

RAPPORT

CETE de LYON

Centre d'Études
Techniques
de LYON

Département Laboratoire
de Lyon

Affaire
42322-1

mars 2013

Etat de l'art

Contribution de l'infrastructure à la consommation de carburant des poids lourds

mars 2013



Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

Ifsttar
14-20 Boulevard Newton
Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Etat de l'art

Contribution de l'infrastructure à la consommation de carburant des poids lourds

Rapport mars 2013

Date	Version	Commentaires
Février 2010	Rev0	

CETE69_R2_DM_Rapport_Rev4



Département Laboratoire de Lyon
25, avenue François Mitterrand
CS92803
69674 BRON CEDEX
Tél.: +33 (0)4 72 14 33 00 - Fax.: +33 (0)4 72 14 33 11
Courriel : dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

Récapitulatif de l'affaire

Client : S. Chanut
Ifsttar
14-20 Boulevard Newton
Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Objet de l'étude : Etat de l'art - Contribution de l'infrastructure à la consommation de carburant des poids lourds

Résumé de la commande : Synthèse bibliographie sur l'impact de l'infrastructure sur la consommation de carburant

Référence dossier : Affaire 42322-1

Offre :

Accord client :

Diffusion/Archivage : Confidentiel – Documentation CETE de Lyon

Chargé d'affaire : Mohamed BOUTEDLJA –Département Laboratoire de Lyon –
Tél. +33 (0)4 72 14 33 00 / Fax +33 (0)4 72 14 33 11
Courriel : dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

Constitution de l'équipe :

Mots Clés : Poids lourds, consommation du carburant, impact, infrstructures, Eco-conduite

ISRN :

Liste des destinataires

Contact	Adresse	Nombre - Type
S. Chanut	Ifsttar 14-20 Boulevard Newton Cité Descartes, Champs sur Marne F-77447 Marne la Vallée Cedex 2	3ex papier 1 CD-ROM

Résumé

Dans de nombreux pays, les questions environnementales (changement climatique) et la consommation d'énergie (concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère) jouent un rôle de plus en plus important dans le processus de planification des projets routiers. En effet, le transport routier doit redoubler d'effort pour réduire son impact environnemental. La question de réduire la consommation de carburant des poids lourds a causé depuis longtemps de nombreuses controverses, car les effets des paramètres du véhicule, du conducteur et de l'infrastructure sont loin d'être bien quantifiés. Ce rapport présente un état de l'art sur les effets de l'infrastructure (caractéristiques physiques et géométriques des chaussées) sur la consommation de carburant des poids lourds. Il ne s'agit pas ici d'apporter une réponse, ni de porter un jugement quelconque, mais de fournir quelques éléments pour aborder le problème.

Bron, le

Le Directeur du Département Laboratoire de Lyon

M.Gilles Gauthier
Directeur du Département

Sommaire

1 - INTRODUCTION.....	<u>5</u>
1.1 - Contexte.....	<u>5</u>
1.2 - Problématique.....	<u>6</u>
1.3 - Objet du livrable.....	<u>6</u>
2 - QUELQUES DÉFINITIONS.....	<u>7</u>
2.1 - Infrastructure.....	<u>7</u>
2.1.1 - Uni.....	<u>7</u>
2.1.2 - Pente.....	<u>8</u>
2.1.3 - Dévers (Profil en travers).....	<u>9</u>
2.1.4 - Rayon de courbure.....	<u>9</u>
2.1.5 - La texture du revêtement.....	<u>10</u>
2.1.6 - Adhérence.....	<u>11</u>
2.2 - Mécanismes de perte d'énergie d'un véhicule.....	<u>12</u>
2.3 - Quelques chiffres.....	<u>13</u>
3 - PRINCIPAUX RÉSULTATS RELATIFS AUX CONTRIBUTIONS DE LA CHAUSSÉE SUR LA CONSOMMATION DE CARBURANT.....	<u>15</u>
3.1 - Revue sur la contribution de la structure de chaussée/uni.....	<u>16</u>
3.2 - Effet de la vitesse sur la consommation de carburant/uni.....	<u>18</u>
3.2.1 - Relation vitesse/uni.....	<u>18</u>
3.3 - Revue sur la contribution de la texture de chaussée/ résistance au roulement.....	<u>20</u>
3.4 - Influence des caractéristiques de l'infrastructure.....	<u>25</u>
3.4.1 - Influence des pentes.....	<u>25</u>
3.4.2 - Influence de rayon de courbure (sinuosité).....	<u>26</u>
3.4.3 - Influence de dévers.....	<u>27</u>
4 - CONCLUSION.....	<u>28</u>
5 - RÉFÉRENCES.....	<u>28</u>

1 - Introduction

1.1 - Contexte

Selon les dernières statistiques du rapport de l'Institut Français du Pétrole, 97 % des transports dépendent des produits pétroliers avec une consommation actuelle de l'ordre de 50 %. Cette consommation de pétrole devrait augmenter d'environ 35 % d'ici 2030 pour le seul secteur des transports. De plus, le transport routier à lui seul représente 81 % de la demande en énergie liée au transport.

En effet, les poids lourds assurent une part importante du trafic de marchandises, ils sont donc indispensables à l'économie du pays. Cependant, ce mode de transport se trouve en premier lieu concerné par les préoccupations actuelles en terme d'économies d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effets de serre.

Les poids lourds sont souvent mal connus du fait de la grande diversité des types, de leurs conceptions sur lesquelles pèse un grand nombre de contraintes technologiques ou réglementaires, ainsi que de leurs fonctionnements et de leurs utilisations. Leurs consommations de carburant sont influencées par différents paramètres liés à leur fonctionnement. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- Les paramètres internes propres au véhicule, liés principalement à la charge transportée et au fonctionnement du moteur, de la transmission, des freinages, ainsi qu'aux différents accessoires, tels que les feux, radio, climatiseurs,...
- Les paramètres externes liés, d'une part, au conducteur, à la traînée aérodynamique, à l'environnement routier et aux conditions météorologiques et d'autre part à l'infrastructure (caractéristiques physiques et géométriques de la route dont la résistance au roulement dépend).

La figure 1 présente ces différents paramètres favorisant la dissipation d'énergie.

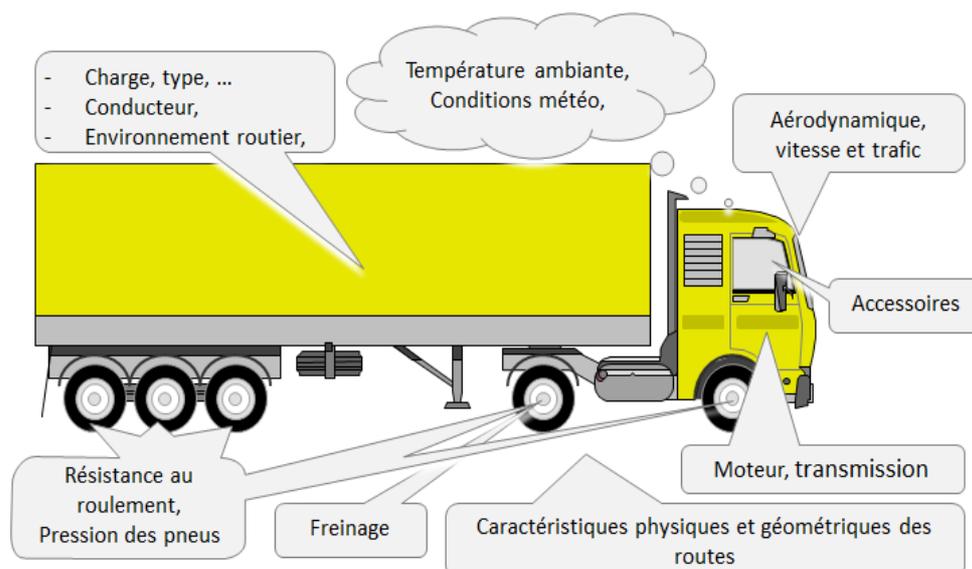


Figure 1 : Différents paramètres influençant la consommation d'un poids lourd.

Depuis le début des années 1970, les industriels, les entreprises de transports ainsi que les chercheurs ont entrepris plusieurs études pour accroître l'efficacité des moteurs et des systèmes de transmission, optimiser le profil aérodynamique des véhicules, dans l'objectif de réduire la consommation de carburant. Tous ces efforts ne sont cependant pas suffisants. Ainsi, malgré les gains observés sur les véhicules, les émissions globales de CO₂ des transports routiers restent très élevées.

Dix ans plus tard, une nouvelle problématique se dessinait autour de l'évaluation de la contribution de la chaussée sur la consommation des véhicules. Cette question reste toujours d'actualité : « **quelle est la part de la chaussée sur la consommation de carburant des poids lourds ?** ». Les réponses sont loin d'être évidentes et elles sont très diversifiées. De plus, les différentes études menées auparavant ne font intervenir que certains paramètres à la fois et même la plupart du temps les paramètres de façon isolée, il reste donc beaucoup à faire pour considérer l'influence des paramètres entre eux ou la consommation de carburant.

1.2 - Problématique

Dans ce contexte, l'une des réponses la plus pertinente aux difficultés rencontrées consiste à mettre en évidence l'effet de l'infrastructure (caractéristiques physiques et géométriques de la chaussée) sur la consommation de carburant des poids lourds. La question qui revient à chaque fois est : **quelle est la part de chaque paramètre sur la consommation de carburant des poids lourds ?**

Il est donc essentiel de connaître quelles conséquences peuvent avoir chaque paramètre de l'infrastructure, en particulier sur la consommation de carburant des véhicules lourds. Il serait bon également de quantifier la part de chacun de ces paramètres pour optimiser et modérer une consommation trop élevée.

1.3 - Objet du livrable

Dans le cadre du sujet 5 de l'opération de recherche SERRES de l'IFSTTAR sur l'eco-conduite, l'objectif est d'optimiser la consommation du carburant d'un poids lourd pour réduire les émissions du gaz à effet de serre. L'ERA12 a réalisé une étude bibliographique sur l'impact des caractéristiques physiques et géométriques de la route sur la consommation de carburant.

Le présent livrable vise à donner un aperçu (état de l'art) très synthétique des travaux menés à ce jour sur :

- la relation chaussée et consommation de carburant,
- les méthodes d'évaluation,
- les différents résultats présentés.

Avant de présenter les travaux de recherche déjà publiés sur les effets des paramètres de la chaussée sur la consommation de carburant, nous présentons tout d'abord quelques définitions relativement simples sur le sujet.

2 - Quelques définitions

Avant de présenter les principaux travaux sur le sujet, il convient d'identifier et de définir les paramètres de la chaussée qui influencent le comportement d'un véhicule en terme de consommation de carburant.

Dans la suite, nous allons décrire les paramètres d'une chaussée qui nous semblent les plus importants dans notre étude : l'uni, le dévers, la pente, le rayon de courbure, la texture de la chaussée et l'adhérence.

2.1 - Infrastructure

2.1.1 - Uni

L'**uni** de la chaussée est défini comme un paramètre qui quantifie les variations du profil en long de la chaussée (dénivellation) par rapport à un profil fictif parfaitement uniforme. Autrement dit, l'uni est une mesure de la planéité de la surface de roulement (Cf. figure 2). Mathématiquement, ces dénivellations sont représentées par des ondes, appelées les longueurs d'ondes de déformations, exprimées en mètre (m). La gamme des longueurs d'onde qui nous intéresse s'étend de 0,11 mm à 40 m (courtes de 1 à 3,3 m, moyennes de 3,3 à 13 m, longues de 13 à 40 m).

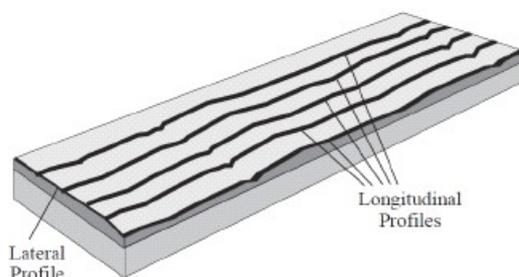


Figure 2 : Section d'une chaussée représentant un profil longitudinal et transversal

L'uni peut être affecté par différents types de fissures, déformations ou problèmes de désintégration. On distingue les composantes longitudinales et transversale de l'uni d'une surface de roulement. Conventionnellement, l'uni longitudinal est généralement mesuré en termes d'IRI (Indice de Rugosité International), qui mesure les déplacements verticaux de la suspension d'un véhicule le long d'une route, sous des conditions standardisées. L'analyse de l'uni transversal d'une route permet de détecter différents types de problèmes dont la profondeur d'orniérage.

Les dénivellations influent directement la dynamique verticale d'un véhicule routier, elles peuvent aussi avoir un certain effet sur la sécurité. Néanmoins, elles entraînent au niveau du pneumatique des variations de la force normale, celles-ci peuvent varier de 5 % sur une chaussée avec un bon revêtement (bon uni) jusqu'à 50 % sur des chaussées dégradées, diminuant d'autant les forces mobilisables en latéral ou longitudinal.

Aujourd'hui, l'uni constitue le principal indicateur permettant de connaître l'état de dégradation d'une route. Il peut être caractérisé numériquement par le calcul de la rugosité. Son effet sur la consommation de carburant reste non identifié, car les ré-

sultats des études comparatives entre une chaussée parfaitement lisse et une autre déformée sont peu concluants. Ceci est principalement dû aux divergences des résultats qui ne sont pas du tout en corrélation entre eux. Pourtant, on détecte quand même, théoriquement parlant, des variations intéressantes lorsqu'on modifie certains paramètres, tels que le coefficient de résistance au roulement et la vitesse de déplacement.

2.1.2 - Pente

La **pente** de la route est l'inclinaison du terrain par rapport à l'horizontal. Exprimée en degré (°) ou en pourcentage (%), elle est principalement due à la topologie du terrain ou laquelle la route est construite. Les travaux à engager pour la modifier (déblais ou remblais) ou pour l'éviter (ouvrage d'art) deviennent rapidement très chers.

La pente d'une route est le rapport de la hauteur (différence de hauteur maximale et de la hauteur minimale) par la distance horizontale parcourue. Elle peut se décliner en deux types : pentes descendantes et pentes montantes.

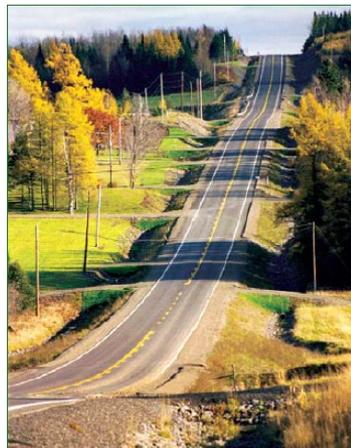


Figure 3 : Section de route en pente

La pente maximale est fixée à partir de la dynamique du véhicule pour les différents types de routes. Au-delà de la pente en elle-même, les variations de cette pente sont soumis à des minima en fonction du confort du conducteur et de la distance de visibilité. Ainsi, l'accélération verticale est limitée à $g/40$.

Les performances ainsi que la consommation de carburant des véhicules, en particulier les poids lourds, sont très sensibles à ce paramètre. Un poids lourd de 40 tonnes de poids total équipé d'un moteur de 360 ch, consomme environ 34 litres aux 100 km à vitesse stabilisée de 80 km/h sur route horizontale. Dans une montée à 6 % de pente, ce même poids lourd se stabilise à la vitesse de 32 km/h et consomme plus de 190 litres aux 100 km.

2.1.3 - Dévers (Profil en travers)

Le **dévers** ou le profil en travers est représenté par une coupe perpendiculaire à l'axe de la route de la surface définie par l'ensemble des points représentatifs de cette surface. Autrement dit, le dévers est la valeur de la pente transversale (inclinaison du profil en travers de la route) d'un des deux versants d'une chaussée.

Le dévers d'une route a deux utilités. Tout d'abord, il permet l'évacuation des eaux de pluie lorsque la pente de la route est nulle. Le dévers minimum est ainsi fixé à 2.5 % pour remplir ce rôle en toutes circonstances.

Ensuite, il permet de diminuer les sollicitations des pneumatiques en latéral en reprenant une partie de l'accélération latérale. Le dévers maximal autorisé sur les routes est de 7 %.

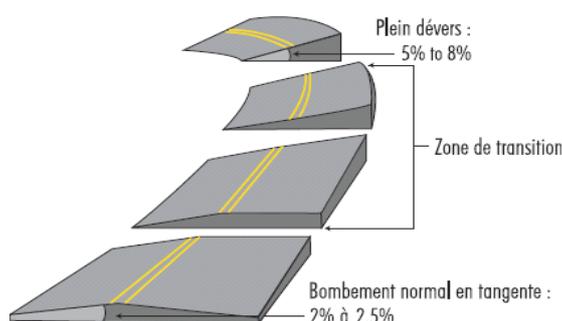


Figure 4 : Développement du dévers (profil en travers)

Toutefois, il existe actuellement très peu d'étude sur les effets de dévers sur la consommation du carburant des poids lourds. Pour le moment, son effet est lié directement au rayon de courbure, car le dévers évolue en fonction de la vitesse et du rayon de courbure.

2.1.4 - Rayon de courbure

Le **rayon de courbure** (virage) d'un tracé est l'indicateur de son niveau d'incurvation : plus le rayon de courbure est élevé, plus le tracé se rapproche d'une ligne droite, et inversement. Mathématiquement, le rayon de courbure est la valeur absolue du rayon du cercle tangent à la courbe au point recherché.



Figure 5 : tracé en plan de la route

Ce cercle est appelé cercle osculateur à la courbe en ce point. La figure 5 présente un exemple de tracé en plan d'une route.

Suite à cette définition, les routes sont décrites par trois figures géométriques simples (selon le rayon de courbure) :

- la ligne droite : la courbure est constante et nulle $R = 0$,
- le cercle : la courbure est constante $R = cste$,
- la clothoïde d'une courbure : elle varie linéairement en fonction de l'abscisse curviligne, notée x , $R = Ax$. Elle assure l'introduction des variations de la courbure et de dévers en prenant en compte la dynamique du véhicule et le comportement du conducteur. Elle permet également de raccorder des lignes droites et des cercles avec une variation acceptable de l'accélération latérale et de l'angle de braquage. Généralement, elle est conçue pour être parcourue à une vitesse constante, avec une variation du braquage à vitesse angulaire constante.

Pour assurer à la fois le respect de la dynamique du véhicule et du comportement du conducteur, trois critères sont testés et évalués. Il s'agit du confort dynamique, du gauchissement de la chaussée et du confort optique [GLASER].

La présence d'un virage sur la route entraîne le véhicule à réduire sa vitesse. La reprise de l'accélération après le virage favorise un surplus de consommation de carburant. Dans le cas des poids lourds, la différence peut atteindre quelques litres en fonction de la vitesse, du rayon et de la longueur du virage.

2.1.5 - La texture du revêtement

La texture est l'écart entre la surface du revêtement et une référence plane vraie, dont les dimensions caractéristiques sont inférieures à 500 mm. Au-delà de cette limite, il s'agit du domaine de l'uni longitudinal. Si un capteur, comme la pointe d'une aiguille ou d'un rayon laser, est en contact permanent avec la texture pendant l'exploration de la surface suivant une ligne d'analyse, il crée un profil.

Le profil de texture est un signal aléatoire de l'espace qui peut se décomposer par une transformation de Fourier en une somme de signaux périodiques de fréquence exprimée en cycles par mètre ou de longueur d'onde exprimée en mètre.

Il existe trois échelles de texture distinctes dans la gamme de longueurs d'ondes allant de 0 à 500 mm.

La microtexture

La microtexture d'un revêtement correspond au domaine de longueurs d'ondes compris entre $1\mu\text{m}$ et 0,5 mm avec une amplitude verticale comprise entre $1\mu\text{m}$ et 0,2 mm. Cette échelle de texture permet de caractériser une surface plus ou moins râpeuse généralement trop petite pour être observée à l'œil nu. Cette rugosité est obtenue grâce aux caractéristiques de surface (arêtes vives) de chaque gravillon ou particule du revêtement qui est en contact direct avec la gomme des pneumatiques. Il n'existe pas actuellement de méthode opérationnelle pour la mesure in situ directe de la microtexture. Une évaluation peut en être donnée par une mesure de coefficient de frottement réalisée avec une faible vitesse de glissement.

La macrotecture

Elle correspond au domaine de longueurs d'ondes compris entre 0,5 mm et 50 mm, avec une amplitude verticale comprise entre 2 mm et 10 mm. Cette échelle de texture donne des longueurs d'ondes du même ordre de grandeur que celles des pavés de gomme de la bande de roulement des pneumatiques qui interviennent dans le contact pneumatique-chaussée. On obtient la macrotecture en répartissant de fa-

çon appropriée les granulats et le mortier du revêtement ou en utilisant des techniques de traitement de surface. La macrotexture peut être évaluée par une méthode volumétrique dite «à la tâche» donnant une profondeur moyenne des aspérités de surface (méthode rustique et statique) ou par une méthode profilométrique permettant d'obtenir par calcul la profondeur moyenne des aspérités de surface (méthode dynamique utilisant un capteur laser).

La mégatexture

Elle correspond au domaine de longueurs d'ondes compris entre 50 et 500 mm, avec une amplitude verticale comprise entre 1 mm et 50 mm. Cette échelle de texture donne des longueurs d'ondes du même ordre de grandeur que celles de la longueur de l'empreinte du pneumatique. La mégatexture découle souvent de l'hétérogénéité de la macrotexture. Elle peut être aussi le résultat de déformations de longueurs réduites. Il s'agit généralement d'une caractéristique ou d'une conséquence d'une altération involontaire des surfaces. Cette altération provoque des déformations locales des pneumatiques dans des longueurs qui sont proches de leurs modes propres de vibrations, d'où un inconfort de conduite. La mégatexture s'évalue à l'aide d'une méthode profilométrique tout comme la macrotexture.

2.1.6 - Adhérence

De façon générale, l'adhérence est définie comme étant un frottement ou une résistance au roulement entre deux surfaces de contact. Dans le domaine routier, les surfaces considérées sont les pneus et la surface de roulement. Sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite, elle permet au véhicule de conserver à tout moment sa trajectoire désirée, de réduire les distances de freinage et d'arrêt et de favoriser les manœuvres d'évitement d'obstacle et changement de voie, etc.

La valeur de l'adhérence n'est pas modélisable et ne peut s'établir que par la mesure. Elle évalue à l'aide de deux indicateurs : la microtexture et la macrotexture. La différence entre le coefficient de frottement et le coefficient d'adhérence étant souvent faible, les deux valeurs peuvent être confondues. La valeur dite «normale» de l'adhérence est de 0,8. Sur des revêtements de très bonne qualité, un pneu standard peut aller jusqu'à 1,2.

Les performances en adhérence du contact pneu/sol sont fondamentales pour les déplacements des véhicules et également pour leur sécurité. Elles interviennent essentiellement dans deux types de situations : lorsqu'on fait varier la vitesse du véhicule (décélération - accélération) et lorsqu'on modifie sa trajectoire (virage ou changement de voie). Ces deux situations font intervenir les deux composantes de l'adhérence : l'adhérence longitudinale et l'adhérence transversale.

Cependant, peu d'études traitent la relation directe pouvant exister entre l'adhérence et la texture de la route sur la consommation de carburant. Même les recherches qui se sont intéressées à cette relation ont été faites dans des contextes différents et ont ainsi permis d'évaluer la résistance au roulement. On note que cette dernière dépend directement des variations de ces deux paramètres et de leur dépendance à mettre en évidence leurs influences sur la consommation de carburant. Dans ce rapport, nous mettons également le poids sur l'effet de la résistance au roulement sur la consommation de carburant.

Remarques :

1. Dans la plupart des cas, les modèles mécaniques développés représentent l'effet des caractéristiques de surface sur la consommation de carburant à travers la résistance au roulement. L'uni (rugosité) favorise l'augmentation de la résistance au

roulement en provoquant principalement des pertes d'énergie liées aux suspensions, tandis que la texture de surface augmente la résistance au roulement, causant des pertes d'énergie liées au pneumatique.

2. Pour un changement d'environ 5 % de la résistance au roulement, une voiture qui roule à vitesse constante va avoir une consommation de carburant variant de l'ordre de 1 % (Descornet 1990b). Pour des poids lourds chargés, le facteur est d'environ 4.
3. À travers ces différentes définitions, nous constatons que chaque paramètre de l'infrastructure contribue favorablement au confort et à la sécurité mais impose des contraintes plus au moins contraignantes sur la consommation de carburant des véhicules.

2.2 - Mécanismes de perte d'énergie d'un véhicule

Un véhicule a besoin d'énergie pour se déplacer. Cette énergie est fournie, à la base, par la combustion du carburant dans le moteur qui transforme l'énergie chimique apportée par le carburant, en énergie mécanique acheminée jusqu'aux roues par une succession d'éléments mécaniques (transmission). En effet, la consommation d'énergie et donc de carburant est influencée par de nombreux facteurs. Ces facteurs concernent :

- le rendement thermodynamique du moteur : transférer de la chaleur en énergie mécanique,
- la résistance au roulement : liée au contact pneu/sol de chaque roue,
- la résistance de l'air : fonction de la vitesse et de la forme aérodynamique,
- la résistance gravitationnelle : effet de la pente des routes et de la masse,
- la résistance d'inertie : effet de masse du véhicule et de l'accélération,
- les Pertes de transmission : au niveau des organes mécaniques.

Cependant, l'énergie mécanique utile nécessaire pour mettre en mouvement le véhicule est loin d'être identique à l'énergie fournie au départ (par combustion). En effet, il y aura une partie de l'énergie dissipée par :

- Les frottements internes mécaniques F_v provoqués, entre autres, par le moteur, la transmission, le convertisseur de couple, le joint de cardan, etc.
- La résistance aérodynamique F_d provoquée par la pénétration du véhicule dans l'air donnée par la relation :

$$F_d = 1/2 * \rho * S * C_d * V_d^2$$

Avec, ρ : 1,2 en kg/m³, la masse volumique de l'air, S est la surface frontale du corps (en m²), V_d est la vitesse du véhicule par rapport à l'air (en m/s) et C_d est le coefficient de traînée, égal à 0,75 pour un poids lourd,

- La force de la résistance de roulement F_{RR} est la force de frottement solide exercée par la route sur les roues. Elle s'exprime par :

$$F_{RR} = C_{RR} * P$$

avec, C_{rr} le coefficient de résistance de roulement, il dépend de la surface, de la déformation du pneu et de la suspension, du diamètre, de la largeur de la roue, de la nature du sol, de la pression de gonflage, et de la

température. Généralement pour les poids lourds sa valeur varie de 0,005 à 0,007, $P = M * g$ est le poids du véhicule en [N]. M est la masse du véhicule en [kg].

Contrairement aux forces aérodynamiques qui sont dominantes à grande vitesse, les forces de résistance au roulement dominant à basse vitesse pour une route plane à vitesse constante.

- La gravité (pente, dévers, virage,...) ou force de pente (F_p en [N]) : La force résistive de pente évolue en fonction de la masse et de l'inclinaison de la pente. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_p = M * g * \sin(\alpha)$$

avec α : la pente ou angle de dénivellation de la route (en deg),

- La force dynamique et la force d'accélération F due aux variations de vitesse du véhicule définie par la deuxième loi de Newton :

$$F = \sum F_x = F_a + F_{dyna} = M * \gamma$$

où F_a et F_{dyna} sont respectivement la force d'accélération et la force dynamique, exprimées en N.

Remarque : pour prendre de la vitesse ou maintenir une vitesse constante, le moteur d'un véhicule lourd ou léger doit être en mesure de fournir une force de traction supérieure ou égale à la somme totale de différentes forces résistantes $F_{Tot} = F_v + F_d + F_{RR} + F_p + F$. Si la force de traction du moteur est inférieure à cette somme de résistances, le véhicule ralentit.

2.3 - Quelques chiffres

Les relations précédentes (dissipations d'énergie) montrent que la vitesse et le type de véhicule ont un impact non négligeable sur la consommation de carburant, comme le montre la figure 6.

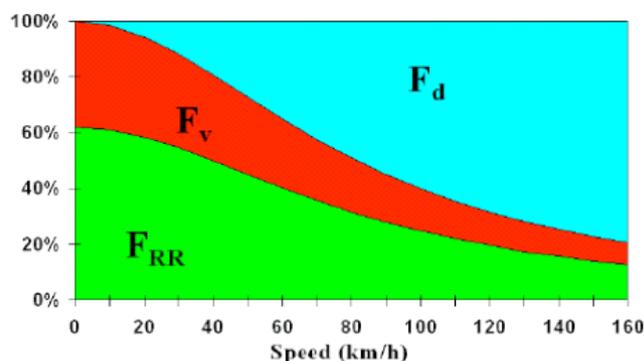


Figure 6 : Répartition de la dissipation d'énergie en fonction de la vitesse [7]

Ainsi, on remarque que plus la vitesse augmente, plus il y a de pertes d'énergie dues aux forces dynamiques et moins les frottements mécaniques internes et la résistance au roulement sont conséquents. Ainsi, selon Michelin [7], à une vitesse

constante de 100 km/h, l'ordre de grandeur relatif aux forces résistantes F_d , F_v et F_{RR} varie entre une voiture et un poids lourd suivant les valeurs présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Ordre de variation des forces s'opposant à l'avancement d'une voiture et d'un poids-lourd à une vitesse constante de 100 km/h [7]

Pour une	Voiture léger	Poids lourd
F_d	65,00%	50,00%
F_v	15,00%	10,00%
F_{RR}	20,00%	40,00%

Dans la littérature on trouve également qu'environ un tiers de la consommation de carburant est dû à la résistance au roulement $F_{RR} + F_d$ du poids lourd. En 1992, le NRC (National Research Council) du Canada a présenté la répartition des pertes d'énergie dans le mécanisme d'acheminement de l'énergie. Il en ressort que les pertes les plus importantes se situent dans le moteur (environ 69 %) lors de la combustion du carburant.

En 2001, Sandberg Tony, de l'université de Linköping (Sweden), a publié un rapport sur la modélisation d'un poids lourd pour l'étude en simulation et en expérimentation de la consommation de carburant. Il a décrit que l'énergie potentielle fournie par le combustible du carburant est généralement transformée en énergie thermique (chaleur) et mécanique. Cette puissance mécanique disponible est divisée en deux parties. La première partie sera perdue sous forme de perte liée aux transmissions, à la résistance de l'air, à la traînée (résistance au roulement) et au maintien de la vitesse constante. La seconde partie (le reste de la puissance mécanique) est utilisée pour remonter les pentes et/ou en phase d'accélération du véhicule.

Les figures 7 et 8 prises dans ce même rapport montrent la distribution de la perte d'énergie en % (selon les forces résistantes) par rapport à la puissance de sortie du moteur pour un poids lourd roulant à une vitesse constante de 80 km/h.

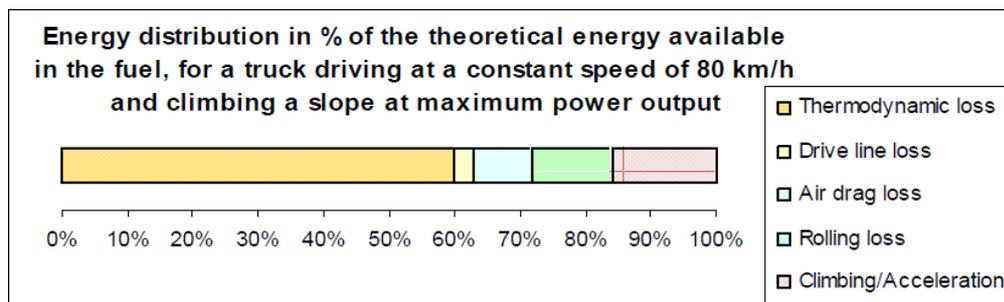


Figure 7 : Distribution de l'énergie potentielle du moteur (puissance maximale) pour un poids lourd roulant à vitesse constante de 80 km/h [5, 6]

La figure 7 présente une situation typique d'un poids lourd de 40 tonnes, roulant à vitesse constante de 80 km/h. Son bilan énergétique est présenté comme suit ; 3 % de pertes liées au système de transmission, 9 % liées à la résistance de l'air, 12 %

liées à la résistance au roulement. Le reste de la puissance mécanique, environ 16 %, est utilisé en phase d'accélération et en pente. L'efficacité du moteur étant seulement d'environ 40 %, les pertes liées à la résistance au roulement représentent environ 12 % de la consommation totale de carburant pour ce type de poids-lourd.

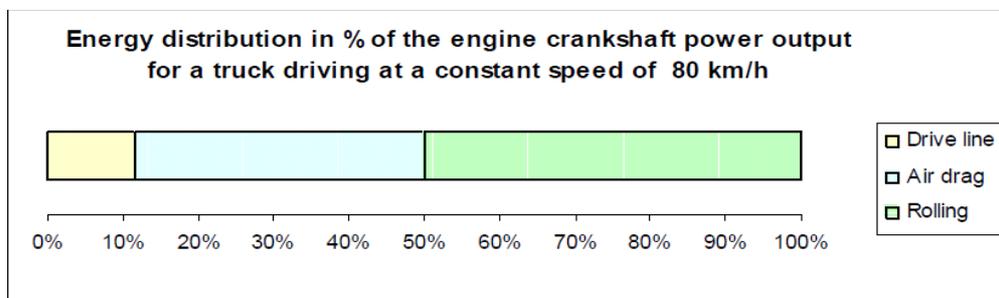


Figure 8 : Distribution de l'énergie du moteur (puissance réelle) pour un poids lourd roulant à vitesse constante de 80 km/h sur la même route [5, 6].

Afin de vérifier ces conclusions théoriques, Sandberg Tony a expérimenté le même poids lourd en condition de conduite réelle. La figure 8 présente de nouveau les pourcentages des énergies perdues par rapport au potentiel d'énergie mécanique disponible à la sortie du moteur. Il a constaté que les pertes de transmission représentent désormais 7 %, celles de la résistance de l'air sont de 23 % et celles de la résistance au roulement de 30 %. Le reste de l'énergie représente 40 %.

Il a conclu que pour un poids lourd de 40 tonnes à une vitesse constante de 80 km/h, environ 12 % de la consommation de carburant est représentée par des pertes liées à la résistance au roulement des pneumatiques. Cette perte d'énergie représente environ 30 % de la puissance mécanique disponible à la sortie du moteur. Une réduction de la résistance au roulement peut contribuer significativement à réduire la consommation globale de carburant.

En 2008, le TRL (Transport Research Laboratory) a montré également l'influence de la résistance au roulement F_{RR} sur la consommation d'énergie. Ainsi, pour une réduction de 10 % du coefficient de résistance au roulement C_{rr} , la consommation en carburant du véhicule lourd diminuait de 2 %.

3 - Principaux résultats relatifs aux contributions de la chaussée sur la consommation de carburant

Les premières études consacrées à l'évaluation de la contribution de la chaussée sur la consommation de carburant des véhicules, datent des années 70. Elles visent principalement l'impact de la structure des chaussées sur la consommation des poids lourds. Par la suite, de nombreux travaux ont été réalisés afin de montrer l'influence des paramètres de la chaussée sur la consommation de carburant des véhicules légers et/ou lourds. Autant de résultats ont été proposés avec, parfois, des divergences assez significatives. Ces différences proviennent des considérations (hypothèses) de départ propres à chaque étude ; à titre d'exemple :

1. Les industriels des pneumatiques ont testé leurs produits vis-à-vis de la consommation tout en focalisant sur le comportement du pneumatique et en supposant maîtriser totalement les paramètres extérieurs (vent, pression des pneumatiques,

température,...), ce qui est loin d'être vrai. Par contre, ce type d'approche ne permet pas de quantifier les effets de la route ni ceux de la surface de la chaussée sur la consommation,

2. Pour les gestionnaires et les constructeurs des routes, l'approche a été totalement basée sur des mesures (expérimentales) sur site avec des hypothèses difficiles à atteindre (vitesse constante, décélération au point mort), en négligeant le comportement dynamique du véhicule et du pneumatique, ainsi que les perturbations d'autres paramètres extérieurs (vent, poids du véhicule,...). Ces perturbations non maîtrisées, donnent généralement des erreurs plus ou moins significatives,
3. etc.

Cependant, les effets de ces paramètres décrits précédemment sur les poids lourds sont toujours d'actualité et restent des pistes à exploiter.

Avant de rentrer dans le vif du sujet de ce rapport, il ne semble important de présenter une revue synthétique de la contribution de la structure d'une chaussée sur la consommation en carburant des véhicules lourds.

3.1 - Revue sur la contribution de la structure de chaussée/uni

La contribution de la structure/uni de la chaussée ou la consommation en carburant des véhicules est largement décrite dans la littérature. Les premières études ont été faites il y a plus de 30 ans et, à cette époque, ni les conditions des chaussées ni les véhicules n'étaient aussi performants qu'aujourd'hui. Ainsi, la consommation de carburant dans les années 70/80 était d'autant plus conséquente que l'entretien des chaussées était moins fréquent et certainement de moins bonne qualité. Cependant, il est tout à fait nécessaire de souligner que les premières études sur ce point ont été financées par l'industrie cimentière. Elles ont mis en évidence une nette surconsommation des poids lourds sur les chaussées en enrobé par rapport aux chaussées en béton. Une partie de cette surconsommation de carburant et le coût de CO2 sont répercutés sur le prix du ciment.

En 1982, une étude américaine [26] a été menée sur différents types de véhicules (léger et poids lourd). Un suivi de la consommation en carburant a été réalisé sur des chaussées de structures variées (béton bitumineux, béton de ciment) à différentes vitesses. Cette étude conclut que les structures de chaussées influencent considérablement la consommation de carburant des poids lourds, mais sont négligeables pour les véhicules légers. La différence de consommation en faveur des chaussées en béton peut aller jusqu'à 20 % pour un véhicule articulé.

En s'appuyant sur ces résultats, d'autres études similaires ont été réalisées en Inde par Cement Manufacturer Association [27] et au Canada par NRC [24] (National Research Council). Elles ont également mis en évidence des surconsommations de véhicules lourds respectivement de 14 et 11 % sur des chaussées en enrobé et en béton. Néanmoins, ces résultats ont été contestés, mettant en évidence une prise en compte insuffisante des caractéristiques de surface des différentes sections considérées dans les deux études.

Young (1988) a présenté des résultats de quatre expériences menées par le laboratoire de recherche sur les transports au Royaume-Uni (TRL) restant à estimer l'effet de l'uni de surface de la route sur la consommation de carburant. Il a utilisé pour la première expérience la décélération d'une roue d'essais pour estimer la consommation de carburant d'un camion. Un modèle mécanique a été ainsi développé pour mieux cerner les effets de l'uni sur la consommation de carburant et avoir une idée

de l'ordre de grandeur sur des chaussées réelles. Les trois autres expériences ont été menées sur la piste d'essai de TRL, avec des mesures directes de la consommation de carburant. Ces expériences ont été réalisées sur :

- (a) des pistes d'essai avec un niveau de rugosité (uni) contrôlé par l'introduction d'éléments de rugosité artificielle,
- (b) deux voitures identiques roulant côte à côte dans deux voies parallèles (bien que les niveaux de rugosité dans les deux voies sont très différents, la qualité et la courbure étaient les mêmes),
- (c) des tests sur des tronçons de la voie publique avec différents niveaux de rugosité.

La variation de la rugosité a été exprimée en HRM (high speed road monitor) et convertie en unités IRI, comme décrit dans Jordan (1990). Les résultats de cette étude montrent une augmentation linéaire de la consommation de carburant par rapport au IRI. Les pourcentages de surconsommation présentés sont considérablement plus élevés que ceux annoncés dans les autres études. Cela peut être dû à la conversion incorrecte de la rugosité utilisée par Young entre HRH et IRI équivalents.

En 2002, Asphalt Institute [28] a publié les résultats d'une étude basée sur les travaux de NRC avec un état de surface plus dégradé des chaussées en enrobé. Ces nouveaux résultats ont permis de justifier plus au moins les différences de consommation constatées.

Quatre ans plus tard, le CNRC [25] (Conseil national de recherches Canada) a réalisé des mesures de consommation d'un poids lourd avec différentes charges sur une série de sections de structures différentes pour des températures extérieures couvrant la gamme des valeurs enregistrables sur une année au Canada. De plus, cette étude vise seulement les sections avec des bonnes caractéristiques de surface ($IRI < 1,6$). L'analyse des résultats a permis d'exprimer la consommation en carburant en fonction de la structure de la chaussée, de son état de surface, de la pente, du poids du véhicule, de la température du revêtement, de la vitesse d'avancement et de la vitesse relative du vent. Sur la base de ces modèles empiriques, les auteurs mettent alors en évidence des variations de consommation d'un poids lourd (avec 3 types de chargement et des températures de revêtements s'échelonnant entre -20 et $+35$ °C) comprises entre 1,3 et 3,9 % à 60 km/h et entre 0,8 et 1,8 % à 100 km/h sur une chaussée présentant de bonnes caractéristiques de surface ($IRI = 1$).

En 2007, le TRL (Transport Research Laboratory) a conduit une série de tests en laboratoire [29] afin d'isoler les contributions respectives de la structure et de la texture de chaussée. Sur le PTF (Pavement Test Facility), des mesures du coefficient de résistance au roulement à 15 km/h d'une roue instrumentée (chargée à 25 kN) ont été réalisées sur des structures rigide et souple (différence de déflexion de 28 μm), constituées d'une même fondation et d'une même couche de surface. Les résultats de cette étude montrent que le coefficient de résistance au roulement est de 5,6 % plus faible sur la structure rigide. Ceci se traduirait donc par une différence de consommation de l'ordre de 1,1 %.

Globalement, les différentes études font ressortir que la condition de la chaussée influence peu la consommation de carburant des poids lourds, que les nombreuses variables qui affectent cette consommation font en sorte qu'il est difficile d'isoler les effets spécifiques à la condition de la chaussée, et qu'il est nécessaire de rester dans des gammes de valeurs pour le niveau d'infrastructure qui correspondent à des conditions de chaussées réalistes.

Comme nous avons pu le constater précédemment dans la partie définitions du rapport, les caractéristiques de la chaussée sont complètement dépendantes. Afin de limiter les redondances dans le rapport, le détail de cette partie sera traité aussi dans les autres sections du rapport. Certaines études peuvent présenter l'effet d'un ou de plusieurs paramètres de chaussée.

3.2 - Effet de la vitesse sur la consommation de carburant/uni

La section précédente mettait en évidence que la consommation de carburant augmente avec la variation de l'uni (rugosité) de la route. De plus, cette relation est également influencée par la variation de la vitesse du véhicule, car celle-ci peut être impactée par des défauts de surface de la route.

En effet, il est intéressant de se poser la question : « quelle relation peut-il y avoir entre la vitesse/uni de la chaussée/consommation de carburant ? ». Nous présentons ici un bref résumé de la recherche bibliographique et des résultats obtenus dans le cadre de ces études.

3.2.1 - Relation vitesse/uni

Il a été prouvé depuis longtemps qu'une grande partie du carburant consommé est lié directement au maintien en marche du moteur, indépendamment de la puissance délivrée. À basse vitesse, l'augmentation de la vitesse sert à diminuer la consommation de carburant en fonction de la distance, c'est à dire le temps relatif à la distance parcourue par chaque unité de carburant consommé. Par contre, à grande vitesse, ce sont les pertes aérodynamiques qui augmentent, autrement dit, à vitesse élevée, la résistance aérodynamique est prépondérante sur les autres résistances à l'avancement, étant donné que sa valeur évolue avec le carré de la vitesse.

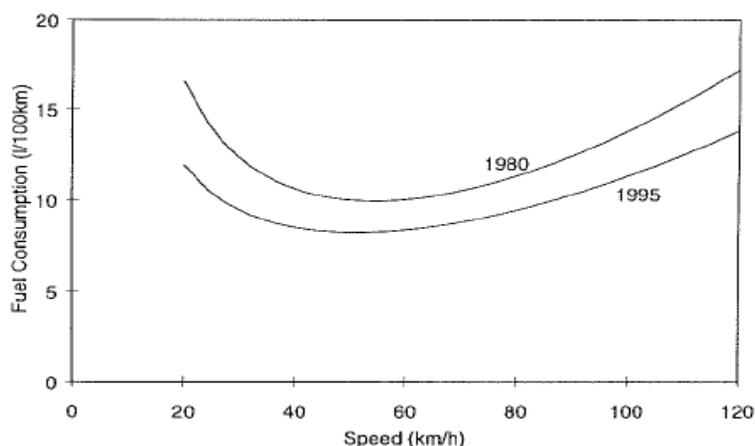


Figure 9 : Consommation de carburant en fonction de la vitesse pour des voitures moyennes [32]

La figure 9 montre la consommation de carburant des véhicules moyens représentatifs du parc automobile des années 1980 et 1985 en fonction de la vitesse (les tests ont été réalisés à vitesse constante), [32].

Cependant, depuis 1995, les voitures montrent des consommations de carburant moins importantes, cela est dû à l'amélioration de la conception aérodynamique des véhicules.

Généralement, on associe l'uni de la route au confort des véhicules, car un uni dégradé a un impact négatif sur le confort et la sécurité. En revanche, il a été constaté à travers plusieurs études que les conducteurs réduisent leur vitesse en présence d'uni dégradé, en réponse à un confort de roulement. En effet, la consommation de carburant est donc diminuée. Autrement dit, les pertes aérodynamiques associées à l'uni de la route diminuent la vitesse du véhicule et compensent l'effet de l'augmentation de la résistance au roulement.

De plus, la conception des véhicules s'est considérablement améliorée depuis les premières études relatives à l'uni/vitesse (réponse vibratoire des véhicules). La figure 10 représente la relation entre la vitesse du véhicule et l'uni de route pour deux types de véhicules : une voiture de tourisme moyenne et un tracteur semi-remorque.

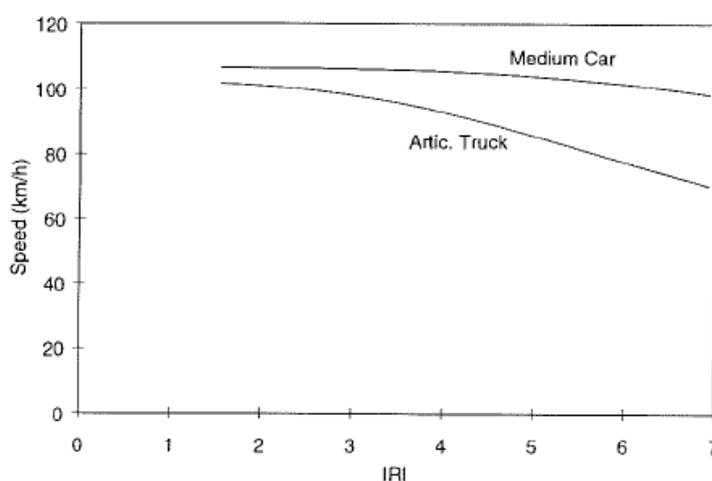


Figure 10 : Relation uni/vitesse [32].

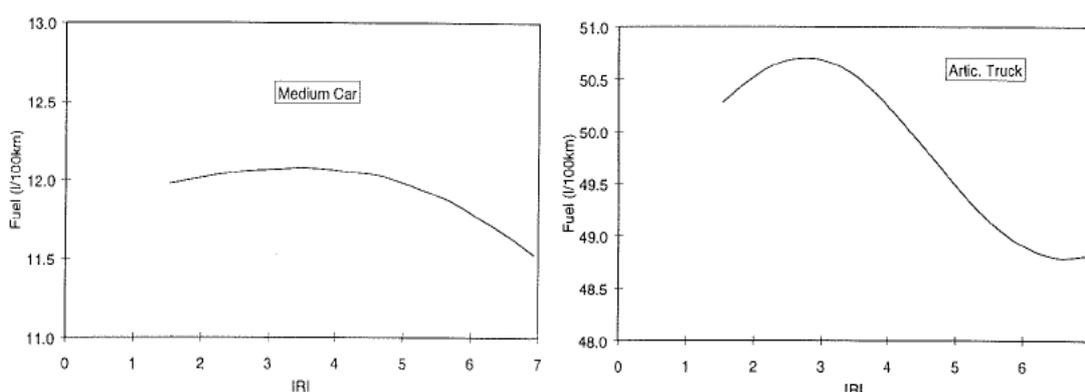


Figure 11 : La consommation de carburant en fonction de l'uni sur route réelle [32].

Ces résultats ont été présentés par Botterill en 1996, suite à ses travaux de recherche en Australie menés au cours des années 1990 sur des pistes d'essais.

Il a conclu qu'avec des valeurs faibles de l'uni, l'effet de la vitesse est négligeable jusqu'à une certaine valeur d'IRI (environ 5 pour la véhicule de tourisme et un peu moins pour le véhicule articulé, IRI de l'ordre de 3).

Sur une route ouverte du réseau routier australien, l'effet de l'uni est nettement présent sur la consommation de carburant de ces deux types de véhicules. La figure 11 montre cet effet. Ceci a été également prédit par le modèle ARRB en utilisant les relations de uni/vitesse de la figure 10. On constate qu'à de très faibles valeurs de IRI (uni) la consommation de carburant pour les deux types de véhicules augmente légèrement, cette augmentation est suivie par une diminution brutale à des grandes valeurs de IRI.

3.3 - Revue sur la contribution de la texture de chaussée/ résistance au roulement

La résistance au roulement est définie comme étant le phénomène qui représente l'énergie dissipée par les pneus en fonction de l'unité de distance parcourue. Cette résistance dépend directement des caractéristiques de pneumatiques (structure du pneu,...) et de celles des chaussées. De nombreux facteurs influencent la résistance au roulement, il s'agit de :

- la vitesse du véhicule,
- la forme et la pression d'air dans le pneumatique : élevées, elles diminuent la résistance au roulement,
- la charge du véhicule favorise la résistance au roulement,
- la température ambiante élevée réduit la résistance au roulement.

De plus, le type de chaussée et sa surface influencent également la résistance au roulement. Différentes caractéristiques de surface (texture de la chaussée,...) contribuent à la résistance au roulement, de même que le comportement de la structure.

En 2003, A. Woodside de l'université de Ulster de l'Irlande du Nord, a présenté une étude expérimentale sur l'évaluation de la résistance au roulement de différents matériaux de surface en fonction du type de surface, de la charge du pneu et de la pression de gonflage [17]. Le tableau 2 (de l'article) présente les différents facteurs affectant la résistance au roulement.

Tableau 2 : Facteurs influant sur la résistance au roulement

caractéristiques des pneumatiques	Conditions des pneumatiques	Conditions environnementales	Caractéristiques de surface de la route
Construction : - Plis - Ceintures - Radial Bande de roulement : - Mélange - Sculpture - Profondeur - Fragmentation	Pression de gonflage Charge Vitesse Angle de dérapage Angle de carrossage Conduite/force de freinage Configuration roue/essieu	Température Eau Neige Glace	Microtexture Macrotexture Megatexture Uni

Par ailleurs, l'influence de la texture de la chaussée sur le phénomène de résistance au roulement est en revanche largement reconnue. Plusieurs campagnes de mesure de la consommation de carburant de véhicules légers sur différents types

de revêtements mettent en évidence des variations de consommation : celle-ci varie entre 6 et 11 %. Pour les articles qui ont été publiés préalablement à ces études, les auteurs peuvent toutefois se référer aux [13, 15, 20, 22 [Smail](#)].

Parmi ces travaux, les plus connus sont ceux de l'institut VTI (Swedish Road and Traffic Research Institute) en 1990 [8]. Les données expérimentales sont issues d'une voiture Volvo spécialement instrumentée pour cette étude. Les essais ont été réalisés à vitesse constante de 50, 60 et 70 km/h et sur plus de 20 sites (pistes) avec différentes textures de surfaces, macro et mégatexture. De plus, de courtes longueurs d'onde d'uni ont été mesurées par un profilomètre laser. Ensuite, une analyse en régression linéaire a permis d'évaluer l'effet de la texture (spectre de profil) sur la consommation de carburant (instantanée et moyenne) pour les trois vitesses. Les conclusions de ce rapport montrent que :

- ✓ il existe une nette corrélation entre la consommation de carburant et la macrotexture et une très bonne corrélation entre la consommation de carburant et l'uni de la chaussée à courtes longueurs ondes,
- ✓ une route dégradée peut augmenter la consommation de carburant jusqu'à 12 % par rapport à une même route non dégradée,
- ✓ une macrotexture rugueuse peut augmenter la consommation de carburant de 7 % par rapport à une macrotexture très lisse,
- ✓ trois types de sources de pertes d'énergie en raison des effets de la surface de la route ont été constatés, il s'agit de :
 - pertes au niveau des suspensions liées à des longueurs d'ondes plus longues de l'uni,
 - pertes liées aux vibrations du pneumatique sur des longueurs d'ondes variant de 0,5 à 1,3 m,
 - pertes liées aux pneus sur des longueurs d'ondes typiques de la macrotexture (hystérésis). Ces pertes sont importantes à des vitesses de 60 à 70 km/h et plus.

Dans une autre expérience similaire aux Pays-Bas [9]. Une voiture de tourisme Volvo V70 a été instrumentée. Des mesures de consommation ont été enregistrées pour différents revêtements à vitesse constante de 90 km/h. Les auteurs ont constaté qu'il n'y a pas de différence significative sur la consommation de carburant entre des revêtements drainants et compacts. Ainsi, d'un point de vue statistique, il n'existe pas de différence significative de la consommation de carburant trouvé entre l'asphalte et les surfaces en béton.

En outre, il a été mentionné que l'état de la surface de la route, en particulier celui qui influe sur la texture et l'homogénéité, semble avoir une forte influence sur la résistance au roulement et donc sur la consommation de carburant.

Dans ces deux expériences menées en Suède et aux Pays-Bas, seules les voitures de tourisme ont été utilisées, l'effet sur la consommation des poids lourds n'a pas été évalué.

Par la suite, différentes campagnes expérimentales ont été réalisées [13, 15, 21], elles semblent s'accorder sur le fait que l'uni, principalement dans ses petites longueurs d'ondes, peut conduire à des variations de la consommation des véhicules légers de l'ordre de 10 %.

Laganier & Lucas et al [22, 14] ont montré que les consommations de carburant associées aux petites ($1 \text{ mm} < \lambda < 3,3 \text{ cm}$) et moyennes ($3,3 \text{ m} < \lambda < 13 \text{ m}$) longueurs d'ondes de l'uni peuvent aller jusqu'à 6 % (figure 12).

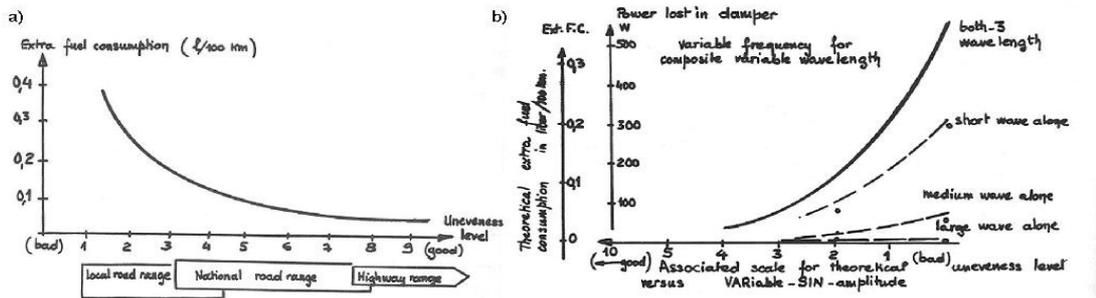


Figure 12 : Surconsommation associée au niveau d'uni [22, 14] : (a) mesures sur sites avec une voiture de consommation moyenne de 7 L/100 km, (b) dissipations au niveau des amortisseurs lors d'essais sur banc de vibration

Ainsi, pour les consommations liées à la macrotecture, les auteurs ont enregistré des variations de l'ordre de 6 % (valeur similaire à la contribution de l'uni) (Cf. figure 13).

Sandberg [15] conclut qu'il y a une forte dépendance entre la consommation en carburant d'un véhicule léger et les petites longueurs d'ondes de l'uni (0,63 m < λ < 3,15 m). Une fois déduite la contribution de la macrotecture (prise en compte de la corrélation entre l'uni et la macrotecture), l'auteur estime à 10 % la contribution réelle de l'uni à la consommation en carburant d'un véhicule circulant à 60 km/h.

VTI a réalisé une étude assez similaire [21], cette fois-ci avec une voiture familiale de 1700 kg et un camion léger de 3300 kg. Des mesures de vitesse lors d'essais de décélération au point mort ont été enregistrées.

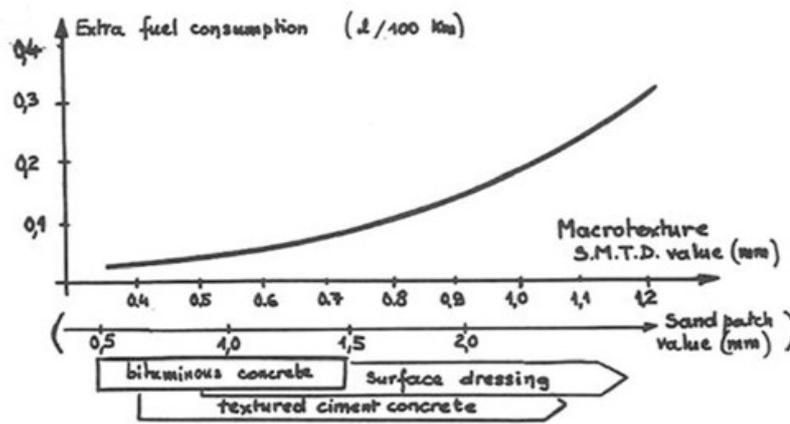


Figure 13 : Surconsommation associée au niveau de macrotecture lors de mesures sur sites avec une voiture de consommation moyenne de 7 L/100 km [22]

Une analyse statistique (méthode de régression multilinéaire) a été effectuée pour exprimer la décélération du véhicule en fonction de la pente, de l'uni, de la profondeur moyenne de texture et de la vitesse du véhicule. Suite à ces analyses, des modèles de régression ont été proposés. À partir de ces modèles, les auteurs ont conclu que la résistance au roulement variait entre 19 % et 48 % par rapport à l'uni (IRI variant de 1 à 10) pour la voiture roulant respectivement à 55 et 90 km/h et de

47 % pour le camion (résultat indépendant de la vitesse). Celles-ci correspondent donc à des variations maximales de consommation de l'ordre de 9 à 10 %. Sachant que la part de la macrotexture est moins bien établie, cette tendance est également confirmée pour la variation de résistance au roulement due à la macrotexture. Celle-ci représente environ 46 %, soit 9 % de variation de consommation de carburant à 55 km/h et de 72 %, soit 14 % de consommation à 90 km/h pour un véhicule léger. La variation de résistance au roulement imputable à la macrotexture atteint 60 % pour le camion, soit 12 % de consommation.

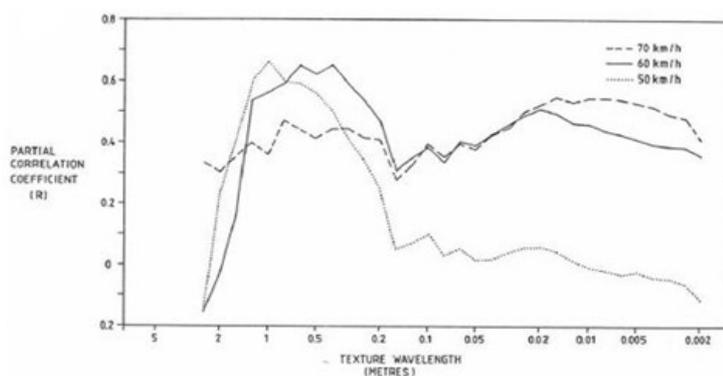


Figure 14 : Corrélation partielle entre la consommation en carburant et le niveau de texture une fois déduite la contribution de l'uni [15] (les valeurs de R supérieures à 47 % sont significatives à 95 %)

Cependant, Sandberg [15] affiche une valeur de l'ordre de 5 % pour un véhicule léger circulant à 60 km/h. En déduisant la contribution de l'uni (corrélation uni/macrotexture => énergie dissipée par la suspension), l'auteur montre que l'influence de la macrotexture ($3 \text{ mm} < \lambda < 30 \text{ mm}$) tend à croître avec la vitesse. Elle n'est en revanche pas significative pour des vitesses inférieures à 60 km/h (Cf. figure 14).

Descornet [13] a abordé le sujet différemment, il a réalisé des mesures directes du coefficient de résistance au roulement sans les consommations du véhicule sur un échantillon d'une quarantaine de sections de chaussée. Il a montré que la corrélation entre la résistance au roulement et le niveau de texture est maximale pour des échelles comprises entre la macro- et la mégatexture ($4 \text{ cm} < \lambda < 16 \text{ cm}$) (Cf. figure 14). A partir de ces résultats, Sandberg a évalué théoriquement l'effet de la macro et la mégatexture, donc la résistance au roulement sur la consommation de carburant.

La contribution de la microtexture à la résistance au roulement a, quant à elle, été peu étudiée, cette dernière étant généralement supposée négligeable. Paradoxalement, une étude en laboratoire de la Bast [18] montre que cette gamme de longueurs d'ondes de texture est la mieux corrélée avec le coefficient de résistance au roulement.

Bien que des études expérimentales et théoriques restent à approfondir, les résultats obtenus sur l'effet de la structure et la texture de la chaussée sont pour autant significatifs. Globalement, on note que la contribution de la structure de chaussée à la consommation en carburant des véhicules est de l'ordre de 1 % et de 10 % pour l'uni.

Cependant, comme il y avait un certain degré d'erreur associé aux mesures expérimentales de la consommation de carburant, et que les effets de la rugosité de la route étaient généralement faibles par rapport aux effets de l'uni, la fiabilité des ré-

sultats sur l'effet de la rugosité de la route sur la consommation de carburant n'était pas élevée. Des modèles dits « mécanistes » de la consommation de carburant des véhicules ont été développés. Les premiers modèles se sont développés au cours des années 1980, ils sont basés sur la théorie du mouvement avec une représentation simplifiée du moteur (sa consommation de carburant), des pertes aérodynamiques, de la résistance au roulement et des cycles de changement de vitesse en fonction des dénivellations de la route (uni).

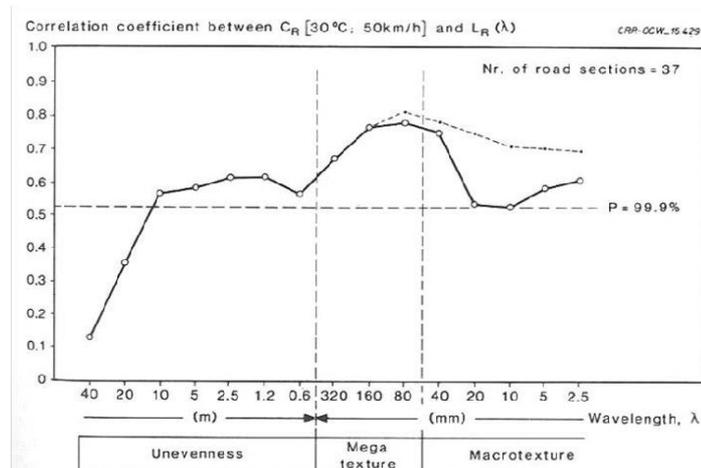


Figure 15 : Corrélation entre le coefficient de résistance au roulement et le niveau de texture par bande d'octave [13]

Les principaux avantages de ces modèles par rapport aux méthodes statistiques (méthode de régression) résident sur le fait que :

- la forme globale du modèle est établie à partir des principes mécaniques,
- les coefficients du modèle peuvent être calibrés séparément grâce à des expériences spécifiques.

De tels modèles sont actuellement utilisés par les ingénieurs de l'automobile. Des améliorations et applications ainsi sont développées pour répondre aux diverses questions sur la consommation de carburant des véhicules. Parmi ces modèles, à titre d'exemple, celui de Bester (1984) présente un modèle de consommation de carburant permettant d'évaluer l'impact de la rugosité (uni) des chaussées sur la résistance au roulement et/ou la consommation de carburant. Ce modèle a été calibré à travers des essais de résistance au roulement sur plusieurs types de chaussées. La rugosité a été mesurée et convertie en unités métriques (IRI) en utilisant la relation donnée par Paterson (1986). Un autre modèle empirique de Watanatada et al (1987) présente la consommation de carburant en fonction de la résistance au roulement et la texture de chaussées. Ce modèle présente à la fois les caractéristiques physiques et géométriques de surface de chaussées.

Par la suite, d'autres modèles plus complets et plus complexes ont été développés. Ainsi, plusieurs programmes de recherche sont en cours d'étude. Ces programmes visent la compréhension physique et la modélisation réaliste de contact pneumatique-texture afin de compléter les études sur la résistance au roulement des pneumatiques et ainsi la contribution de celle-ci sur la consommation de carburant.

3.4 - Influence des caractéristiques de l'infrastructure

Plusieurs travaux de recherche ainsi que des études expérimentales réalisées montrent que les caractéristiques géométriques (pente, dévers et rayon de courbure) de l'infrastructure ont une influence considérable sur la consommation de carburant des véhicules. En effet, lorsqu'on sait qu'il faut 1 litre de gazole à un poids lourd de 38 tonnes pour s'élaner de 0 à 75 km/h ou pour s'élever de 25 mètres, on apprécie l'importance du rôle que peuvent jouer les rampes, les courbes entraînant des remises en vitesse et les arrêts lors des déplacements.

Dans cette section du rapport, nous ne représentons pas les résultats des études sur l'effet de la pente et le rayon de courbure sur la consommation de carburant des poids lourds, mais il est important de donner un aperçu théorique sur cet effet.

3.4.1 - Influence des pentes

Chacun sait que la pente est un facteur qui a une influence significative sur la consommation du véhicule en général. La façon de gérer cet élément est une source potentielle de réduction de la consommation.

De manière simplifiée, la consommation de carburant d'un poids lourd donné circulant à une vitesse donnée augmente linéairement avec la pente dans le cas de pentes positives (montées). Le coefficient de sensibilité à la pente étant proportionnel à la masse du véhicule, dans le cas de pentes négatives (descentes), on extrapole la tendance observée pour les montées, mais on ne peut le faire que jusqu'à une certaine valeur de pente au-delà de laquelle le poids lourd est obligé de freiner pour ne pas être entraîné par la force de gravité. Cette valeur de pente limite correspond au couple maximal de retenue du moteur : la consommation de carburant est alors nulle (dans le cas des moteurs diesel).

Ceci est représenté sur la figure 16.

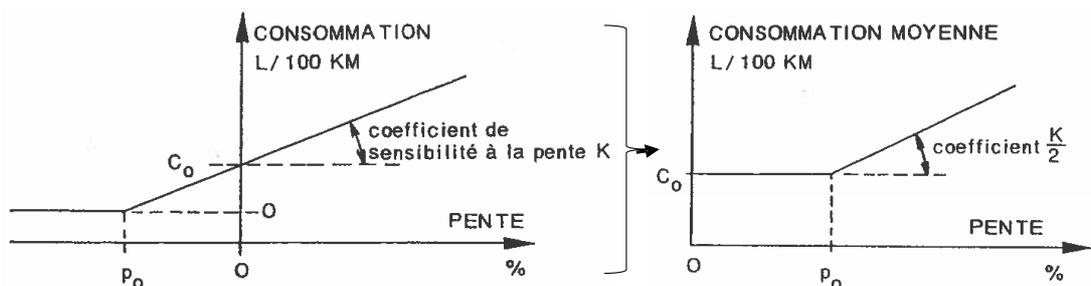


Figure 16 : Modélisation simplifiée de la variation de la consommation de carburant moyenne en fonction des rampes (montée + descente) [33]

À partir d'une telle modélisation, on peut déduire la consommation de carburant moyenne pour les deux sens de parcours (montée et descente).

La consommation de carburant (ΔC) due à la pente (p), vaut alors :

- pour $p \leq p_0$, $\Delta C = 0$
- pour $p \geq p_0$, $\Delta C = k/2 * (p - p_0)$

Où $k/2$ est le coefficient de sensibilité à la pente.

On voit que pour des pentes ne dépassant pas p_0 , la consommation moyenne (montée + descente) est égale à la consommation sur chaussée horizontale : il y a compensation et, en d'autres termes, cette compensation n'a lieu que lorsque le véhicule ne freine pas dans la descente.

Pour des vitesses allant de 30 km/h à 80 km/h, la pente limite p_0 peut être considérée comme indépendante de la vitesse, mais elle dépend bien évidemment de la masse du véhicule. Ainsi, compte tenu des différentes valeurs limites attachées à chaque type de poids lourd, on obtient pour un poids lourd moyen :

Pour

$$p \leq 1,5, \Delta C = 0$$

$$1,5 < p \leq 2,5, \Delta C = 3,4(p - 1,5)$$

$$2,5 < p \leq 4, \Delta C = 3,4 + 4,6(p - 2,5)$$

$$p > 4, \Delta C = 10,3 + 5,2(p - 4)$$

Où p est la valeur absolue de la pente en [%] et ΔC est la surconsommation de carburant due à la pente.

Ces relations sont représentées sur la figure 17.

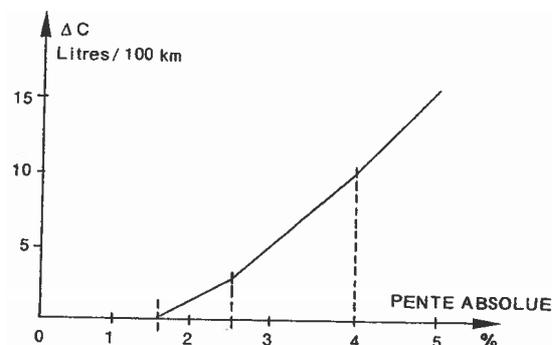


Figure 16 : Surconsommation de carburant (par rapport à une chaussée horizontale) d'un poids lourd moyen selon la valeur de la pente [33].

On remarque ainsi l'influence très importante des pentes sur la consommation du trafic de poids lourds : la consommation de carburant dans une pente de 4 % est supérieure d'environ 10 litres/100 km à la consommation sur chaussée horizontale à la même vitesse.

Enfin, on constate que la consommation est beaucoup plus importante en montée qu'en descente, ce qui est tout à fait naturel. De même, comme sur une route horizontale, le fait d'aborder une montée ou une descente avec des vitesses différentes peut s'avérer très bénéfique en terme d'économie de carburant en contre-partie d'une augmentation du temps de trajet.

3.4.2 - Influence de rayon de courbure (sinuosité)

En 1998, Bonnetain et all. ont présenté une étude dans laquelle ils comparent le cas d'une route sinueuse et horizontale à celui d'une route rectiligne et horizontale. Ils ont constaté qu'à l'approche d'un virage, le poids lourd se comporte comme suit :

- Si le rayon de courbure de ce virage est suffisamment grand, le véhicule continue sa route à la même vitesse,
- Si le rayon est petit, le conducteur doit freiner pour ensuite réaccélérer une fois le virage passé.

À partir de ces deux constats, les auteurs ont examiné la consommation de carburant des poids lourds :

- Dans le premier cas, la force centrifuge génère des résistances supplémentaires à l'avancement du véhicule (les pneumatiques roulent en dérive), d'où une consommation supérieure à celle sur une section rectiligne, cet effet n'a pas été traité par les auteurs,
- Dans le second cas, c'est à dire à l'approche d'un virage, les conducteurs doivent freiner puis accélérer, ceci se traduit par une surconsommation de carburant importante eu égard à la masse élevée des véhicules.

Cette analyse a ainsi permis aux auteurs de développer et de proposer un modèle de consommation pour une section de route sinueuse. La surconsommation de carburant (par rapport à une section rectiligne parcourue à la même vitesse) est alors pour un poids lourd moyen :

$$\Delta C = n [28,8(V/100)^2 + 3,6 - 4,6 R/40]$$

Où

n est le nombre de virages au kilomètre de rayon $R \leq R_0$ avec $R_0 = V_0^2/32$, R_0 en mètres V_0 en km/h, vitesse sur la section d'un poids lourd isolé. R est le rayon moyen de ces virages en mètres.

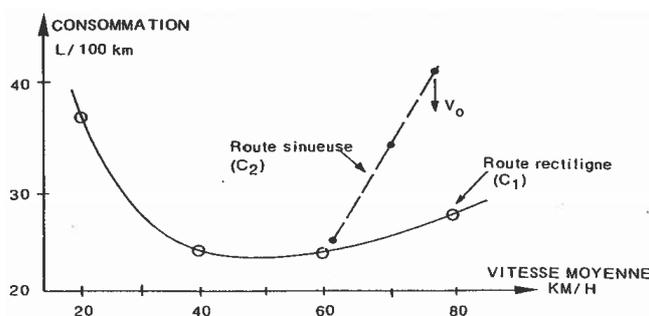


Figure 17 : Consommation en fonction de la vitesse moyenne pour un poids lourd moyen selon la sinuosité de la route (exemple) [33].

Sur un exemple qui a été réalisé dans le cadre de cette étude, pour une vitesse de 75 km/h et $n = 2,5$ avec $R = 120$ m, l'influence de cette route sinueuse est donc très importante. Dans cet exemple, l'écart atteint 10 litres/100 km par rapport au cas d'une section rectiligne (voir la figure 17).

La plage d'utilisation de la relation C_2 est limitée, d'une part par la vitesse V_0 , d'autre part par l'intersection de C_2 avec C_1 : il faut d'ailleurs noter que cette intersection a lieu pour une valeur de vitesse à laquelle la sinuosité n'a plus d'effet ralentisseur sur le poids lourd ; en effet dans cet exemple, les virages de rayon $R = 120$ m n'obligent plus à ralentir dès que $V = 62$ km/h.

3.4.3 - Influence de dévers

Les effets de dévers de la route sur la consommation de carburant des poids lourds n'ont pas (ou peu) été abordés dans la littérature.

4 - Conclusion

L'ensemble des études réalisées jusqu'à aujourd'hui montre que les caractéristiques de l'infrastructure ont bien une influence non négligeable sur la consommation de carburant des véhicules. Globalement, ces études concluent que l'infrastructure provoque des dissipations d'énergie du véhicule, celles-ci influencent la consommation de carburant de l'ordre de :

- environ 1 % pour la structure de la chaussée
- de l'ordre de 10 % pour l'uni de la chaussée,
- entre 19 % et 48 % pour la résistance au roulement et la texture,
- de 10 à 50 % pour la pente et route sinueuse.

Dans l'optique d'une optimisation de la consommation de carburant vis-à-vis des caractéristiques de l'infrastructure, des travaux théoriques et expérimentaux complémentaires sont nécessaires. Ils permettront de compléter les études antérieures et d'intégrer les poids lourds récents du parc routier ainsi que les nouvelles routes. De plus, il semble également nécessaire de quantifier/identifier les paramètres de l'infrastructure influant sur les dissipations d'énergie, donc la consommation de carburant, au niveau de la zone de contact pneumatique / chaussée et de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu.

5 - Références

- [1] S. Glaser, « Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoires limites. Application au développement de systèmes d'aide à la conduite », these de l'université Evry-Val d'Essonne, 2004.
- [2] Vassev, V., (2005), Etude des conséquences de la détérioration de l'uni des chaussées sur le comportement des véhicules, Mémoire de maîtrise présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 92 p.
- [5] Sandberg, Tony. Heavy Truck Modelling for Fuel Consumption. Simulations and Measurements. Linköping University, Sweden 2001.
- [5] Beuving, E., De Jonghe, T., Goos, D., Lindahl, T., Stawiarski, A., « Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements » INDUSTRY REPORT, March 2004.
- [7] Michelin. 2003. The Tyre Encyclopedia, Vol. 3.
- [8] Sandberg, Ulf SI Road Macro and Megatexture Influence on Fuel Consumption. ASTM STP 1031 page 460-479, USA 1990.
- [9] De Graaff, DF Rolweerstand van ZOAB - een pilotstudie, (Dutch report: Rolling resistance of Porous Asphalt - a pilotstudy); Report nr. M+P.MVM.97.2.1 rev. 2 M+P, The Netherlands 1999.
- [10] Zaniewski, J. P. 1989. Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption, Report SR289.01P, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
- [11] Zaniewski, J. P., B. C. Butler, G. Cunningham, G. E. Elkins, M. S. Paggi, and R. Machemehl. 1982. Vehicle Operating Costs, Fuel Consumption and Pavement type and Condition Factors, Final Report # DOT-FH-11-9678, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [12] Papagiannakis, A. T. 1999b. On the Relationship between Truck Operating Costs and Pavement Roughness, SAE Technical Paper Series No. 1999-01-3783, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
- [13] Descornet G. 1990. Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance. Surface Characteristics of Roadways. Meyer/Reichert, editors. pp. 401-415.

- [14] O.boujard, J. Bonal, "Bibliographe- influence des caractéristiques de surface sur la résistance au roulement" rapport technique, OR ORR, 2009.
- [15] Sandberg U. 1990. Road Macro- and Megatexture Influence on Fuel Consumption. Surface Characteristics of Roadways. Meyer/Reichert, editors. pp. 460-479.
- [17] Woodside, A et al. Rolling resistance of surface materials affected by surface type, tyre load and inflation pressure. Mairepav'03 Symposium. Portugal July 2003.
- [18] Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption, Phase II, CSTT-HVW-CTR-041, Taylor, Marsh, Oxelgren, August 2000.
- [19] Additional Analysis of the Effect of Pavement Structure on Truck Fuel Consumption, Taylor, GW, July 2002.
- [20] Gagnon, D., Beaulac, I., Doré, G., Pierre, P., (2006), Incidence de l'uni et du type de chaussée sur le coût d'opération d'un véhicule, sur l'émission des gaz à effet de serre et sur la sécurité des usagers de la route, Rapport GCT, Université Laval, Québec , Canada, 97p.
- [21] Du Plessis, H.W., Visser, A.T., et Curtayne, P.C., (1985), Fuel Consumption of Vehicles as Affected by Road-Surface Characteristics, Surface Characteristics of Roadways, STP 1031, p. 480-496
- [22] Laganier R. & Lucas J. 1990. The Influence of Pavement Evenness and Macrotexture on Fuel Consumption. Surface Characteristics of Roadways. Meyer/Reichert, editors. pp. 454-459.
- [23] P. Sumitsawan, S.A. Ardekani, S. Romanoschi, "Effect of Pavement Type on Fuel Consumption and Emissions", Proceedings of the 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2009.
- [24] NRC. 2000. Effect of Pavement Structure on Truck Fuel Consumption. Phase 2: Seasonal tests.
- [25] NRC-CNRC. 2006. Effect of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III, CSTT, HVC-TR-068.
- [26] Zaniewski J. 1982. Vehicle Operating Costs, Fuel Consumption and Pavement type and Conditions factors. FHWA/PL/82/001.
- [27] Kadiyali et al. L.R. 2000. Fuel savings on cement concrete pavement.
- [28] Lindhal T. & Goos D. 2002. Environmental aspects of Asphalt and Concrete roads. Ny-nas Bitumen.
- [29] C. Andrieu, "Analyse statistique d'une expérience d'étude de l'éco-conduite : vers la conception d'un « éco index »", rapport de stage, 2009.
- [30] Gagnon, D., Beaulac, I., Doré, G., Pierre, P., (2006), Incidence de l'uni et du type de chaussée sur le coût d'opération d'un véhicule, sur l'émission des gaz à effet de serre et sur la sécurité des usagers de la route, Rapport GCT, Université Laval, Québec , Canada, 97 p.
- [31] DROUOT, V., « Etude de l'effet des chaussées dégradées sur la consommation de carburant des véhicules et la sécurité des usagers de la route » Projet de Fin d'Etudes, 2010.
- [32] J. McLean, G Foley « Road surface characteristics and condition: effects on road users », Research report, ARRB 314, 1998.
- [33] Y. Bonnetain, J.P. Roumegoux, « Le poids lourd – conception et fonctionnement », Note d'information N°18, septembre 1998.



CETE de Lyon
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON Cedex
Tél. : 04 72 14 30 30
Fax : 04 72 14 30 35
CETE-Lyon@developpement-durable.gouv.fr

Département Laboratoire de Lyon
25, avenue François Mitterrand
CS92803
69674 BRON CEDEX
Tél. : +33 (0)4 72 14 33 00
Fax : +33 (0)4 72 14 33 11
dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

