

Modélisation de la consommation en carburant d'un véhicule léger à partir de données expérimentales

Hong Tu LUU¹, Lydie NOUVELIERE², Said MAMMAR²

¹Laboratoire sur les Interactions Véhicule-Infrastructure-Conducteur
LIVIC, 14 Route de la minière - Bâtiment 824, 78000 Versailles, France

²IBISC CNRS FRE 3190
40, Rue du Pelvoux, 91020 Evry-Courcouronnes, France

hong-tu.luu@inrets.fr, nouveliere@iup.univ-evry.fr, said.mammar@inrets.fr
<http://www.inrets.fr/ur/livic/>

Résumé— La modélisation de la consommation en carburant des véhicules fait l'objet de nombreux travaux de recherche ces dernières années. La comparaison de quelques modèles connus sur des données expérimentales montre une précision insuffisante pour l'usage futur dans un système d'aide à la conduite (système d'alerte ou système actif). L'objectif de cet article est de faire un point sur ces travaux et de proposer des modèles de consommation instantanée d'un véhicule léger. La construction de ces modèles est fondée d'une part sur des connaissances physiques, mécaniques reliant le véhicule, son environnement et la consommation et d'autre part sur des méthodes d'identification paramétriques. Les résultats montrent une bonne estimation des modèles dans plusieurs situations de conduite en ville sur autoroute.

Mots-clés— Modélisation, identification, consommation instantanée de carburant.

I. INTRODUCTION

La réduction de la pollution, notamment automobile, constitue un des grands chantiers de ces dernières années. Un des principaux enjeux consiste, par le biais d'une gestion intelligente, à limiter la consommation en carburant qui constitue aussi un facteur d'économie sur la facture énergétique. Il faut savoir que la moyenne des émissions de CO₂ des voitures neuves en France en 2006 est de 149 g de CO₂ par km, sachant qu'elle est légèrement plus faible à 147g de CO₂ par km pour les voitures diesel, qui constituent 71% des ventes de voitures neuves en France en 2006, et légèrement plus élevée à 155 g de CO₂ par km pour les voitures essence.

La consommation en carburant est liée à plusieurs facteurs souvent négligés par le conducteur. A titre d'exemple, un déficit de seulement de 0,3 bar du gonflage des pneumatiques entraîne une surconsommation d'environ 3%. De même, le fait de rouler avec une galerie entraîne une surconsommation de carburant qui va de 10% pour une galerie vide à 15% pour une galerie chargée. Notons qu'à la vitesse de 120 km/h, ces 15% coûtent 1 litre de carburant au 100 km. Par ailleurs, d'après les chiffres publiés par l'ADEME, les systèmes de climatisation automobile actuels augmentent la consommation de carburant d'environ 30% en ville (15% sur route) pour les moteurs essence et d'environ 35% (20% sur route) pour les moteurs diesel. Il ne faut pas non plus oublier l'utilisation abusive de la

voiture en ville sur des courts trajets : un trajet en voiture sur deux est réalisé sur une distance inférieure à 3 km, avec des problèmes de surconsommation et de pollution liés au démarrage et au fait que le véhicule consomme et pollue énormément plus au cours des premiers kilomètres quand le moteur est froid.

Il est donc essentiel de sensibiliser les conducteurs à ne pas négliger tous ces facteurs et à adapter son comportement. Dans ce cadre, plusieurs solutions peuvent être envisagées, en particulier, des aides à la conduite pourraient aider à réduire la consommation. Siemens VDO a développé un copilote électronique dénommé GERICO (Gestion de l'EneRgie par Interface COnducteur) qui permet d'assister le conducteur pour adopter une éco-conduite par le biais d'informations et de conseils ou alertes au conducteur en temps réel. Ce système utilise une IHM spécifique [VC].

Dans le domaine des transports publics, le projet PREDIT-ANR ANGO auquel le LIVIC a largement pris part, s'est intéressé à la minimisation de la consommation sur les autobus par la mise en place d'assistances à la conduite [NBML08], [NMB⁺08]. Les recherches ont conclu que pour fournir au conducteur une recommandation de vitesse pertinente, l'analyse de la situation de conduite ne peut pas se limiter au niveau local. La géométrie 3D de la route doit être prise en compte sur un horizon suffisant pour permettre d'anticiper sur les caractéristiques de l'itinéraire (montées, descentes, temps de parcours). Mais plus généralement, la problématique des vitesses recommandées doit être reconsidérée dans une approche globale visant à la fois à optimiser la sécurité (gestion de l'inter-distance ou de la vitesse, . . .) et le confort et à minimiser la consommation et donc rendre le véhicule « plus vert », tout en étant en accord avec les vitesses réglementaires (signalisation verticale).

Pour cela, il est indispensable de comprendre les phénomènes déterminant de la consommation du véhicule. On se propose donc dans ce papier une modélisation adéquate permettant un usage futur dans un système d'assistance à la conduite (système d'alerte ou système actif).

La deuxième section dresse un état de l'art des différents modèles de la littérature. La troisième section permet

d'identifier les variables essentielles et fournit une comparaison de quelques modèles. La section suivante présente le modèle mis en œuvre. La cinquième section permet de valider ce modèle en utilisant des données expérimentales. La dernière section propose des perspectives d'amélioration du modèle.

II. ÉTAT DE L'ART

Le thème de la consommation des véhicules routiers a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche ces dernières années [ARA⁺02],[PKTC85]. L'objectif de cette section est de donner quelques idées fondamentales issues de ces travaux. Notons d'ores et déjà que deux approches se distinguent, la première utilise les données expérimentales pour construire des modèles empiriques. La seconde, plus récente, dite "mécanique" utilise les connaissances physiques, mécaniques du véhicule dans ses mouvements ainsi que des facteurs liés à l'environnement pour en déduire le modèle de consommation. Dans cette approche, la consommation est liée au rendement du moteur et aux efforts résistants appliqués au véhicule [Gre03].

A. Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont divisés en trois catégories [Din00] : les modèles instantanés, les modèles liés au mode de conduite et les modèles de vitesse moyenne. Cette dernière catégorie de modèles fondés sur la vitesse moyenne comme le modèle US EPA MOBILE6, ou encore ceux issus des travaux de LAM et EVA [Lam85], [CEHW79] ne reflètent pas de manière adéquate la consommation en lien avec la dynamique du véhicule. Ils sont par ailleurs limités à basse et haute vitesses. On se contente de présenter dans la suite uniquement des modèles microscopiques qui estiment la consommation instantanée du véhicule à partir des variables explicatives instantanées. On distingue par ailleurs d'un côté, des modèles ne faisant intervenir que des paramètres liés au véhicule comme la puissance, la vitesse, l'accélération et de l'autre côté, les modèles faisant intervenir en plus des caractéristiques de la route, du trajet comme la pente, le nombre d'arrêts...

A.1 Modèle de Post

Le premier modèle microscopique est dû à K. Post [PKTC85] en 1984. La consommation instantanée est donnée en fonction de la puissance appliquée par l'équation 1 :

$$\begin{aligned} FC &= \alpha + \beta P & P > 0 \\ &= \alpha & P \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

avec FC , la consommation en carburant instantanée en ml/s , α la consommation au ralenti en ml/s , β le facteur de l'efficacité moyenne en $mL/kW/s$ et P la puissance totale instantanée en kW .

A.2 Modèles de Alcelik

Le laboratoire ARRB (Australian Road Research Board) a par la suite proposé une extension du modèle de Post. Le modèle de l'équation 2 prédit la consommation pour différents profils de vitesse du véhicule, en utilisant des coefficients moyens.

$$FC = \alpha + \beta_c P_c + \beta_a P_a \quad (2)$$

avec β_c , β_a des paramètres d'efficacité, P_a la puissance totale d'avancement à vitesse constante et P_c , la puissance totale due aux effets d'inertie.

A.3 Modèles de Ahn et Rakha

Ahn [Ahn98] et Rakha [RVAAT99] ont développé un ensemble de modèles polynômiaux basés sur la vitesse et l'accélération instantanée. La forme générale du modèle est donnée par l'équation 3. La transformation logarithmique permet d'exclure tous les arguments négatifs liés à la consommation :

$$\ln(FC) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (k_{ij} * s^i * a^j) \quad (3)$$

avec FC la consommation de carburant en l/s , k le coefficient de régression du modèle, s la vitesse instantanée du véhicule en m/s et a l'accélération instantanée du véhicule en m/s^2 .

Ce modèle a été mis au point à partir de données des huit véhicules et camions légers en essai fournies par le laboratoire ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Les données enregistrées sur route et sur banc d'essais incluent une vitesse variant de 0 à 120 km/h avec un pas d'incrément de 1.1 km/h , l'accélération variant quant à elle entre $-1.5 m/s^2$ à 3.2 m/s^2 avec un pas d'incrément de 0.3 m/s^2 .

En distinguant le cas de l'accélération et de la décélération, un nouveau modèle [ARA⁺02] donné par l'équation 4 a été proposé :

$$\ln(FC) = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (L_{ij} * s^i * a^j) & a \geq 0 \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (M_{ij} * s^i * a^j) & a < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Il faut souligner que plusieurs modèles polynômiaux de la consommation en carburant ont été proposés dans [Ahn98]. Un modèle non linéaire utilisant des réseaux de neurones y est aussi présenté.

A.4 Modèle de Cheshier et Harrison

Comme énoncé précédemment, la deuxième famille de modèles microscopiques fait intervenir des paramètres du véhicule et du trajet. On retrouve le modèle proposé par An et Ros [FR93] qui met en relation, entre autres paramètres, la consommation, la vitesse moyenne, le nombre d'arrêts, la résistance au roulement... ou encore le modèle de Cheshier et Harrison [CH87] présenté par l'équation 5 qui utilise notamment le gradient de la route et la vitesse du véhicule :

$$FC = a_0 + \frac{a_1}{s} + a_2 s^2 + a_3 RISE + a_4 FALL + a_5 IRI \quad (5)$$

avec FC la consommation de carburant en $l/1000km$, s la vitesse du véhicule en km/h , IRI l'indice international de la rugosité en m/km (ou mm/m), $RISE$ la pente croissante de la route, $FALL$ la pente décroissante de la route, et a_0, \dots, a_5 des constantes.

B. Modèles mécaniques

L'approche mécanique considère que la consommation est proportionnelle à la puissance totale demandée. Le travail consiste d'abord à estimer et modéliser les différentes

forces résistantes pour en déduire les forces de traction nécessaires au véhicule. Par la suite, la puissance totale est calculée par la combinaison de ces forces avec la consommation des accessoires du véhicule et le frottement interne du moteur.

Dans cette approche, on retrouve les modèles développés par Greenwood, par Bennett et Bester.

B.1 Modèles ARRB

Dans ce modèle, la consommation est considérée comme proportionnelle à la puissance totale demandée 6 :

$$FC = \max(\alpha, \beta P_{tot}) \quad (6)$$

avec FC la consommation en carburant en ml/s , α la consommation au ralenti en ml/s , β le facteur d'efficacité en carburant en $mL/kW/s$, P_{tot} la puissance totale demandée en kW . Il reste à déterminer la consommation au ralenti. Bowyer et al (1986) expriment la relation entre la consommation au ralenti et la cylindrée D du moteur par l'équation 7 :

$$\alpha = 0.220D - 0.0193D^2 \quad (7)$$

De plus amples détails sur le paramètre α sont donnés dans [Gre03]. Un deuxième modèle plus proche de celui de Post est le suivant :

$$FC = \begin{cases} \max(\alpha, \beta P_{tot}) & \text{si } P_{tot} > 0 \\ \min FC & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

avec $\min FC$ la consommation minimum sous une puissance négative en mL/s .

Une conclusion importante de ces études est que la consommation au ralenti varie en fonction du régime moteur. Si on appelle $UFCO$ la quantité de carburant nécessaire au maintien du moteur en régime, celle-ci est reliée au régime moteur N par l'équation 9.

$$UFCO = a_0 + a_1N + a_2N^2 \quad (9)$$

B.2 Les autres modèles

Les recherches en Afrique du sud commencent avec Bester [Bes81]. Le modèle utilisé est le suivant :

$$FC = 1000\beta P_{tot}/s \quad (10)$$

En substituant dans les équations de prédiction la puissance totale exigée, on obtient l'équation 11 :

$$FC = a_0 + \frac{a_1}{s} + a_2s^2 + a_3GRa_4a \quad (11)$$

avec a l'accélération en m/s^2 . Ce modèle a la même forme que celle utilisée dans l'approche empirique. La différence réside dans la définition des paramètres. Bester relie les coefficients avec des forces résistantes. En effet, a_0 est lié à la résistance au roulement, a_1 à la consommation au ralenti, a_2 à la résistance aérodynamique, a_3 à la résistance due à la gravité et a_4 à l'accélération.

Finalement, le principal inconvénient de l'approche empirique est qu'elle dépend beaucoup des caractéristiques du véhicule étudié. Si on veut généraliser le modèle pour un

ensemble de véhicules, on introduit des paramètres moyens et en même temps une imprécision de l'estimation. Par contre, cette approche est parfois plus directe et plus facile si on dispose déjà de données expérimentales. L'approche mécanique quant à elle donne des modèles plus simples et plus génériques. Mais il faut estimer les différentes forces résistantes et identifier les paramètres. On présente dans la section suivante un modèle mixte qui combine les deux approches.

C. Modèle EMIT

L'approche mécanique utilisée dans [BAY+], [TR] permet de modéliser la consommation de carburant en g/s par l'équation 12 :

$$FC = \begin{cases} \phi \cdot (K \cdot N \cdot V + \frac{P}{\eta}) & P > 0 \\ K_{idle} \cdot N_{idle} \cdot V & P = 0 \end{cases} \quad (12)$$

avec ϕ , le rapport de masse du mélange carburant/air (14.5), K le coefficient de frottement du moteur en $kJ/rev/litre$, N le régime moteur en (tr/s), V la cylindrée du moteur en l , η le rendement du moteur, K_{idle} le coefficient de frottement du moteur au ralenti en $kJ/rev/l$, N_{idle} le coefficient lié à la vitesse au ralenti et P la puissance de sortie du moteur en kW . La puissance du moteur est ainsi modélisée par l'équation 13 :

$$P = \frac{P_{tract}}{\epsilon} + P_{acc} \quad (13)$$

avec P_{tract} , la puissance demandée aux roues, ϵ le rendement de la chaîne de traction, P_{acc} la puissance pour les accessoires. La force de traction est alors donnée par 14 :

$$P_{tract} = A \cdot s + B \cdot s^2 + C \cdot s^3 + M \cdot a \cdot s + M \cdot g \cdot \sin \vartheta \cdot s \quad (14)$$

avec s la vitesse du véhicule en m/s , a l'accélération en m/s^2 , A la résistance au roulement en $kW/m/s$, B un terme correctif pour la résistance au roulement $kW/m/s$, C le coefficient aérodynamique $kW/(m/s)^3$, M la masse du véhicule en kg , g l'accélération de pesanteur ($9.81 m/s^2$), ϑ la pente de la route en degré. On considère que l'on travaille sur route plane $\vartheta = 0$, sans utilisation des accessoires P_{acc} , en prenant comme hypothèse que les effets de K, N, ϵ, ϕ sur la consommation sont en accord avec l'évolution de $s, s^2, s^3, a \cdot s$ selon l'équation 14. Le modèle EMIT est finalement de la forme suivante [CCN+02] :

$$FC = \begin{cases} \alpha + \beta s + \gamma s^2 + \delta s^3 + \zeta a s & P_{tract} > 0 \\ \alpha' & P_{tract} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

III. DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES DE CONSOMMATION SUR DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Pour cette étude, on utilise les données expérimentales issues du projet LAVIA dont l'objet était l'étude de l'impact sur la conduite de l'utilisation du guidage et des recommandations par GPS. Ces données ont été enregistrées sur différents trajets avec plusieurs conducteurs. Elles comprennent des valeurs instantanées de la consommation, la vitesse, l'accélération, le rapport de boîte de vitesse, le couple moteur, le régime moteur avec un pas de 0.5 s. Un exemple de trajet enregistré avec différents paramètres est donné sur

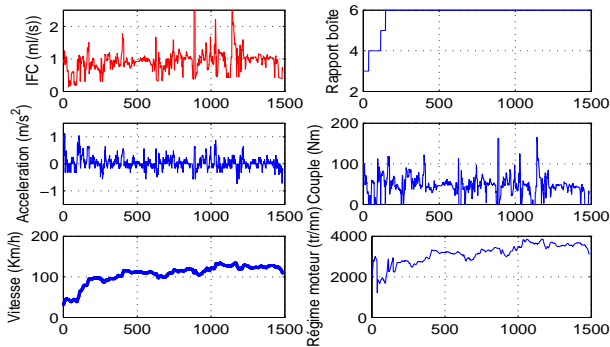


Fig. 1. Exemple des trajets étudiés

la figure 1. Le tableau suivant présente les cinq paramètres qui nous intéressent dans un premier temps :

FC	Consommation de carburant	ml/s
N	Régime moteur	tr/mn
C	Couple moteur	Nm
s	Vitesse	km/h
a	Accélération	m/s^2

La première démarche pour nous est de savoir ce que donnent les différents modèles dans la littérature avec nos jeux de données. Vu le nombre limité de paramètres disponibles (pas de gradient de la route par exemple), on n'est pas en mesure de tester tous les modèles existants. Par conséquent, seuls les trois modèles présentés par les équations (1, 3, 4, 15) seront testés. Deux étapes préparatoires pour les tests et la modélisation ont été faites. La première consiste à choisir, parmi les trajets enregistrés, celui ou ceux qui représentent au mieux les différentes situations de circulation. Cela permet d'assurer que les modèles ne fonctionnent pas seulement dans des cas particuliers comme par exemple l'équation 19. La deuxième étape consiste à construire d'un côté des jeux de données pour la modélisation et de l'autre des jeux de données pour la validation. Sur un trajet choisi, on utilise par exemple sur 1000 mesures, les 300 premières pour faire la modélisation et le reste pour la validation. On se contente dans un premier temps d'utiliser des méthodes d'identification pour trouver les différents optima des paramètres des modèles à partir des données expérimentales. On peut constater que les modèles présentés sont linéaires en les paramètres à identifier. On utilise donc la méthode d'identification simple et efficace des moindres carrés.

A. Test de trois modèles

Dans cette partie, on souhaite tester les modèles de Post, de EMIT, et celui de Ahn et Rakha avec les jeux de données du projet LAVIA. Disposant de la vitesse et de l'accélération, il nous manque la variable puissance dans le modèle de Post. On la calcule par la relation $P = N * C$. Les modèles sont testés sur un trajet dont la vitesse varie entre 0 et 115 km/h .

La figure 2 présente l'estimation de la consommation instantanée avec le modèle de Post. Cette figure montre que la courbe d'estimation a une allure, plutôt proche de celle des

mesures. Bien que l'erreur d'estimation reste élevée, l'utilisation de la puissance est intéressante à reprendre par la suite (modèle 21). Les valeurs numériques identifiées de α et β sont respectivement 2.461 et $0.04003 * 10^{-4}$.

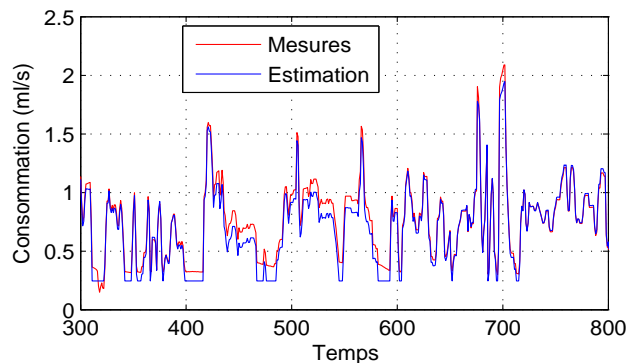


Fig. 2. Estimation avec le modèle de K. Post

Le même test avec le modèle EMIT et celui de Ahn et Rakha ne fournit pas une meilleure estimation. La figure 3 montre le résultat obtenu avec le modèle EMIT.

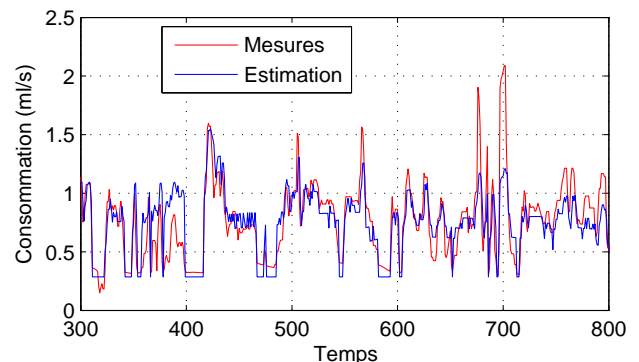


Fig. 3. Estimation avec le modèle EMIT

Sur ces trois modèles, celui de Post donne la meilleure estimation pour nos jeux de données. Les deux autres modèles donnent des erreurs d'estimation trop importantes de l'ordre de 80% pour le modèle EMIT et de 50% pour le modèle de Ahn et Rakha. Il est important de souligner que les modèles testés sont construits avec certaines hypothèses qui ne sont pas forcément vérifiées dans nos données (par exemple : route plane pour le modèle EMIT). Il est dans ce cas délicat de conclure si ces modèles sont précis ou pas. Par contre, on peut retenir que l'utilisation de la puissance moteur semble prometteuse et qu'on doit estimer séparément la consommation au ralenti et en fonctionnement normal. Il est par ailleurs évident que l'utilisation d'une simple constante pour le régime de ralenti est insuffisante. Finalement, l'utilisation seule de la cinétique du véhicule peut aussi être insuffisante. Il faut donc rajouter d'autres paramètres comme ceux de la route ou du trajet. On construit donc un nouveau modèle sous forme :

$$\begin{aligned}
 FC &= \beta \quad \text{si } P > 0 \\
 &= \alpha \quad \text{si } P \leq 0
 \end{aligned} \tag{16}$$

où α et β sont fonction des différents paramètres du véhicule et du trajet, avec $P = C * N$ et $N > 0$, on se ramène

à tester la condition sur le couple moteur C à la place de la puissance P . D'autre part, la consommation au ralenti varie en fonction du régime moteur du véhicule. L'étude de Bowyer donne cette dépendance sous la forme de l'équation 9. Dans un premier temps, le modèle s'écrit :

$$\begin{aligned} FC &= \beta & si \ C > 0 \\ &= \alpha + \gamma N + \theta N^2 & si \ C \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

B. Modèle combinant la cinétique du véhicule et le couple moteur

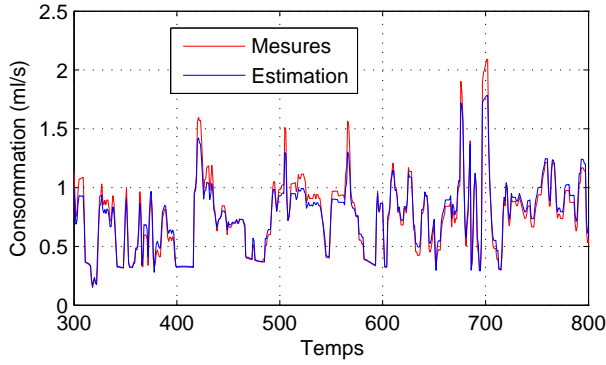


Fig. 4. Estimation avec modèle utilisant la vitesse et le couple moteur

D'après les données expérimentales à haute vitesse, la consommation peut être considérée comme une fonction linéaire de C . En utilisant la vitesse dans le modèle, on obtient l'équation 18 :

$$\begin{aligned} FC &= \beta_1 + \beta_2 s + \beta_3 C & si \ C > 0 \\ &= \alpha + \gamma N + \theta N^2 & si \ C \leq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

La figure 4 montre le résultat de l'estimation avec le modèle 18, plutôt intéressant surtout pour le régime au ralenti. Différents tests ont été réalisés. C'est avec l'équation 7 que l'on estime la consommation en carburant au ralenti. L'identification avec les moindres carrés nous donne le tableau I des valeurs des paramètres du modèle. Pour une meilleure lisibilité, dans ce tableau, ainsi que tous ceux qui suivent, les valeurs des paramètres ont été multipliées par un facteur 10^{-4} :

TABLE I
VALEUR DES PARAMÈTRES DU MODÈLE 18

β_1	β_2	β_3
-492.34603	45.09856	91.17993
α	γ	θ
1099.15704	0.03971	0.00026

On synthétise les résultats de l'estimation avec le tableau II :

TABLE II
ESTIMATION AVEC LE MODÈLE 18

ϵ	$\frac{mean(\epsilon_\theta)}{max(\theta)}$	$\frac{max(\epsilon_\theta)}{max(\theta)}$	$\frac{ \epsilon_\theta }{max(\theta)} < 5\%$
$\epsilon(\%)$	2.47	22.80	87.60

Ces résultats ne semblent pas encore très satisfaisants, on ajoute alors d'autres paramètres influençant la consommation, notamment l'accélération. Cela donne un deuxième

modèle avec l'équation 19 :

$$\begin{aligned} FC &= \beta_1 + \beta_2 s + \beta_3 C + \beta_4 a & si \ C > 0 \\ &= \alpha + \gamma N + \theta N^2 & si \ C \leq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

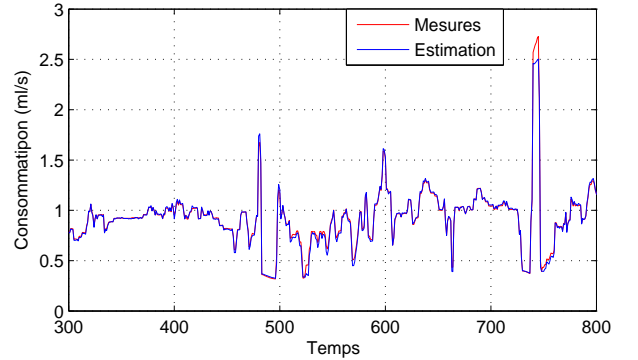


Fig. 5. modèle 19 avec vitesse élevée

L'estimation est très peu améliorée. Par contre, si le modèle est utilisé uniquement sur un parcours à vitesse élevée, on obtient un résultat plutôt intéressant comme le montre la figure 5. Sur le trajet retenu, il faut remarquer qu'il y a peu de changements de rapport de boîte de vitesse qui influencent pourtant considérablement la consommation. Cela explique le fait que le modèle ne fonctionne pas correctement dans une zone de vitesses moyennes ou faibles où l'on a souvent des changements de rapport de boîte. En suivant cette réflexion, il faut souligner que sur le même rapport de boîte de vitesse, on a un rapport constant entre la vitesse et le régime moteur. D'où l'idée de remplacer la vitesse dans les équations précédentes par le régime moteur. Ce qui nous permet de construire d'autres modèles dans la section suivante.

C. Prise en compte du régime moteur

On suppose donc que l'influence du rapport de boîte sur la consommation peut s'exprimer à travers le régime moteur. On remplace la vitesse par le régime moteur dans le modèle 18, cela nous donne l'équation 20 :

$$\begin{aligned} FC &= \beta_1 + \beta_2 N + \beta_3 C & si \ C > 0 \\ &= \alpha + \gamma N + \theta N^2 & si \ C \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Ce modèle donne un résultat bien meilleur comme on peut le vérifier sur la figure 6.

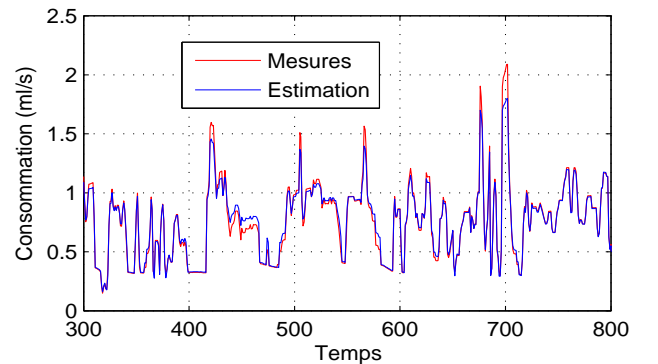


Fig. 6. Modèle avec le régime moteur et le couple

Les erreurs maximale et moyenne sont plus faibles (14% et 1% au lieu de 22.8% et 2.47%) et le pourcentage d'erreur inférieur à 5% est de 96% au lieu de 87%. L'erreur d'estimation est présentée sur la figure 7.

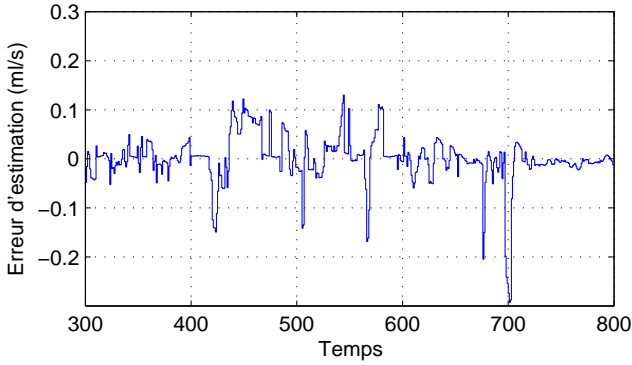


Fig. 7. Erreur d'estimation avec le modèle 20

Les valeurs des paramètres sont données dans le tableau III :

TABLE III
VALEUR DES PARAMÈTRES DU MODÈLE 20

β_1	β_2	β_3
-5353.57313	3.17790	94.91884
α	γ	θ
1099.15704	0.03971	0.00026

Ce modèle assez simple estime plutôt bien la consommation en carburant sur les différents trajets étudiés. Par contre, ces résultats ne sont pas encore satisfaisants car l'erreur maximale reste élevée. On souhaite améliorer le modèle en remplaçant le couple moteur par le produit du couple et du régime moteur, donc la puissance.

D. Modèle utilisant la puissance

Le modèle proposé dans cette section est proche de celui de l'équation 20. On y remplace C par le produit $N * C$. Cela donne :

$$\begin{aligned} \text{FC} &= \beta_1 + \beta_2 N + \beta_3 NC \quad \text{si } C > 0 \\ &= \alpha + \gamma N + \theta N^2 \quad \text{si } C \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

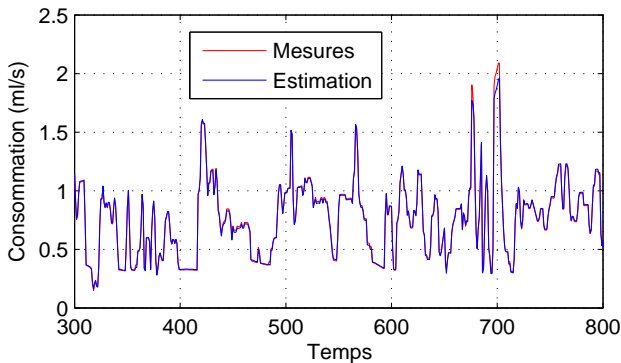


Fig. 8. Résultat de l'estimation avec le modèle 21

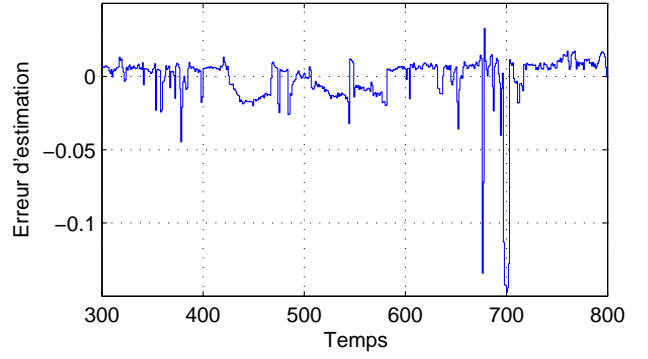


Fig. 9. Erreur de l'estimation avec le modèle 21

Ce modèle reprend, pour le premier terme, l'idée développée par Post en utilisant la puissance du moteur. Les différents tests montrent qu'on améliore beaucoup l'estimation avec ce nouveau modèle. Sur la figure 8, les deux courbes de consommation réelle et estimée se suivent bien. Il existe quelques pics de consommation que le modèle n'arrive pas à bien estimer. Les résultats sont quand même globalement corrects comme montre la figure 9 pour l'erreur de l'estimation. Les différents paramètres du modèles et de l'estimation sont donnés dans le tableau IV :

TABLE IV
RÉSULTATS DE L'ESTIMATION AVEC LE MODÈLE 21

β_1	β_2	β_3
-397.51019	1.16184	0.03954
α	γ	θ
1099.15704	0.03971	0.00026
$\frac{\text{mean}(\epsilon_\theta)}{\text{max}(\theta)}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_\theta)}{\text{max}(\theta)}$	$\frac{ \epsilon_\theta }{\text{max}(\theta)} < 5\%$
0.42	12.08	99.40

IV. AMÉLIORATIONS DU MODÈLE

Le modèle de base est donné par l'équation 8. La présence des pics mal estimés représente le problème majeur. Le premier réflexe consisterait à introduire des paramètres supplémentaires dans le modèle. Mais quels sont les paramètres à ajouter sachant qu'on a déjà le régime moteur et la puissance? Dans les précédentes remarques, on voit que l'ajout de l'accélération améliore de très peu le modèle et que la vitesse a moins d'influence sur la consommation par rapport au régime moteur. Les tests réalisés avec ces deux paramètres nous confirment ces remarques. On retient donc le couple moteur comme variable supplémentaire. Le nouveau modèle est donc :

$$\begin{aligned} \text{FC} &= \beta_1 + \beta_2 N + \beta_3 NC + \beta_4 C \quad \text{si } C > 0 \\ &= \alpha + \gamma N + \theta N^2 \quad \text{si } C \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Ce modèle donne un résultat légèrement meilleur par rapport au modèle précédent. Le tableau récapitulatif de ce modèle ainsi que la figure 10 nous permet de constater cette différence.

L'étude portée sur le gradient de la route ne donne pas de meilleur résultat. On ne voit pas vraiment l'effet de la pente sur l'estimation avec le modèle présenté. Cela peut

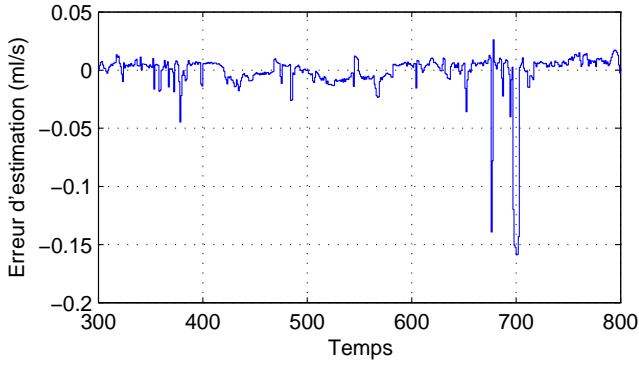


Fig. 10. Erreur de l'estimation avec le modèle 22

TABLE V
RÉSULTATS POUR LE MODÈLE 22

ϵ	$\frac{\text{mean}(\epsilon_\theta)}{\text{max}(\theta)}$	$\frac{\text{max}(\epsilon_\theta)}{\text{max}(\theta)}$	$\frac{ \epsilon_\theta }{\text{max}(\theta)} < 5\%$
$\epsilon(\%)$	0.398	9.35	99.40
β_1	β_2	β_3	β_4
-1029.92481	1.41071	0.03475	11.86631
α	γ	θ	
1086.27350	0.05276	0.00025	

sembler surprenant mais il faut souligner que dans le modèle développé, les paramètres utilisés incluent implicitement l'effet de la pente. On s'inspire à présent du modèle de EMIT avec la pondération des variables du modèle. On peut très bien imaginer ajouter le terme C^2 ou N^2 dans le modèle. Plusieurs tests nous confirment que le premier est plus adéquat. Le modèle peut être écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \text{FC} &= \beta_1 + \beta_2 N + \beta_3 NC + \beta_4 C + \beta_5 C^2 & \text{si } C > 0 \\ &= \alpha + \gamma N + \theta N^2 & \text{si } C \leq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

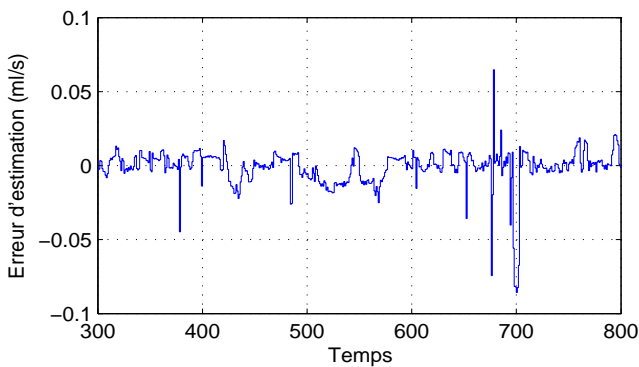


Fig. 11. Erreur de l'estimation avec le modèle 23

La performance de ce modèle est plutôt satisfaisante, bien que l'erreur maximale demeure aux alentours de 9%.

V. CONCLUSION

Ce papier s'est limité à présenter des modèles linéaires simples. Ces modèles, avec plus ou moins de paramètres, arrivent à donner des résultats satisfaisants pour des tests menés sur plusieurs types de trajets et différents conducteurs. L'introduction du gradient de la route ne semble pas

nécessaire. Le nouveau modèle proposé est construit comme une combinaison entre l'approche purement statistique et l'approche mécanique et n'utilise que deux variables du véhicule. Ce modèle ne tient pas compte de la consommation des accessoires du véhicule et il est construit pour des véhicules légers de cinq places. Il serait maintenant intéressant de le tester sur d'autres types de véhicules.

RÉFÉRENCES

- [Ahn98] K. Ahn. Microscopic fuel consumption and emission modeling. Master's thesis, the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [ARA⁺02] K. Ahn, H. Rakha, M. ASCE, A. Trani, and M. Van Aerde. Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128 :182–190, 3 2002.
- [BAY⁺] M. Barth, F. An, T. Younglove, G. Scora, C. Levine, M. Ross, and T. Wenzel. Development of a comprehensive modal emissions model, final report prepared for the national cooperative highway research program, april 2000.
- [Bes81] C.J. Bester. *Fuel Consumption of Highway Traffic*. PhD thesis, University of Pretoria, 1981.
- [CCN⁺02] A. Cappiello, I. Chabini, E.K. Nam, A. Lue, and M. Abou Zeid. A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption. *Manuscript received March 15, 2002. This work was supported in part by Ford Motor Company through the Ford-MIT Alliance.*, 2002.
- [CEHW79] M.F. Chang, L. Evans, R. Herman, and P. Wasielewski. Gasolin consumption in urban traffic. *Transportation Research Record 599, Washington D.C.*, 1979.
- [CH87] A.D. Chesher and R. Harrison. Vehicle operating costs : Evidence from developing countries. world bank publications, johns hopkins press. 1987.
- [Din00] Y. Ding. Quantifying the impact of traffic-related and driver-related factors on vehicle fuel consumption and emissions. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, May 2000.
- [FR93] An F. and M. Ross. Model of fuel economy with applications to driving cycles and traffic management. *Transportation Research Record 1516, Washington, D.C.*, 1993.
- [Gre03] I.D. Greenwood. *A New Approach To Estimate Congestion Impacts For Highway Evaluation - Effects On Fuel Consumption And Vehicle Emissions*. PhD thesis, The University of Auckland, 2003.
- [Lam85] T.N. Lam. Estimating fuel consumption from engine size. *Journal of Transportation Engineering*, 111 :No.5, July 1985.
- [NBML08] L. Nouveliere, M. Braci, L. Menhour, and H. T. Luu. Fuel consumption optimization for a city bus, ukacc control 2008, england, manchester. 2008.
- [NMB⁺08] L. Nouveliere, Menhour, L. Braci, H.T. Luu, and S. Mammam. Infrastructure based fuel consumption optimization of a vehicle, 9th international symposium on advanced vehicle control avec08, japan, kobé. 2008.
- [PKTC85] K. Post, J.H. Kent, J. Tomlin, and N. Carruthers. Fuel consumption and emission modeling by power demand and a comparison with other models. *Transport Research A*, 18A(No.3) :Pergamon Press Ltd, 1985.
- [RVAAT99] H. Rakha, M. Van Aerde, K. Ahn, and A.A. Trani. Requirements for evaluating the environmental impacts of intelligent transportation systems using speed and acceleration data. In *Presented at the Transport Research Board 78th Annual Meeting*, 1999.
- [TR] M. Thomas and M. Ross. Developpement of second-by-second fuel use and emissions model based on an early 1990s composite car, sae technical paper series, 97-1010, 1999.
- [VC] Siemens VDO-Continental. http://www.vdo.fr/press/releases/chassisandcarbody/2006/sv20060611af_r.htm.