

CONSÉQUENCES DES TRAVAUX D'ENTRETIEN DES CHAUSSÉES SUR LES CONSOMMATIONS EN CARBURANT ET ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

F. BRILLET & C. VADEPIED

Division ESAR, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France
francois.brillet@lcpc.fr

RÉSUMÉ

L'entretien des chaussées sert à restaurer les qualités d'usage, qui conditionnent sécurité, confort, silence, mais aussi diminuent la consommation en carburant et donc les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone principalement). En contrepartie, les véhicules consomment et émettent davantage lors des travaux, du fait des ralentissements, bouchons et déviations. Lors du contrat européen FORMAT (Fully Optimised Road Maintenance, 2002-2005), un calcul du temps perdu sur chantier a été proposé, qu'il convenait de compléter par les consommations en carburant et émissions. C'est l'une des tâches du projet de recherche national PROPICE (Préservation et Réhabilitation Optimisées du Patrimoine existant d'Infrastructures sous fortes Contraintes de circulation, d'Environnement et des riverains), confiée au LCPC. Pour cela, un véhicule léger a été équipé pour la mesure de consommation et autres paramètres de fonctionnement, pour des essais à différentes vitesses sur piste, puis à vitesse normale sur circuit routier, et enfin dans des conditions de circulation saturée. Ceci permet de connaître les variations de consommation et émissions dans différentes configurations de chantier, selon le niveau de trafic. Il est prévu ultérieurement d'étendre ces résultats à une circulation diversifiée, afin d'établir des bilans sur le cycle de vie d'une chaussée.

1. CONTEXTE ET EXECUTION DE L'EXPERIMENTATION

1.1. Le cadre de la recherche : le contrat PROPICE

L'entretien de la route a un coût, pour le gestionnaire bien sûr, mais aussi pour l'utilisateur, qui subit les inconvénients des chantiers [1,2] : augmentation des temps de parcours, inconfort, surconsommations en carburant et autres coûts d'exploitation et d'amortissement du véhicule. On doit ajouter à ce bilan les conséquences pour les riverains et l'environnement, en matière de bruit et pollutions supplémentaires. Parmi les émissions atmosphériques des véhicules, le CO₂ (dioxyde de carbone) constitue le principal gaz à effet de serre, cause du réchauffement climatique.

Conclu avec l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour une durée de trois ans (2006-2009), le contrat PROPICE (Préservation et Réhabilitation Optimisées du Patrimoine existant d'Infrastructures sous fortes contraintes de Circulation, d'Environnement et de riverains) a pour objectif de développer des stratégies de gestion du patrimoine et des outils technologiques et méthodologiques visant à concevoir et mettre en œuvre des « chantiersfurtifs » (c'est à dire à la fois discrets et rapides), minimisant la gêne pour les usagers, l'environnement et les riverains.

Ce contrat réunit différents intervenants. Il est coordonné par le groupe EGIS, et associe un concessionnaire d'autoroutes (ASF), des entreprises de génie civil (Colas et Bouygues TP), des organismes de recherche (LCPC et CSTB) et un département universitaire (le LGC -Laboratoire de Génie Civil- de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand).

Le travail décrit dans ce qui suit ne concerne qu'une partie du contrat (tâche 1.2), confiée au LCPC et concernant la modélisation des gênes dues aux chantiers. Dans le cadre de la tâche 1.1, le LCPC a déjà produit un rapport analysant les différents types de gênes provoquées par les travaux routiers [3]. Un premier travail de modélisation des gênes ayant été réalisé au LCPC dans le cadre du projet européen FORMAT [4] (*Fully Optimised Road Maintenance*), concernant le calcul des temps de parcours sur chantier, il s'agissait ici de compléter le modèle par un calcul des consommations en carburant et émission de CO₂.

1.2. Le véhicule instrumenté

L'objectif consistait à mesurer la consommation effective d'un véhicule léger dans diverses conditions, concernant tant la route elle-même (géométrie et état) que ses modalités de fonctionnement (vitesses et accélérations). Le véhicule utilisé est une berline Peugeot 406 1,8L à essence, pourvue d'une instrumentation spécifique : mesure de distance, vitesse et accélération, centrale inertielle permettant de connaître la position du véhicule par déplacement de son centre de gravité. Une roue dynamométrique pouvait également être montée, afin de mesurer les efforts subis par le véhicule suivant les trois directions (longitudinale, verticale et transversale). Pour les mesures de consommation, deux débitmètres ont été insérés sur les conduites de carburant : le premier appareil mesure la quantité de carburant envoyée par la pompe à carburant vers le moteur, le second mesure l'excès de carburant revenant au réservoir. La consommation du véhicule résulte de la différence entre les deux mesures.

1.3. Les paramètres caractérisant la route

Les mesures [5] caractérisant la route sont ici de trois types : la géométrie, l'uni et la profondeur de texture superficielle. Les données géométriques comprennent le rayon en plan du tracé, la pente longitudinale et le dévers transversal, mesurées grâce à l'appareil VANI (Véhicule d'ANalyse d'Itinéraires), qui utilise le principe d'une centrale gyroscopique. Cet appareil a été conçu par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon, qui assure sa gestion.

La mesure de l'uni longitudinal et de profondeur moyenne de texture (PMT selon la norme ISO [6]) a fait appel à un nouvel appareil : le MLPL (MuLtiProfilomètre Longitudinal), pourvu de plusieurs lasers assurant une mesure sans contact, complétée par un gyroscope et un accéléromètre, le tout permettant de reconstituer le profil longitudinal de la surface routière dans la gamme de longueur d'onde considérée. Le profil ainsi relevé permet de calculer un indice d'uni ; dans ce qui suit, deux méthodes de calcul ont été considérées : l'IRI [7] (*International Roughness Index*), et la NBO [8,9] (Notation par Bande d'Ondes), utilisée en France, et qui consiste à calculer l'énergie mise en jeu dans trois gammes de longueurs d'onde (PO, MO et GO, correspondant aux gammes 0,7-2,8, 2,8-11,3 et 11,3-45,25 m), rapportée à une échelle de notation de 0 à 10 (10 correspondant à un uni parfait).

2. MESURES SUR PISTE FERMEE

2.1. La piste de référence du LCPC

Le LCPC dispose sur son site de Nantes d'une piste d'essais fermée à la circulation (figure 1). Cette piste comporte un virage relevé pour l'accélération des véhicules, et une ligne droite où sont situées les planches d'essais, ainsi qu'un virage destiné à étudier les phénomènes dynamiques. Elle permet de réaliser divers types d'essais dans de bonnes conditions de sécurité et de fiabilité, à des vitesses allant de 0 à 130 km/h. Conçue pour

tester, étalonner et homologuer des appareils de mesure des caractéristiques de surface des chaussées, son utilisation s'est étendue à l'analyse et la modélisation de performances diverses des véhicules, comme par exemple le rayonnement sonore ou les distances de freinage.

L'objectif principal était ici de réaliser des essais à vitesse maîtrisée, sans subir de contrainte du fait des autres véhicules, et en toute sécurité, en ligne droite ou en virage. La présence de différentes natures de surface permet d'étudier l'influence de la texture.



Figure 1 – Vue d'ensemble des planches d'essais de la piste et du virage

2.2. Séries de mesures

Des mesures ont été effectuées à l'arrêt, puis à différentes vitesses stabilisées grâce au régulateur, par pas de 10 km/h entre 20 et 130 km/h, pour différents rapports de boîte, d'abord selon une conduite « économique » (passage des vitesses à 20, 40, 60 et 80 km/h), avec ensuite des cas de sur- ou sous-régime.

Les premières séries ont été faites sur le revêtement « E2 » en BBSG (béton bitumineux semi-grenu) 0/10 « ancien » (datant de 1980). Les séries suivantes ont concerné plusieurs zones d'essais, qui ont chacune leurs propres caractéristiques de texture sur une longueur de 250 m (parfois légèrement moins) et 3 m de large, et sont représentatives de différentes techniques utilisées en couche de surface, sauf pour certaines où l'objectif est justement d'obtenir une faible adhérence (planches G, L1 et L2). Le tableau 1 donne les caractéristiques d'uni et de texture de ces planches (l'uni GO n'y figure pas car les longueurs de mesures étaient insuffisantes pour obtenir une valeur significative).

Tableau 1 – Données de texture et d'uni des planches de la piste

Planche	Technique	Texture PMT (mm)	Uni IRI (m/km)	Note MO		Note PO	
				G	D	G	D
E1	BBSG 0/10 neuf	0,81	1,37	9	9,5	8	8
E2	BBSG 0/10 ancien	0,93	1,51	9	9	7	7
M2	BBTM* 0/6	1,30	1,84	9,5	9	7	6
L1	Résine	0,20	1,34	10	9	9,5	8
L2	Sable enrobé	0,50	1,66	8	8,5	7	8
F	Procédé d'entreprise	0,77	1,52	9	8,5	6,5	7
G	BB 0/10 faible adhérence	0,62	1,33	8	9	9	8,5

* BBTM = Béton Bitumineux Très Mince

Pour l'étude de l'influence du tracé, la piste dispose d'un virage de 110 m de rayon (figure 1), où des mesures ont été effectuées à des vitesses comprises entre 40 et 90 km/h.

2.3. Calage du modèle

Le mouvement d'un véhicule s'oppose à plusieurs types de forces, qui chacune possède sa propre équation. Toutes participent à la dépense d'énergie, et donc à la consommation en carburant ; de plus, ces forces ne sont pas indépendantes entre elles, et les interactions en jeu sont rarement linéaires. Heureusement, les phénomènes peuvent être décrits selon des lois physiques bien identifiées, d'où l'intérêt de s'appuyer sur un modèle numérique, ce qui permet en outre des extrapolations à des véhicules de même nature mais de caractéristiques différentes. Les relations utilisées sont les mêmes que dans le modèle HDM, créé sous l'égide de la Banque Mondiale dans les années 1970, et dont la responsabilité a été reprise en 1996 par l'AIPCR, qui en a externalisé le développement [10].

La procédure (proposée dans le volume « guide pour le calage et l'adaptation » de HDM) est la suivante :

- 1 Mesurer la consommation au ralenti.
- 2 Mesurer la consommation à différentes vitesses constantes sur la même route, plate et droite (en l'occurrence, la piste du LCPC).
- 3 Calculer pour chaque vitesse la puissance nécessaire au mouvement du véhicule, selon les équations du modèle.
- 4 Calculer la puissance utilisée par le moteur et les accessoires, avec le paramétrage par défaut.
- 5 Calculer la puissance totale utilisée.
- 6 Diviser la consommation instantanée (en ml/s) par la puissance totale ; cela donne le facteur de conversion puissance-consommation correspondant.

Les équations du modèle (point 3) permettent de calculer, en fonction de la vitesse et des caractéristiques du véhicule et de la route, les différentes forces qui s'opposent au mouvement (gravité, inertie, envirage, résistances à l'avancement). À vitesse constante et en ligne droite, seules sont concernées les résistances au roulement et à la pénétration dans l'air, et la gravité positive ou négative selon que l'on se trouve en montée ou en descente.

La figure 2 montre la puissance nécessaire au mouvement en fonction de la vitesse, sur la planche « E2 » en ligne droite et sans accélération, et la puissance totale consommée en conduite « économique ». La figure 3 illustre le calage qui en résulte.

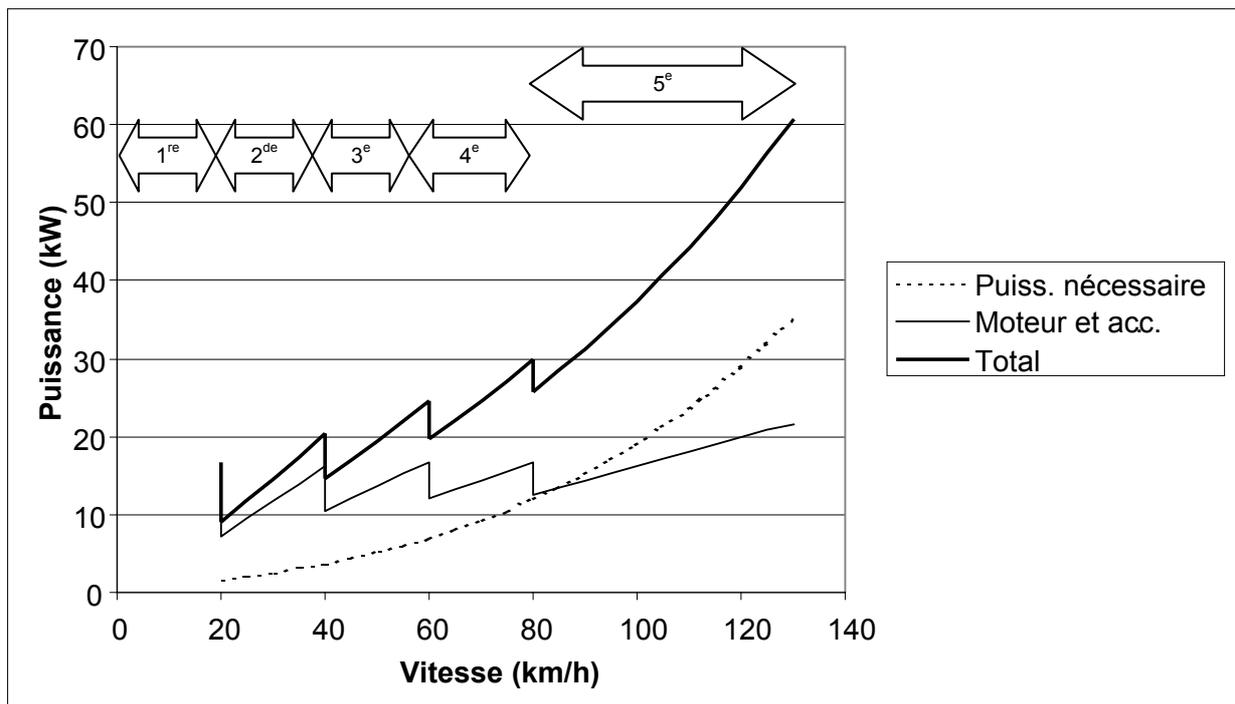


Figure 2 – Principe de calcul de la demande de puissance

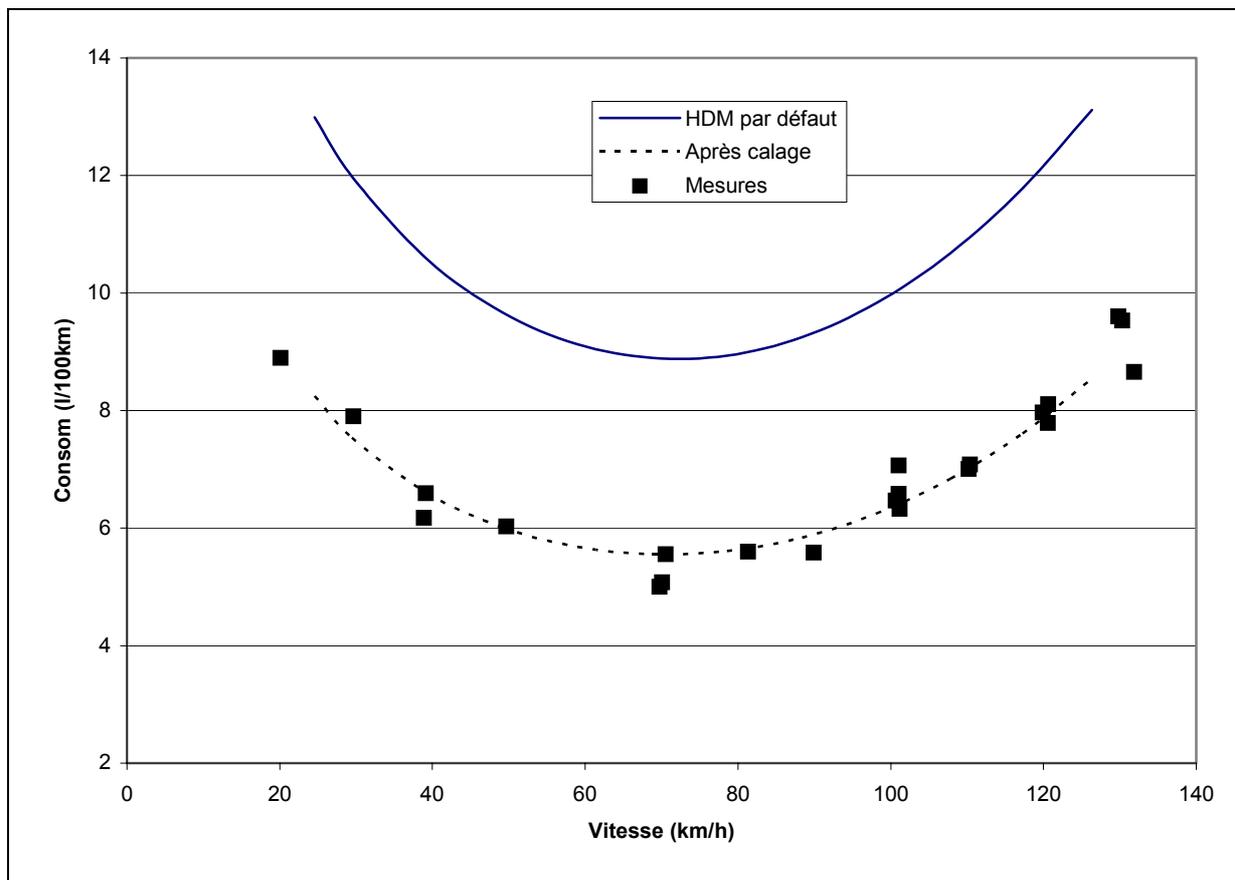


Figure 3 – Résultats du calage du modèle à vitesse constante et en ligne droite (conduite « économique »)

Les essais réalisés en virage et sur les autres planches de la piste ont permis d'ajuster les coefficients relatifs à la force d'envirage, et à la résistance au roulement en fonction des caractéristiques de la surface routière (texture et uni). La formule de HDM prend en compte l'IRI pour caractériser l'uni, mais une variante a été créée ici pour pouvoir intégrer les notes NBO d'uni.

3. MESURES EN CONDITIONS REELLES SUR ROUTE

3.1. Le circuit routier

Un circuit de routes départementales de rase campagne, long de 70 km environ, a été utilisé pour cette série de mesures, qui avait plusieurs objectifs :

- Valider les résultats obtenus sur la piste du LCPC, notamment les coefficients de calage du modèle, dans des conditions réelles et normales de fonctionnement du véhicule, sur des parcours de plusieurs kilomètres ;
- Étudier les facteurs d'influence, comme l'uni ou la pente longitudinale, dont les variations sur la piste sont très faibles ;
- Prendre en compte les variations de vitesse, et donc les accélérations et décélérations, dans un contexte de conduite normale.

Les données caractérisant la route ont été mesurées à l'aide du véhicule VANI et du MLPL (cf. § 1.3). Lors des mesures de consommation, le conducteur devait pratiquer une conduite « économique », en se conformant aux vitesses normalement pratiquées sur route, avec leurs variations dues aux éléments du tracé (virages, agglomérations, carrefours, vitesses limites) mais aussi aux événements aléatoires (interactions avec les autres véhicules).

3.2. Calage du modèle sur le circuit routier

Les résultats des mesures sur route ont été rassemblés dans un fichier de type tableur, dans lequel chaque colonne correspond à une variable et chaque ligne à une section unitaire de route, de longueur constante (certaines analyses ont porté sur des sections continues regroupées selon un critère géométrique). Les variables caractérisent aussi bien la route (rayon en plan, pente longitudinale, dévers, profondeur de texture, uni IRI et NBO) que le fonctionnement du véhicule (vitesse, régime du moteur, consommation instantanée). Le calage a été repris sur les mêmes bases que pour les mesures sur piste, mais en prenant en compte toutes les variables disponibles, y compris l'accélération longitudinale, calculée par différence entre vitesses enregistrées. Moyennant un léger ajustement de coefficients, les consommations mesurées s'accordent bien, statistiquement, aux valeurs prédites par le modèle (figure 4). Une analyse des « résidus » (différences entre valeurs observées et prédites) montre que la plupart des variables ne leur sont pas corrélés, ce qui est un indice favorable quant au bon calage du modèle. Il ne reste que la pente et l'accélération longitudinales dont l'influence semblerait sous-estimée par le modèle.

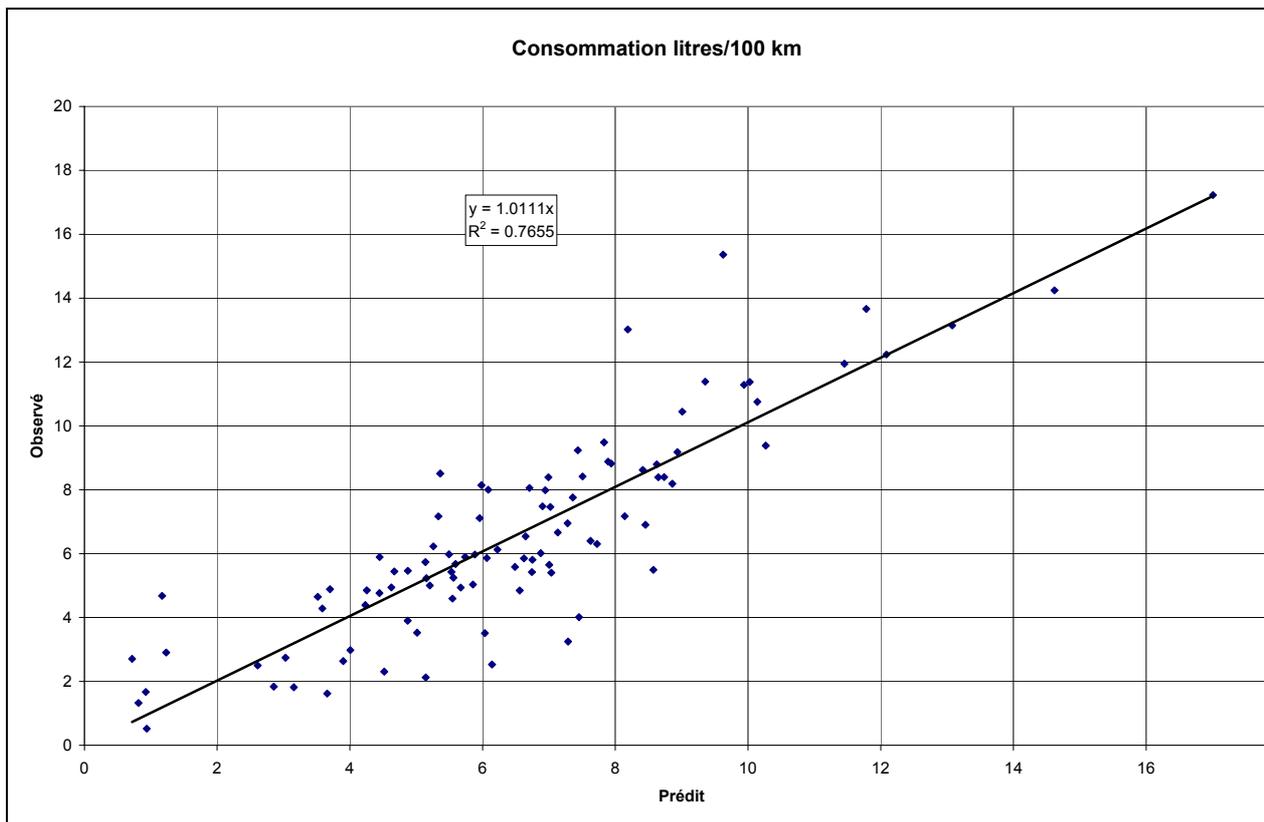


Figure 4 – Corrélation entre consommations observées et prédites (après regroupement des sections unitaires en sections continues de géométrie homogène)

3.3. Conclusions des mesures sur le circuit routier

Conformément à l'objectif assigné, les mesures faites sur le circuit routier ont permis de prendre en compte les paramètres « uni », « pente longitudinale » et « dévers », ce que ne permettaient pas les mesures sur la piste, avec comme résultats :

- Confirmation des coefficients obtenus sur la piste, tels que le rendement énergétique du moteur, la résistance au roulement, l'environnement ;
- Légère augmentation du coefficient d'accroissement de la consommation avec la puissance consommée ;
- Ajustement des coefficients d'uni et de texture selon deux modèles, fondés respectivement sur les échelles d'uni IRI et NBO (le deuxième paraissant plus pertinent).

Il apparaît cependant que, par rapport aux consommations mesurées, le modèle tend à sous-estimer l'effet des accélérations et à un moindre degré des pentes longitudinales. Ceci pourrait avoir une origine métrologique (lissage lors des calculs d'accélération) ou physique (existence de phénomènes dynamiques ignorés).

Si l'on examine les effets des variables décrivant la route, c'est la pente longitudinale qui agit le plus sur les consommations, suivie de la sinuosité ; l'influence des caractéristiques de surface de la chaussée vient après, sans pour autant être négligeables : celle de l'uni ou de texture seraient du même ordre de grandeur (variations de l'ordre de 2 à 3 % pour la gamme rencontrée sur le circuit).

4. MESURES EN CIRCULATION RALENTIE

4.1. Le programme de mesures

Les essais sur le boulevard périphérique de Nantes (RN 844, voie rapide urbaine à 2x2 voies), long de 40 km, ont été réalisés dans le but de mesurer vitesses, accélérations et consommations de carburant en période de trafic dense, allant jusqu'à la situation de bouchon, afin de reproduire les conditions que l'on peut rencontrer lors de chantiers. Deux passages successifs ont été réalisés, l'un à l'heure de pointe (8-9 h), l'autre en heure creuse (14-15 h).

4.2. Analyse des vitesses et accélérations

La figure 5 montre les variations de vitesse enregistrées successivement lors des deux séries de mesures (heure creuse, puis heure de pointe) ; on peut y distinguer trois situations :

- Circulation fluide, où la vitesse oscille autour de la vitesse de consigne, en temps normal égale à la vitesse limite (90 km/h), avec quelques ralentissements temporaires, pendant lesquels la vitesse peut descendre jusqu'aux environs de 60 km/h ;
- Circulation « en accordéon », caractérisée par des cycles d'accélération plus ou moins lente et régulière et de décélération rapide ;
- Situation de bouchon, avec périodes d'arrêt et avance à faible vitesse.

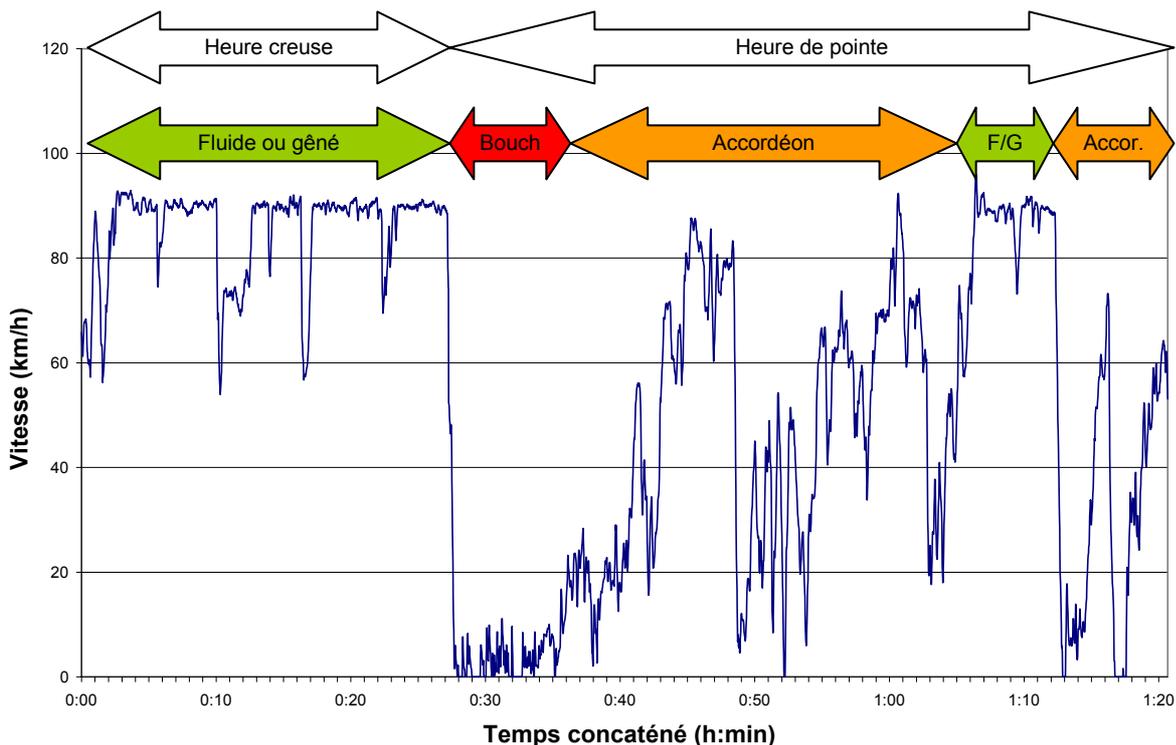


Figure 5 – Diagramme des vitesses

En fait, il a été convenu de séparer, dans le cas de la « circulation fluide », les cas avec et sans gêne, de façon à pouvoir balayer toute la gamme, depuis la circulation fluide sans aucune gêne jusqu'au cas du bouchon. Dans ce qui suit, le cas « fluide » sera donc scindé en deux : « libre » et « gêné ». Le tableau 2 donne les statistiques des cas ainsi définis.

Tableau 2 – Moyenne et écart type des vitesses, accélérations et consommations

Données	Circulation			
	Accordéon	Bouchon	Libre	Géné
Vitesse Moyenne km/h	46,01	3,74	89,88	74,37
Ecart type Vitesse km/h	23,09	3,78	1,13	8,92
Ecart type Accélération m/s ²	0,42	0,32	0,11	0,38
Consommation Moyenne L/h	3,38	1,39	5,09	5,11
Ecart type Consommation L/h	2,72	0,87	1,85	2,85
Consommation Moyenne L/100 km	7,35	37,11	5,66	6,87

4.3. Calage du modèle de consommation

Les principes de simulation appliqués sont les mêmes que sur le circuit routier, avec les particularités suivantes :

- Les données « route » ont été fixées à des valeurs constantes,
- Les accélérations ont été mesurées et non calculées,
- Le régime moteur a été calculé selon la formule de HDM (après calage).

D'autre part, les consommations sont exprimées en litres à l'heure et non pas en litres aux 100 km, compte tenu des périodes où le véhicule était arrêté par les bouchons. Le calage obtenu sur la piste, et ajusté sur les données du circuit routier, a donné de bons résultats, sauf à très faible vitesse, ce qui a conduit à augmenter le paramètre « consommation au ralenti », et de revenir au calage initial « piste » pour la relation entre consommation et puissance utilisée.

5. APPLICATION À UN CHANTIER

5.1. Modélisation de la vitesse

Les relations entre débit de trafic et vitesse font l'objet de nombreux modèles, plus ou moins complexes, pouvant décrire de nombreuses situations [11]; les modèles macroscopiques (qui assimilent le trafic à un fluide) considèrent que, à un temps donné t en un point d'abscisse x , le débit instantané de trafic est $Q(x,t)$ et la vitesse instantanée $V(x,t)$; le nombre de véhicules peut être exprimé en données « tous véhicules » (débit en véhicules/heure, véh/h), ou en Unités de Véhicules Particuliers (UVP), tenant compte de l'espace occupé par les différentes catégories de véhicules. Le taux d'occupation est défini comme $R(x,t) = V(x,t) * Q(x,t) / D_{max}$ où $R(x,t)$ est exprimé comme le rapport entre la densité observée (véh/km ou UVP/km) et un maximum théorique de densité D_{max} . Entre les deux extrêmes (trafic libre et bouchon), le débit maximal est atteint pour un « taux critique », lui-même associé à une vitesse et un débit critiques V_c et Q_c . Si $Q > Q_c$, une situation de bouchon s'installe, avec formation d'une file d'attente elle-même en situation de bouchon. Pour simplifier, le modèle retenu considère ici que la courbe débit/vitesse est une parabole, qui coupe l'axe des ordonnées à zéro et à la vitesse maximale autorisée V_{max} ; ceci implique une vitesse critique V_c égale à $V_{max} / 2$. La vitesse est alors calculée comme suit :

$$V = V_c * \left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q}{Q_c}}\right)$$

Cette formule ne peut bien sûr s'appliquer que si $Q \leq Q_c$; au-delà, seul un débit égal à Q_c continue à rouler, les véhicules excédentaires formant alors une queue, qui avance à la vitesse constatée en situation de bouchon. Dans ces conditions, un véhicule donné ne peut parvenir au point d'abscisse x qu'au bout d'un certain temps, qui peut être calculé (c'est ce que fait le modèle FORMAT).

Cependant, la transition entre la situation « critique » et celle du bouchon est difficile à modéliser, du fait de son caractère chaotique (dans la réalité, un simple coup de frein d'un seul conducteur peut suffire à créer le bouchon). Dans le modèle FORMAT, ce type d'effet est atténué par le caractère probabiliste de la variable Q (qui prend simultanément plusieurs valeurs auxquelles sont attribuées différentes probabilités). Pour ne pas trop compliquer le calcul tout en restant réaliste, la vitesse en traversée de chantier a été considérée dans ce qui suit comme égale à la vitesse critique. Le débit critique Q_c applicable au périphérique de Nantes a été évalué, sur la base de comptages SIREDO [12] (dispositifs répartis sur l'ensemble du réseau national, et qui assurent le comptage des véhicules), à 4 700 v/h par sens (valeur maximale observée en 2002).

5.2. Modélisation des accélérations

La plupart des modèles (dont celui de HDM) admettent l'additivité des carrés des accélérations, dont les causes sont diverses, d'une part dues au véhicule et à son conducteur (γ_0 observée en l'absence totale de gêne, soit ici 0,1 m/s², voir Tableau 2), et d'autre part à la gêne causée par le reste de la circulation, γ_1 . La résultante est alors $\gamma^2 = \gamma_0^2 + \gamma_1^2$. Dans les conditions de circulation « en accordéon », la résultante est égale (toujours en moyenne quadratique) à 0,42 m/s², ce qui, si l'on considère que γ_1 est proportionnel au débit, donne un maximum $\gamma_{1\max}$ de 0,41 m/s². La formule donnant l'accélération devient alors :

$$\gamma = \sqrt{\gamma_0^2 + \left(\frac{Q}{Q_c} \gamma_{1\max}\right)^2}$$

5.3. Modélisation des débits

Dans le cadre du projet FORMAT, un modèle probabiliste de prédiction des débits de trafic a été mis au point. Ce modèle considère, pour un jour type donné (par exemple un jour de semaine hors période estivale), une évolution comprenant un niveau de base et trois courbes en cloche, selon la formule :

$$Q_p(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{i=3} a_i * \exp(-\lambda_i * (t - m_i)^2) + \sigma * N(p)$$

où :

- $Q_p(t)$ est le débit en véh/h par sens exprimé en fonction de l'heure décimale t et de la probabilité p ,
- la fonction $N(p)$ est celle de la loi normale centrée réduite,
- les paramètres a_i, λ_i, m_i déterminent chacune des trois courbes en cloche,
- σ est l'écart type résiduel (moyenne quadratique des résidus, c'est à dire des écarts entre observations et prédiction).

Ces dix paramètres sont déterminés selon une régression non linéaire. Les données seront ici celles du périphérique nantais (données SIREDO 2002), pour les jours définis comme « en semaine » (en fait, les mardis, mercredis et jeudis non fériés) et « hors été » (ce qui exclut les mois de juillet et août). Les résultats de la formule, selon les différentes probabilités, sont affichés sur la figure 6.

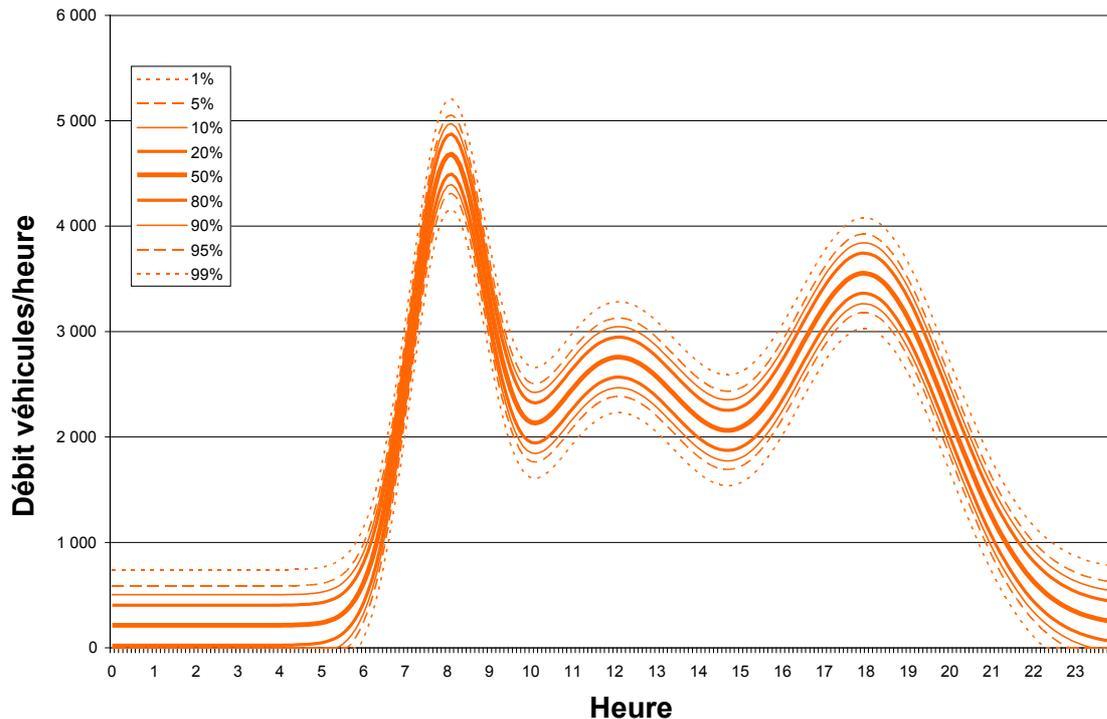


Figure 6 – Calcul probabiliste des débits de trafic

5.4. Simulation du chantier

Sur la base des éléments précédemment définis, un cas simple de chantier a été simulé, avec prédiction des conséquences pour l'utilisateur (en l'occurrence, celui qui utiliserait le véhicule de mesure), en matière de temps de parcours, de consommation de carburant et d'émission de CO₂. Le chantier en question implique de fermer une des deux voies de circulation de la chaussée à une heure h donnée, sur une longueur de 5 km. Le véhicule considéré arrive sur la zone une heure après le début du chantier, soit à l'heure $h + 1$. Les hypothèses suivantes ont été faites sur la demande de trafic et la capacité résiduelle de la voie :

- La demande de trafic reste la même, pour une même heure, quel que soit l'état de saturation de la route (aucun usager ne cherche à dévier son parcours, ni renonce à son déplacement par la route) ;
- La capacité résiduelle de la route en chantier est égale à la moitié de la capacité normale ;
- La vitesse autorisée n'est pas modifiée pendant le chantier (logiquement elle devrait être de 70 km/h mais compte tenu du débit cette vitesse ne serait dépassée qu'en heures creuses).

Les calculs suivants ont été opérés :

- Débit de trafic en fonction de l'heure t et de la probabilité p , selon la formule du modèle FORMAT ;
- Temps d'attente selon les principes de FORMAT ;
- Vitesses et accélérations selon les formules définies précédemment ;
- Régime moteur selon la formule de HDM calée sur la conduite économique ;
- Consommations selon les formules de HDM calées ;
- Émissions de CO₂ proportionnelles aux consommations (2 390 g par litre de carburant) ;
- Espérance mathématiques des temps de parcours, consommations et émissions de CO₂.

Les figures 7, 8 et 9 donnent respectivement les temps de parcours, les consommations de carburant et les émissions de CO₂, en fonction de l'heure h de fermeture de la voie. Les trois composantes correspondent respectivement à :

- La valeur que l'on observerait « en temps normal » ;
- Le « ralentissement », différence entre la situation avec et sans chantier, limitée à la zone de fermeture de voie ;
- L'« attente » en amont du chantier.

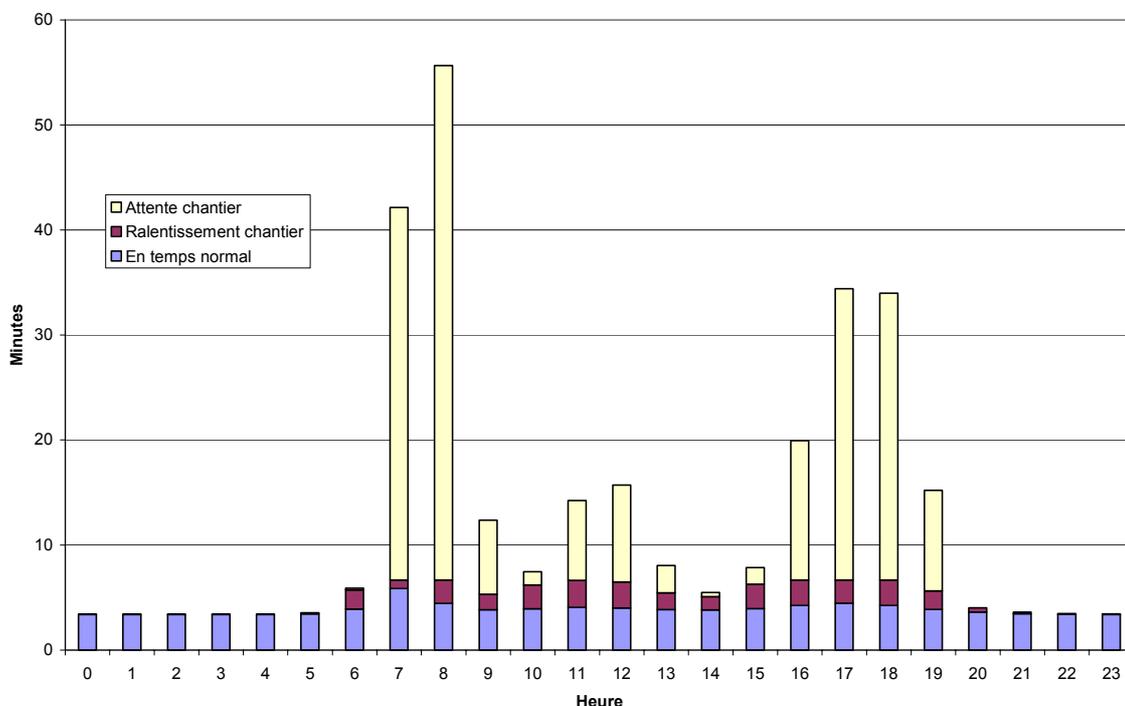


Figure 7 – Temps de parcours sur le chantier considéré

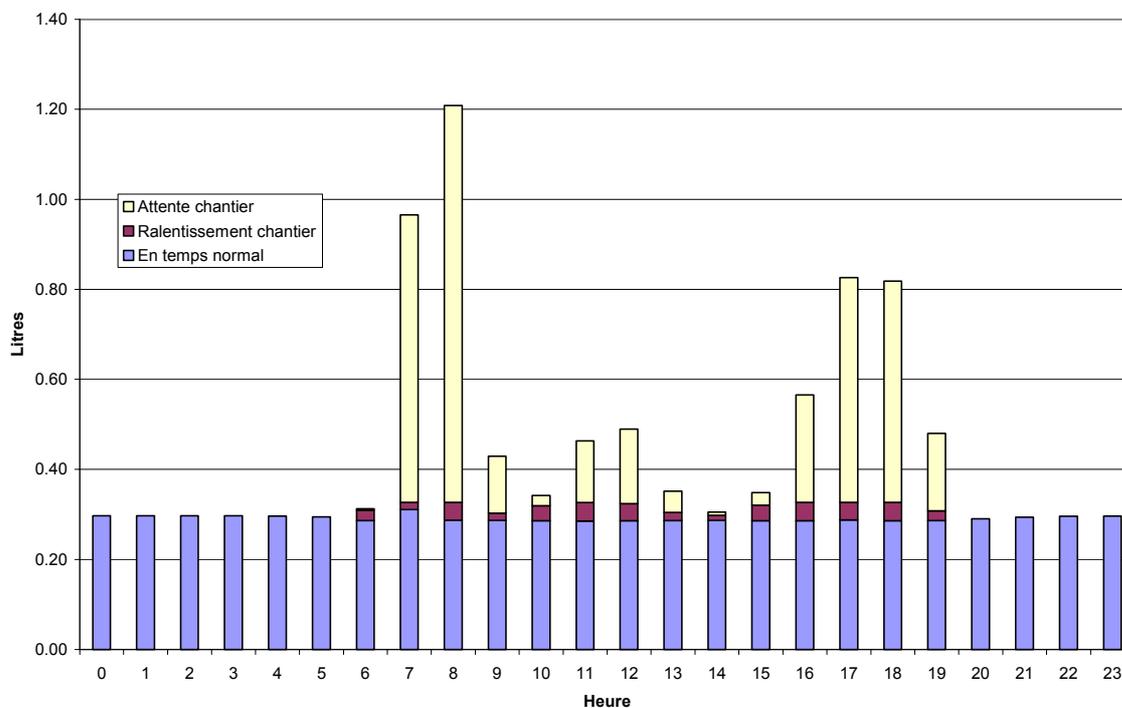


Figure 8 – Consommation du véhicule sur le chantier considéré

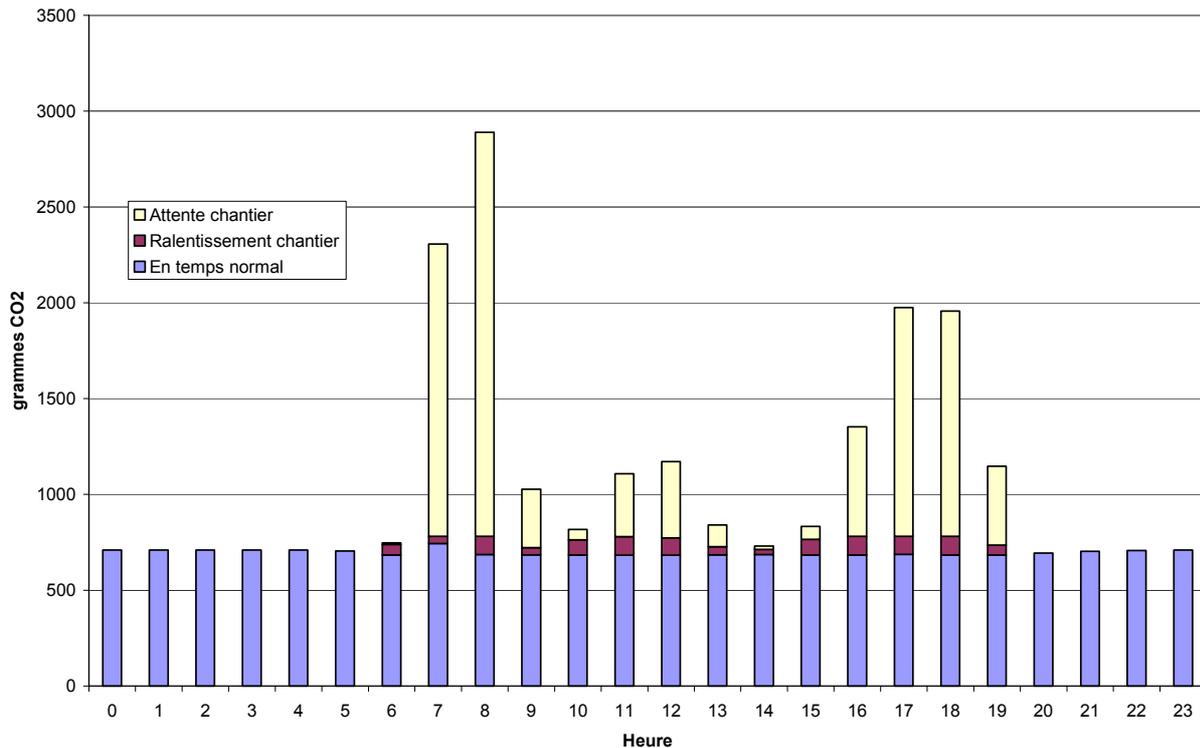


Figure 9 – Émissions de dioxyde de carbone

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.1. Le modèle

Un modèle peut être proposé pour le calcul de la consommation en carburant d'un véhicule léger d'un type donné (berline à essence), en fonction des caractéristiques de la route (géométrie et état) et des conditions de circulation (vitesses et accélérations pratiquées par un conducteur type). Les cas étudiés permettent de prendre en compte à peu près tout type de route, depuis la route locale étroite jusqu'à l'autoroute, depuis le trafic libre jusqu'à la situation de bouchon.

6.2. Extension à un flot de trafic diversifié

La principale limitation du modèle tel qu'il est proposé est qu'il a été validé sur un seul véhicule, et l'on ne peut se contenter de l'hypothèse selon laquelle tous les véhicules en circulation lui seraient semblables. Cependant, le modèle est essentiellement fondé sur des lois physiques, ce qui permet de l'étendre sans difficulté à des véhicules analogues, mais de caractéristiques différentes (telles que masse, puissance, dimensions de pneumatiques...). Il conviendrait donc de segmenter le parc de véhicules actuels par classes de taille et par tranches d'âge, pour lesquels le rapport consommation/puissance ferait l'objet de calages différents. Un calage spécifique devrait être appliqué aux véhicules à moteur Diesel.

Pour les poids lourds, la tâche est plus ardue, car ils ne constituent pas un ensemble homogène, et une expérience analogue de mesure de consommation nécessiterait de très gros moyens. L'application du modèle reste cependant possible, à condition d'exploiter les données disponibles, notamment auprès des organismes professionnels ou des exploitants de parcs.

Enfin, une tâche supplémentaire consistera à passer du « parc statique » (répartition des véhicules en circulation au niveau national) au « parc roulant » (véhicules empruntant une section donnée de route) selon la typologie précédemment définie.

6.3. Interface avec le modèle FORMAT

Le modèle FORMAT (actuellement à l'état d'une feuille de calcul prototype) permet d'évaluer les temps de parcours pour les usagers en fonction de la demande de trafic et de ses variations, des caractéristiques de la route et de celles d'un éventuel chantier (dont on définit l'horaire, le calendrier, le type de fermeture de voies, les déviations proposées, etc.). Il calcule ainsi les conséquences d'un chantier donné en matière de temps perdu par l'utilisateur. Il reste donc à compléter ce modèle, en utilisant les données intermédiaires qu'il génère, telles que les débits de trafic par voie, pour décrire les conditions d'écoulement du trafic et prédire les consommations. Cela consistera à introduire dans la feuille de calcul les formules appliquées dans la présente étude. Une étape ultérieure consistera à réécrire « en dur » toutes les formules et relations du modèle ainsi complété, afin de pouvoir les intégrer dans des logiciels professionnels de gestion routière, tel que le futur SAGIR [1].

6.4. Émissions des véhicules

Les polluants émis par les véhicules dans l'atmosphère ont deux principales conséquences : au niveau local la toxicité pour la santé humaine, et au niveau mondial l'effet de serre, qui provoque le réchauffement climatique. D'autres effets concernent plus spécifiquement la biosphère, comme c'est le cas des pluies acides. Les principaux polluants atmosphériques émis par les véhicules sont :

- Le dioxyde de carbone CO₂ (principal gaz à effet de serre),
- Le monoxyde de carbone CO (toxique),
- Le dioxyde de soufre SO₂ (toxique et acidifiant),
- Les oxydes d'azote NO_x (toxiques et acidifiants),
- Les hydrocarbures non brûlés (le méthane CH₄ est un gaz à effet de serre, et les dérivés aromatiques sont cancérigènes),
- Les particules solides (cancérigènes et salissantes).

Parmi ces émissions, deux peuvent être évaluées sans difficulté à partir des quantités de carburant consommées :

- Nous avons déjà évoqué CO₂ dans ce texte ; c'est en effet la forme sous laquelle se retrouve la quasi totalité du carbone contenu dans le carburant (les autres émissions carbonées, comme les hydrocarbures, le CO et les particules de suie, sont beaucoup plus faibles en quantités, mais bien plus gênantes) ; or le contenu en carbone des différents carburants est constant et bien connu ;
- Le SO₂, forme sous laquelle se retrouve la totalité du soufre contenu dans le carburant, peut aussi être calculé sans difficulté (la teneur en soufre des carburants est réglementée).

Pour les autres polluants, les choses sont plus compliquées, car leur production dépend du fonctionnement des moteurs et des dispositifs antipollution (pots catalytiques et filtres à particules) ; les normes européennes fixent des limites, exprimées en g/km, pour les véhicules mis en circulation, mais les quantités émises par le parc roulant sont plus difficiles à évaluer.

RÉFÉRENCES

1. LEPERT, Ph. (2006). Gestion technico-économique des infrastructures routières. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 261-262, pp 3-23.
<http://www.lcpc.fr/fr/sources/blpc/recent/pdf/bl261-262-003.pdf>

2. BRILLET, F. (2007). Vers une approche économique de l'entretien des routes. Projet de rapport ERLPC, LCPC
3. BRILLET, F. (2006). Typologie des gênes causées par les opérations d'entretien des infrastructures routières. Rapport soumis au Comité de pilotage du contrat PROPICE
4. BRILLET F. (2006). Projet européen FORMAT : quantification de la gêne causée par les chantiers d'entretien. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 261-2, pp 43-66
<http://www.lcpc.fr/fr/sources/blpc/recent/pdf/bl261-262-043.pdf>
5. LCPC (2007). Catalogue des Matériels MLPC. www.lcpc.fr/fr/produits/materiels_mlpc
6. ISO (1997). Norme ISO 13473-1 - Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils de la surface -- Partie 1: Détermination de la profondeur moyenne du profil
7. SAYERS, M.W., GILLESPIE, T.D. & PATERSON W.D.O. (1990). Directives pour la mesure de l'uni des routes et l'étalonnage des appareils. Document technique Banque Mondiale N° 46F
8. LCPC (2002), Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques, méthode N° 46.
9. NF P98-218-3 (1995) - Essais relatifs aux chaussées. Essais liés à l'uni. Partie 3 : détermination de quantificateurs d'uni longitudinal à partir de relevés profilométriques.
10. AIPCR (2006). The Highway Development and Management System - HDM-4.
<http://www.hdmglobal.com>
11. COHEN, S. (1990). Ingénierie du trafic routier. Presses des Ponts et Chaussées.
12. SETRA (1994). SIREDO - Système Informatisé de REcueil de DONnées de circulation. Note N° 97