Sigma Clermont
Université Clermont Auvergne
Clermont-Ferrand

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
MASTER ROBOTIQUE

— — — —

DAHMANE Yassir

OPTIMAL ENERGY CONSUMPTION OF HYBRID VEHICLE IN HEAVY TRAFFIC USING ADAPTIVE CRUISE CONTROL WITH STOP&GO

Soutenu le 7 Septembre 2017
Laboratoire d'Excellence IMOBS3

Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à mon tuteur, Mr. Lounis Adouane, pour son aide, son encouragement, et son soutien tout au long de la période de stage.

Mes remerciements vont spécialement à Rustem Abdrakhmanov pour la gentillesse qu'il a manifestée à mon égard durant ce stage. Certainement, j'ai appris beaucoup de choses de lui.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à l'ensemble de l'équipe MACCS. Je remercie tous les membres permanents de cette équipe ainsi que les non permanents.

Aussi je tiens à exprimer mes sincères remerciements au jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Je saisis cette occasion pour adresser mon remerciement au corps professoral du Master Robotique.

Résumé

Le sujet de mon stage consiste à participer dans le développement d'une architecture de contrôle à la base de régulateur de vitesse adaptatif pour améliorer les performances énergétiques d'un véhicule hybride (électrique / thermique). A travers mon stage j'ai réalisé une recherche bibliographique sur les différentes parties du sujet afin de me documenter et de m'inspirer des travaux existants. Le sujet traite deux grands axes. Le premier axe concerne les systèmes intelligents de contrôle de véhicules à savoir les régulateurs de vitesse adaptatifs qui visent à diminuer la consommation du carburant et à remplacer le conducteur dans les tâches répétitives soit en accélération soit en freinage, avec un respect de la sécurité et du confort des passagers. Le deuxième axe de stage consiste à implémenter une stratégie de gestion de l'énergie sur un véhicule hybride afin d'optimiser la participation énergétique de chacune des sources électrique et thermique. Une attention particulière est donnée aux techniques d'optimisations énergétiques stochastiques.

Abstract

The subject of my internship is to participate in the development of a control architecture based on adaptive cruise control to improve the energy performance of hybrid vehicle (electric motor / heat engine). Through my internship I have carried out a bibliographic research on the different parts of the subject in order to have a strong documentation and to be inspired by the existing works. The subject deals with two main axes. The first one is intelligent vehicle control systems, namely adaptive cruise control systems designed to reduce fuel consumption and to replace drivers in repetitive tasks, either in acceleration or braking, with respecting safety and the comfort of passengers. The second axis of training consists in implementing an energy management strategy on a hybrid vehicle in order to optimize the energy participation of each source electrical and thermal one. Particular attention is given to stochastic energy optimization techniques.

Table des matières

Remerciement **1**

Résumé, Abstract **2**

Table des matières **4**

Liste des tableaux **5**

Table des figures **7**

Introduction **8**

1 L'état de l'art **10**
1.1 Les Véhicules Hybrides 11
1.1.1 Composition 11
1.1.2 Architectures de véhicules hybrides 12
1.2 Analyse bibliographique sur ACCwSG 15
1.2.1 Généralités sur ACCwSG 15
1.2.2 Les modèles des véhicules automatisés 16
1.2.3 Les modèles du conducteur 26
1.3 Les stratégies de gestion d'énergie pour les véhicules hybrides . 28
1.3.1 Les techniques d'optimisation énergétiques 28
1.3.2 Les méthodes d'optimisation stochastiques 31

2 Implémentation et simulation de ACCwSG **36**
2.1 La structure de contrôle 36
2.1.1 Le modèle dynamique du bus 36
2.1.2 Contrôle de la boucle interne 38
2.1.3 Contrôle de la boucle externe 39
2.2 Simulation et discussion des résultats 41
2.2.1 Présentation des types de scénarios 41
2.2.2 La simulation des scénarios 42

3 Implémentation et simulation de la stratégie d'optimisation énergétique **48**
3.1 Modélisation du système 48
3.2 Stochastic Model Predictive Control 49
3.3 Apprentissage du comportement du conducteur 51
3.4 Simulation 52

Conclusion et perspectives **57**

Bibliographie **62**

Liste des tableaux

2.1 Paramètres utilisés pour le calcul de la distance entre véhicules . 39
2.2 La règle de commutation entre les deux mode ACC et CC 40
2.3 Erreur entre d et d_{ref} 47

Table des figures

1.1 Schéma de l'architecture hybride série[11] 13
1.2 Schéma de l'architecture hybride parallèle[11] 14
1.3 Schéma de l'architecture hybride série-parallèle[11] 14
1.4 Modèle ACC[12] 17
1.5 Modélisation d'un véhicule automatisé selon Molina [21] 18
1.6 Schéma de boucle de commande[30] 19
1.7 La régle de commutation entre ACC et CC [30] 20
1.8 L'algorithme du NMPC [30] 21
1.9 Contrôleur PI [30] 22
1.10 Les Fonctions de transferts des deux points de fonctionnement [31] 22
1.11 Exemples de régulateur PI proposés pour les deux premiers points de fonctionnement[31] 22
1.12 Schéma du contrôleur LQ[31] 23
1.13 Schéma de boucle de régulation de distance ACC [35] 23
1.14 Modèle complet de la boucle interne et externe du véhicule[26] 24
1.15 Architecture de contrôle [25] 24
1.16 Architecture de ACC1 [37] 25
1.17 Architecture de ACC2 [37] 26
1.18 Commande optimale combinée aux chaînes de markov[13] . . . 33
1.19 Schéma du modèle de la chaîne de traction[27] 34

2.1 Forces appliquées sur le bus[1] 37
2.2 Architecture globale de la boucle interne 38
2.3 La simulation d'une circulation urbaine fluide (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance 42
2.4 La simulation d'une circulation urbaine avec des arrêts fréquents (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance 43
2.5 La simulation d'une circulation urbaine fluide mais avec une oscillation de vitesse de leade (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance 44
2.6 La simulation des accélérations et décélérations brutales du leader (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance 45

2.7 La simulation d'une circulation urbaine avec embouteillages (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance 46
2.8 La simulation d'une circulation urbaine avec un trafic routier variable (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance 47

3.1 Profil de vitesse 52
3.2 Puissance requise par le conducteur 53
3.3 Puissance développée par le moteur thermique 54
3.4 Puissance du moteur électrique 55
3.5 Puissance de freinage 56

Introduction

Depuis une centaine d'années, la consommation des carburants issus du pétrole a continuellement augmenté du fait notamment de l'essor des transports routiers. Avec une part estimée aujourd'hui à 27% des émissions globales de CO_2, le secteur des transports est le premier contributeur au réchauffement de la planète. De plus, la forte croissance dans les pays émergents tels la Chine ou l'Inde entraîne une constante augmentation de la part des transports dans le réchauffement global [3].

Historiquement, les constructeurs réagissent aux inquiétudes du public concernant la pollution urbaine en commercialisant des véhicules électriques dès les années 90. Mais le handicap d'un véhicule électrique est une batterie lourde, coûteuse, et de capacité insuffisante ; il semble que ces problèmes n'aient pas encore été surmontés. La résolution de cela est la condition nécessaire à l'émergence d'un véritable marché du véhicule électrique à diffusion massive[29].

Dans ce contexte, la réalisation de véhicules hybrides qui font appel à deux types d'énergie embarquées distincts pour se mouvoir, dont l'un de nature électrique semble être une des réponses au problème. L'expérience montre que seule une politique environnementale coercitive associée éventuellement à une pression des consommateurs peut inciter les constructeurs à proposer des solutions innovantes, en particulier plus écologiques.

Quoi qu'il en soit, les objectifs que se fixent les constructeurs lors de l'élaboration d'un véhicule hybride sont les suivants[29] :

- diminuer tant que possible la consommation de carburant
- respecter les normes actuelles et préparer les futures
- garder un bon agrément de conduite, ou même l'améliorer
- éventuellement proposer des fonctionnalités supplémentaires

Accompagné par l'ADEME [1] dans le cadre du programme véhicule du futur des investissements d'avenir, la société SAFRA, spécialisée dans la carrosserie industrielle, a engagé en 2009 une stratégie de diversification de son activité afin de se lancer dans la construction de bus innovants. Les travaux menés dans le cadre d'un premier projet BUSINOVA sur ce nouveau type de bus à motorisation multi-hybride, ont permis de développer une première version présentée en octobre 2011 lors des rencontres nationales des transports publics de Strasbourg. Il s'agit d'un bus majoritairement électrique avec deux autres sources d'énergie (hydraulique et thermique) utilisées en cas de besoin.

Ce stage effectué au laboratoire LabEx IMOBS3 [2] relève les trois défis :

- Défi 1 – Véhicules et machines intelligents
- Défi 2 – Services et systèmes de mobilité intelligente
- Défi 3 – Procédés de production d'énergie pour la mobilité

Ce stage s'inscrit dans le défi 1 «Véhicules et machines intelligents» s'intéresse aux marchés de niche à très forte valeur ajoutée visant à l'étude et à la réalisation de véhicules et machines spéciaux (systèmes d'aide à la conduite, véhicules autonomes, systèmes manufacturiers agiles et reconfigurables, robotique agricole, ...)

Le présent sujet de stage aborde principalement l'utilisation des nouvelles fonctionnalités innovantes comme les systèmes d'aide à la conduite ACCwSG [3] et de la problématique de la minimisation énergétique avec une prise en compte réaliste des contraintes de sécurité, de confort des passagers et de performances de conduite proposés au conducteur.

1. Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
2. Le Laboratoire d'Excellence Innovative Mobility Smart and Sustainable Solutions
3. Adaptive Cruise Control with Stop&Go

Chapitre 1

L'état de l'art

Une étude scientifique réussie se base sur une bibliographie ciblée, approfondie et une critique des travaux réalisés car c'est une étape indispensable pour la réalisation d'un travail de recherche particulièrement dans un master ou dans une thèse. Elle permet la maîtrise du sujet de recherche par l'acquisition des connaissances solides sur les travaux de recherche réalisés dans ce domaine.

La recherche bibliographique est effectuée suivant ces étapes :

- Collecte de papiers
- Sélection de papiers
- Lecture approfondie
- Classification des approches selon des critères à fixer
- Structuration et organisation
- Rédaction des résumés des articles
- Synthèse

Cette étape cruciale permet au chercheur de tirer des conclusions et des leçons afin de suggérer des solutions au problème traité.

1.1 Les Véhicules Hybrides

1.1.1 Composition

Dans cette partie, je présente les éléments utilisés dans un véhicule électrique, les sources d'énergie et les systèmes de propulsion [28].

Éléments de stockage d'énergie

Les véhicules hybrides utilisent au moins une source d'énergie réversible. Pour stocker l'énergie, le composant le plus couramment utilisé est la batterie. Les batteries au plomb sont parmi les moins chères mais elles sont aussi les plus lourdes et peu performantes. D'autres technologies, ayant généralement un meilleur rendement et sont plus légères peuvent être utilisées, comme par exemple le Nickel Métal Hydrure, le Lithium Ion. Néanmoins, aujourd'hui, leur coût est plus élevé et leur gestion (cycles de charge décharge, estimation de l'état de charge) s'avère plus délicate [6].

D'autres composants ont été envisagés pour le stockage de l'énergie : les supercapacités et les volants d'inertie mais leur usage reste relativement marginal. Il semble que l'association de batteries et de supercapacités soit une solution intéressante d'un point de vue technique mais relativement coûteuse à mettre en oeuvre[2].

Le principe du CAES (Compressed Air Energy Storage) [34] consiste à stocker l'air comprimé et ainsi à décorréler la phase de compression de l'air du reste du processus. Pour ce faire, un système de stockage de ce type est inséré entre le compresseur et la chambre de combustion. En phase de stockage, le compresseur utilise l'énergie mécanique pour comprimer de l'air. Cet air comprimé est ensuite acheminé puis stocké dans un réservoir. En phase de déstockage, l'air comprimé est extrait de son réservoir et envoyé dans la chambre de combustion pour générer en sortie une puissance mécanique [10].

Éléments de traction

Toutes les technologies du moteur thermique sont envisageables. On peut citer, par exemple, les moteurs diesel, essence, GPL [1] ou bien encore au gaz naturel. Chacune de ces technologies a des caractéristiques différentes que ce soit en termes de pollution, de performance, de rendement, d'encombrement, de poids, et de consommation. Les technologies les plus couramment utilisées pour les applications au véhicule hybride sont les moteurs diesel et essence.

1. Gaz de Pétrole Liquéfié

Pour les moteurs électriques, toutes les technologies sont également envisageables : moteur à courant continu, synchrone ou asynchrone, etc. Une des caractéristiques essentielles des véhicules hybrides est le taux d'hybridation, c'est à dire le rapport entre la puissance du moteur thermique et la puissance totale installée dans le véhicule. Lorsque le taux d'hybridation est proche de 1, le moteur électrique a une faible puissance, comme par exemple les alterno-démarreurs qui permettent de démarrer quasi instantanément le moteur thermique. Lorsque le taux d'hybridation est proche de 0.5 le ou les moteurs électriques participent à la propulsion du véhicule et/ou à la recharge des batteries.

Généralement, les moteurs de traction sont intégrés dans le groupe motopropulseur, mais pour certaines applications, les moteurs-roues sont situés dans le moyeu de chaque roue[6].

Transmissions

Les transmissions mécaniques sont celles couramment utilisées dans les véhicules conventionnels : embrayage (utilisé pour accoupler/désaccoupler deux ensembles mécaniques), boîte de vitesses (manuelle ou automatique) ou variateur continu de vitesse, train planétaire (système mécanique à trois arbres dans lequel le régime de l'arbre de sortie est égal à la somme des régimes des arbres d'entrées), différents types de réducteurs (à courroie, chaîne ou engrenages), etc [6].

Les différentes façons d'associer ces composants permettent de définir plusieurs architectures de groupes motopropulseurs.

1.1.2 Architectures de véhicules hybrides

Il existe une grande variété de techniques d'hybridation, qui proposent des solutions intéressantes en termes de consommation et d'émissions polluantes, sous réserve d'être améliorées pour permettre une commercialisation plus large. Plusieurs topologies de véhicules hybrides existent dans la littératures [9, 11, 28], certaines d'eux sont utilisées par les constructeurs automobiles et certaines d'autres sont seulement au niveau études.

Les configurations hybrides séries

La configuration du véhicule hybride série est la configuration du véhicule dans lequel les deux sources d'énergie alimentent un seul groupe motopropulseur qui propulse le véhicule. Dans ce type de véhicule, le moteur thermique est mécaniquement découplé des roues (transmission) et est lié à une génératrice soit sur le même arbre, soit par un assemblage mécanique. La source principale

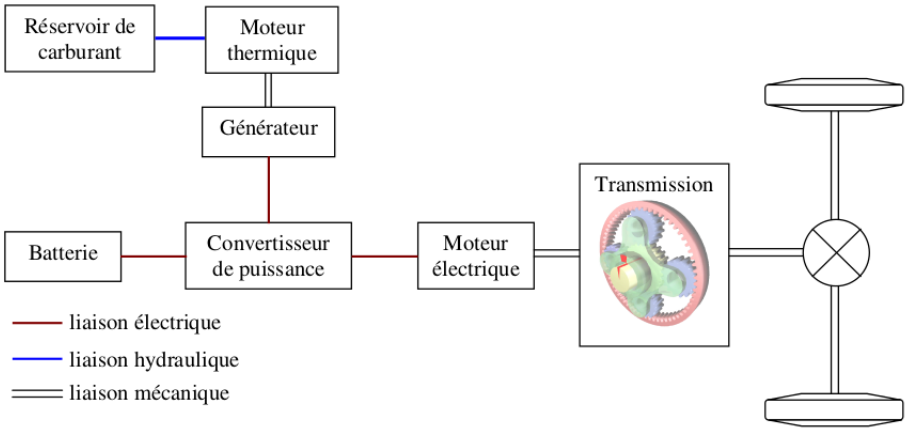


FIGURE 1.1 – Schéma de l'architecture hybride série[11]

d'énergie assure la recharge de la source secondaire d'énergie et l'alimentation de la motorisation électrique. Lors d'une demande d'énergie supplémentaire, pour les reprises lors des dépassements ou dans les côtes par exemple, c'est la source secondaire d'énergie qui fournit ce supplément d'énergie. Cette source peut être un moteur diesel ou essence. L'avantage principal de cette structure vient du découplage total entre le moteur thermique et la transmission mécanique, ce qui permet de faire travailler le moteur dans sa plage de rendement maximal ou d'émissions polluantes minimales. En revanche, l'inconvénient majeur de l'architecture hybride série est son faible rendement global. En effet, l'énergie mécanique produite par le moteur thermique est ensuite transformée en énergie électrique via la génératrice, puis à nouveau transformée en énergie mécanique par le moteur électrique. Ainsi, la cascade de rendement du train moteur est assez défavorable à la réduction de l'énergie consommée.

Les configurations hybrides parallèles

Dans la configuration parallèle les deux moteurs : thermique et électrique, sont liés directement à la transmission et donc aux roues. Ils peuvent participer à la traction du véhicule d'une façon parallèle car les flux énergétiques provenant des deux sources d'énergie arrivent simultanément aux roues. Des liaisons mécaniques entre l'arbre du moteur électrique et l'arbre du moteur thermique via une boite à vitesse permettent d'assurer la transmission de la puissance aux roues. Cette structure a un rendement global meilleur que l'architecture série. La taille du moteur thermique peut être réduite, c'est pour cette architecture que l'on obtient une meilleure économie de carburant, avec la possibilité de faire fonctionner le moteur électrique et le moteur thermique ensemble pour des fortes demandes

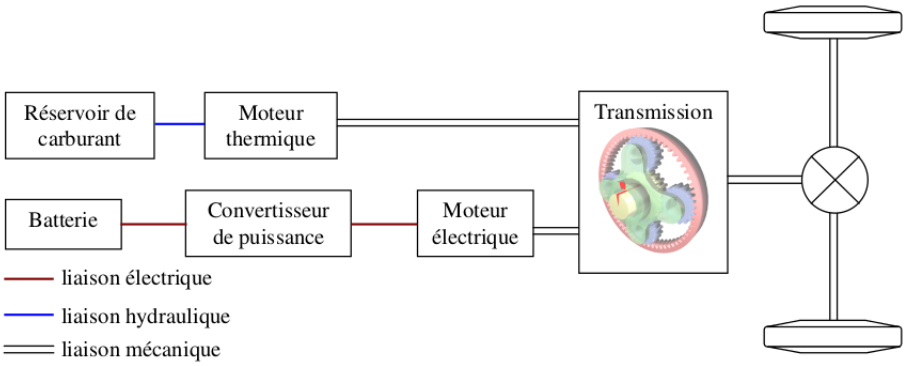


FIGURE 1.2 – Schéma de l'architecture hybride parallèle[11]

de puissance. L'inconvénient majeur est la complexité de l'architecture contrôle-commande et la liaison rigide entre le moteur thermique et les roues.

Les configurations hybrides séries-parallèles

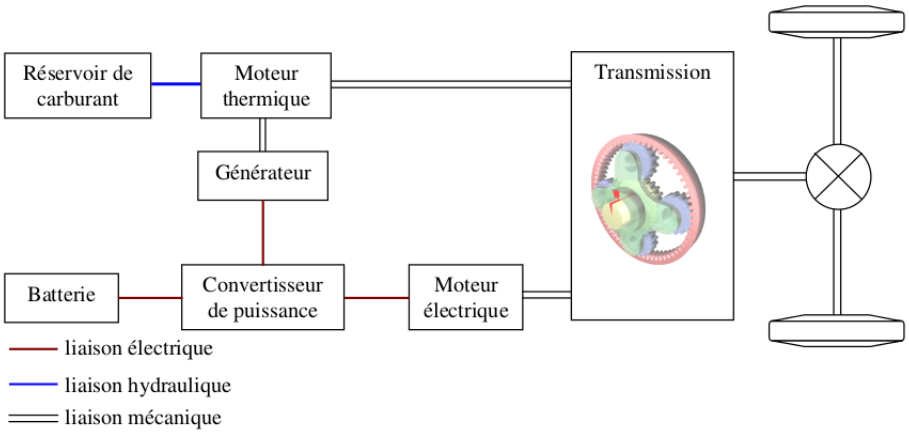


FIGURE 1.3 – Schéma de l'architecture hybride série-parallèle[11]

Cette architecture série-parallèle est appelée aussi « hybride parallèle à dérivation de puissance », elle intègre un moteur électrique, une génératrice et un moteur thermique. Utilisant une gestion efficace des puissances demandées d'un coté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler le régime de fonctionnement avec le maximum de rendement concernant le moteur thermique et de partager la puissance entre les demandes du véhicule (charge) et la recharge de la batterie. Les combinaisons entre les avantages de la configuration série et

les avantages de la configuration parallèle permettent de tirer un bon parti de cette configuration. L'architecture série-parallèle nécessite au moins deux moteurs électriques en plus du moteur thermique ce qui la rend onéreuse et augmente la complexité de la structure contrôle-commande [11].

1.2 Analyse bibliographique sur ACCwSG

1.2.1 Généralités sur ACCwSG

Le système Adaptive Cruise Control with Stop&Go (ACCwSG) se base sur la fusion des deux fonctions, ACC pour les grandes vitesses, et SG pour les faibles vitesses dans une seule entité. L'intégration des deux fonctions facilite la tâche au conducteur pour la plupart des tâches de routines telles que dans l'autoroute ou dans les embouteillages, il permet d'assurer le confort des passagers et d'avoir des meilleures performances énergétiques.

Adaptive Cruise Control (ACC)

Adaptive Cruise Control (ACC), en français (régulateur de vitesse adaptatif ou régulateur de distance), réfère surtout aux voitures intelligentes. De plus en plus, des fonctionnalités automatiques s'ajoutent aux voitures conventionnelles afin d'exécuter des tâches de routines à la places du conducteur, c'est ce qu'on appelle un système d'assistance ou un système d'aide à la conduite.

Le système ACC utilise un capteur radar ou laser monté à l'avant du véhicule. Les objets immobiles ne sont pas pris en compte. Le système mesure la distance par rapport à la surface réfléchissante du véhicule qui précède, et adapte ainsi la vitesse automatiquement afin de garder une distance de sécurité constante avec les véhicules qui le précèdent.

Lorsque l'ACC détecte devant lui un véhicule plus lent, il réduit la vitesse du véhicule et, le cas échéant, actionne les ralentisseurs et les freins pour conserver une distance de sécurité définie.

Lorsque l'ACC détecte devant lui un véhicule plus rapide, il accélère jusqu'à atteindre la vitesse de croisière prédéfinie par le conducteur.

En cas de dépassement, si le système ne détecte pas de véhicule de devant, le système ACC accélère jusqu'à ce que le véhicule roule à la vitesse de croisière et la maintienne constante[24].

Stop&Go (SG)

Le système SG est simplement un système de mise en veille du moteur, dès que la vitesse atteinte est inférieure à 15 km/h (peut varier d'une voiture à l'autre

et d'une technologie à l'autre en générale entre 8 à 20) [20], le moteur se met en veille. Ce système permet l'arrêt et le redémarrage automatique du moteur afin d'économiser le carburant et réduire la pollution essentiellement dans les embouteillages et aux feux tricolores entre autres.

Lorsque la voiture passe en dessous des 15 km/h et que le conducteur appuie sur le frein, le moteur se coupe. Lorsqu'il n'y a plus de pression sur le frein le moteur se rallume rapidement. La coupure du moteur se fera aussi sous certaines conditions puisque par exemple il est néfaste à froid (le but d'un moteur est d'arriver le plus vite possible à température pour sa santé mais aussi pour la consommation). Il faut aussi que la batterie soit suffisamment chargée pour éviter de l'achever .

La réduction de consommation qu'autorise un tel dispositif va, selon les cas, de 3 à 10 % sur un cycle mixte normalisé. Mais le gain peut atteindre 6 à 15 % en parcours urbain, et plus encore en situation réelle si le trafic est chargé. Car la très légère surconsommation provoquée par un démarrage est compensée dès que la durée de coupure dépasse 5 secondes [19].

1.2.2 Les modèles des véhicules automatisés

L'évolution rapide des technologies couplée à une concurrence accrue entre les constructeurs automobiles permet, aujourd'hui, de penser à la commercialisation des véhicules complètement autonomes vers 2020-2030. Ce qui était encore impensable il y a quelques années. Par exemple, le constructeur allemand BMW, envisage de commercialiser sa nouvelle BMW i3 totalement autonome en freinage et en accélération pour des vitesses inférieures à 40 km/h. Le constructeur japonais Nissan prévoit, lui, en 2018 une fonction complètement automatisée de placement du véhicule sur un parking après que le conducteur abandonne son véhicule. En 2020, les constructeurs BMW, Audi, Nissan et General Motors (GM) imaginent un véhicule sans conducteur [36].

Aujourd'hui cependant, la législation de la circulation de ce type de véhicule reste restreinte. Jusqu'à présent, ces véhicules sont autorisés à circuler seulement aux États Unis dans le territoire du Nevada depuis 2011, en Floride depuis avril 2012 et en Californie depuis septembre 2012. En attendant la mondialisation de cette autorisation, l'automatisation du freinage et de l'accélération reste une solution technique partielle de l'automatisation totale du véhicule, via le système ACC. Dans un cadre de conduite en file, cette solution construit une automatisation totale du véhicule du moment que le mouvement latéral est négligé.

Un modèle ACC basé sur les réseaux de neurones et la logique floue a été proposé par [12]. La structure de ce modèle est composée de trois couches. La première couche linéarise la dynamique du véhicule. La deuxième couche consiste à synthétiser une loi de commande en accélération avec des techniques classiques.

La troisième couche forme un contrôleur flou basé sur la description linguistique des données de confort. La structure globale de ce contrôleur est donnée par la figure.

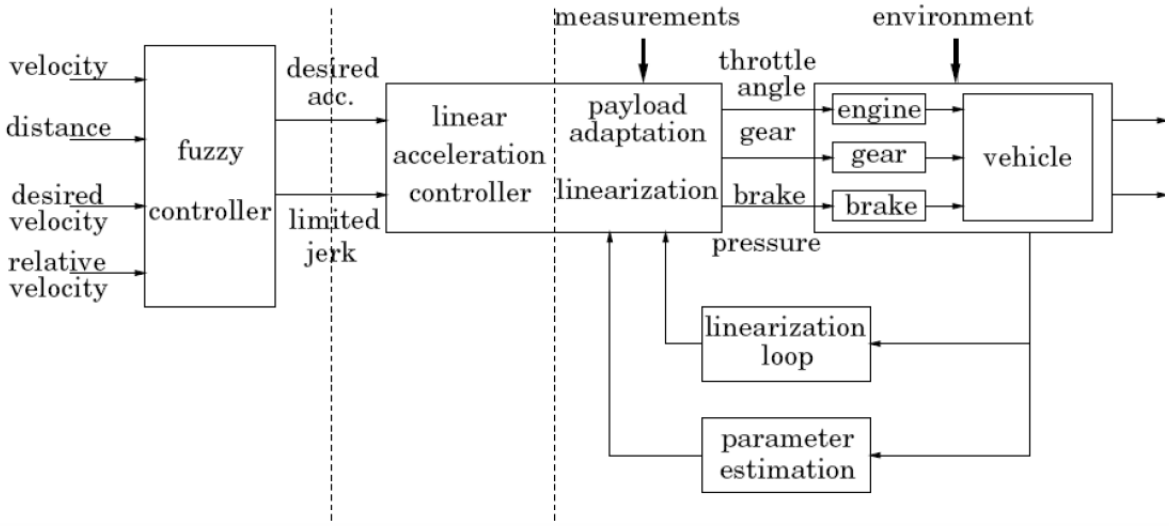


FIGURE 1.4 – Modèle ACC[12]

L'inconvénient majeur de ce modèle est la complexité de l'implémentation dans un simulateur.

Plus récemment, [21] a développé un modèle pour la commande longitudinale par analogie avec la théorie de l'élasticité et de la mécanique des contacts. Sur ce schéma, le véhicule de tête est représenté avec la coordonnée longitudinale x_2. Le véhicule de référence est situé à une distance s du meneur et repéré par la coordonnée ${x^{\mathrm{r}}}_1$. L'accélération du véhicule de référence et celle du meneur sont respectivement dénotées par u et w.

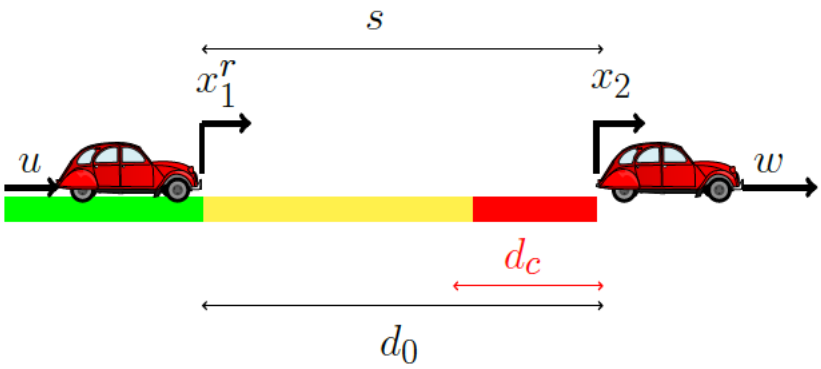


FIGURE 1.5 – Modélisation d'un véhicule automatisé selon Molina [21]

La figure précédente montre trois zones importantes :

- La zone verte $s > d_0$. L'inter-distance s est plus grande que l'inter-distance nominale de sécurité d_0 (d_0 est un paramètre de conception). C'est une région de conduite sûre.
- La zone jaune $d_0 > s > d_c$ où $d_0 - d_c$ correspond à l'inter-distance nécessaire pour éviter une collision dans le cas d'un freinage infini du véhicule meneur.
- La zone rouge $s < d_c$ où d_c correspond à l'inter-distance minimale imposée.

En définissant la dynamique du véhicule de référence comme :

$$\ddot{x}^{\mathrm{r}}{}_1 = u$$

la dynamique de l'inter-distance $s = x_2 - x^{\mathrm{r}}{}_1$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\ddot{s} = \ddot{x}_2 - u$$

L'erreur de l'inter distance est définit comme suit :

$$\tilde{d} = d_0 - s$$

Ainsi, la dynamique de l'erreur prend la forme suivante :

$$\ddot{\tilde{d}} = u - \ddot{x}_2$$

A ce stade, le problème revient alors à trouver une structure appropriée de la commande u telle que toutes les équations de la dynamique de l'erreur, pour un ensemble donné de conditions initiales (au moment où la zone orange est pénétrée), soient conformes aux contraintes de sécurité suivantes :

— action d'éviter la collision : $s \geq d_c$

— vitesse maximale : $\dot{x}^{\mathrm{r}}{}_1 \leq V_{max}$

— capacité de freinage maximale : $\ddot{x}^{\mathrm{r}}{}_1 \geq -B_{max}$

La commande utilisée par [21] est donnée par :

$$u = -c.\tilde{d}^{\mu}\dot{\tilde{d}}$$

où μ exprime la topologie de la surface de contact. La viscosité c est donnée par :

$$c = \frac{27B_{max}^2}{8V_{max}^3}$$

Plusieurs d'autres scientifiques ont traité ce sujet à travers des publications, des articles, et des rapports de masters ou de thèses. Les stratégies développées utilisent deux niveaux de contrôle : contrôle de la boucle externe et de la boucle interne. Différentes méthodes ont été proposées certaines se basent sur, des régulateurs PID [31] avec une approximation simplificatrice, la prédiction d'un modèle non linéaire [32], etc.

Dans la suite on va détailler les différentes approches trouvées.

Deux niveaux de commandes ont été séparément traités par l'article [30] :

— La boucle externe : La commande donnée par l'ACCwSG

— La boucle interne : La commande des actionnaires, soit en accélération ou en freinage

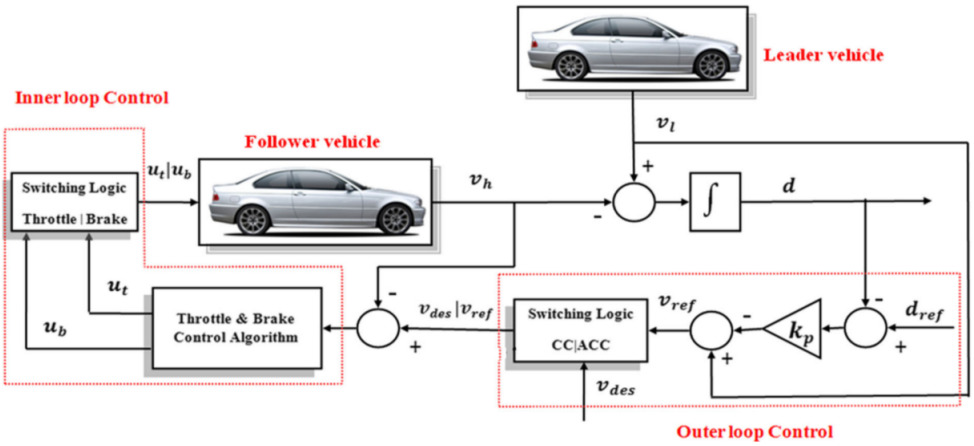


FIGURE 1.6 – Schéma de boucle de commande[30]

La commande de la boucle externe proposée par [30] :

$$V_{ref} = V_{leader} + k_p(d - d_{ref})$$

Toutes les stratégies développées étaient autour de la boucle interne à savoir [30] :

- Contrôleur avec un modèle prédictif non linéaire NMPC [2]
- Algorithme B-BAControl [3]
- Régulateur PI [4] avec un gain variable

La logique de commutation pour les trois stratégies développées est la même indiquée sur le tableau ci-dessous :

	$(v < v_{ref})$	$(v \geq v_{ref})$ & $(v_r < 0)$	$(v \geq v_{ref})$ & $(v_r \geq 0)$
$d \leq d_{ref}$	ACC	ACC	CC
$d > d_{ref}$	CC	CC	CC

FIGURE 1.7 – La régle de commutation entre ACC et CC [30]

Le Contrôleur qui se base sur un modèle prédictif non linéaire NMPC commute entre deux modèles linéaires, approximation du modèle dynamique du moteur et du frein, et utilise un modèle de prédiction du vecteur d'état. On peut dire que la structure de commande est complexe.

L'organigramme suivant résume les étapes essentielles dans l'algorithme NMPC [30] :

2. Nonlinear Model Predective Control
3. Basic BAlance Control
4. Proportionnel Intégral

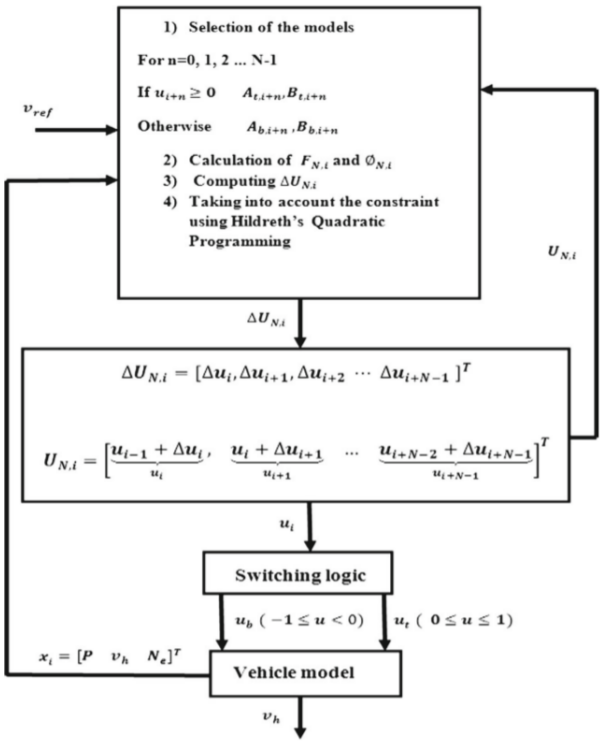


FIGURE 1.8 – L'algorithme du NMPC [30]

La deuxième méthode proposée B-BAControl consiste à simplifier l'équation dynamique du système en une équation du premier ordre

$$\frac{dY}{dt} = f() + g() \cdot u - Ry$$

Une linéarisation de la dérivée.

$$\frac{dY}{dt} = k \cdot (Yref - Y)$$

Ensuite la commande peut récupérer facilement après discrétisations de l'équation du premier ordre. L'ajout du terme Ry dans l'équation du modèle permet de compenser toutes les simplifications, les incertitudes et les défaillances du premier ordre par rapport au modèle dynamique réel du système.

La méthode à base de régulateur PI utilise une approximation du modèle dynamique du véhicule, en linéarisant le modèle non linéaire du véhicule autour de 10 points de fonctionnement pour l'accélération et un modèle linéaire pour le frein chaque modèle possède son régulateur PI propre.

Le détail de cette méthode est traité dans un autre article [31] du même auteur où il va utiliser deux structures différentes mais tous les deux sont à la base de PI.

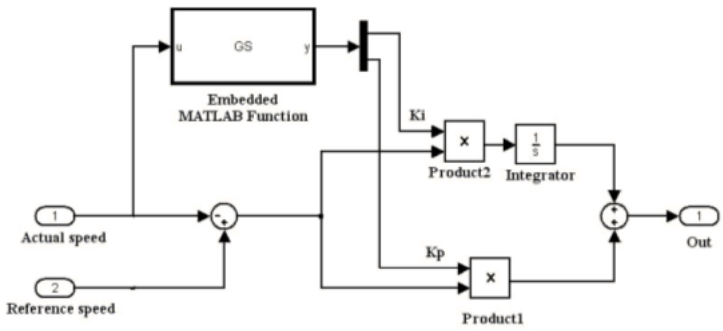


FIGURE 1.9 – Contrôleur PI [30]

La première méthode consiste à linéariser le système autour de dix points de fonctionnement pour avoir dix fonction de transfert différentes l'une les autres, et par la suite chaque fonction de transfert va être régulée avec son propre régulateur.

OP.	Transfer function of the plant
0.1	$\frac{55.4912s + 277.4558}{s^3 + 10.1286s^2 + 25.8155s + 0.8625}$
0.2	$\frac{5.5922s + 27.96128}{s^3 + 7.3297s^2 + 11.6938s + 0.2263}$

FIGURE 1.10 – Les Fonctions de transferts des deux points de fonctionnement [31]

OP.	Transfer function of PI controller (Lin.)	K_p (Lin. &Nonlin.)	K_i (Lin.)	K_i (Nonlin.)
0.1	$0.01 \times \frac{1 + 21s}{s}$	0.21	0.01	0.012
0.2	$0.006 \times \frac{1 + 68s}{s}$	0.41	0.006	0.0065

FIGURE 1.11 – Exemples de régulateur PI proposés pour les deux premiers points de fonctionnement[31]

La deuxième structure proposée est une optimisation quadratique [31], la solution de l'équation de Riccati, permet de déduire directement le gain variable du régulateur PI qui est de la forme

$$K = R^{-1}B^T S$$

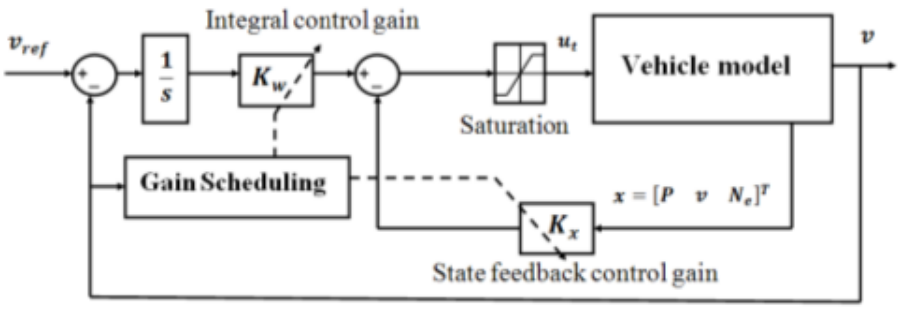


FIGURE 1.12 – Schéma du contrôleur LQ[31]

Un autre contrôleur de l'ACC a été proposé [35] en se basant sur une boucle de régulation simplifiée, sans prendre en compte l'aspect non linéaire de la dynamique du véhicule. Cette fois-ci la vitesse du leader et son accélération est

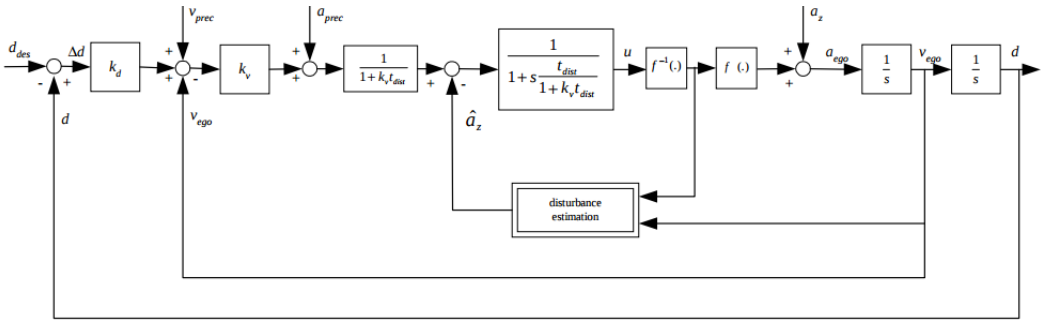


FIGURE 1.13 – Schéma de boucle de régulation de distance ACC [35]

considérée comme une perturbation au système. La distance disérée entre les deux véhicules a été modélisée en premier ordre sous la forme suivante :

$$d_{des} = d_{min} + t_h v$$

En plus la commande de la boucle interne est donnée en accélération, pas en vitesse.

D'autre auteurs ont commencé le sujet du point de départ, par la modélisation complète de la dynamique du véhicule [26] en prenant en compte toutes les hypothèses, ce premier travail a permis de construire la commande de la boucle interne.

En plus, la boucle externe donne en sortie une consigne en accélération ensuite la boucle interne qui contrôle la puissance ou le couple du moteur et le frein prend cette accélération en paramètre pour donner en sortie la vitesse désirée afin de suivre le leader à une distance d_{des}.

La structure globale des deux boucles développées par [26] incluant le bloc ACC et la boucle interne.

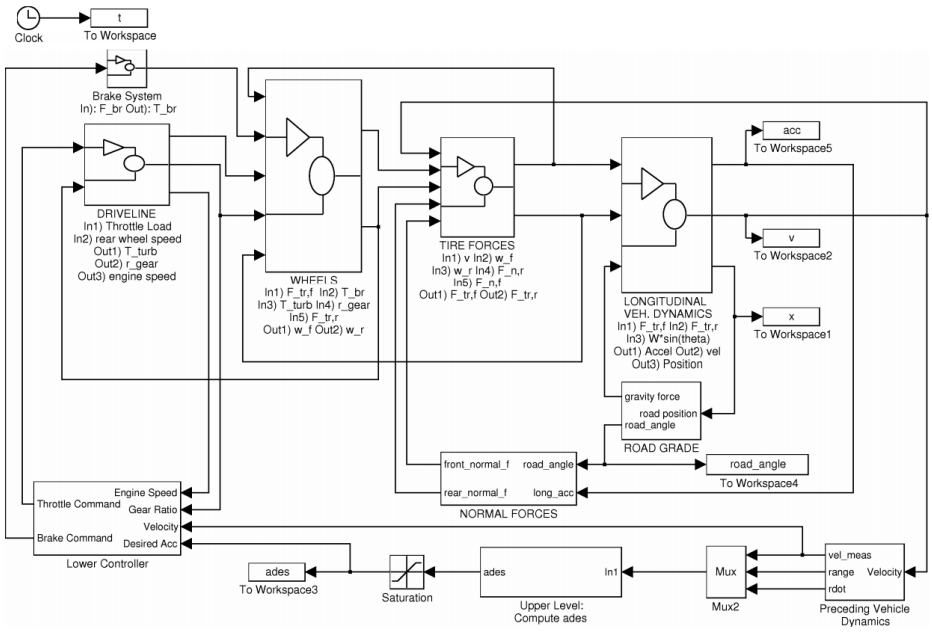


FIGURE 1.14 – Modèle complet de la boucle interne et externe du véhicule[26]

D'autres constructeurs automobiles qui ont été intéressés par le développement d'autres philosophies pour l'ACC tel que Volvo [25], qui a privilégié de donner plus d'importance à l'aspect sécurité en développant plusieurs lois de d_{ref} qui simulent le comportement et la réaction du conducteurs.

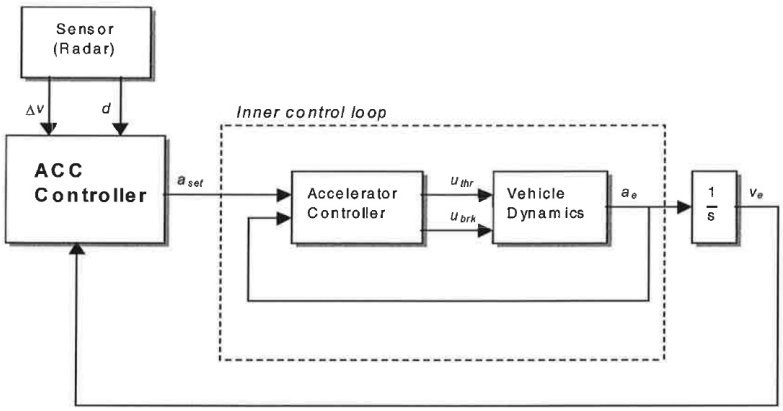


FIGURE 1.15 – Architecture de contrôle [25]

L'auteur commence cet article par la division du problème en deux volets, boucle externe et interne, il a suivi son travail par l'élaboration du modèle dynamique du véhicule, les contrôleurs des actionneurs et régulation la boucle interne. Dans cet article, l'auteur a proposé d'introduire la notion du danger, qui permet de mesurer le degré du danger de chaque situation et le temps qui reste pour réagir avant la collision. Pour cela, il a proposé une décélération minimale qui permet d'éviter la collision avec la voiture de devant sans l'intervention du conducteur.

Dans l'article [37] l'auteur a traité le sujet de l'ACC pour un objectif de suivi total du leader. Son raisonnement commence par l'élaboration du modèle simplifié du véhicule en premier ordre justement pour le développement des calculs or pour la simulation il s'est basé sur un modèle non linéaire. En vu d'assurer le confort des passagers il a imposé des contraintes sur l'accélération $a_{min} < a < a_{max}$ et sur le jerk aussi, pour éviter toute action brutale qui peut déranger les passagers.

Les deux stratégies développées pour l'ACC ne permettent pas d'avoir une vitesse de croisière mais un suivi du leader :

— ACC01 : La commande est basée sur un PID, il est similaire à ce qui était proposé dans la littérature, sa réponse est stable, mais on remarque une propagation de l'oscillation de vitesse du leader au véhicule.

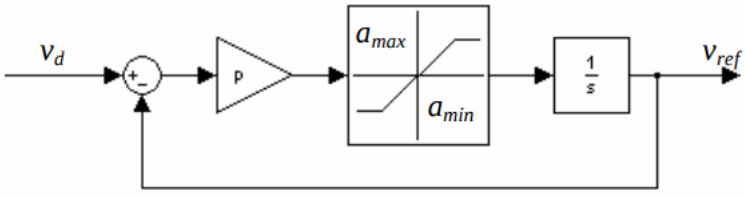


FIGURE 1.16 – Architecture de ACC1 [37]

— ACC02 : Utilisation de la même commande mais avec un filtre non linéaire afin d'atténuer cette oscillation, ce qui donne au système plus de performance dynamique.

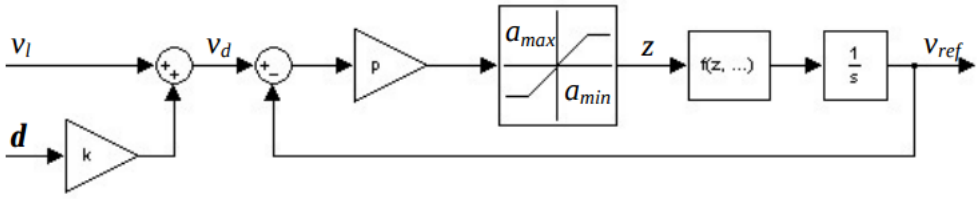


FIGURE 1.17 – Architecture de ACC2 [37]

1.2.3 Les modèles du conducteur

Les travaux de [33] permettent d'isoler les critères pertinents qui ont guidé mon choix du modèle. D'après eux, un modèle « conducteur » doit contenir au moins un des critères suivants :

- **l'anticipation temporelle** : le conducteur prend en compte son temps de réaction dans l'anticipation de la situation du trafic. Dans ce cas, le temps inter-véhiculaire doit être supérieur ou égal à son temps de réaction.
- **l'anticipation spatiale** : le conducteur prend en compte l'état de deux ou plusieurs véhicules en amont en observant leurs situations d'un ou plusieurs véhicules en amont.
- **l'erreur sur l'estimation de l'inter-distance et de la vitesse relative** : le conducteur n'estime pas correctement sa vitesse relative ou son inter-distance par rapport à un autre véhicule dans la file. Pour cela, le modèle doit contenir un terme d'erreur traduisant cette incertitude.

Toutefois, le modèle « conducteur » qui sera retenu, doit répondre aussi à la contrainte de : **le respect des limites réelles en accélération et décélération d'un véhicule**. Par exemple, dans le cas d'un scénario de freinage d'urgence, la décélération des véhicules suiveurs ne doit pas dépasser les limites réelles en décélération. Dans le cas d'un scénario de démarrage, l'accélération du véhicule ne doit pas dépasser ses limites réelles en accélération. Ce scénario consiste à placer des véhicules en file à l'arrêt avec une certaine inter-distance. À un instant donné, ces véhicules commencent à rouler afin d'atteindre une vitesse désirée. Cette situation peut être évoquée à l'attente du feu vert dans un carrefour.

Modèle de Kometani : Collision Avoidance Model (CAM)

Avec la manipulation des équations newtoniennes du mouvement, le modèle CAM a été présenté par [17]. Son but est de déterminer l'inter-distance de sécurité permettant au conducteur d'éviter les collisions lorsque son véhicule meneur

freine de façon imprévisible. Cette inter-distance minimale est donnée par l'expression :

$$\Delta x_n(t-\tau) = \alpha v_{n+1}^2(t-\tau) + \beta_2 v_n^2(t) + \beta_1 v_n(t) + \beta_0$$

où τ le temps de réaction du conducteur en secondes, α et β_2 représentent, respectivement, l'inverse de la capacité maximale de décélération des véhicules $n+1$ et n. Les constantes de calibration β_0 et β_1 représentent, respectivement, une distance et l'inverse du temps de réaction (la sensibilité du conducteur).

L'avantage de ce modèle est la focalisation sur la distance de sécurité qui est un critère très important dans l'étude de la sécurité du trafic. Par contre, son inconvénient réside dans l'absence de la prise en compte du critère de l'anticipation spatiale.

Parmi les contributions de [26] est le modèle proposé pour le conducteur afin de respecter la distance entre les deux véhicules et éviter toute collision, c'est un modèle propre à BMW.

$$d_{des} = d_0 + t_h v^{0.48}$$

Les coefficients de cette formule sont calculés de manière à prendre en considération les réactions du conducteur face à la diminution de la distance, et aussi l'évitement des collisions.

La réflexion de [37] pour assurer le confort a aboutit à définir un modèle conducteur en deuxième ordre de la vitesse du véhicule qui assure une distance de sécurité optimale entre véhicule et qui évite la collision. Ce modèle se base sur la connaissance des paramètres temporelles du système et les paramètres dynamiques du véhicule tels que l'accélération et la décélération maximales autorisées.

$$d_{ref} = d_0 + T_h v + h^* v^2$$

T_h traduit les retards, de perception, des actionnaires, de la réaction du conducteur, h^* dépend essentiellement de la capacité de freinage du véhicule et de son leader.

Cette expression flexible, prend en compte à la fois le retard de réaction du conducteur, des appareils de détection et des actionneurs, et le confort des passagers.

Le terme T_h peut être ajusté pour traduire le retard total du système

$$T_h = t_c + t_{capt} + t_{act}$$

Avec t_c retard de réaction du conducteur, t_{capt} retard des éléments de perception, t_{act} retard de la réponse des actionneurs.

Le terme h^* va être calculé en se basant sur les contraintes imposées sur l'accélération et la décélération maximales de la manière suivante :

$$h^* = \frac{1}{2} \cdot (\frac{1}{a_l} - \frac{1}{a_f})$$

Avec $a_l < 0$ la décélération maximale du leader, $a_f < 0$ la décélération maximale du bus. Une remarque importante, Si $a_l = a_f$, donc $h^* = 0$. Pour assurer le confort et la sécurité, il faut que $a_l < a_f$, afin de prendre en compte les pires cas, des véhicules avec des grandes décélérations comme les voitures sportives ou les poids lourds.

1.3 Les stratégies de gestion d'énergie pour les véhicules hybrides

1.3.1 Les techniques d'optimisation énergétiques

Les méthodes d'optimisation présentées dans la littérature peuvent se classer en deux catégories :

- Les méthodes exactes de commande optimale, qui permettent d'obtenir les commandes atteignant l'optimum global, au prix d'une complexité, d'un temps de calcul, et d'un encombrement mémoire variable. Parmi celles-ci, deux grandes catégories se dégagent :
  - celles utilisant le Principe du Maximum de Pontryaguine (PMP), permettant de calculer des commandes en boucle ouverte, avec relativement peu de moyens de calculs.
  - celles utilisant le principe de la Programmation Dynamique (DP), permettant de calculer des commandes en boucle fermée, mais souvent avec des moyens de calculs et d'encombrement mémoire prohibitifs. Cela est réalisé via la résolution de l'équation de Hamilton-Bellman-Jacobi (HBJ) [29].
- Un certain nombre de méthodes heuristiques, demandant un encombrement mémoire variable, mais presque toujours présentant un temps de calcul prohibitif. De plus, on connaît les difficultés que peut poser le réglage des méthodes heuristiques afin d'obtenir une solution satisfaisante au problème posé :
  - les méthodes de type recuit simulé ont été testées par [6]. Les solutions fournies sont des optimum locaux, néanmoins proches de l'optimum global. Il fait état de temps de calcul long et de réglage délicat des paramètres

- d'autres approches sont envisageables, par exemple les algorithmes génétiques. Dans ce cas, il faut formuler le problème en termes de génétique (définition de la population, des enfants, des critères d'hérédité, etc.) ce qui n'est pas toujours intuitif. De plus, cela nécessite parfois beaucoup de réglages. Aussi la méthode des colonies de fourmis (basée sur le principe des phéromones), qui est d'après [29] s'avère trop gourmande en encombrement mémoire.

Cette partie est dédiée à la présentation de de certaines stratégies d'optimisation énergétique qui se basent sur les méthodes déja citées.

Sur la base d'un modèle dynamique, [18] propose deux approches de contrôle différentes qui utilisent la Programmation Dynamique (DP). Les deux approches déterminent les demandes de puissance du moteur en fonction de l'efficacité globale du véhicule. La principale différence réside dans le fait que la première approche Stochastic Dynamic Programming (SDP) suppose une demande de puissance stochastique et l'optimisation est basée sur les performances attendues sur un horizon infini. En revanche, l'approche ECMS [5] utilise un facteur de conversion pour estimer la consommation de carburant équivalente encourue lorsque l'énergie électrique est utilisée. La consommation totale de carburant est alors minimisée en fonction des conditions instantanées de conduite, avec une fonction de pondération supplémentaire pour assurer le maintien de la charge de la batterie. Les deux stratégies ont été étudiées sur les véhicules hybrides parallèles et série et sont modifiées pour les hybrides à dérivation de puissance traités dans cet article. La contrainte cinématique imposée par l'engrenage planétaire a été considérée comme un facteur majeur à prendre en compte dans le développement des nouveaux algorithmes SDP et ECMS. Les deux stratégies de contrôle ont été jugées presque optimales, ce qui démontre une excellente économie de carburant dans les cycles de conduite standard. Les auteurs de [18] a constaté que l'algorithme ECMS produisait une commande de puissance du moteur "plus rapide" dans sa forme non modifiée, une approche simple de limitation de débit ou de filtrage peut évidemment être utilisée pour résoudre ce problème. Les deux méthodes de conception atteignent d'excellents résultats d'économie de carburant et semblent être d'excellents algorithmes de contrôle.

Aussi l'article [1], utilise la technique de la Programmation Dynamique (DP) pour générer simultanément le profil de vitesse optimal et le partage de puissance optimal entre le moteur thermique et électrique, assurant l'économie de carburant, et en respectant le confort des passagers. L'objectif de cette optimisation est principalement de réduire la consommation d'énergie électrique et thermique du HEV [6] étudié tout en assurant un mouvement fluide du bus et le confort des pas-

5. Equivalent Consumption Minimization Strategy
6. Hybrid Electric Vehicle

sagers. Il est supposé dans cette première proposition que le profil actuel de la route (pente, géométrie, etc.) et le trajet général du bus (temps aux stations) sont connus à l'avance. Ensuite, la stratégie optimale hors ligne a été adaptée afin de traiter en ligne un profil routier actuel et une demande de vitesse du conducteur. La stratégie en ligne sous-optimale proposée utilise principalement une base de données d'un profil de vitesse approprié et un partage optimal de puissance obtenue hors ligne avec DP. Une méthode d'interpolation multidimensionnelle est faite afin de faire face aux situations de bus actuelles.

L'article [16] a proposé un algorithme du Principe du Maximum de Pontryaguine (PMP) pour contrôler les véhicules hybrides. L'algorithme PMP peut être utilisé pour un contrôle optimal en temps réel car il est basé sur la minimisation instantanée de l'hamiltonien. Le contrôle optimal basé sur PMP peut être un contrôle global optimal sous certaines hypothèses. Avec l'hypothèse, du multiplicateur de Lagrange de PMP constant, cela simplifie le problème de contrôle optimal. Les résultats optimaux de contrôle de PMP sont presque les mêmes que les résultats de contrôle globalement optimal. Avec cette hypothèse, les résultats sont encore excellents par rapport aux résultats globaux optimaux. Dans cet article, la méthode de PMP est utile en tant que solution optimale pour les problèmes HEV. Cependant, l'étude est en cours pour déterminer la corrélation entre le cycle de conduite et le multiplicateur de Lagrange à partir d'un certain nombre de résultats optimaux.

Cet article [16] a démontré deux faits, qui est sa contribution la plus importante.

- le multiplicateur de Lagrange optimal peut être un paramètre simple, pas une fonction variable dans le temps
- un contrôle optimal basé sur PMP avec un multiplicateur de Lagrange constant garantit quasiment l'optimalité ou l'optimalité globale dans certains cas.

L'article [22] démontre l'application des algorithmes génétiques pour l'optimisation de la stratégie de contrôle énergétique pour un HEV [7] parallèle. Le problème d'optimisation est formulé pour une stratégie de contrôle d'assistance électrique afin de minimiser la consommation de carburant et les émissions tout en maintenant les exigences de performance du véhicule. Une nouvelle approche est également utilisée pour les paramètres de contrôle de la batterie afin de réduire le nombre de variables de décision. Enfin, l'optimisation est effectuée sur trois cycles de conduite et l'effet du modèle de conduite sur l'optimisation de la stratégie de contrôle HEV est étudié. L'optimisation est également effectuée pour différentes fonctions objectives. Les résultats montrent l'impact du modèle de conduite sur les paramètres de contrôle optimal HEV. En outre, les résultats de la simulation révèlent que les paramètres optimaux ne sont pas identiques pour différentes fonctions objectives, ce qui implique que la minimisation de la consommation de carburant n'est pas nécessairement associée à l'optimisation des émissions.

Dans l'article [14], l'application de Adaptive Simulated Annealing Genetic Algorithm (ASAGA) est décrite pour l'optimisation des tailles de composants clés dans un véhicule hydraulique hybride. Le problème d'optimisation est formulé pour répondre à la consommation minimale de carburant tout en maintenant les performances du véhicule. Dans la fonction objective de l'optimisation, tous les facteurs de pondération peuvent être définis avec des valeurs différentes selon différentes exigences. Les combinaisons du modèle théorique et de la méthode du modèle numérique sont introduites pour construire les modèles de composants du groupe motopropulseur. Enfin, l'optimisation s'effectue sous différentes fonctions objectives. Les résultats montrent que la méthode proposée distingue efficacement la valeur optimale des paramètres, des composants clés du véhicule hydraulique hybride, et améliore les performances et la consommation du carburant, ce qui fournit à la méthode un grand avantage d'être pratique et réalisable pour le véhicule hydraulique hybride.

1.3.2 Les méthodes d'optimisation stochastiques

L'utilisation des méthodes d'optimisations stochastiques reçoit dans ses dernières années une attention croissante de la part des chercheurs. De nombreuses problématiques telles que la génération de trajets optimaux et la gestion des flux énergétiques qui peuvent être résolues par les outils d'optimisations traditionnels, se voient migrer vers ces nouvelles méthodes qui ont montré leurs robustesse.

7. Hybrid Electric Vehicle

A ce titre, certains auteurs proposent une méthode d'optimisation, appelée programmation dynamique stochastique [23], permettant de résoudre un problème d'optimisation avec contraintes sous incertitudes. Cet outil consiste en un algorithme dont l'esprit est similaire à celui de la programmation dynamique classique.

En premier lieu il s'agit de construire une chaîne de Markov dont chaque état est représenté par une valeur possible de la vitesse du véhicule et de la puissance demandée par l'utilisateur P_{req}. A un instant quelconque t_i, l'état de la chaîne de Markov est donné par l'équation

$$X(t_i) = \{P_{req}(t_i), v(t_i)\}$$

La transition d'un état à un autre représente un incrément de temps. La vitesse à l'instant t_{i+1} est entièrement déterminée par la vitesse et la puissance requise à l'instant t_i. En revanche la puissance requise à l'instant t_{i+1} est estimée à partir d'un ensemble de probabilité reliant $P_{req}(t_i)$ et $v(t_i)$ à $P_{req}(t_i + 1)$. L'ensemble de probabilité est donné par l'équation

$$p_{jkl} = P(P_{req}(t_i + 1) = j | P_{req}(t_i) = k, v(t_i) = l)$$

La puissance requise et la vitesse étant respectivement égales à k et l à l'instant t_i, la puissance requise à l'instant t_{i+1} aura une probabilité p_{jkl} d'être égale à j. Ces probabilités sont calculées à partir de l'analyse d'une collection de cycles de vitesse normalisés.

Le but de l'algorithme est de définir les valeurs optimales des variables de contrôle libres. Ce type de problème se résoud de manière itérative et l'optimum est trouvé lorsque l'algorithme de résolution a convergé. Il résulte de cette optimisation une carte donnant une commande unique u^* donnant les valeurs optimales des variables de contrôle en fonction de P_{req}, et v. Cette carte est ensuite utilisée en temps réel par le système de gestion d'énergie.

L'article [23] propose l'utilisation de cette méthode pour la recherche des couples électriques et mécaniques optimaux minimisant le coût (en dollars) de l'énergie dépensée globalement (coût de l'énergie électrique et coût du carburant) plutôt que la quantité de carburant. Ainsi ils observent que si le kWh électrique devient trop cher par rapport au kWh de carburant, alors il est préférable de ne jamais décharger complètement la batterie.

La formulation du problème possède l'avantage de fournir une stratégie de contrôle dépendant seulement de l'état du véhicule à l'instant actuel et invariante par rapport au temps. La stratégie obtenue est donc facilement utilisable en temps réel et ne nécessite aucune information à priori sur le cycle de vitesse. Néanmoins le contrôleur offre une solution optimale au sens moyen et non au sens strict. L'idée est d'offrir de « bonnes » performances (mais non-optimales)

sur une grande variété de cycle de vitesse plutôt que d'obtenir des performances quasi-optimales sur un seul cycle de vitesse[7].

L'article [13] introduit une méthode d'optimisation en temps réel qui combine la méthode de commande optimale Pontryagin's Minimum Principle (PMP) avec les chaînes de Markov qui traduisent la composante stochastique. Le principe est de construire la matrice de transition à partir des données réelles extraites des cycles de conduites normalisés UDDS en calculant de manière statistique le nombre de transition entre un état i et un état j.

Le modèle de chaîne de Markov proposé prédit la demande de puissance pour le cycle de conduite. Le processus d'optimisation donne une solution sous-optimal qui va être ajoutée à une quantité pondérée par la probabilité de transition optimale qui corrigera la différence entre la solution sous-optimale et l'optimum global.

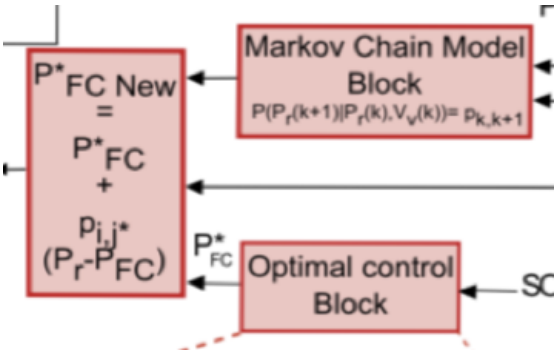


FIGURE 1.18 – Commande optimale combinée aux chaînes de markov[13]

L'importance du bloc de chaîne de markov réside dans la prédiction des futures séquences de puissance demandée, afin de bien gérer les fortes demandes et les demandes brusques de puissance. Cette technique a été appréciée car elle assiste la méthode d'optimisation utilisée, en plus le bloc de chaîne de markov a l'avantage d'être utilisé avec n'importe qu'elle méthode d'optimisation et donne de meilleurs résultats énergétiques.

Une autre méthode d'optimisation stochastique connue par son nom en anglais Stochastic Model Predictif Control (SMPC) appartient à une famille de stratégies d'optimisation numérique pour le contrôle des systèmes stochastiques soumis à des contraintes sur les variables états et les entrées du système. Dans cette approche, les performances futures sont quantifiées en utilisant une fonction de coût évaluée selon l'état prévu et les entrées. Cela conduit à un problème stochastique de contrôle optimal, qui est résolu numériquement pour déterminer une séquence optimale de commande en boucle ouverte ou, une séquence

de lois de contrôle de rétroaction. Dans MPC [8], seul le premier élément de cette séquence optimale est appliqué au système contrôlé et le problème de contrôle optimal est résolu à nouveau lors du prochain instant d'échantillonnage sur la base d'informations mises à jour sur l'état du système. Le caractère numérique de l'approche le rend applicable à des systèmes à dynamique non linéaire et à des contraintes sur les états et les entrées, tandis que le calcul répété des trajectoires prédites optimales compense les effets de la modélisation.

L'article [27] illustre l'utilisation du SMPC pour la gestion de l'alimentation dans les véhicules hybrides ayant deux ou plusieurs sources d'énergies distinctes pour la propulsion. Leur architecture complexe du groupe motopropulseur nécessite la coordination de tous les sous-systèmes pour atteindre les performances ciblées en termes de la consommation de carburant, de la durabilité, de la durée de vie des composants, de l'échappement Émissions. Cet article propose une approche stochastique pour la gestion de l'alimentation. L'étude est faite sur un véhicule électrique hybride série, qui combine un moteur à combustion interne et un moteur électrique. La chaîne de traction est modélisée par un système linéaire, le système est modélisé par le schéma suivant :

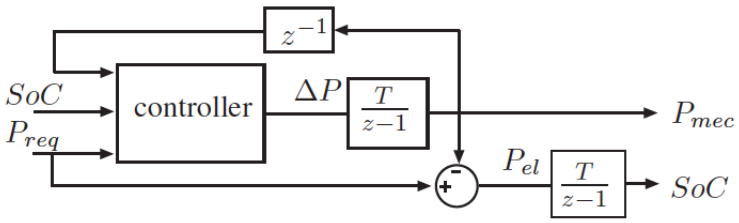


FIGURE 1.19 – Schéma du modèle de la chaîne de traction[27]

La demande de puissance du pilote est modélisée par une chaîne de Markov estimée sur plusieurs cycles de conduite et utilisée pour générer des scénarios dans SMPC.

$$p_{ij} = P(P_{req}(k+1) = j | P_{req}(k) = i)$$

Le critère d'optimisation est quadratique, pondéré par les probabilités de transition entre états, il est formulé de la manière suivante :

$$\min_{\{\Delta P_i\}} \quad \sum \pi_i (x_i - x_{ref})' \begin{bmatrix} Q_{SoC} & 0 \\ 0 & \phi Q_J \end{bmatrix} (x_i - x_{ref}) + \sum \pi_j Q_P \Delta P_j^2$$

8. Model Predective Control

Les résultats de la simulation sur un cycle de conduite standard démontre une efficacité de 13,5 % de l'approche stochastique proposée par rapport à l'approche déterministe.

Un MPC stochastique avec une approche d'apprentissage (SMPCL) pour une application dans l'automobile [8], a été proposée. Le comportement du conducteur est appris en ligne sous la forme de chaîne de Markov, qui sont ensuite utilisées dans le contrôle prédictif du modèle stochastique basé sur un scénario. Ainsi, le système en boucle fermée s'adapte aux changements de style de conduite et aux différentes conditions de circulation.

Le SMPCL est appliqué à la gestion de l'énergie d'un véhicule hybride, où le modèle de pilote prédit la demande de puissance future qui se rapporte au cycle de conduite et au style de conduite. Grâce à l'exploitation du modèle avec apprentissage du comportement du conducteur, l'approche proposée est plus performante que celle du MPC conventionnel et montre une performance proche de MPC avec une connaissance approfondie de la demande de puissance future du pilote dans les cycles de conduite standard et réel.

Dans [15], une stratégie SMPC est proposée et la performance du contrôleur est évaluée sur les cycles de conduite standards. Comparé à [27], un modèle basé sur des couples est utilisé au lieu de celui de puissance. En outre, la vitesse du véhicule est considérée variable sur l'horizon de prédiction. De cette façon, les limites réelles de la machine en termes de couples minimum et maximum qui dépendent de la vitesse de rotation peuvent être prises en considération sur l'horizon de prédiction dans le schéma de contrôle.

Le comportement futur du conducteur est représenté par une chaîne de Markov avec un nombre fini d'états. Ainsi, la demande de couple du conducteur a été sélectionnée comme un état de la chaîne de Markov. L'identification d'une chaîne de Markov nécessite l'estimation des probabilités de transition qui sont généralement déterminées en fonction d'une analyse de fréquence. Contrairement à [27] et [8], où l'estimation du maximum de vraisemblance est utilisée, dans [15] une technique plus générale qui utilise le degré d'appartenance à chaque état [5] , est utilisée pour mener le processus d'apprentissage.

Chapitre 2

Implémentation et simulation de ACCwSG

2.1 La structure de contrôle

Dans cette partie on va détailler les étapes suivies pour l'élaboration du ACCwSG, allant de la description du modèle dynamique du bus jusqu'à l'implémentation de ce dernier avec ACCwSG [1] . Notre approche, inspirée de l'état de l'art, consiste à séparer le contrôleur bas niveau de commande du moteur, du contrôleur haut niveau de ACCwSG. Le contrôleur haut niveau va donner une vitesse de consigne et le contrôleur bas niveau essayera d'exécuter cet ordre pour converger vers la valeur voulue. Pour cela, le modèle dynamique du bus sera la base de la construction du contrôleur bas niveau.

2.1.1 Le modèle dynamique du bus

Cette partie est consacrée pour décrire l'équation dynamique du bus afin d'avoir un comportement réaliste du bus et de valider la stratégie du contrôle de ACCwSG qui sera proposée par la suite.

1. Adaptive Cruise Control with Stop&Go

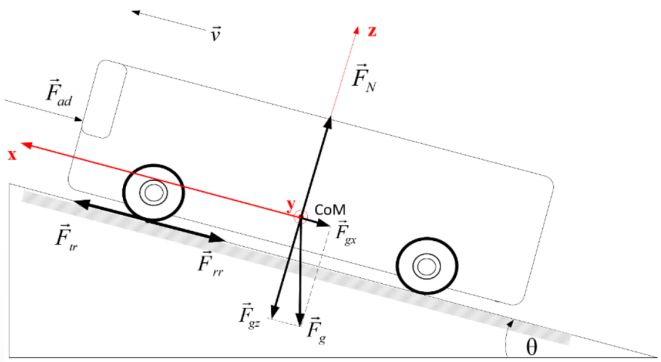


FIGURE 2.1 – Forces appliquées sur le bus[1]

En appliquant au bus la deuxième loi de Newton au point CoM, centre de gravité du bus, et point d'application des forces externes indiquées sur la figure ci-dessus :

$$\vec{F}_{tr} - \vec{F}_{rr} - \vec{F}_{ad} - \vec{F}_g - \vec{F}_{brake} = (M + M_{eq})\vec{a}$$

avec :

- F_{tr} la force de traction est définie par :

$$F_{tr} = \frac{i_g \eta_{pt} T_{pt}}{r}$$

  avec i_g le rapport de transmission, η_{pt} le rendement globale de la chaîne de transmission, T_{pt} le couple de sortie de la boite à vitesse, r le rayon de la roue.

- F_{rr} la force de roulement définie par :

$$F_{rr} = \mu_{rr} F_N sign(v)$$

  avec μ_{rr} le coefficient de résistance au roulement, $F_N = Mg \cdot cos(\theta)$ la force normale dû au contact pneu chaussée, g l'accélération gravitationnelle, v la vitesse du bus, et θ l'angle de pente.

- F_{ad} la force aérodynamique, Il s'agit de la force exercée par l'air selon l'axe du mouvement sur le véhicule, Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{ad} = \frac{1}{2}\rho A C_d (v + v_{wind})$$

  avec ρ la densité de l'air, A la surface frontale du bus, C_d le coefficient de pénétration dans l'air ou le coefficient de traînée, v_{wind} vitesse du vent.

- F_g la force de gravité du véhicule nommée aussi la force de résistante de montée en côte, elle définie de la manière suivante :

$$F_g = Mg \cdot sin(\theta)$$

- F_{brake} la force de freinage appliquée au bus est calculée de la manière suivante :

$$F_{brake} = \frac{T_{brake}}{r}$$

  avec T_{brake} le couple de freinage
- M_{eq} traduit la masse équivalente au moment d'inertie introduit par les éléments rotatifs, elle s'écrit sous la forme :

$$M_{eq} = \frac{i_g \eta_{pt} J_{rot}}{r^2}$$

  avec i_g le rapport de transmission, η_{pt} le rendement globale de la chaîne de transmission, J_{rot} le moment d'inertie de tous les éléments rotatifs de la chaîne de transmission et r le rayon de la roue.
- a l'accélération du bus

2.1.2 Contrôle de la boucle interne

Cette partie va juste donner une vue générale sur l'architecture de la boucle interne, c'est à dire le contrôleur bas niveau du bus. Ce dernier reçoit en entrée une vitesse de consigne de ACCwSG, ensuite génère le couple nécessaire pour atteindre cette vitesse, en décomposant le besoin en couple entre le moteur électrique et le moteur hydraulique. Ce schéma globale de la boucle interne expliquera son fonctionnement :

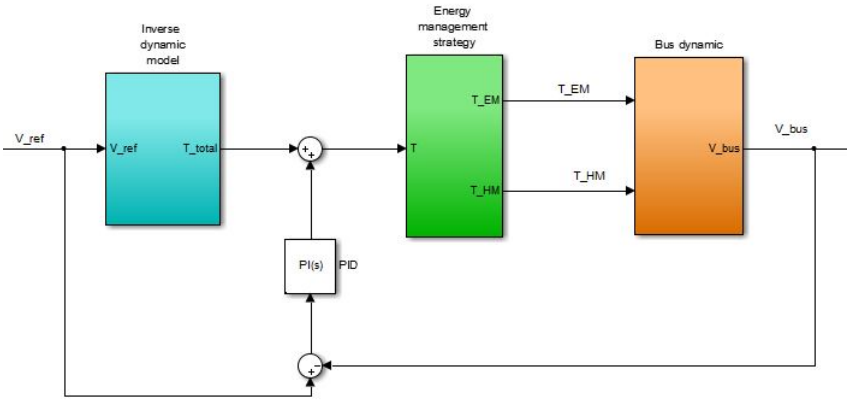


FIGURE 2.2 – Architecture globale de la boucle interne

L'architecture se compose de trois parties :

- Le modèle dynamique inverse : cherche à trouvé la valeur de couple totale qui va équilibrer les forces des actions mécaniques extérieures dans l'équation dynamique du bus.
- Le bloc d'optimisation énergétique : permet de trouver les valeurs optimales pour les couple électrique et hydraulique afin d'optimiser la consommation totale du bus. Ce bloc sera l'objet d'une étude détaillée dans la deuxième parie de ce rapport afin de trouver une stratégie d'optimisation énergétique, basée sur des méthodes stochastiques.
- Le modèle dynamique du bus : traduit les couples en une accélération ensuite en vitesse pour propulser le bus. Ce bloc à été détaillé dans le paragraphe précèdent, et il a été implémenté sous Matlab.

2.1.3 Contrôle de la boucle externe

Modélisation du conducteur

Une formulation du problème de modélisation du conducteur se fait à travers le terme d_{ref}. On a opté pour la formule utilisé dans [37], donc pour nous d_{ref} va être définie de la manière suivante :

$$d_{ref} = d_0 + T_h v + h^* v^2$$

La formule de d_{ref} est la suivante :

$$d_{ref} = 10 + 0.6v + 0.4v^2$$

Le calcul de la distance entre véhicule est basée sur les données du tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Temps de réaction du conducteur t_c	0.4s
Retard des capteurs de perceptions t_{capt}	0.1s
Retard des actionneurs t_{act}	0.1s
Décélération du bus a_f	-1.25 m/s^2
Décélération du leader a_l	-∞ m/s^2

TABLE 2.1 – Paramètres utilisés pour le calcul de la distance entre véhicules

La décélération du leader est supposée infini seulement dans la simulation, car j'ai fait des scénarios avec des grandes valeurs de décélérations, mais réellement, elle est limitée. Dans un contexte réel ce paramètre peut être adapté pour

simuler les cas plus réalistes. Cette formule de distance entre véhicule donne plus de confort et de sécurité en cas de manoeuvres du leader et évite toute propagation des oscillations de vitesse du leader à la vitesse consigne donnée par ACCwSG.

L'algorithme proposé pour ACCwSG

Le système ACCwSG se divise en deux cas :

- $d < d_{ref}$: A partir de $d = d_{ref}$ la situation commence à devenir dangereuse, puisque les deux voiture se rapproche l'une de l'autre.
- $d > d_{ref}$: Les voitures sont à une bonne distance l'un de l'autre, donc le bus se stabilise sur la vitesse de croisière V_{cc} vitesse de consigne du conducteur.

Condition	$d < d_{ref}$	$d > d_{ref}$
Vitesse de consigne	V_{ref}	V_{cc}
Mode	ACC	CC

TABLE 2.2 – La règle de commutation entre les deux mode ACC et CC

La commutation entre les deux modes est instantanée, afin d'éviter les sauts, on a introduit un filtre pass-bas qui va donner en sortie une consigne exponentielle au lieu d'une consigne en échelon, ce qui donne au passager un sentiment de confort car on va éviter toute accélération brutale.

Dans cet algorithme, on a deux consignes de vitesses, V_{cc} qui sera une consigne externe entrée par le conducteur, et la consigne du système ACC appelée V_{ref}. Dans le mode ACC, cette consigne va dépendre essentiellement de la vitesse du leader et de la distance entre les deux véhicules. L'expression de V_{ref} est donnée par la formule suivante :

$$V_{ref} = V_{leader} + k_p(d - d_{ref}) - \dot{d}_{ref}$$

Cette formule contient le terme d_{ref}, son expression est donnée dans le paragraphe précèdent. Après dérivation on obtient l'expression suivante :

$$\dot{d}_{ref} = 0.6\dot{v} + 0.46\dot{v}v = (0.6 + 0.46v)a$$

Avec a accélération du bus et v sa vitesse.

L'implémentation de cette loi en simulation nous oblige d'utiliser le bloc de dérivation de Matlab pour avoir l'accélération, dans certaines cas, l'oscillation de l'accélération conduit à une oscillation de la vitesse consigne se qui n'est pas voulu.

La démonstration de convergence de la loi de commande est cruciale afin de montrer la stabilité du programme. Pour démontrer la convergence de cette loi, on va utiliser la théorie de Lyapunov.

On pose la fonction candidate : $e = \frac{1}{2}(d - d_{ref})^2$

La dérivation de e par rapport au temps :

$$\begin{aligned}
\dot{e} &= 2 \cdot \tfrac{1}{2} \cdot (\dot{d} - \dot{d}_{ref})(d - d_{ref}) \\
&= (V_{leader} - V_{ref} - \dot{d}_{ref})(d - d_{ref}) \\
&= -k_p(d - d_{ref})(d - d_{ref}) \\
&= -k_p(d - d_{ref})^2 < 0
\end{aligned}$$

D'après Lyapunov, cette loi converge asymptotiquement vers 0.

Cette loi converge rapidement vers d_{ref}, et lorsque d devient égale à d_{ref}, le système oscille autour de d_{ref} ce qui engendre aussi une oscillation de la vitesse de consigne. Afin de contourner ces oscillation de consigne, on a introduit un comparateur à hysteresis qui élimine toutes les oscillations et les discontinuité de la consigne.

2.2 Simulation et discussion des résultats

2.2.1 Présentation des types de scénarios

Durant cette partie, on va tester le système ACCwSG sur différentes situations, à savoir :

- Une circulation urbaine fluide
- Une circulation urbaine avec embouteillage
- Une circulation urbaine avec des arrêts fréquents
- Des accélérations et décélérations brutales du leader
- Une circulation urbaine fluide mais avec une oscillation du vitesse de leader
- Une circulation urbaine avec un trafic routier variable

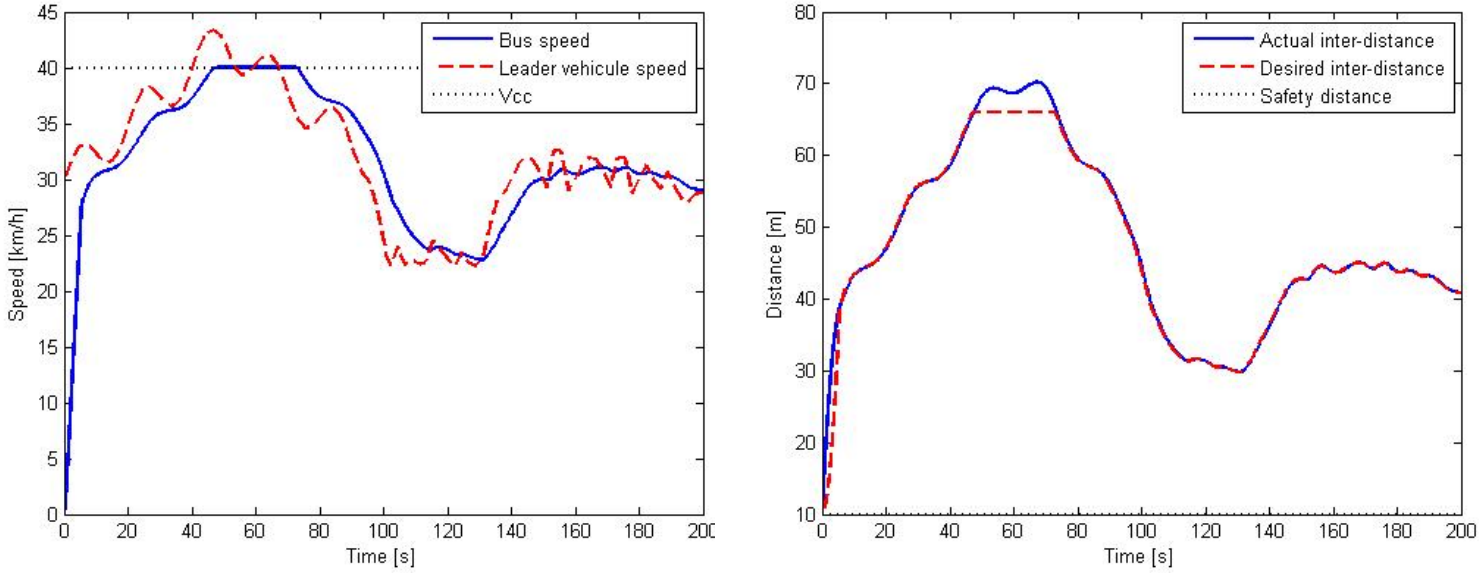
A l'aide des différents scénarios de simulation, on testera tous les modes du système ACCwSG :

- Le mode CC : Le suivi de la vitesse de consigne ou vitesse de croisière V_{cc}
- Le mode ACC : Le suivi de la distance de référence d_{ref}
- Le mode de commutation : Mesure de la performance du système en commutant entre les deux derniers modes
- Le mode SG : L'option dans les faibles vitesses et les arrêts fréquents

Ces scénarios représentent un outil de test complet du système ACCwSG et permet de conclure sur ses performances au niveau d'erreur, rapidité et sécurité.

2.2.2 La simulation des scénarios

La simulation d'une circulation urbaine fluide

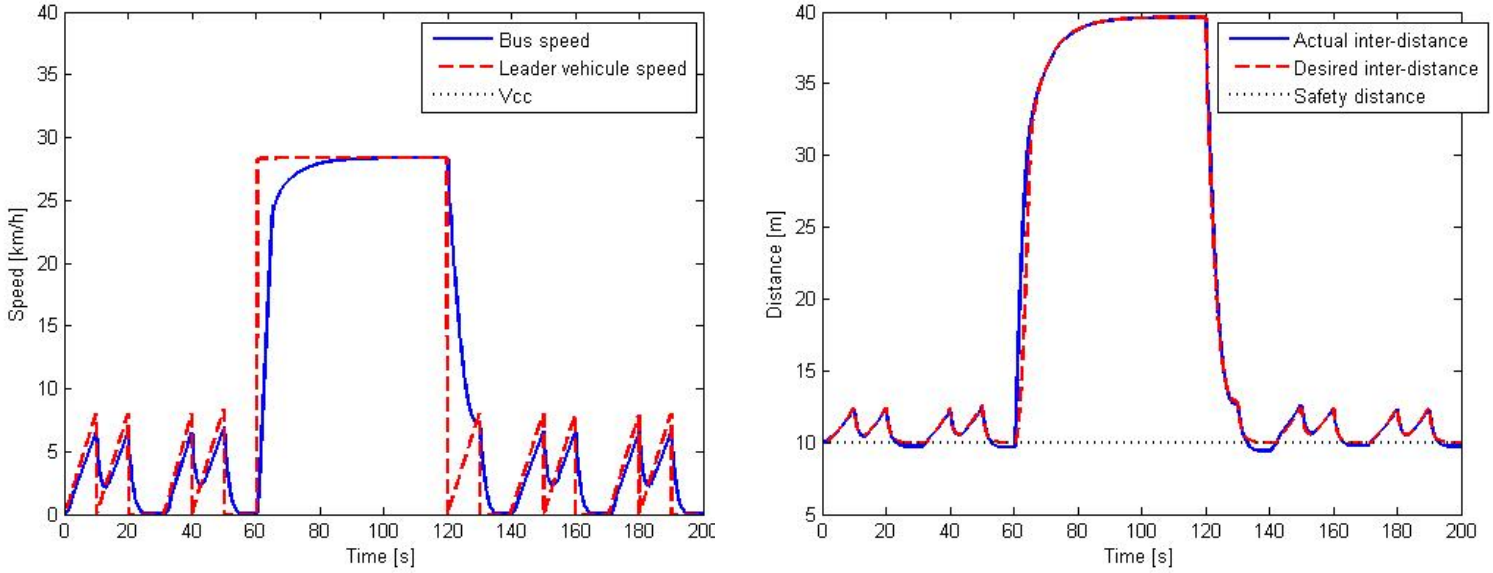


(a) (b)

FIGURE 2.3 – La simulation d'une circulation urbaine fluide (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance

Dans cette simulation on simule une circulation fluide avec légère oscillation de vitesse du leader, on remarque que la vitesse du bus n'oscille pas comme celle de leader et dès que $d > d_{ref}$ sa vitesse devient égale à la vitesse de croisière, aussi le bus respecte à la lettre la distance de référence qui assure le confort et la sécurité des passagers.

La simulation d'une circulation urbaine avec des arrêts fréquents

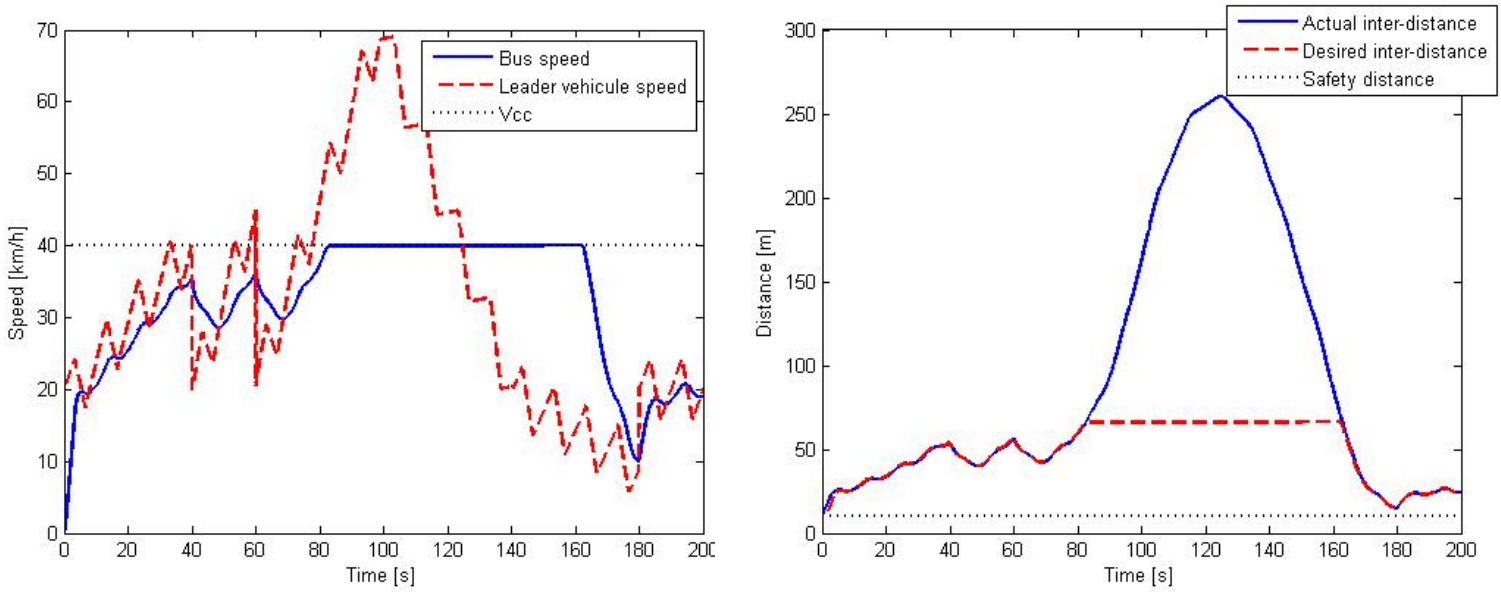


(a) (b)

FIGURE 2.4 – La simulation d'une circulation urbaine avec des arrêts fréquents (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance

Dans ce scénario on simule des arrêts et des départs fréquents à faible vitesse afin de tester la composante SG et une accélération et un freinage brusque du leader. Cette simulation montre la robustesse de la composante SG du système ACCwSG. On remarque aussi que la distance de sécurité est toujours respectée

La simulation d'une circulation urbaine fluide mais avec une oscillation du vitesse de leader

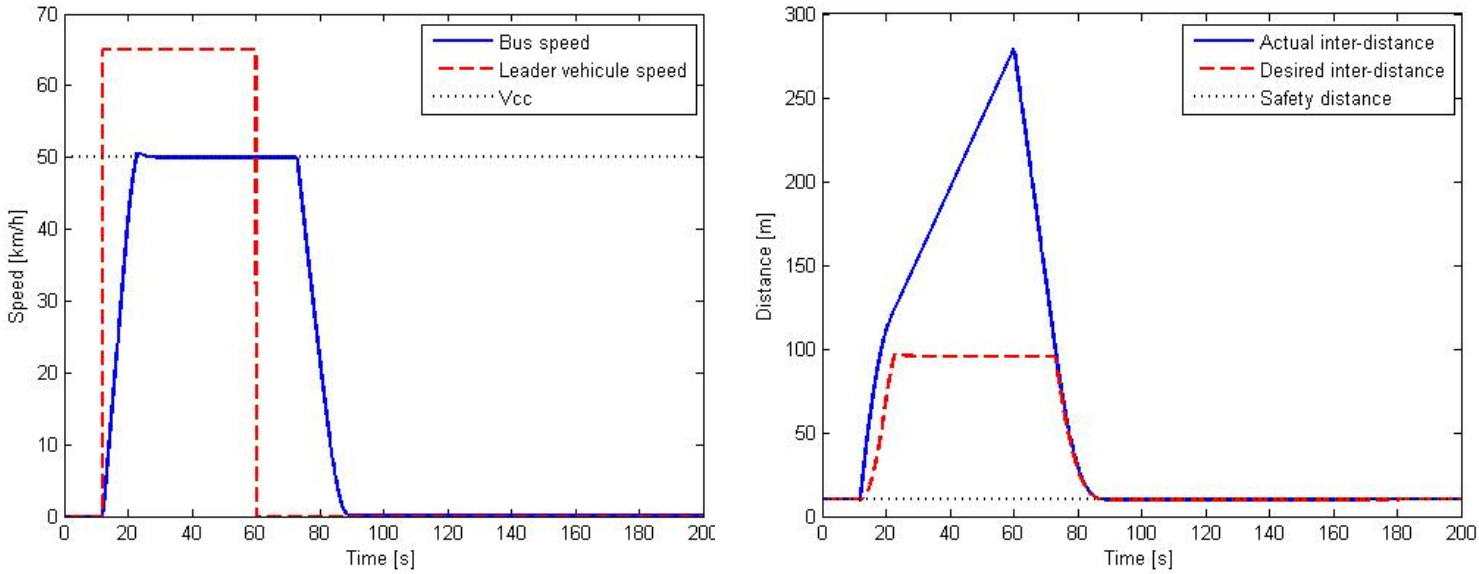


(a) (b)

FIGURE 2.5 – La simulation d'une circulation urbaine fluide mais avec une oscillation de vitesse de leade (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance

Dans ce cas de figure, on remarque bien les deux modes de fonctionnement, ACC quand $d > d_{ref}$ puis CC quand $d < d_{ref}$ et à la fin ACC quand $d > d_{ref}$. Ce scénario montre la commutation fluide entre les deux modes CC et ACC. On remarque aussi que les oscillations du vitesses du leader ne se propagent pas vers le bus mais ils sont largement atténuées.

La simulation des accélérations et décélérations brutales du leader

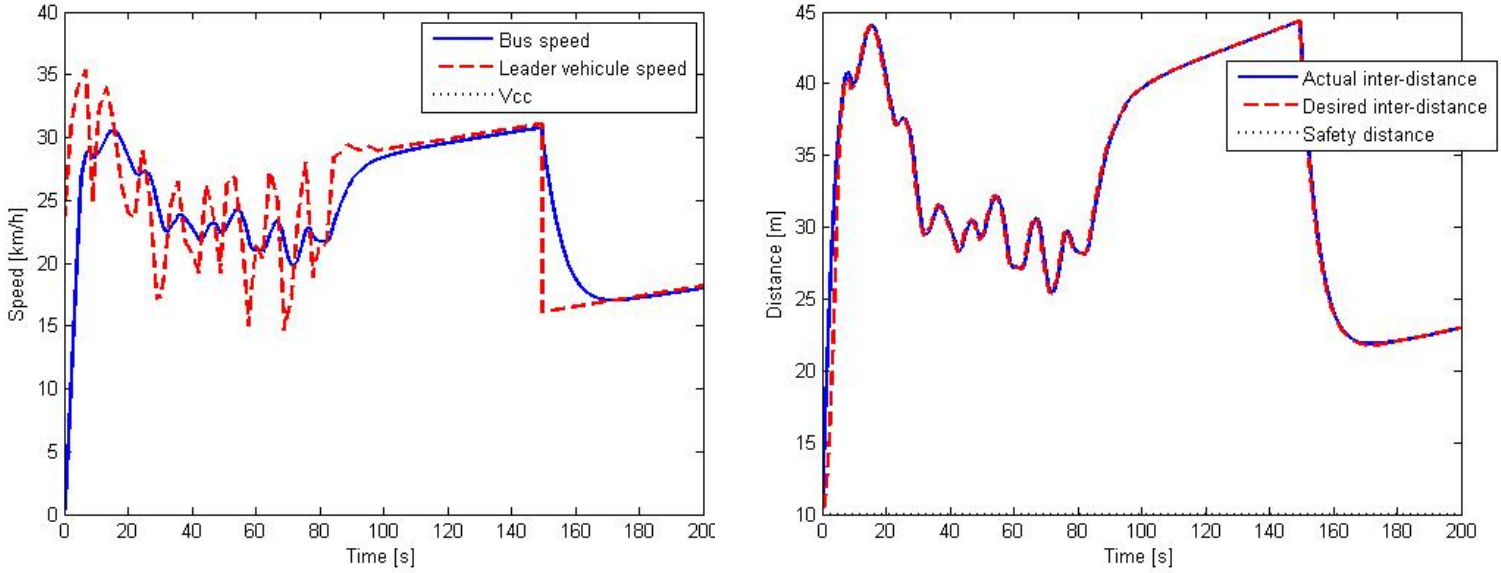


(a) (b)

FIGURE 2.6 – La simulation des accélérations et décélérations brutales du leader (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance

On remarque bien que le bus atteint sa vitesse de croisière V_{cc} dès que la distance devient supérieure à la distance de référence, et lorsque le leader décélère instantanément le bus ne répond pas puisque la distance est grande entre véhicules, mais régi dès que $d = d_{ref}$, freine de manière souple sans dépasser la distance de sécurité $d_0 = 10m$. Ce scénario met en évidence la commutation souple entre les deux modes CC et ACC.

La simulation d'une circulation urbaine avec embouteillages

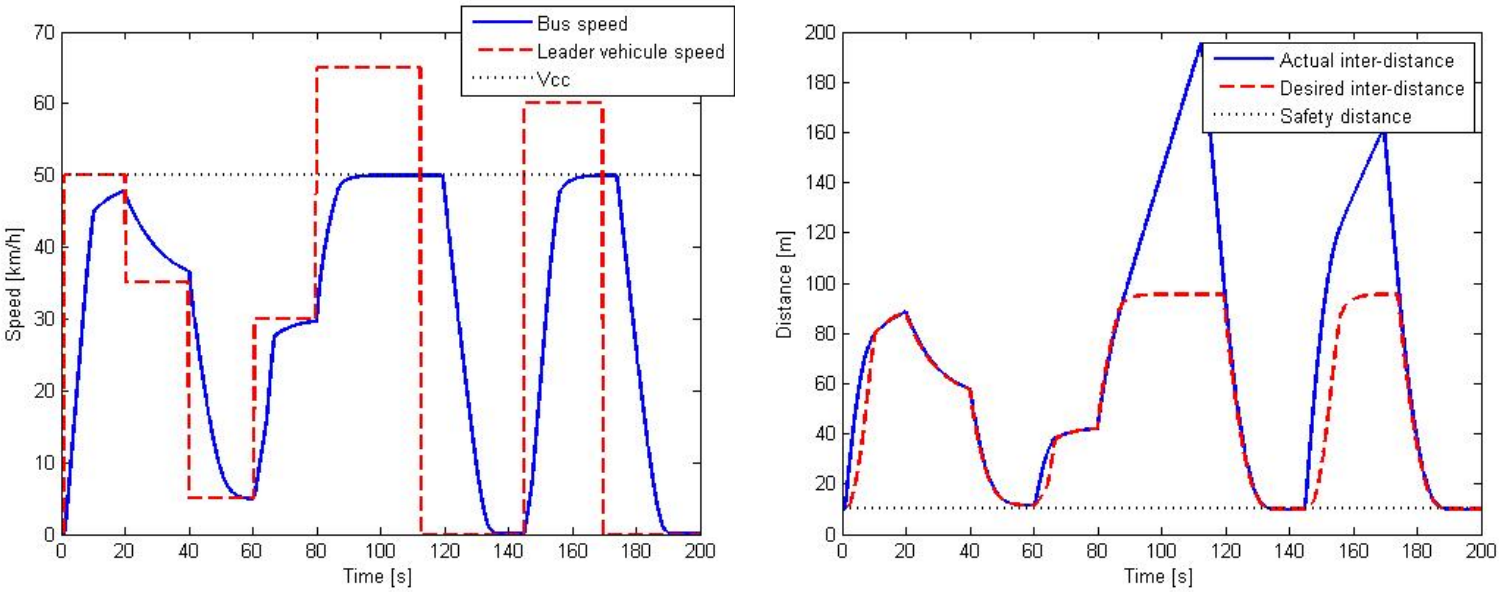


(a) (b)

FIGURE 2.7 – La simulation d'une circulation urbaine avec embouteillages (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance

Avec cette simulation on se focalise sur le comportement du système en cas d'embouteillage avec des fortes variations de vitesse du leader et un freinage brutal de la voiture de devant. On remarque le freinage souple du bus et le respect de la distance de référence avec un erreur maximal de 2% et un erreur moyen total de 0.2%.

La simulation d'une circulation urbaine avec un trafic routier variable



(a) (b)

FIGURE 2.8 – La simulation d'une circulation urbaine avec un trafic routier variable (a) profil de vitesse, (b) suivi de distance

Ce scénario est parmi les cas les plus difficiles avec des accélérations et des freinages instantanés qu'on sait bien que dans la réalité est impossible. Ce scénario se répète dans la vie quotidienne avec des changements de vitesse et des arrêts fréquents. On remarque bien que l'ACCwSG répond parfaitement avec la sollicitation des deux composantes ACC et SG. On note bien que $V_{cc} = 50km/h$ et $d_0 = 10m$ Pour avoir une idée générale sur l'erreur entre d et d_{ref}, ce tableau résume les résultats obtenus pour les différents scénarios :

Scénario	1	2	3	4	5	6
Erreur maximal	1%	1.5%	2%	0.3%	2%	4%
Erreur moyen	0.2%	0.4%	0.4%	0.16%	0.2%	0.25%

TABLE 2.3 – Erreur entre d et d_{ref}

Au terme d'analyse, le système ACCwSG a montré une grande stabilité et précision

Chapitre 3

Implémentation et simulation de la stratégie d'optimisation énergétique

Dans ce chapitre, je vais utiliser la méthode d'optimisation basée sur l'approche Stochastic Model Predictive Control présentée dans le **Chapitre 1**.

Après avoir implémenté l'architecture de contrôle à base d'ACCwSG [1], qui cherche à donner la vitesse de consigne optimale de sorte à respecter la distance désirée. Le deuxième niveau de réflexion qui se pose dans le cas d'un véhicule hybride est comment répondre à cette demande avec quel actionneur électrique, thermique, ou le mixe entre les deux si dans ce cas combien la part de chacun des actionneur.

Le but de cette partie est de réaliser une stratégie d'optimisation énergétique dans l'intention de trouver le partage optimal entre le moteur électrique et le moteur thermique, afin d'asservir la demande d'accélération qui minimise l'écart entre la distance entre véhicules et la distance désirée.

3.1 Modélisation du système

Nous considérons le problème de gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride. Le système sélectionne la puissance P_{eng} fournie par le moteur thermique à travers le générateur, et combien de puissance P_{el} par la batterie. L'équation de la balance des puissances :

$$P_{req}(k) = P_{el}(k) + P_{eng}(k) - P_{br}(k)$$

1. Adaptive Cruise Control with Stop&Go

Comme la dynamique du moteur thermique, et du moteur électrique sont beaucoup plus rapides que la dynamique de charge de la batterie, L'équation qui relie la dynamique des actionneurs avec celle de la batterie est :

$$SoC(k+1) = SoC(k) - KT_s P_{el}(k)$$

avec $SoC \in [0,1]$ $SoC = 1$ correspond à une batterie totalement chargée, T_s la période d'échantillonage, et $K > 0$ un paramètre de la batterie. Le SMPC va contrôler la variation de l'énergie mécanique ΔP et de puissance de freinage P_{br}

$$\Delta P(k) = P_{mec}(k) - P_{mec}(k-1)$$

En combinant ces équations, on peut poser notre modèle du système sous la forme suivante :

$$x(k+1) = Ax(k) + B_1 u(k) + B_2 w(k)$$
$$y(k) = Cx(k) + D_1 u(k) + D_2 w(k)$$

Le vecteur d'état $x(k) = \begin{bmatrix} SoC(k) \\ P_{mec}(k-1) \end{bmatrix}$

Le vecteur de commande $u(k) = \begin{bmatrix} \Delta P(k) \\ P_{br}(k) \end{bmatrix}$

La sortie $y(k) = P_{el}(k)$, la perturbation stochastique $w(k) = P_{req}(k)$

Avec les matrices $A = \begin{bmatrix} 1 & KT_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $B1 = \begin{bmatrix} KT_s & -KT_s \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B2 = \begin{bmatrix} -KT_s \\ 0 \end{bmatrix}$
$C = \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix}$, $D1 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}$, $D2 = 1$

3.2 Stochastic Model Predictive Control

Afin de concevoir le contrôleur SMPC, il faut générer la perturbation stochastique en utilisant un modèle basé sur les chaînes de Markov. Nous modélisons les actions du conducteur sur le véhicule par un processus stochastique w où $w(k) \in W$. Nous supposons qu'au temps k, la valeur w peut être mesuré et, avec un peu d'abus de notation, on dénote par $w(k)$ la réalisation À des fins de prédiction, le processus aléatoire générant w est modélisé comme une chaîne de Markov avec les états $W = \{w1, w2, ..., ws\}$, où évidemment $w_i \in W$, pour

tous $i \in \{1, ..., S\}$. Le $Card(W) = S$ définit le compromis entre la complexité du modèle stochastique et sa précision. La chaîne de Markov est définie par une matrice de probabilité de transition

$$[T]_{ij} = Pr[w(k+1) = w_j | w(k) = w_i]$$

En utilisant le modèle de chaîne de Markov, ayant $w(k) = w_i$, la distribution de probabilité de $w(k+l)$ est calculé de la façon suivante :

$$Pr[w(k+l) = w_j | w(k) = w_i] = [{}^t(T^l) \cdot e_i]$$

Avec e_i le vecteur unité de taille S qui contient des zéros dans toutes les composante saut la ligne i est égale à 1.

Pour prédire P_{req}, une chaîne de Markov avec $S = 300$ états est utilisée, qui est initialisé par $T = I$. Nous exécutons le contrôleur plusieurs fois afin d'apprendre les probabilités de transition (voir la partie suivante).

Le problème d'optimisation stochastique SMPC est formulé en fonction du modèle proposé où les paramètres dynamiques sont définis dans la partie modélisation. En résolvant l'algorithme, l'SMPC sélectionne l'optimum variation de puissance mécanique et puissance de freinage conventionnelle.

$$\begin{aligned}
\min_{\mathbf{u}} \quad & \sum_{i \in \mathcal{T} \setminus \{\mathcal{T}_1\}} \pi_i (x_i - x_r) Q (x_i - x_r) \\
& + \sum_{j \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{S}} \pi_j (u_j' R u_j + y_j' S y_j) \\
\text{s.t.} \quad & x_1 = x(k), \quad w_1 = w(k), \\
& x_i = A x_{pre(i)} + B_1 u_{pre(i)} + B_2 w_{pre(i)}, \\
& \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad i \in \mathcal{T} \setminus \{\mathcal{T}_1\}, \\
& y_i = C x_i + D_1 u_i + D_2 w_i, \ i \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{S}, \\
& x_i \in \mathbf{X}, \ i \in \mathcal{T} \setminus \{\mathcal{T}_1\}, \\
& u_i \in \mathbf{U}, \ y_i \in \mathbf{Y}, \ i \in \mathcal{T} \setminus \mathcal{S},
\end{aligned}$$

$$\mathbf{X} = \{x \in R^2, \begin{bmatrix} SoC_{min} \\ 0 \end{bmatrix} < x < \begin{bmatrix} SoC_{max} \\ P_{engmax} \end{bmatrix}\}$$

$$\mathbf{U} = \{u \in R^2, \begin{bmatrix} \Delta P_{min} \\ 0 \end{bmatrix} < u < \begin{bmatrix} \Delta P_{max} \\ P_{brmax} \end{bmatrix}\}$$

$$\mathbf{Y} = \{y \in R, P_{elmin} < y < P_{elmax}\}$$

Avec $x_r = \begin{bmatrix} SoC_{ref} \\ P_{engref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 15000 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 500 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}, S = 0$

La fonction coût qui sera calculée dans le problème d'optimisation est sous la forme suivante :

$$J(k) = r_1 \Delta P(k)^2 + r_2 P_{br}(k)^2 + q_1 (SoC(k) - SoC_{ref})^2 + q_2 (P_{eng}(k) - P^*_{eng})^2$$

avec P^*_{eng} est la puissance qui correspond au rendement maximal du moteur thermique, SoC_{ref} est l'état de la charge final, le coefficient r_1 impose une variations de puissance mécanique lisse, le poids q_2 pousse le système à fonctionner plus près de la zone à rendement maximal, q_1 pénalise les écarts par rapport à l'état de charge final de la batterie, et r_2 pénalise l'utilisation des freins.

3.3 Apprentissage du comportement du conducteur

L'apprentissage se fait au niveau de la matrice de transition de la chaîne de markov à travers la puissance demandée par le conducteur P_{req} qui traduit le comportement du conducteur et sa façon de conduire. En comptant le nombre de transitions d'une puissance P_{reqi} à P_{reqj}, le nombre d'occurrences pour chaque transition d'un état i vers un état j est stocké dans la matrice n_{ij} [4].

La matrice de transition $[T]_{ij}$ peut être mise à jour après chaque simulation,ou quand un grand nombre de données sont collectées, un petit programme va calculer la nouvelle matrice de transition.

Pour tout $h \in \{1, 2, ..., s\}$

$$[T]_h = \frac{[n]_h + \lambda [T]_h}{\lambda + \sum_{k=1}^{s} [n]_{hk}}$$

Avec λ un paramètre de filtrage.

La stratégie de mise à jour en ligne de la matrice de transition consiste à ajouter l'apprentissage du comportement du conducteur. Après la fin de chaque simulation la matrice de transition est mise à jour, et donc après chaque expérience le système apprend, ce qui ajoute encore plus de robustesse à l'optimisation stochastique.

3.4 Simulation

En vu de réaliser des simulations sur la méthode d'optimisation proposée SMPC [2], un scénario basé sur un profil de vitesse NEDC [3] a été utilisé.

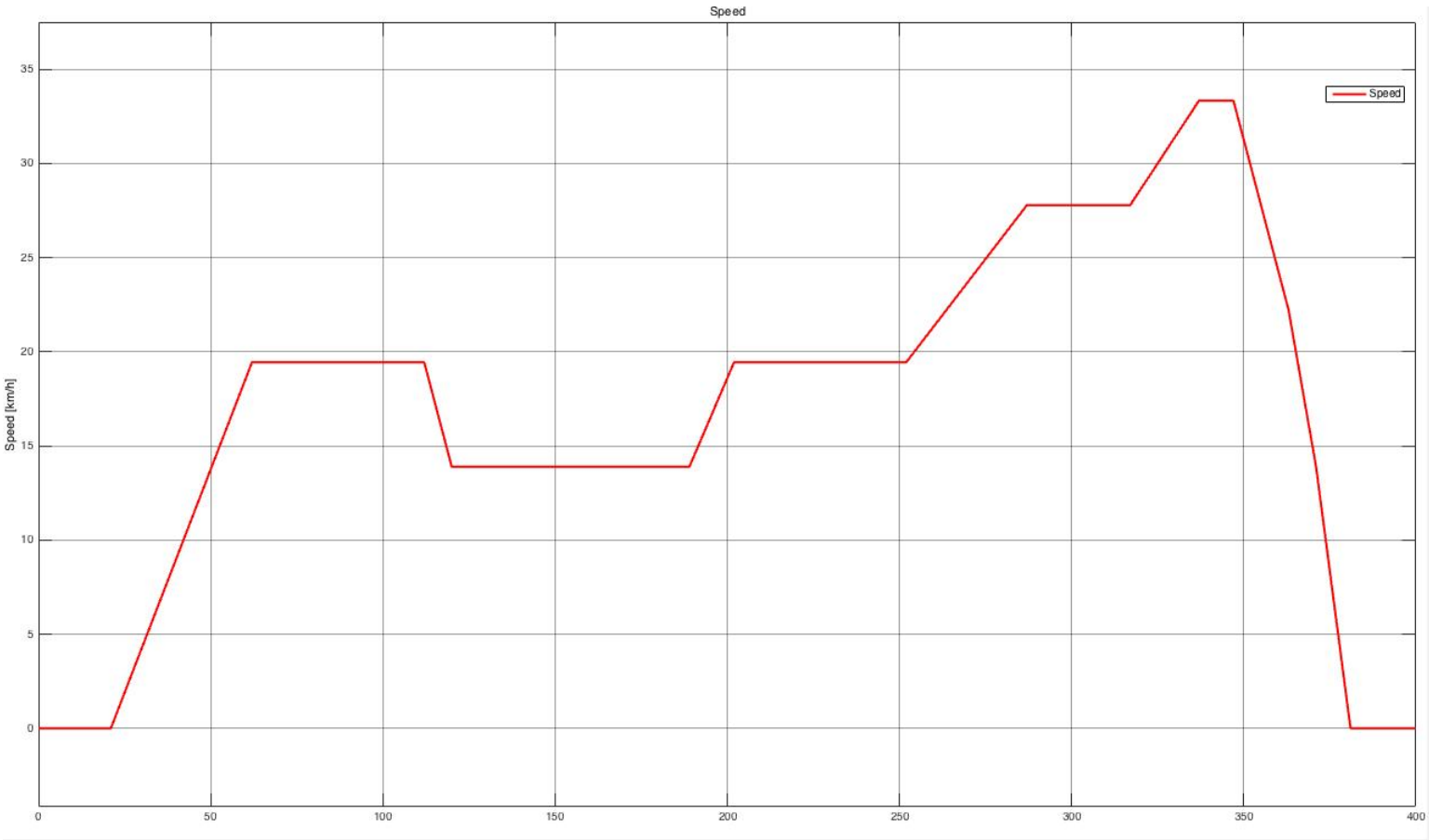


FIGURE 3.1 – Profil de vitesse

Ce profil de vitesse comprend des accélérations et des décélérations comme celle des embouteillages dans le milieu urban. Cette simulation se focalise sur le comportement du système en cas d'embouteillage avec des fortes variations de vitesse et un freinage brutal. Ce profil de vitesse va être transformé en une demande de puissance mécanique afin d'atteindre les accélérations et le profil de vitesse voulus.

2. Stochastic Model Predictive Control
3. New European Driving Cycle

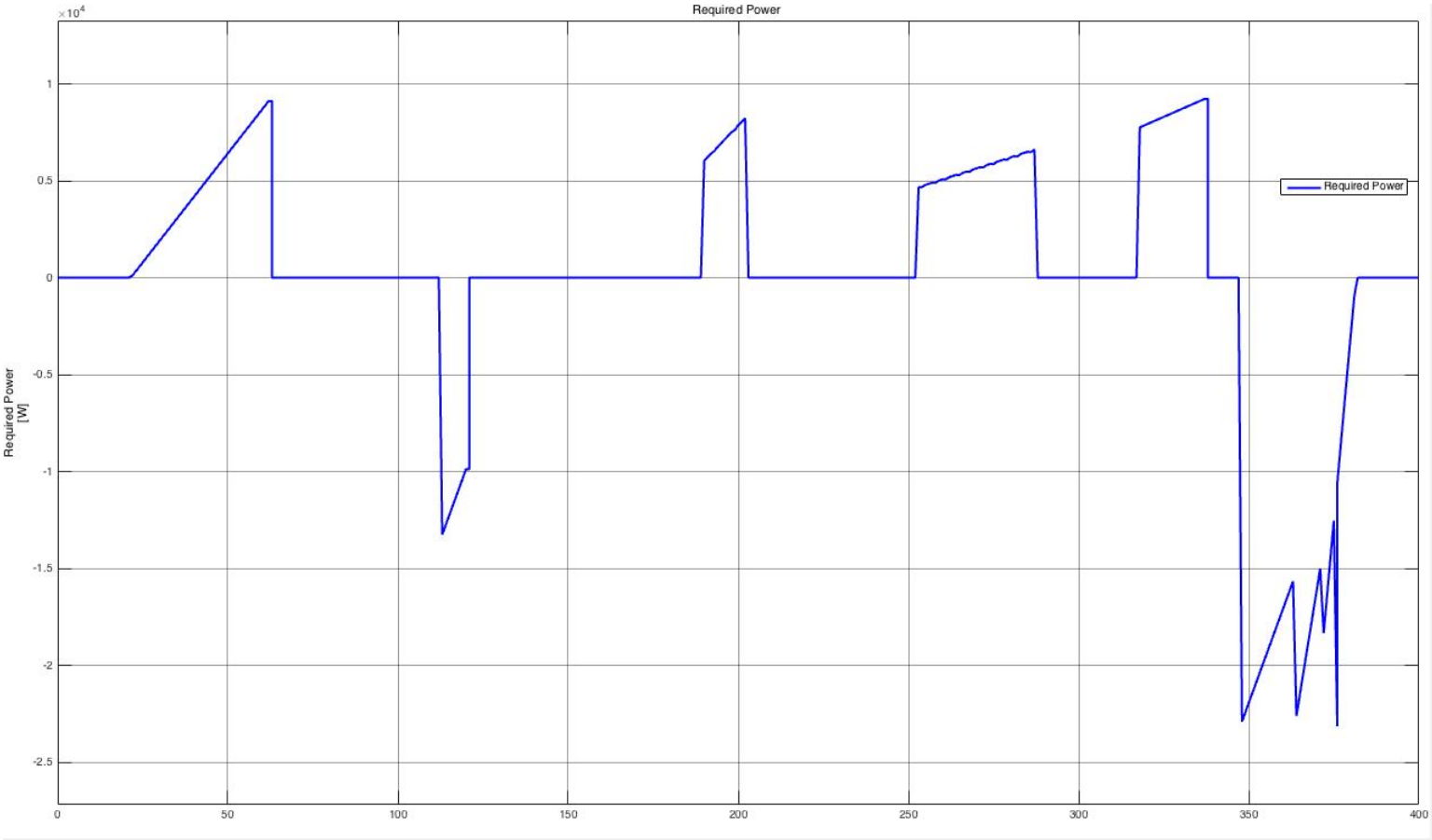


FIGURE 3.2 – Puissance requise par le conducteur

Si on compare les figures, on remarque que la demande de puissance est positive dans les accélération et négative dans les décélérations. Dans les figures suivantes, on va voir le partage de puissance entre les différentes sources électrique et thermique, et aussi la puissance de freinage. Les piques de puissance sont très visibles dans les fortes demandes et et aussi dans le freinage brusque.

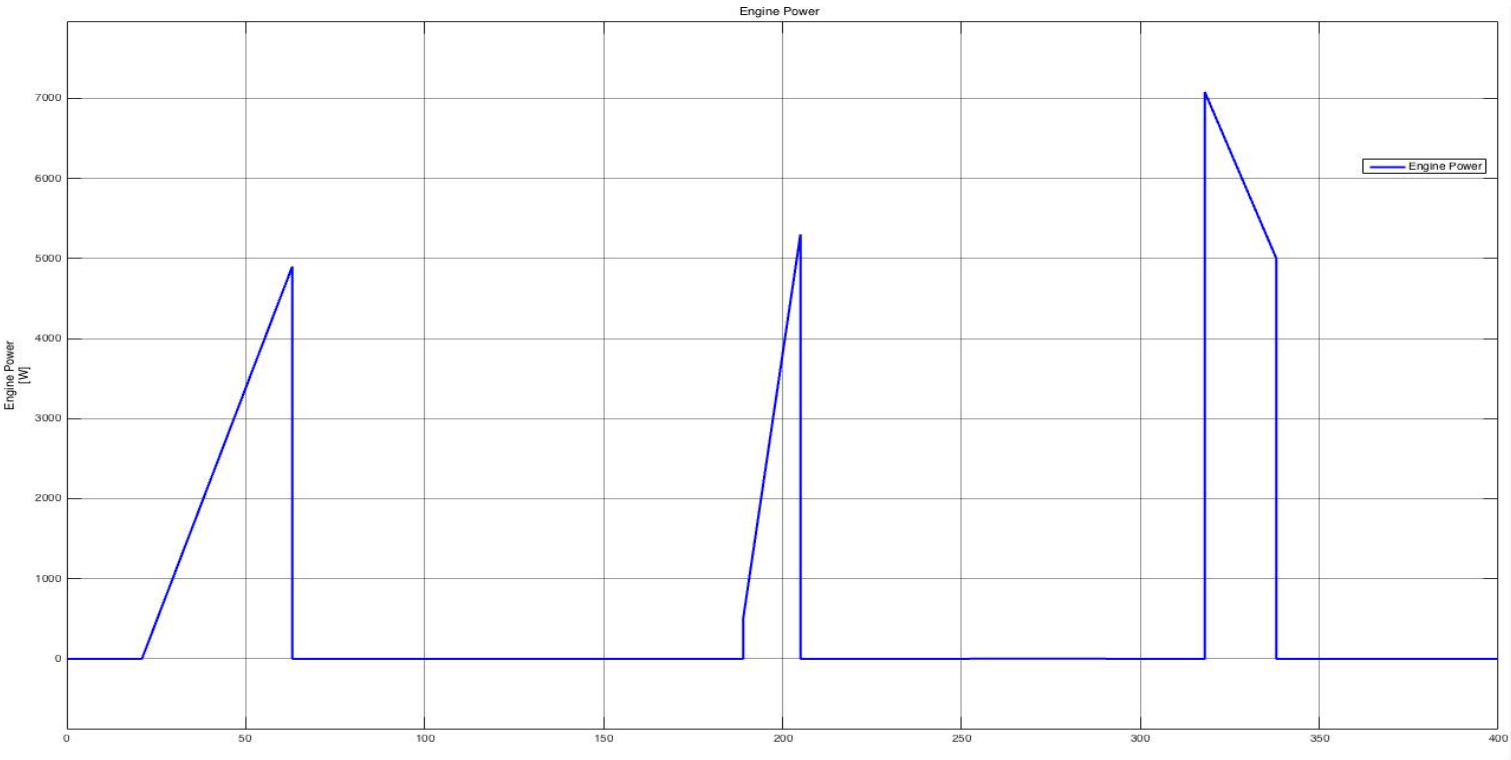


FIGURE 3.3 – Puissance développée par le moteur thermique

Au début des demandes d'accélérations, le moteur thermique commence à développer la puissance pour subvenir au besoin de puissance mécanique demandée. Les valeurs de puissance obtenues par l'optimisation montrent que le moteur thermique répond juste au accélérations, qui correspondent aux demandes de puissances positives. Par contre, pour la demande d'accélération entre $250s$ et $300s$, le moteur thermique n'a pas pris cette demande de puissance en compte, car elle est faible, donc c'est le moteur électrique qui va réponde à celle ci automatiquement.

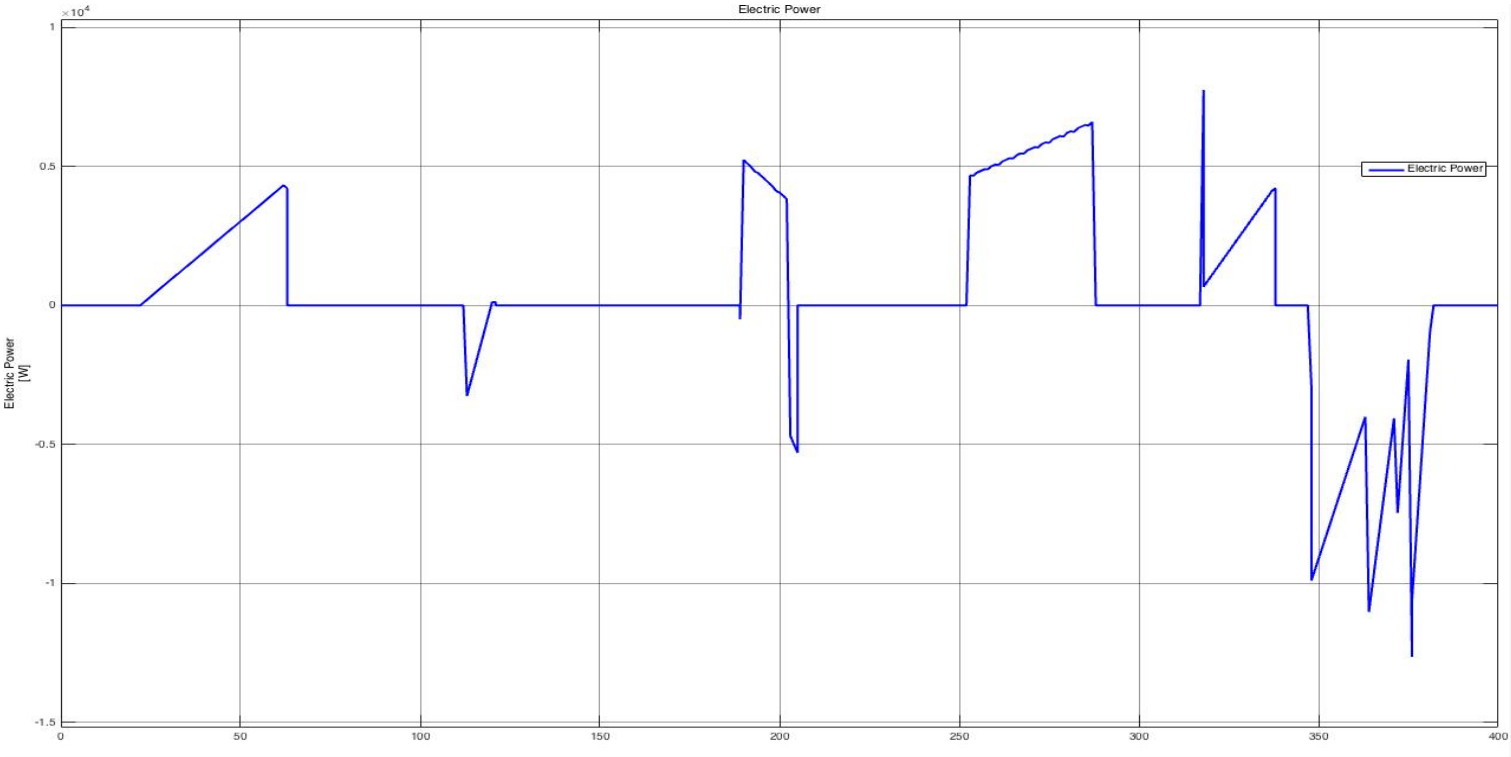


FIGURE 3.4 – Puissance du moteur électrique

On remarque que le moteur électrique assiste le moteur thermique dans la réponse aux demandes de puissance les plus significatives, le remplace dans les faibles demandes, et répond aussi aux piques des demandes brutales. Le deuxième rôle du moteur électrique réside dans la récupération d'énergie, en fonctionnant en mode générateur pendant le freinage, c'est à dire lorsqu'il y a une demande de puissance négative.

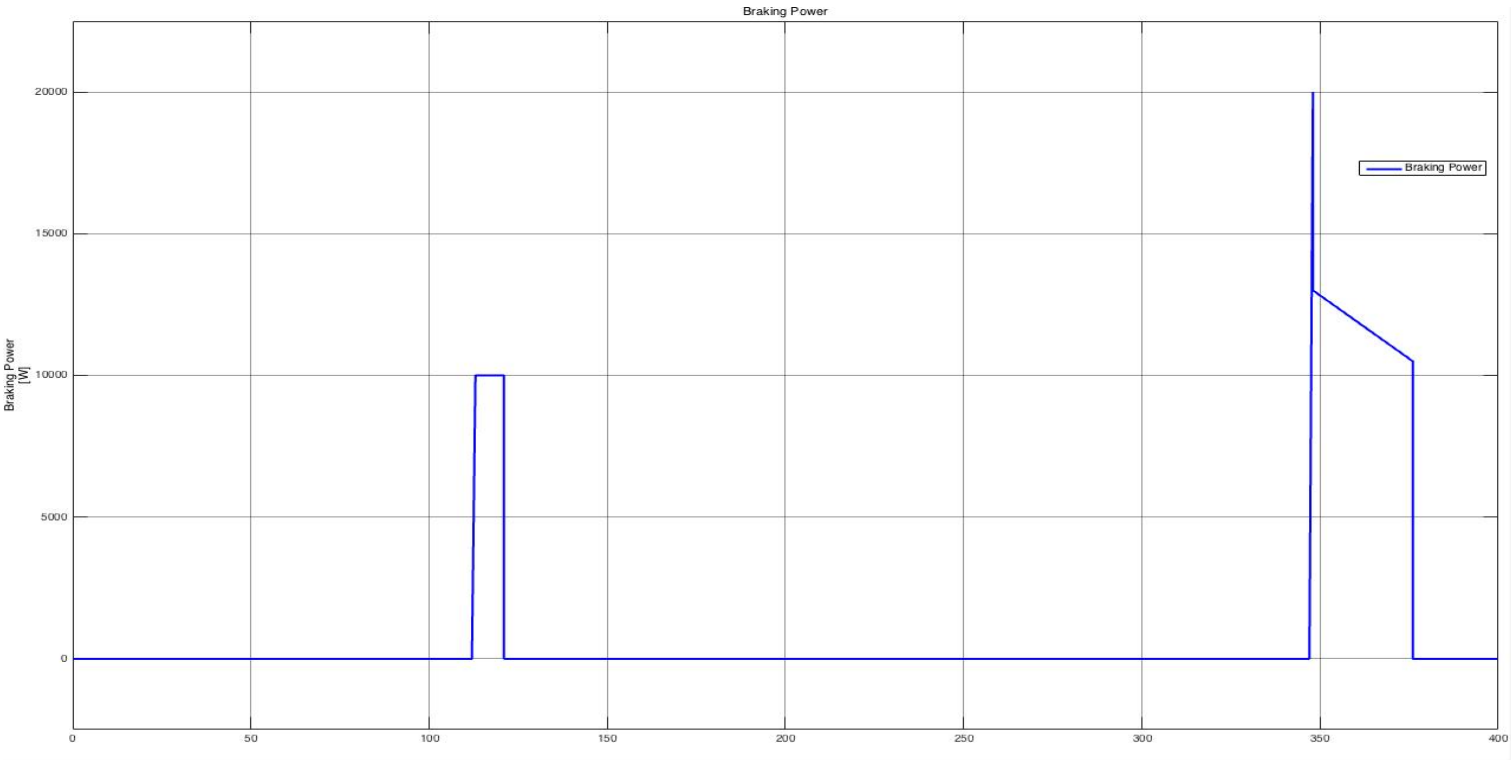


FIGURE 3.5 – Puissance de freinage

En phase de décélération, de descente ou de freinage, une part de l'énergie cinétique est transformée par le moteur/générateur en électricité pour recharger les batteries, assurant ainsi un rôle de frein moteur accru et soulageant les freins mécaniques.

Cette optimisation à base SMPC [4] prend en entrée un profil de vitesse à suivre et génère en sortie la participation énergétique de chacune des sources éclectique et thermique.

4. Stochastic Model Predictive Control

Conclusion et perspectives

L'objectif de mon stage de fin d'études est de proposer une architecture de contrôle commande basée sur l'Adaptive Cruise Control (ACC), l'utilisation d'une méthode d'optimisation stochastique pour l'optimisation énergétique en proposant des solutions permettant d'améliorer la consommation avec la prise en compte de la sécurité et du confort des passagers.

Je commence par définir le contexte de travail, les objectifs de ce stage. Dans le dessein d'atteindre cet objectif, j'ai établi la partie d'état de l'art qui présente la recherche bibliographique faite sur les véhicules hybrides : leur composition et leurs architectures, les modèles des véhicules automatisée et les méthodes d'optimisations énergétiques. Cette partie m'a permis de me documenter sur les techniques existantes, et construire une bonne base pour choisir les méthodes et les techniques à utiliser.

A l'issue de cette recherche bibliographique, j'ai proposé une architecture de contrôle basée sur ACCwSG [5] qui permet de suivre le véhicule qui précède d'une manière automatique en respectant la distance consigne, d'améliorer le confort des passagers en évitant les collisions, les accélérations et les décélérations brusques. Cette architecture a montré une bonne robustesse et de très bonnes résultats, surtout au niveau du confort et de la sécurité.

Après l'implémentation et la vérification de cette architecture par simulation, je me suis lancé dans la partie de l'optimisation énergétique. Elle consiste à modéliser le problème par le choix d'un modèle adéquat, formuler le problème d'optimisation énergétique en utilisant une méthode stochastique. Afin d'ajouter plus de robustesse au système une technique d'apprentissage est implémentée.

5. Adaptive Cruise Control with Stop&Go

Le rapport et le travail effectués seront une bonne base de départ pour les futurs sujets qui ont une relation avec les véhicules hybride et de l'optimisation énergétique. Ce travail peut être encore améliorer en intégrant les deux architectures proposées et aussi en prenant en compte d'autres paramètres qui pourront ajouter plus de flexibilité et de robustesse au système, à savoir les données du trafic, l'ajout d'une nouvelle source d'énergie, etc.

Ce stage a été très enrichissant pour moi car il m'a permis de découvrir dans le détail les systèmes d'aides à la conduite, l'optimisation énergétique appliquée aux véhicules hybrides. Il m'a permis de participer concrètement à ses enjeux à travers des recherches bibliographiques, des mises en oeuvres que j'ai particulièrement appréciées.

Bibliographie

[1] Rustem Abdrakhmanov et Lounis Adouane. "Dynamic Programming Resolution and Database Knowledge for Online Predictive Energy Management of Hybrid Vehicles". In : *Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1 : ICINCO,* INSTICC. SciTePress, 2017, p. 132–143. isbn : 978-989-758-263-9. doi : 10.5220/0006437301320143.

[2] BJ Arnet et LP Haines. "Combining ultracapacitors with lead-acid batteries". In : *17th International Electric Vehicle Symposium, Montreal, Canada.* 2000.

[3] Magali Bardou. "Politiques publiques et gaz àeffet de serre. Pour le climat : mieux vivre ensemble en ville ?" In : *Ethnologie française* 39.4 (2009), p. 667–676.

[4] Marco Bichi et al. "Stochastic model predictive control with driver behavior learning for improved powertrain control". In : *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on.* IEEE. 2010, p. 6077–6082.

[5] Jianing Dai. "Isolated word recognition using Markov chain models". In : *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 3.6 (1995), p. 458–463.

[6] Sébastien Delprat. "Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybride paralleles". Thèse de doct. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002.

[7] Nicolas DENIS. "Système de gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride rechargeable à trois roues". Thèse de doct. Université de Sherbrooke, 2014.

[8] Stefano Di Cairano et al. "Stochastic MPC with learning for driver-predictive vehicle control and its application to HEV energy management". In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 22.3 (2014), p. 1018–1031.

[9] Ali Emadi et al. "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations". In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54.3 (2005), p. 763–770.

[10] Connaissance des Énergies. *CAES, stockage par air comprimé*. 2013. URL : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime.

[11] Adrian Florescu. "Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique". Thèse de doct. Université Grenoble Alpes, 2012.

[12] S. Germann et R. Isermann. "Nonlinear distance and cruise control for passenger cars". In : (1995).

[13] Hanane Hemi, Ghouili Jamel et A Cheriti. "Combination of Markov chain and optimal control solved by Pontryagin's Minimum Principle for a fuel cell/supercapacitor vehicle". In : (2015).

[14] Sun Hui. "Multi-objective optimization for hydraulic hybrid vehicle based on adaptive simulated annealing genetic algorithm". In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23.1 (2010), p. 27–33.

[15] Martina Josevski et Dirk Abel. "Energy management of parallel hybrid electric vehicles based on stochastic model predictive control". In : *IFAC Proceedings Volumes* 47.3 (2014), p. 2132–2137.

[16] Namwook Kim, Sukwon Cha et Huei Peng. "Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle". In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19.5 (2011), p. 1279–1287.

[17] E Kometani et T Sasaki. "Dynamic behaviour of traffic with a nonlinear spacing-speed relationship. Transport Research Board, 211 :105–119". In : (1974).

[18] Jinming Liu et Huei Peng. "Modeling and control of a power-split hybrid vehicle". In : *IEEE transactions on control systems technology* 16.6 (2008), p. 1242–1251.

[19] Yves Maroselli. *Qu'est-ce que le Stop & Start*. 2010. URL : http://www.lefigaro.fr/automobile/2010/12/14/03001-20101214AR/TFIG00460-qu-est-ce-que-le-stop-amp-start.php.

[20] Laurent Meillaud. *Un système plus efficace et de nouvelles fonctions VALEO OPTIMISE SON STOP & START*. URL : http://www.autonews.fr/voiture-bio/un-systeme-plus-efficace-et-de-nouvelles-fonctions-37635 (visité le).

[21] J. M. Molina. "Commande de l'inter-distance entre deux véhicules. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble". In : (2005).

[22] Morteza Montazeri-Gh, Amir Poursamad et Babak Ghalichi. “Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles”. In : *Journal of the Franklin Institute* 343.4 (2006), p. 420–435.

[23] Scott Jason Moura et al. “A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles”. In : *IEEE Transactions on control systems technology* 19.3 (2011), p. 545–555.

[24] Romain Nicolas. *L’ACC pour maintenir la distance de sécurité avec le véhicule précédant.* 2012. URL : http://www.car-engineer.com/fr/lacc-maintenir-distance-securite-vehicule-precedant.

[25] Mikael Persson. “Stop & Go Controller for Adaptive Cruise Control”. In : *MSc Theses* (1998).

[26] Rajesh Rajamani. “Stop and Go Cruise Control”. In : (1999).

[27] Giulio Ripaccioli et al. “A stochastic model predictive control approach for series hybrid electric vehicle power management”. In : *American Control Conference (ACC), 2010.* IEEE. 2010, p. 5844–5849.

[28] Francis Roy. “Optimisation énergétique de chaines de traction électrifiées”. Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2015.

[29] Julien Scordia. “Approche systématique de l’optimisation du dimensionnement et de l’élaboration de lois de gestion d’énergie de véhicules hybrides”. Thèse de doct. Université Henri Poincaré-Nancy I, 2004.

[30] "P. Shakouri, A. Ordys et J. Czeczot". “Simulation validation of three nonlinear model-based controllers in the adaptive cruise control system”. In : *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 80.2 (2015), p. 207–229.

[31] P. Shakouri et al. “Adaptive Cruise Control System : Comparing Gain-Scheduling PI and LQ Controllers”. In : *IFAC Proceedings Volumes* 44.1 (2011), p. 12964–12969. ISSN : 1474-6670.

[32] P. Shakouri et al. “Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab”. In : *UKACC International Conference on Control 2010.* Sept. 2010, p. 1–6. DOI : 10.1049/ic.2010.0410.

[33] A. Treiber M. Hennecke et D Helbing. “Delays,inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models”. In : (2006).

[34] Sergio Vazquez et al. “Energy storage systems for transport and grid applications”. In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57.12 (2010), p. 3881–3895.

[35] Paul Venhovens, Karl Naab et Bartono Adiprasito. “Stop and go cruise control”. In : *International journal of automotive technology* 1.2 (2000), p. 61–69.

[36] John Voelcker. “2014 bmw i3 moves us closer to autonomous driving in cities”. In : (2011).

[37] Jianlong Zhang et Petros Ioannou. “Integrated roadway/adaptive cruise control system : Safety, performance, environmental and near term deployment considerations”. In : *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)* (2004).