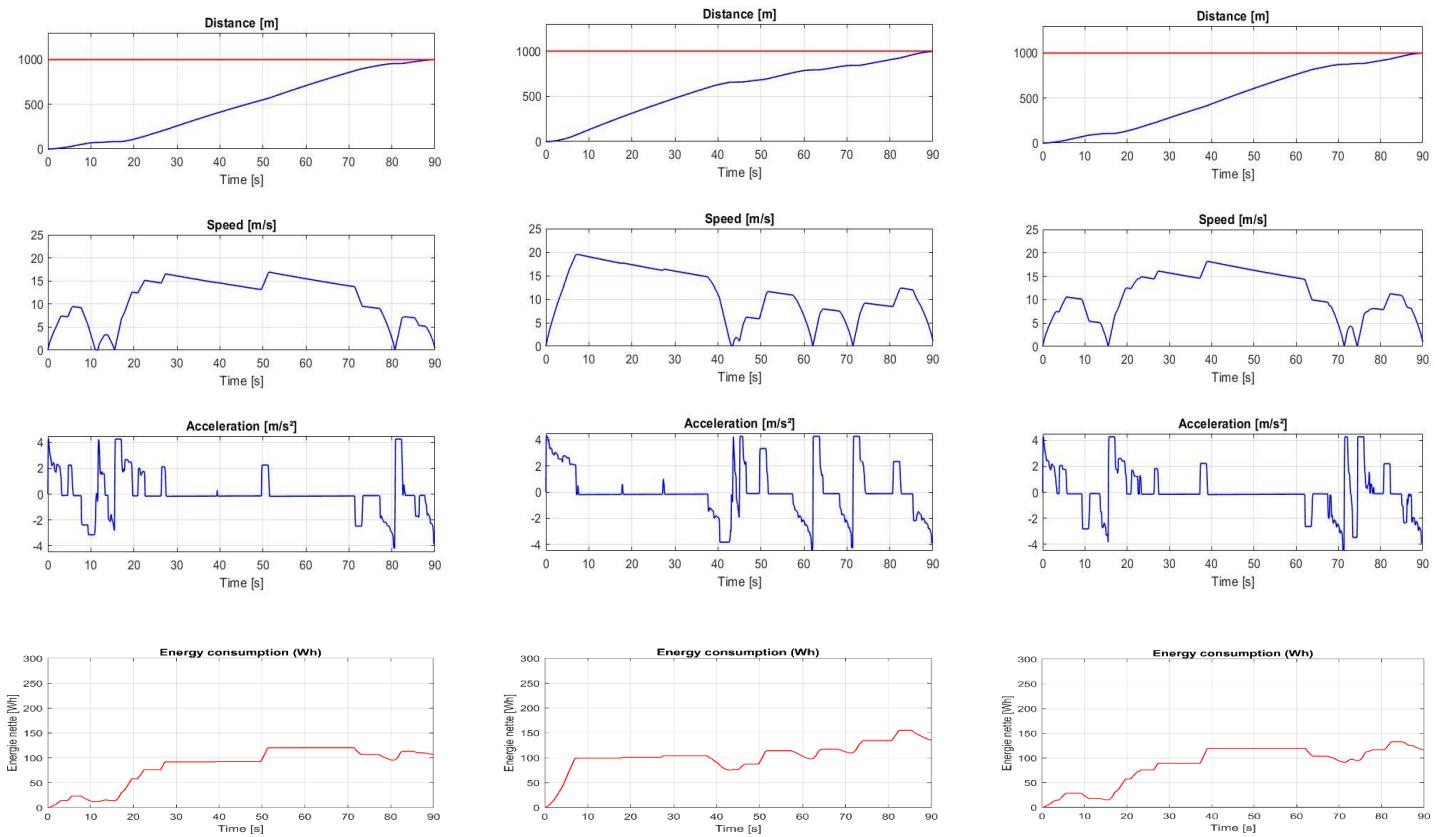
Tableau 10 : Résultats de distance parcourue et d'énergie consommée en Boucle Ouverte

Critère / Temps segment (s)	Bolza		Lagrange	
	Energie conso [Wh]	Dist. Parcourue [m]	Energie conso [Wh]	Dist. Parcourue [m]
Max X				
60	106,36	1000	216,7	1000
75	107,89	1000	220,49	1000
90	106,55	1000	213,11	1000
Max V				
60	153,12	171,42	107,19	1000
75	180,86	200,74	84,9	1000
90	195,79	263,63	116,2	1000
Min EQX				
60	105,31	995,42	212,51	1000
75	82,17	996,9	214,56	1000
90	135,48	995,66	209,72	1000
Min EQV				
60	97,23	107,24	162,61	1000
75	85,29	260,71	119,84	999,22
90	84,44	219,34	96,83	998,6

Tableau 11 : Résultats de distance parcourue et d'énergie consommée avec le MPC

Critère / Temps segment (s)	Bolza		Lagrange	
	Energie conso [Wh]	Dist. Parcourue [m]	Energie conso [Wh]	Dist. Parcourue [m]
Max X				
60	165,57	979,19	241,12	1329,10
75	165,35	992,83	241,12	1644,10
90	165,35	992,83	241,12	2004,10
Max V				
60	0	0	174,28	955,84
75	0	0	174,28	955,84
90	0	0	174,28	955,84
Min EQX				
60	168,47	997,76	182,86	999,87
75	168,32	1000	182,86	999,87
90	168,32	1000	182,86	999,87
Min EQV				
60	16,95	228,31	120,33	933,28
75	14,60	219,59	88,72	940,56
90	13,55	217,89	73,51	954,40

Annexe 9 : Comportement obtenu avec les trois critères sélectionnés en boucle ouverte dans la première phase de tests



(a) **Figure 55 : Maximisation de distance sous Bolza (a), minimisation de l'erreur quadratique de distance sous Bolza (b), maximisation de la vitesse sous Lagrange (c)**

Annexe 10 : Tableau récapitulatif des tests effectués sur les fonctions de coût

Les formulations notées « B » signifient « Bolza » et celles notées « L » correspondent à « Lagrange ». Les cadres distinguent les fonctions sélectionnées à l'issue de la première phase de tests (avant l'intégration au modèle de la restriction de vitesse minimale). Ceux de couleur jaune relèvent les fonctions adoptées au terme des essais (avec restriction de vitesse minimale).

Tableau 12 : Récapitulation des essais sur les fonctions de coût

METHODE	Boucle Ouverte								MPC								
	2ème CRITERE		d(t)		v(t)		$(d(t) - D_{ref})^2$		$(v(t) - V_{ref})^2$		d(t)		v(t)		$(d(t) - D_{ref})^2$		$(v(t) - V_{ref})^2$
FORMULATION	B	L	B	L	B	L	B	L	B	L	B	L	B	L	B	L	
DISTANCE	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	
ENERGIE	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	
TEMPS CALCUL	-	-	-	-	-	-	-	-	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	