HAL
open science

Concurrent evaluation of the tire/pavement contact torsor by means of both a dynamometer wheel and a road infrastructure-integrated system

Alex Coiret, Olivier Orfila

To cite this version:

Alex Coiret, Olivier Orfila. Concurrent evaluation of the tire/pavement contact torsor by means of both a dynamometer wheel and a road infrastructure-integrated system. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2008, 273, pp 133-145. hal-00376819

HAL Id: hal-00376819

https://hal.science/hal-00376819v1

Submitted on 20 Apr 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évaluation concurrentielle du torseur de contact pneumatique/chaussée au moyen d'une roue dynamométrique et d'un système intégré à l'infrastructure routière

Alex COIRET*
Olivier ORFILA
LCPC, ESAR, Nantes, France

RÉSUMÉ

La connaissance des efforts exercés par les roues d'un véhicule sur une chaussée facilite l'évaluation des risques de perte de contrôle. En particulier, pour des études expérimentales, de tels efforts mesurés peuvent être rapportés aux dérives des pneumatiques pour consolider l'analyse du comportement dynamique d'un véhicule. Face aux coûteuses roues dynamométriques traditionnellement employées pour cela, un système alternatif a été développé au LCPC. Constitué d'un élément de chaussée instrumenté, ce système permet la mesure des composantes du torseur de contact entre un pneumatique et une chaussée. Sa validation est ici établie par confrontation à un véhicule muni d'une roue dynamométrique. Des résultats sont présentés pour des situations de braquage pur d'une roue, de roulement à vitesse constante et de freinage d'urgence, en contact sec ou lubrifié. Bien qu'il ne donne pas accès à la connaissance des efforts tout au long d'une trajectoire, un tel système intégré à la chaussée permet d'acquérir localement le torseur de contact avec un ordre de précision semblable à celui d'une roue dynamométrique et ce pour tout véhicule, même dénué d'instrumentation. L'emploi de ce système sur une section routière pourrait autoriser l'évaluation de celle-ci vis-à-vis des sollicitations mobilisées par un ensemble varié de véhicules. En perspectives d'application, il serait possible de compléter les observatoires de vitesse existant sur le réseau routier par des mesures de l'adhérence réellement mobilisée par les divers usagers, dans le but général de contribuer au bilan de sécurité des voies répertoriées comme particulièrement dangereuses.

Concurrent evaluation of the tire/pavement contact torsor by means of both a dynamometer wheel and a road infrastructure-integrated system

ABSTRACT

Knowledge of the forces exerted by vehicle wheels on a pavement facilitates the evaluation of control loss risk. More specifically, for experimental studies, such forces when measured can be correlated with tire skidding in order to consolidate the dynamic behavior analysis of a vehicle. Given the costly dynamometer wheels conventionally introduced for these studies, an alternative system has been developed at the LCPC Laboratory. Composed of an instrumented pavement section, this system enables measuring components of the contact torsor present between a tire and a pavement. Its validation will be performed in this article by means of comparing results derived from a vehicle equipped with a dynamometer wheel. Findings will be provided for situations of pure one-wheel turning situations, constant-speed driving and emergency braking, under either dry or lubricated contact conditions. Even though such a system cannot yield precise values of forces over an entire trajectory, its inclusion in the pavement is still able to locally acquire the contact torsor, to a degree of precision that rivals the output of a dynamometer wheel. This holds true for any vehicle, even one that has not been instrumented. Use of this system on a road section could eventually authorize evaluation of the section in terms of forces mobilized by a heterogeneous group of vehicles. As for potential applications, it would be possible to complement road speed observation data from existing network stations with measurements of skid resistance actually being mobilized by various road user categories, in the general aim of contributing to safety gains on road sections identified as especially dangerous.

* Auteur à contacter :
Alex COIRET
alex.coiret@lcpc.fr

INTRODUCTION

La sécurité routière s'est fortement améliorée ces dernières années, en particulier grâce à une plus forte répression (contrôle automatique des vitesses par radar). Cette tendance s'infléchit cependant depuis 2007. Sans renier les bénéfices des stratégies de contrôle-sanction, il faut sûrement en améliorer d'autres : le gestionnaire routier peut sans doute encore optimiser l'état et les règles d'usage des infrastructures, grâce à une meilleure connaissance de la relation entre accidentologie et caractéristiques routières. Dans ce contexte, le travail présenté ici vise à développer et qualifier des moyens expérimentaux portant sur l'étude de la *contrôlabilité* d'un véhicule.

Nous définissons la contrôlabilité par l'existence de commandes applicables à un véhicule qui conduisent à une trajectoire viable (rester en voie de circulation tout en conservant une vitesse adaptée au trafic et à la règlementation locale). Cette contrôlabilité dépend particulièrement des forces de contact qui peuvent être mobilisées entre les pneumatiques et la chaussée. Lors de recherches expérimentales, ces forces peuvent être mesurées de façon directe par des roues dynamométriques équipant des véhicules de test (coûteux) ou de façon indirecte par le biais de coefficients de frottement relatifs à un pneumatique de référence. Les roues dynamométriques représentent l'instrumentation de choix pour les constructeurs automobiles désireux de valider la contrôlabilité de leurs prototypes. Mais il est difficile d'étudier de la sorte une chaussée particulière devant supporter des véhicules variés, car il faudrait disposer de différents modèles de ces – coûteuses – roues dynamométriques. Le LCPC a donc développé un système alternatif, permettant la mesure des efforts de contact par un composant spécifique de chaussée (système dénommé MEVI pour Mesure des efforts appliqués par un véhicule, depuis l'infrastructure). Son implantation sur diverses sections routières d'essai autoriserait l'évaluation de la contrôlabilité de multiples combinaisons véhicule-chaussée.

En première validation le système MEVI a été confronté à des estimations embarquées des efforts : procédure de freinage frontal ou exploitation de mesures cinématiques **[1, 2]**. Il a aussi conforté **[3]** les résultats d'homogénéité du parc français des grip-tester lors d'essais croisés (matériel couramment utilisé en gestion de l'entretien des routes).

Disposant depuis lors d'une roue dynamométrique, nous avons l'opportunité de lui comparer le système MEVI. Les deux systèmes portent sur l'évaluation du torseur de contact global qui se développe à l'interface pneumatique/chaussée. Néanmoins, si MEVI autorise une mesure quasiment directe – aux lois de transport près – du torseur de contact, le moyeu dynamométrique ne le mesure qu'après un filtrage par le pneumatique **[4]**. En effet le comportement visco-élastique du pneumatique altère la mesure du moyeu dynamométrique en générant des retards et des amortissements (expérimentalement, on peut cependant limiter ces influences en privilégiant des régimes de fonctionnement de pneumatique quasi stationnaires). De plus, une instrumentation complémentaire complexe est nécessaire pour établir la correspondance entre les référentiels liés respectivement au moyeu et à la zone de contact (mesure des angles de braquage, de carrossage, de l'écrasement et du ballant, etc.).

Après une présentation succincte de l'état de l'art sur les moyens de mesure des efforts de contact, le système novateur MEVI est détaillé dans cet article. Puis est présentée sa validation, réalisée par comparaison à une roue dynamométrique, système de référence actuellement utilisé par les constructeurs automobiles **(figure 1)**.

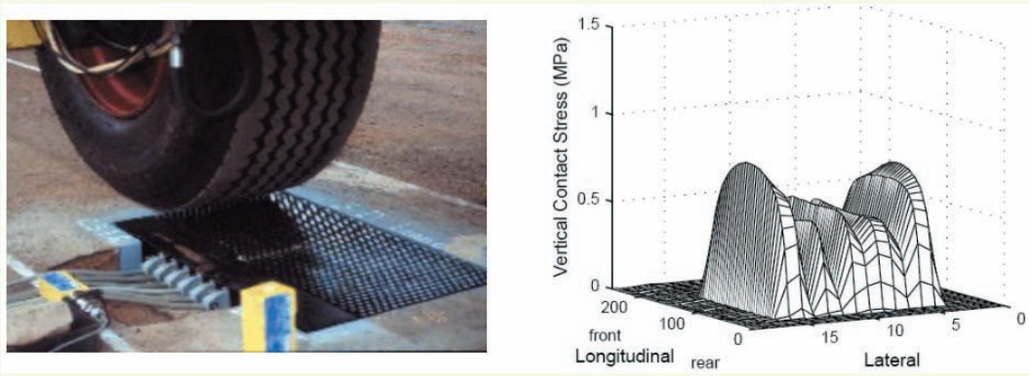
MOYENS DE MESURE DES EFFORTS DE CONTACT

Il existe diverses méthodes d'évaluation du torseur de contact transmis entre un pneumatique et une chaussée. Nous présentons ci-après certaines d'entre elles, en distinguant les systèmes embarqués de ceux qui sont intégrés à l'infrastructure.

La plupart des systèmes se limitent à l'évaluation globale du torseur transmis à l'interface pneumatique/chaussée. En effet, si la répartition réelle des efforts à l'interface pneumatique/chaussée

figure 1
Roue Kistler sur système MEVI.

est éloignée du modèle de chargement uniforme **[5, 6]** **(figure 2)**, il reste difficile d'accéder expérimentalement à cette répartition pour des vitesses de passage élevées tout en tenant compte des propriétés de surface du revêtement.



a | b

figure 2
d'après **[7]**
a : ensemble de pointes instrumentées
b : répartition des pressions de contact mesurées sous un pneumatique par cet ensemble.

Évaluations embarquées (depuis un véhicule d'essai)

La méthode dite du *bilan cinétique* est un moyen d'évaluation des efforts de contact fondé sur la mesure de la différence d'état dynamique d'un véhicule en situation de freinage entre deux points de sa trajectoire. Le principe fondamental de la dynamique est exploité pour estimer les efforts à partir de la décélération moyenne mesurée par des capteurs proprioceptifs. Le coefficient de frottement en freinage est donné par :

$$\mu_x = \frac{\Delta V}{g \cdot \Delta t} \qquad (1)$$

Avec ΔV la différence entre vitesses à deux instants séparés par un temps Δt

Cette approche ne permet d'obtenir qu'une information d'adhérence longitudinale moyenne en temps et pour les quatre roues (ou au mieux, sur les deux roues de l'essieu avant si une procédure de freinage frontal est utilisée). Le coefficient de frottement en freinage, défini comme le rapport Fx/Fz, est dans ce cas :

$$\mu_x = \frac{F_x}{F_z} = \frac{L \cdot \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2d} - \left(\alpha + \beta \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 \right) \right)}{L - x_g + h \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2d}} \qquad (2)$$

Où x_g est la position longitudinale du centre de gravité, L est l'empattement du véhicule, h est la hauteur du centre de gravité, α et β sont des constantes à déterminer par des essais de décélération en roue libre, d est la distance de freinage, V_1 et V_2 sont les vitesses au début et à la fin de la période de freinage considérée.

L'intérêt de cette méthode est d'ordre économique : adaptation rapide à divers véhicules, capteurs relativement simples (accéléromètres ou système hybride GPS/inertiel/buscan tel que la vbox3 de Racelogic™).

Les jantes dynamométriques permettent la mesure directe du torseur s'exerçant entre le moyeu et le voile de jante d'une roue **(figure 3)**. La technique employée **[8]** permet la mesure du torseur de contact complet avec une linéarité inférieure à 0,5 % (utilisation de jauges de déformations ; efforts et moments sur trois axes). Le fait que la conception doive être réitérée pour chaque véhicule et le coût élevé (de l'ordre de 100 k€ par roue) réservent cette méthode aux constructeurs automobiles pour des études R&D ou à des véhicules d'essai dédiés. Sur une trajectoire donnée, la mesure peut être continue jusqu'à une fréquence de 500 Hz.

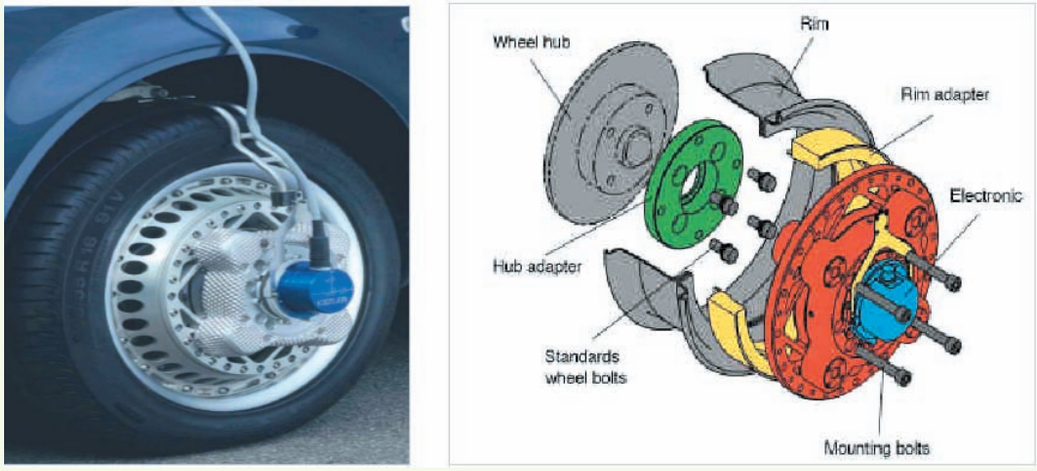
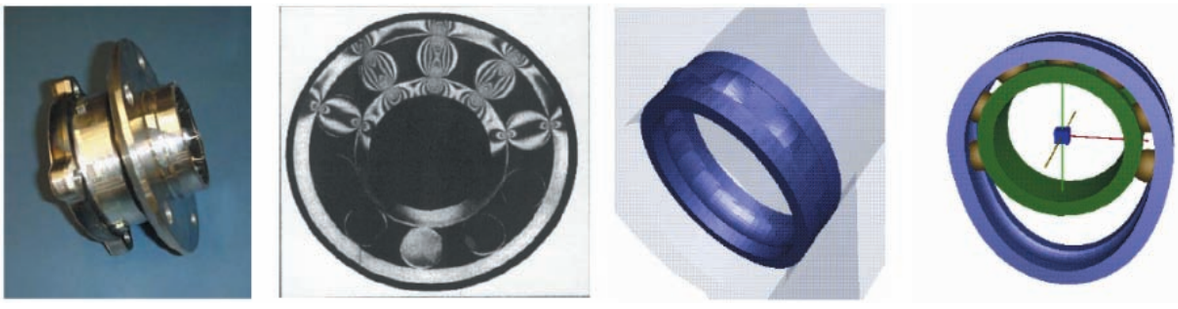


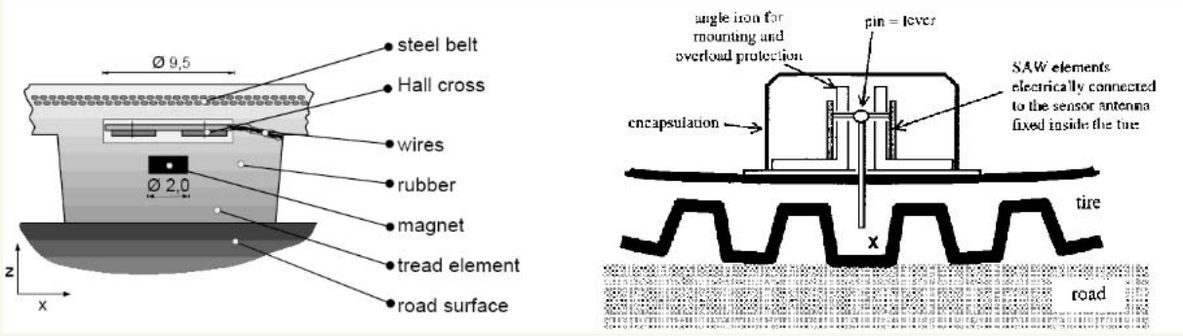
figure 3
Jantes dynamométriques **[8]**
a : vue d'ensemble
b : schéma éclaté.

a | **b**

Le développement de roulements dynamométriques **[9]** **(figure 4)** pourrait aboutir à la démocratisation des mesures dynamométriques rendant possible l'application de la méthode aux véhicules de tourisme. Cette technique prometteuse permet de déterminer les efforts appliqués entre l'axe de la roue et la jante à partir des déformations de la bague extérieure du roulement (efforts tridimensionnels, erreur maximale de 2 %). Des recherches sont également conduites sur le thème du *pneumatique intelligent* : l'instrumentation d'un pain de gomme est généralement réalisée pour déterminer ses déformations et estimer le niveau d'adhérence mobilisée **[10, 11]** **(figure 5)**. Un des buts du développement du pneumatique intelligent est de fournir aux systèmes ABS/ESP une indication anticipée de la dégradation de l'adhérence **[12]**.

figure 4
Roulement dynamométrique (SKF-TNO) **[9]**.





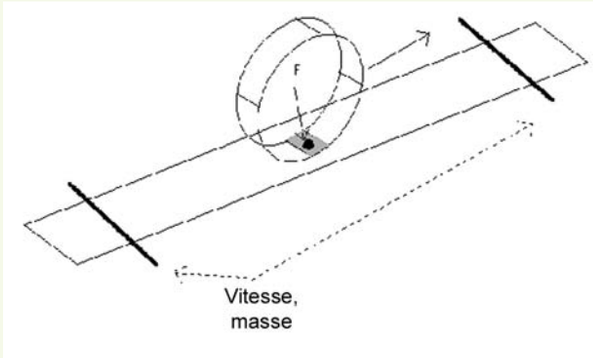
a | b

figure 5
Pavé de gomme instrumenté
a : effet hall **[10]**
b : SAW sensors **[11]**.

Évaluations liées à l'infrastructure routière

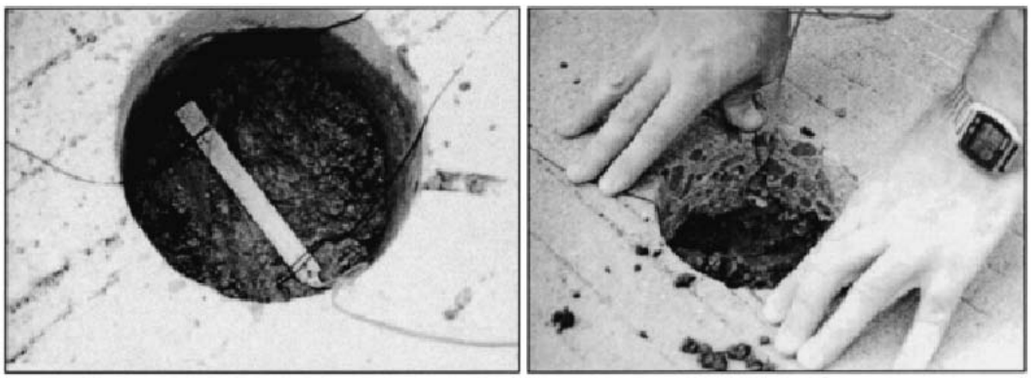
De manière analogue à la méthode du bilan cinématique embarqué, des boucles insérées dans le revêtement routier (stations SIREDO) ou des systèmes WIM (Weight in motion) peuvent donner accès aux paramètres dynamiques en plusieurs points de la trajectoire d'un véhicule : masse, vitesse **(figure 6)**. Des cinémomètres optiques peuvent aussi avantageusement être utilisés pour un usage déporté. Les efforts aérodynamiques, voire hydrodynamiques, ne sont quant à eux pas identifiables et leurs effets sont assimilés à la performance globale de freinage/accélération. L'échelle prise en compte est toujours celle du véhicule complet, avec une adhérence moyenne des quatre pneumatiques sur le tronçon délimité par les positions d'évaluation.

figure 6
Méthode globale du bilan cinématique.



Pour évaluer le torseur appliqué par un pneumatique donné d'un véhicule d'essai, il est aussi envisageable d'employer des jauges de déformation noyées dans le revêtement **[13]** **(figure 7)**. La portée de mesure réduite nécessite une répartition dense de capteurs sur la zone intéressée. Le module mécanique moyen équivalent de la chaussée doit être déterminé, ainsi que sa sensibilité à la température **[14]**. Cette sensibilité et le caractère hétérogène des revêtements routiers limitent la pos-

figure 7
Mise en œuvre de jauges de déformation dans un revêtement **[13]**.



sibilité de mesurer précisément le torseur de forces de cette manière **[15-17]**. Enfin les systèmes à base de plaques *sensibles* (tel que présenté en **figure 2**) occultent les caractéristiques de surface des revêtements.

Les limitations des techniques disponibles jusqu'alors ont conduit à étudier la faisabilité, puis à mettre en œuvre la méthode présentée en partie suivante.

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE MESURE LIÉ À L'INFRASTRUCTURE

Besoin de développement

Du fait de la complexité du système véhicule/chaussée, les études sur les limites de contrôlabilité ne peuvent pas encore se contenter de modèles numériques et nécessitent des validations expérimentales des efforts mobilisés lors de freinages d'urgence (mode longitudinal), de prises de virage (mode transversal) ou d'associations de ces deux sollicitations. Pour cela, un moyen de mesure intégré à la chaussée et déplaçable permet d'étudier de nombreux véhicules en différents points d'une infrastructure. Dans le cadre de telles mesures, où les rôles de la chaussée et du véhicule sont d'importance comparable, il est impératif que l'influence des revêtements ne soit pas occultée. Enfin pouvoir estimer les limites de contrôlabilité nécessite que des vitesses et des efforts de contact assez élevés puissent être exprimentés.

Pour répondre à ces besoins il a été choisi de développer une instrumentation de la chaussée avec un capteur de type *balance dynamométrique* qui offre une mesure comparable à celle procurée par une jante dynamométrique, mais en un lieu unique (limitation acceptable pour la majorité des essais qui sont réalisés dans des états dynamiques stationnaires). Un autre bénéfice du choix d'une instrumentation liée à la chaussée est la possibilité de vérifier les efforts développés par les matériels d'essais de référence (adhéra, grip-tester, scrim, etc.). Pour ces matériels d'essais, les dérives métrologiques dues au conditionnement du signal et aux capteurs pourront être distinguées des variations dans les conditions d'essais : usure des pneumatiques et des organes de liaison modifiant qualitativement le contact gomme/sol. Le suivi métrologique de ces appareils sera ainsi facilité.

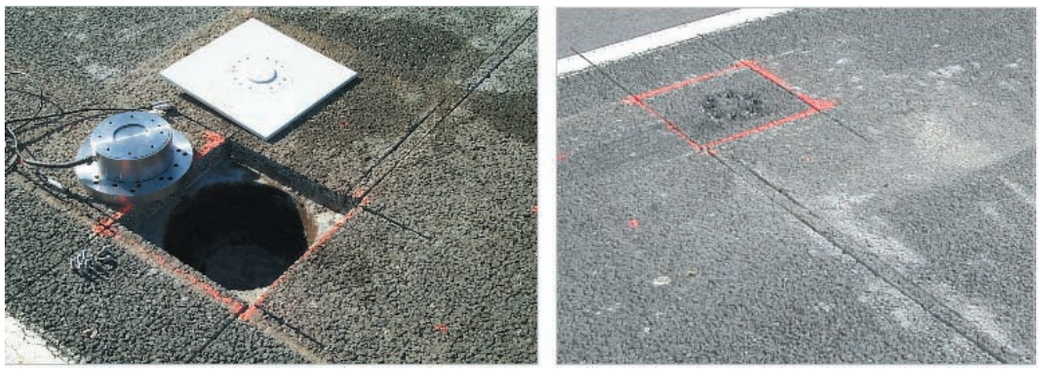
Système expérimental

Pour accéder à la mesure du torseur global des forces transmises par un pneumatique d'un véhicule en mouvement sur la chaussée, nous avons choisi d'instrumenter un élément de chaussée désolidarisé mécaniquement de son environnement.

En pratique, une portion carrée de la couche de roulement **(figure 8)** a été découpée sur 4 cm d'épaisseur, instrumentée sur sa surface inférieure par une cellule de mesure 6 voies (efforts et moments tridimensionnels) et replacée dans son environnement initial. Les moments sont évalués au point O situé sur l'axe de révolution de la cellule de mesure et dans le plan de sa surface supérieure. Un espace de désolidarisation a été respecté autour de la dalle découpée, de sorte qu'elle ne soit reliée au reste de l'infrastructure que par la cellule de mesure et ce, pour toute intensité de chargement. Les dimensions de la dalle ont été fixées de manière à assurer le contact complet pneumatique/chaussée pendant une durée suffisant à sa stabilisation dynamique et à l'acquisition des données, tout en maintenant les moments du torseur à des niveaux admissibles par la cellule. Une chaîne d'acquisition rapide (2,5 kHz) a été employée, associée à un corps d'épreuve rigide.

Un véhicule de type Peugeot 406 est utilisé pour l'ensemble des essais. Ses pneumatiques, de dimension $195 \times 65/15$, présentent une usure faible et sont gonflés à la surpression de 2 bars. Les réglages statiques de la liaison au sol du véhicule sont conformes aux prescriptions du constructeur ; pour les mesures présentées, les niveaux des efforts qui correspondent à ces réglages seront inclus dans les tares.

figure 8
Implantation du système MEVI sur une piste d'essai du LCPC
a : cellule à six composantes
b : aspect final, avec dalle remise en place.



a | b

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Essai statique de braquage pur : première vérification

Un essai quasi statique est réalisé en première intention pour comparer les systèmes roue dynamométrique et MEVI. Partant de la position roue centrée sur MEVI, la commande de direction du véhicule est braquée à droite au maximum, puis à gauche également en butée et finalement ramenée au centre, tout en bloquant la rotation propre de la roue à l'aide du frein de service. Le réglage en décalage (offset) de MEVI est réalisé en soustrayant aux signaux un échantillon préalablement enregistré en l'absence de roue. Celui de la roue dynamométrique est réalisé en deux étapes, roue délestée et lors d'un roulement à vitesse constante.

Le torseur mesuré par MEVI pour cet essai **(figure 9)** présente les caractéristiques suivantes.

• Le moment Mz_{mevi} est représentatif de la progressivité de la commande volant appliquée (avec un rapport d'échelle dû à l'assistance de la direction). Sa saturation à niveau constant sur chaque grande phase de la commande de braquage est liée au fait que le contact est réalisé en glissement sans roulement pour l'essentiel de la surface de contact (soit une valeur constante de frottement de Coulomb en glissement).

• La résultante $\overrightarrow{Fy_{mevi}}$ est l'effort latéral de contact du pneumatique sur la chaussée. Il est dû à l'élastocinématique du train avant du véhicule. Le détail du comportement de cette résultante sera étudié plus en profondeur par des expérimentations plus poussées, en prenant en compte les variations de référentiels. La variation en amplitude de l'ordre de 70 daN est cependant probable ; on aurait cependant dû s'attendre à des efforts positif et négatif de même intensité pour les braquages à droite et à gauche : en pratique, cette asymétrie est sans doute liée à un effort permanent ou contextuel (géométrie de train du véhicule, chaussée en dévers).

• Une résultante $\overrightarrow{Fx_{mevi}}$ apparaît pour les angles de braquage élevés (presque en butée). Elle est corrélée à la résultante Fy en raison de la condition de roue bloquée en rotation propre. Un essai effectué en laissant la roue libre en rotation, le véhicule étant maintenu par le frein de stationnement arrière, a montré que cette résultante n'apparaissait plus. Ce comportement est sans doute lié à la réponse mécanique du pneumatique, en particulier à la rigidité des flancs en torsion.

• La résultante $\overrightarrow{Fz_{mevi}}$ augmente légèrement lors des braquages vers la droite et diminue lors des braquages vers la gauche. Ceci semble être dû à la diaphonie entre les voies de mesure Mz et Fz. En effet, l'influence de Mz sur Fz est de l'ordre de 1 % de la pleine échelle de Fz, soit 25 daN, ce qui correspond à la variation constatée.

Les mêmes variables mesurées avec la roue dynamométrique sont présentées sur la **figure 10**. On observe que :

• Le moment Mz_{rdyn} est strictement opposé au moment mesuré par MEVI (pour cause de convention d'orientation des repères). Pour ce type particulier de manœuvre, il s'agit de la grandeur la plus directement comparable entre les deux systèmes.

• La charge $\overrightarrow{Fz_{rdyn}}$ est comparable à celle mesurée par MEVI, une différence d'une quinzaine de daN correspondant au poids de la roue diminué de la masse propre du moyeu dynamométrique ($Fz_{mevi} > Fz_{rdyn}$).

• Les efforts $\overrightarrow{Fx_{rdyn}}$ et $\overrightarrow{Fy_{rdyn}}$ présentent, en première approche, des variations comparables à celles qui affectent les efforts mesurés avec MEVI. Il serait nécessaire cependant d'appliquer les lois de changement de référentiel pour réaliser une comparaison lors des forts braquages.

Remarquons enfin que les deux systèmes présentent des moments Mx de courbes homothétiques, mais d'amplitudes assez différentes. La comparaison de ces moments nécessitera au besoin de connaître le point de contact exact et les bras de levier, ainsi que les changements de repère de la roue dynamométrique pour déterminer les lois de transport à appliquer ($Mx_{rdyn} \simeq Fy_{rdyn} \cdot R_{roue}$ et $Mx_{mevi} \simeq Fz_{mevi} \cdot d_{centre} + Fy_{mevi} \cdot h_{mevi}$). Cette expérimentation, initialement destinée à une comparaison métrologique simple, exigera sans doute d'être réitérée avec différents pneumatiques et pour différents niveaux de gonflage afin de caractériser plus finement le contact pneumatique/

figure 9
Torseur MEVI, frein principal bloqué, sol sec, pneu centré ; braquage centre/butée droite/ butée gauche/retour au centre.

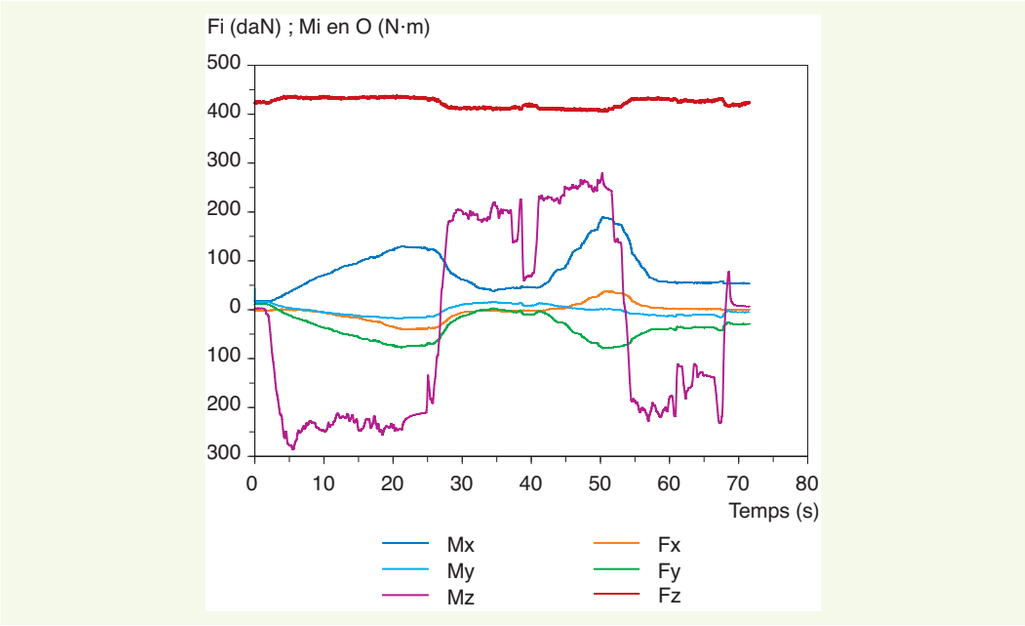
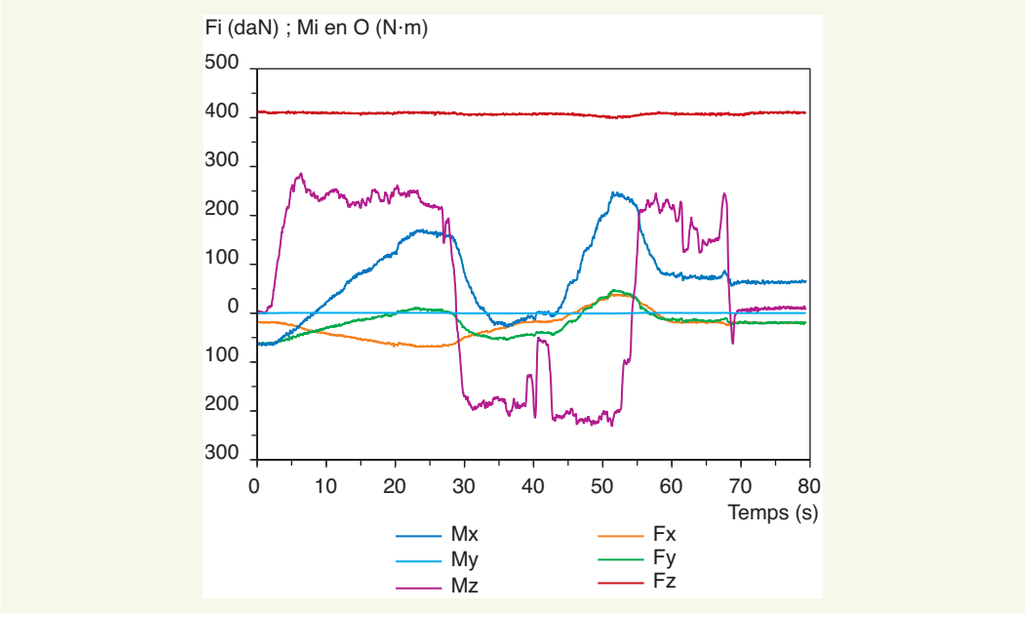


figure 10
Torseur roue dynamométrique, frein principal bloqué, sol sec, pneu centré ; braquage centre/butée droite/ butée gauche/retour au centre.



chaussée. Un tapis sensible à la pression serait également utile à la détermination de la distribution des contraintes dans l'aire de contact (ce qui ne suffirait cependant pas à respecter les caractéristiques du contact réel).

Globalement, on note donc que, si les réglages en décalage (offset) sont bien choisis, les moyens de mesure présentent un bon accord pour cette situation particulière quasi statique.

Situation de roulement à vitesse constante

La **figure 11** présente les variations du torseur de contact mesurées par MEVI pendant une période englobant la durée de passage de la roue avant droite du véhicule sur l'axe longitudinal central de MEVI. L'essai illustré correspond à une vitesse de passage du véhicule de 10 $km \cdot h^{-1}$. Des essais ont été réalisés pour des vitesses de déplacement constantes qui varient de 10 à 110 $km \cdot h^{-1}$ par palier de 20 $km \cdot h^{-1}$, en exploitant une régulation de la puissance moteur.

› Roulement à basse vitesse

Pour un roulement de la roue à 10 $km \cdot h^{-1}$ (mesure MEVI en **figure 11**), la charge verticale Fz est mesurée de manière stable et similaire par les deux systèmes MEVI et roue dynamométrique, avec une différence de 15 daN attribuable à la masse du pneumatique (et d'une partie de la jante).

L'effort de traction Fx selon la mesure de roue dynamométrique est d'environ 30 daN. La moyenne de cet effort est évaluée à 25 daN par le système MEVI, en exploitant la période d'appui complet du pneumatique (un dixième de seconde). La force latérale Fy est de 30 daN selon la roue dynamométrique, mais beaucoup plus faible selon MEVI (environ 10 daN). L'écart est certes important, mais néanmoins inférieur aux erreurs maximales de linéarité/hystérésis/diaphonie des systèmes (pour cette situation, 22 et 11 daN respectivement pour la roue dynamométrique et MEVI, en considérant des diaphonies faibles de 0,5 % puisque le chargement Fz est modéré). Par ailleurs cet écart peut en partie être imputé à l'apparition d'un angle de carrossage susceptible de modifier la mesure de Fy sur la roue dynamométrique, alors que la mesure MEVI n'est pas influencée par les angles du train avant.

La faible valeur du moment Mx_{mevi} indique un bon centrage latéral du pneumatique sur la plaque de mesure en enrobé bitumineux. En trajectoire rectiligne on peut négliger la contribution de la force latérale au moment Mx ; le décentrage du pneumatique peut ainsi être estimé à $d_{centre} \simeq \frac{Mx}{Fz} \approx \frac{50}{4500} \approx 0{,}01$ m.

› Évolution des mesures à vitesse élevée

Pour des vitesses d'essai plus élevées, de 30 à 110 $km \cdot h^{-1}$, l'effort de traction $\overrightarrow{Fx_{mevi}}$ augmente jusqu'à atteindre 50 daN, aucune variation n'étant mise en évidence sur $\overrightarrow{Fx_{rdyn}}$, qui reste stable à la valeur de 30 daN. La variation d'environ 20 daN mise en évidence par le système MEVI est du même ordre de grandeur que la demi-différence de l'augmentation de l'effort aérodynamique appliqué sur le véhicule (17,5 daN pour chaque roue motrice). En effet, cette augmentation peut être estimée en première approximation par l'équation **(3)**, dans laquelle sont négligés pour des raisons pratiques le brassage aérodynamique de la roue, les résistances au roulement des pneumatiques, les frottements résiduels des freins, etc.

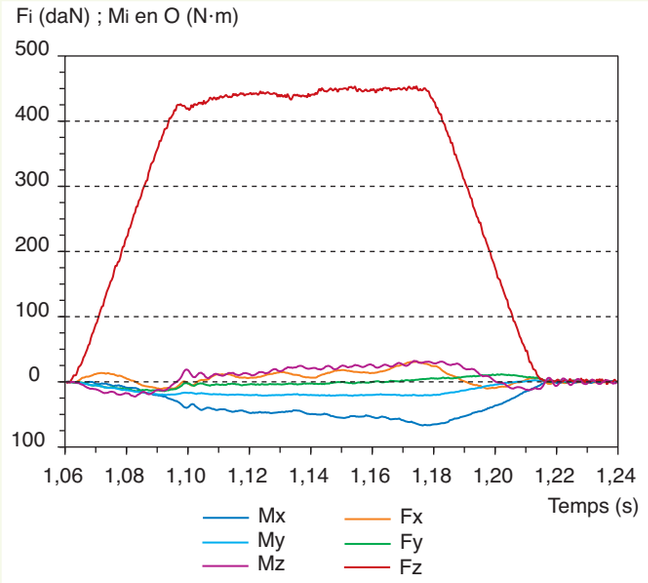
$$\Delta\vec{F}_{aéro} = \frac{1}{2}\rho \cdot SC_x \cdot \left(V_{110}^2 - V_{30}^2\right) \approx 33 \text{ daN} \qquad (3)$$

avec $SC_x = 0{,}63$ m²

$\rho = 1{,}2 \ kg \cdot m^{-3}$

Que l'augmentation de cet effort aérodynamique ne soit pas mise en évidence sur la roue dynamométrique peut s'expliquer par la faiblesse de cette variation au regard de l'étendue de la gamme de mesures $\overrightarrow{Fx_{rdyn}}$ (1 500 daN). Des essais de vérification sont en cours avec une instrumentation redondante (couplemètres sur les arbres de transmission).

figure 11
Torseur MEVI à vitesse constante de 10 km · h⁻¹.



Freinage d'urgence sur revêtement mouillé, sans ABS

› Identification des données mesurées par les systèmes

Les **figures 12** et **13** montrent les efforts acquis par MEVI et par la roue dynamométrique lors d'un freinage d'urgence sur revêtement mouillé, réalisé à partir d'une vitesse initiale de 70 $km \cdot h^{-1}$. Le système ABS du véhicule a été désactivé pour éviter les oscillations de freinage qu'il engendrerait. La longueur d'onde de ces oscillations est en effet trop grande pour permettre l'acquisition de périodes complètes par MEVI. Pour des perspectives d'application ultérieures on pourra penser à des dalles MEVI plus longues.

Le système MEVI fournit un signal de courte durée et échantillonné à haute fréquence (2 500 Hz), soit le double de la fréquence propre du module de mesure. Le signal utile correspondant au contact complet pneumatique/chaussée, d'une durée d'environ 1 ms, est encadré par les phases de mise en contact et séparation du pneumatique du pavé de mesure.

figure 12
Torseur MEVI, freinage sans ABS sur, revêtement mouillé, avec une vitesse initiale de 70 km · h⁻¹.

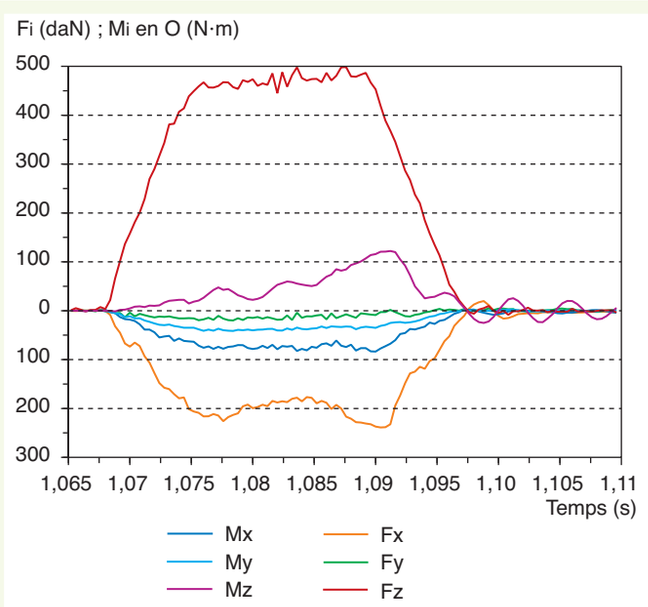
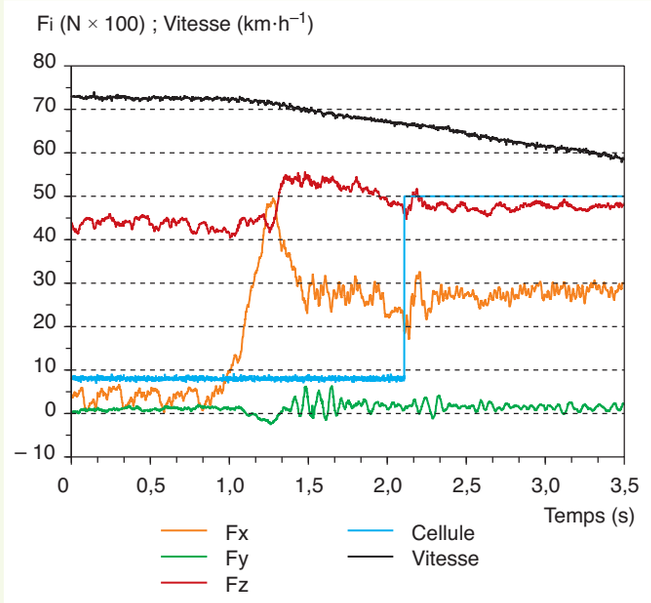


figure 13
Évolution générale du torseur de roue dynamométrique, freinage sans ABS sur revêtement mouillé.



Inversement, la roue dynamométrique fournit un signal portant sur l'ensemble de l'essai et à une fréquence de seulement 100 Hz. Qualitativement cette mesure permet de reconnaître les diverses phases de l'essai : approche à la vitesse constante de 73 $km \cdot h^{-1}$ ($t < 1$ s sur la **figure 13**), freinage d'urgence sans ABS à partir de t = 1 s, passage de la roue sur MEVI à t = 2,1 s.

Le coefficient de frottement en freinage passe en deux dixièmes de secondes par un maximum proche de 1, avant de s'établir à un niveau dégradé égal à 0,5. Ces coefficients, classiquement identifiés par μ_{max} et μ_{bloq}, caractérisent les régimes de freinage optimum et dégradé, qui correspondent respectivement à l'objectif de fonctionnement des systèmes ABS et à une roue bloquée en rotation, ne présentant qu'un glissement pur avec la chaussée.

On peut en particulier vérifier sur cet essai qu'un régime de freinage stationnaire est bien réalisé pendant plus d'une demi-seconde avant que le véhicule n'atteigne la dalle MEVI.

Un autre essai de freinage d'urgence a été réalisé à partir d'une vitesse de 30 $km \cdot h^{-1}$.

Afin de faciliter la comparaison des deux systèmes, des données issues de la roue dynamométrique sont présentées en fonction de la position longitudinale x, relativement au centre de la dalle MEVI (**figures 14** et **15** pour des vitesse de 70 et 30 $km \cdot h^{-1}$ respectivement).

› Comparaison des torseurs mesurés

Pour l'essai de vitesse initiale de 70 $km \cdot h^{-1}$, les efforts valent Fz_{mevi} = 470 daN ; Fx_{mevi} = 220 daN ; $Fz_{rdyn} + M_{pneu}$ = 485 daN ; Fx_{rdyn} = 200 daN.

Pour celui de vitesse initiale de 30 $km \cdot h^{-1}$, ils valent Fz_{mevi} = 500 daN ; Fx_{mevi} = 300 daN ; $Fz_{rdyn} + M_{pneu}$ = 480 daN ; Fx_{rdyn} = 350 daN.

En première approche, les deux systèmes s'accordent à trouver un frottement meilleur à 30 $km \cdot h^{-1}$ qu'à 70 $km \cdot h^{-1}$, probablement du fait que le pneumatique fonctionne à plus basse température dans le premier cas.

Les incertitudes sur les efforts sont de 20 daN pour la roue dynamométrique et respectivement de 25 et 8 daN pour les efforts Fz et Fx issus de MEVI. Les incertitudes de linéarité et d'hystérésis sont prises en compte. En toute rigueur il faudrait ajouter l'incertitude de diaphonie mais celle-ci n'est connue que pour ses valeurs maximales d'étalonnage.

figure 14
Détail du torseur de roue dynamométrique autour de MEVI avec une vitesse initiale de 70 km · h⁻¹.

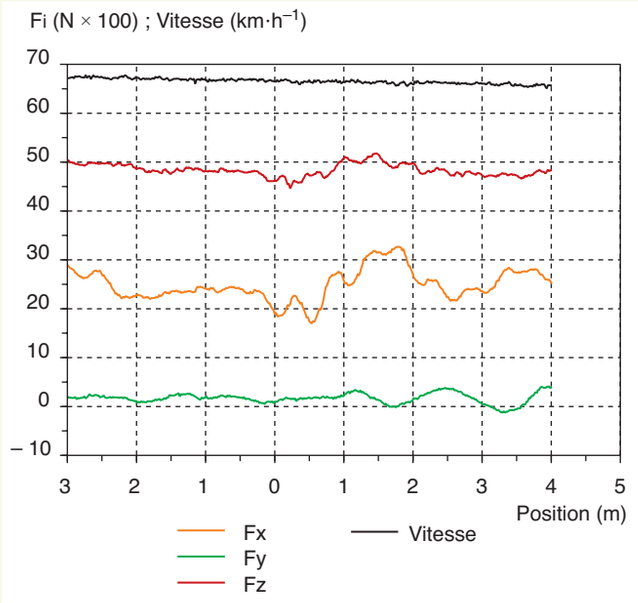
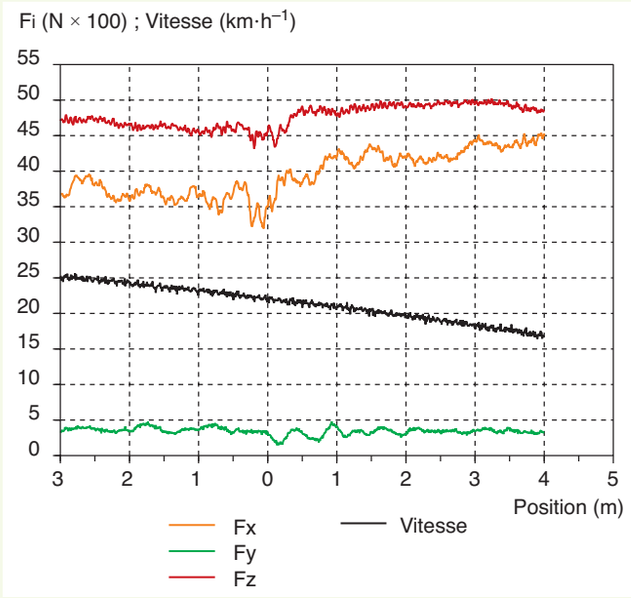


figure 15
Détail du torseur de roue dynamométrique autour de MEVI avec une vitesse initiale de 30 km · h⁻¹.



Pour les deux essais, l'écart entre les efforts verticaux Fz_{mevi} et Fz_{rdyn}, augmenté de la masse du pneumatique, reste inférieur à 20 daN (soit moins que la somme des incertitudes).

L'écart sur les forces de freinage reste acceptable pour l'essai à 70 $km \cdot h^{-1}$, tandis qu'il dépasse les incertitudes métrologiques pour l'essai à basse vitesse (écart de 50 daN pour une incertitude de 28 daN). Cependant la résultante Fx_{rdyn} présente une forte variabilité autour de l'instant de contact centré de la roue sur la dalle MEVI **(figure 15)** ; l'incertitude sur cet instant induit donc une forte incertitude sur Fx_{rdyn} (biais de sensibilité temporelle).

CONCLUSIONS

Les essais préliminaires présentés dans cette étude ont pour but de valider le système MEVI par comparaison aux mesures embarquées des efforts réalisées par le système de référence que constitue la roue dynamométrique. L'intérêt principal du système MEVI est lié à la possibilité de prendre en compte à moindre coût de nombreux véhicules empruntant une infrastructure que l'on cherche à qualifier.

Des essais statiques sous divers chargements ont conforté l'idée d'un niveau de précision équivalent entre MEVI et une roue dynamométrique. En essai de torsion (braquage) le moment Mz et l'effort vertical appliqué sont mesurés identiquement par les deux systèmes.

Lors d'essais à différentes vitesses constantes, le système MEVI a mis en évidence une augmentation des efforts de traction avec la résistance aérodynamique, mais pas la roue dynamométrique. Ce résultat inattendu sera vérifié, bien qu'il ne soit peut-être que la conséquence de la diaphonie, laquelle est forte dans les deux systèmes du fait d'un faible niveau des efforts longitudinaux par rapport aux chargements verticaux.

En freinage d'urgence sans ABS sur sol mouillé, les efforts de freinage peuvent présenter un écart supérieur aux incertitudes métrologiques si des variations importantes du torseur de contact existent autour du lieu de mesure commune (i.e. dalle MEVI).

Au-delà de quelques différences les systèmes de type roue dynamométrique et MEVI fournissent des mesures de grandeurs comparables avec des précisions proches. Le système MEVI peut donc être considéré comme validé. Outre un coût huit fois plus faible, ce système présente l'intérêt d'être indépendant du véhicule d'essai et relativement déplaçable. Ce système pourra donc être utilisé pour mesurer les efforts appliqués sur la chaussée par n'importe quel véhicule parcourant une section de route donnée. La connaissance des efforts mobilisés pourra alors s'ajouter à celle – classique – des vitesses moyennes pratiquées pour contribuer au bilan de sécurité d'une voie particulièrement dangereuse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 **Coiret A.**, *Étude de faisabilité pour le compte de la DSCR, projet MEVI Mesure des Efforts appliqués par un Véhicule léger, depuis l'Infrastructure,* rapport pour la DSCR, décembre **2004**, 99 pages.

2 **Coiret A., Gallenne M.-L., Texier P.-Y.,** Tire/Pavement Strain Tensor Measurement with an Infrastructure-based approach, *World Tribology Congress III,* Washington DC, USA, 12-16 sept. **2005**.

3 **Coiret A.**, *Mise en évidence de l'intérêt d'un système inséré en chaussée pour la vérification d'appareils mobiles évaluant l'adhérence : Expérimentation GRIP-TESTER/MEVI,* rapport LCPC, juin **2005**, 22 pages.

4 **Rippert P.-J.**, *Modélisation et identification paramétrique de l'effort de contact pneumatique/sol pour la dynamique vehicule*, thèse de doctorat, Université de Nantes, **2006**, 291 pages.

5 **Blab R.,** Introducing improved loading assumptions into analytical pavement models based on measured contact stresses of tires, *International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno*, NV, N° CS5-3,**1999**.

6 **De Beer M., Kannemeyer L., Fisher C.,** Towards improved mechanistic design of thin asphalt layer surfacings based on actual tyre/pavement contact stress-in-motion (SIM) in South Africa, *Conference on Asphalt Pavements in Southern Africa,* CAPSA'99, **1999**.

7 **De Beer M., Fisher C., Jooste F.J.,** Evaluation of non-uniform tyre contact stresses on thin asphalt pavements, *ISAP2002*, Copenhagen, Denmark, **2002**.

8 **Evers W., Reichel J., Eisenkolb R. Ebhart I.,** The Wheel Dynamometer as a Tool for Chassis Development, *technical report SD920-234e-11.02*, Kistler Instrumente AG, PO Box, CH-8408 Winterthur, **2002**,18 pages.

9 **Zuurbier J., Van Leeuwen B.,** Vehicle dynamics control based on force-sensing wheel bearings, vehicle dynamics 2007, Stuttgart, 8-10 mai **2007**.

10 **Yilmazoglu O., Brandt M., Sigmund J., Genc E.,** Integrated InAs/GaSb 3D magnetic field sensors, *Sensors and Actuators A : Physical,* Vol. 94, Octobre **2001**.

11 **Pohl A., Steindl R., Reindl L.,** The "intelligent tire" utilizing passive SAW sensors-Measurement of tire friction, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement,* vol. 48, N°6, dcembre **1999**.

12 **Gustafsson F.,** Slip-based Tire-Road Friction Estimation, *Automatica*, Vol 33, N°6, **1997,** pp. 1087-1099.

13 **Burnham T.R.**, Concrete embedment strain sensors at the Mn/road project : as-built orientation and retrofit, *International Conference on Accelerated Pavement Testing,* Reno, Nevada, **1999**.

14 **Marshall C., Meier R., Welch M.,** Seasonal Temperature Effects on Flexible Pavements in Tennessee, *Transportation Research Record 1764,* Paper No. 01-3010, **2001**, pp. 89-96.

15 **OCDE**, Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières, ISBN 92-64-23469-1, **1991**.

16 **Barbachi M.,** Comportement de capteurs à fibres optiques noyés dans un matériau diversement sollicité, *études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées* – Série Sc. De l'Ingénieur -SI4, **1996**.

17 **Belleville C., Duplain G.,** White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor, *Optical Society of America,* n° 0146-9592/93, **1993**.