

Adhérence des pneumatiques, adhérence conventionnelle, comparaison et liaison avec la texture

Yves DELANNE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Les ingénieurs routiers se fondent sur les mesures conventionnelles d'adhérence pour évaluer le niveau d'adhérence d'une route. En France, il s'agit de mesures effectuées avec des pneumatiques lisses en glissement total. L'adhérence utilisée par les usagers peut être significativement différente en raison de la nature différente des pneumatiques et de la généralisation des systèmes antibloquants. Les essais effectués sur route montrent que certaines techniques routières se classent différemment en adhérence conventionnelle et en adhérence « pneumatique sculpté » à taux de glissement variable.

Les valeurs de frottement basse vitesse et de profondeur moyenne de texture, qui expliquent bien les mesures d'adhérence conventionnelle longitudinale, sont insuffisantes pour permettre la prédiction de l'adhérence mobilisée avec les systèmes antibloquants. D'autres indices du domaine de la macrotecture et, particulièrement, entre autres, la densité et l'angularité des indenteurs jouent un rôle important dans le processus de développement des forces de friction au contact pneumatique/chaussée.

DOMAINE : Route.

ABSTRACT

SKID RESISTANCE OF TIRES: CONVENTIONAL SKID RESISTANCE, COMPARISON AND CORRELATION WITH TEXTURE

Highway engineers rely upon conventional skid resistance measurements in order to evaluate the level of a road's skid resistance. In France, such measurements are carried out using smooth tires under conditions of total sliding. The skid resistance assimilated by users may differ significantly due to the distinct nature of the tires as well as to the generalized use of antilock braking systems. Road tests conducted have shown that certain techniques yield different results whether focusing on this conventional skid resistance vs. the "treaded tire" skid resistance with variable slip rates.

The values of low-speed friction and average texture depth, both of which serve to explain quite well the conventional longitudinal skid resistance measurements, prove insufficient when it comes to predicting the level of skid resistance mobilized with antilock braking systems. Other indices in the area of macrotecture, and more specifically the density and angularity of indenters, play a vital role in the frictional force generation process at the tire/pavement interface.

FIELD: Roads.

35

INTRODUCTION

Les ingénieurs routiers, conscients de l'importance de l'adhérence « offerte » par la route, se préoccupent depuis de nombreuses années de choisir des formules et des matériaux qui assurent un niveau d'adhérence élevé. Leur évaluation est fondée sur le niveau déterminé avec des appareils conventionnels utilisant le plus souvent des pneumatiques lisses avec un glissement total au niveau de l'aire de contact.

L'utilisateur qui possède un véhicule récent équipé d'un système antibloquant et de pneumatiques sculptés n'atteint plus la situation de glissement correspondant aux mesures de frottement « conventionnelles ». Avec les véhicules non équipés de systèmes antibloquants, la conduite courante n'implique pas nécessairement le blocage des roues, mais cette situation est souvent atteinte en réaction d'urgence.

La relation entre ces valeurs conventionnelles et l'adhérence potentielle que peut utiliser un usager n'a fait l'objet, semble-t-il, que d'une seule étude publiée vraiment consacrée à ce sujet [1], mais des études comparatives sur le niveau d'adhérence roue bloquée entre le pneumatique AIPCR lisse et des pneumatiques de véhicules légers ont été conduites ces dernières années par les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lyon, Bordeaux et Lille ([2-5]). Ces travaux ont été complétés

récemment par une importante campagne de mesure sur diverses sections routières de la région Aquitaine, effectuée dans le cadre de l'opération de recherche « Adhérence » du LCPC. On examinera successivement :

- la comparaison entre l'adhérence mobilisable par les usagers et celle dite conventionnelle ;
- l'apport de la modélisation pour comprendre les différences entre le coefficient de frottement longitudinal roue bloquée avec un pneumatique AIPCR lisse (CFL) et la performance $F_x/F_z = f$ (taux de glissement* : κ), où F_x est la force tangentielle et F_z est la force normale ;
- l'utilité des mesures conventionnelles de frottement et de texture pour l'évaluation de l'adhérence longitudinale conventionnelle et du potentiel longitudinal d'adhérence des véhicules

CARACTÉRISATION DE L'ADHÉRENCE RÉELLEMENT OFFERTE AUX USAGERS

L'utilisateur de la route utilise « l'adhérence » par le biais des forces développées au contact pneumatique/chaussée. Ces forces permettent d'assurer la maîtrise du véhicule et de suivre la trajectoire cible. La réponse aux commandes de cet usager va dépendre du niveau des forces qui peuvent être mobilisées dans les conditions de sollicitation le long de cette trajectoire. Ces forces dépendent du potentiel intrinsèque d'adhérence du couple pneumatique/chaussée et de la condition de sollicitation dans l'action de conduite : accélération, freinage, virage, freinage + virage, etc.

Pour déterminer par calcul le mouvement du véhicule, on écrit que le torseur des quantités d'accélération est égal au torseur des actions extérieures. Les forces extérieures comprennent les forces aérodynamiques et les forces tangentielles au niveau de chacune des roues. Pour simuler la dynamique du véhicule, il est donc nécessaire de disposer de formules de calcul de ces forces pour les différents états dynamiques et les différentes conditions de sollicitation.

Les manufacturiers possèdent des équipements adaptés pour obtenir des séries complètes de mesures qui permettent de construire point par point un ensemble de courbes qui décrivent la « performance » du couple pneumatique/sol. Ces courbes concernent les forces longitudinale et transversale et le couple d'auto-alignement en fonction des conditions de sollicitations du pneumatique [6, 7]. Les essais sont le plus souvent conduits en sollicitation stationnaire (vitesse stabilisée notamment). Ces équipements ont permis de montrer que le torseur des efforts sur un sol donné dépend de nombreux facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes :

❶ Les caractéristiques du pneumatique

- les matériaux constitutifs et l'architecture de construction,
- les dimensions,
- le type et les profondeurs des sculptures,
- la pression de gonflage.

❷ Les conditions météorologiques

- la température de l'air,
- la température du sol,
- la hauteur d'eau.

❸ La condition de frottement pneumatique/sol

- la charge normale,
- l'inclinaison du plan de roue (carrossage),
- l'angle entre le plan de roue et la tangente locale à la trajectoire (dérive α),
- les vitesses longitudinale et de rotation de la roue (taux de glissement : κ).

❹ Les caractéristiques géométriques de la surface de chaussée

- les irrégularités du domaine de la mégatexture,
- les irrégularités du domaine de la macrotexture,
- la répartition des pointes de contact et leur angularité,
- les irrégularités du domaine de la microtexture**.

* Voir les notations et définitions en fin d'article.

** Voir article de Minh-Tan Do dans ce numéro.

Aucune formule ne peut décrire l'influence de tous ces paramètres. Les formules les plus élaborées permettent de calculer les efforts couplés (couples et forces) pour une charge variable, un carrossage variable, un taux de glissement compris entre 0 et 1 (ou 0 et 100 %) et un angle de dérive compris entre 0 et 10°. Le modèle de calcul « MF tyre » [8] est certainement le plus employé.

En conclusion, pour un revêtement donné dans son état (sec, humide, mouillé) et un pneumatique donné, si l'on dispose d'un modèle dynamique du véhicule et que l'on peut calculer le torseur des actions extérieures, on peut déterminer la réponse du véhicule aux différentes commandes, y compris jusqu'à la perte de contrôle [9].

L'adhérence offerte aux usagers ne peut pas être résumée en un indice unique fonction de la vitesse.

L'adhérence mesurée par les méthodes « conventionnelles » route

L'évaluation de l'adhérence des routes est faite en condition mouillée avec des appareils qui permettent la détermination d'un coefficient de frottement directement lié à l'appareil utilisé.

Toutes les mesures conventionnelles traduisent une résistance au glissement avec des différences pour les éléments suivants : la vitesse de frottement, la force normale, l'aire de contact, la nature de la gomme et la condition de mouillage*.

L'appareil ADHERA et le Grip Tester tractés le long d'un itinéraire mesurent une force qui permet d'obtenir un coefficient de frottement longitudinal (CFL) correspondant à la vitesse de glissement effective et au pneumatique utilisé. Le SCRIM mesure un coefficient de frottement transversal (CFT) déduit de l'effort transversal mesuré sur l'axe de la roue d'essai, oblique par rapport à la trajectoire et libre en rotation, le véhicule circulant normalement le long de la voie routière.

Les différents coefficients mesurés sont corrélés, comme le montrent les travaux conduits dans l'étude 1992 de l'AIPCR [10, 11] et ceux conduits dans le programme HERMES [12], de recherche pré-normative du FEHRL (Forum of European Highway Research Laboratories).

Il a été établi que les mesures conventionnelles effectuées à différentes vitesses avec l'appareil ADHERA permettent une estimation d'une distance d'arrêt « conventionnelle » d'un véhicule équipé de pneumatiques lisses AIPCR [13]. Il n'est pas possible d'évaluer une distance d'arrêt « usager » avec les mesures ADHERA.

37

COMPARAISON DE L'ADHÉRENCE LONGITUDINALE CONVENTIONNELLE ET DE L'ADHÉRENCE LONGITUDINALE DES PNEUMATIQUES

Par la suite, seule l'adhérence longitudinale, caractéristique facilement mesurable avec les appareils conventionnels, sera considérée.

Éléments de base et données d'essais

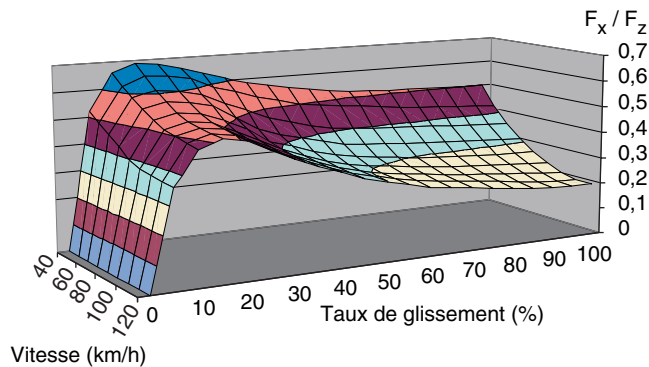
Les surfaces caractéristiques de l'adhérence longitudinale des pneumatiques du commerce en fonction du taux de glissement et de la vitesse de mesure ont la forme donnée sur la figure 1. Sur cette figure, la notation F_x/F_z en ordonnée est préférée au coefficient « μ » car, sur cette surface, comme on le verra, tous les points ne correspondent pas à un coefficient d'adhérence. F_x est la force tangentielle longitudinale et F_z est la force verticale.

Les mesures ADHERA peuvent donner les points de la figure 2, qui correspondent aux points les plus à droite de la figure 1 ($\kappa = 100\%$), si le même pneumatique a été utilisé.

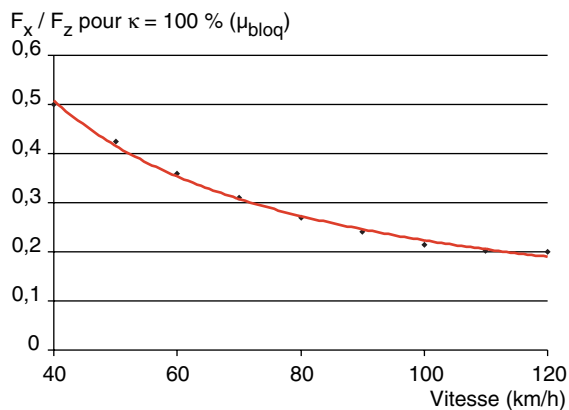
Plus haut, la possibilité pour les usagers de posséder des véhicules avec un système antibloquant a été évoquée. La « lecture » de la surface « d'adhérence » 3D avec (en rouge) et sans ce système (fuchsia), est indiquée sur la figure 3.

* Voir article de Michel Gothié dans ce numéro.

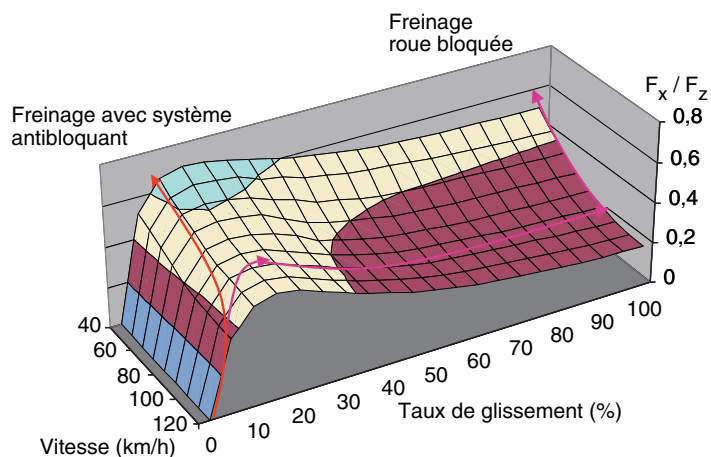
□ **Figure 1**
Surface de performance F_x/F_z en fonction de la vitesse V_x et du taux de glissement en pourcentage.



□ **Figure 2**
Variation du rapport F_x/F_z pour $\kappa = 100\%$ (μ_{bloq} , roue bloquée).



□ **Figure 3**
Utilisation du potentiel d'adhérence en freinage avec et sans système antibloquant.



On constate sur cette figure que le système antibloquant utilise un potentiel d'adhérence proche de la valeur $\mu_{\text{max}}(V_x)$ et que, sans ce système, juste après la phase de blocage, le potentiel utilisé est la valeur $\mu_{\text{bloq}}(V_x)$.

La figure 4 donne un exemple de différences entre les valeurs μ_{max} et μ_{bloq} pour une vitesse de 60 km/h sur douze sections représentatives des techniques routières du réseau. On constate sur cette figure que l'adhérence longitudinale que peut utiliser un usager est différente suivant l'équipement de son véhicule.

La série de mesures ADHERA à différentes vitesses n'est utilisable que pour décrire la dynamique du freinage lorsque la roue est bloquée ($\kappa = 100\%$) entre les deux vitesses extrêmes de mesure, pour la condition de l'essai ADHERA (pneumatique et mouillage choisis).

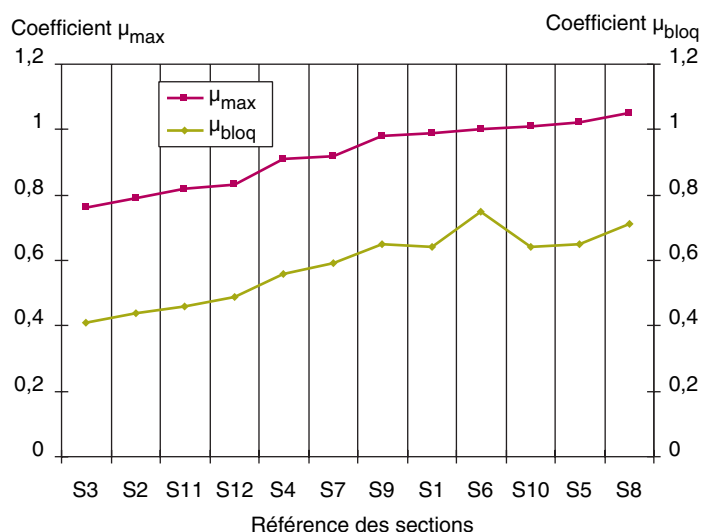


Figure 4
Coefficients μ_{max} et μ_{bloq} à 60 km/h pour douze sections du réseau.

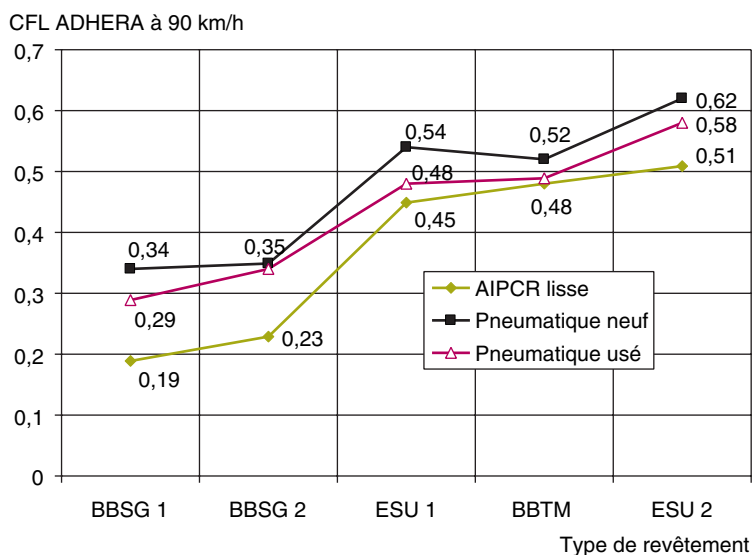


Figure 5
Comparaison des CFL 90 avec un pneumatique neuf et usé et un pneumatique AIPCR lisse.

Si les mesures ADHERA sont réalisées avec le pneumatique AIPCR lisse, elles peuvent être assez différentes de celles effectuées avec les pneumatiques des usagers. La figure 5 illustre les différences qui sont constatées lors des mesures avec l'ADHERA pneumatique AIPCR lisse et avec un pneumatique neuf et usé mécaniquement (1,6 mm en profondeur de sculpture) avec un millimètre d'eau.

Pour cet exemple, les performances du pneumatique du commerce sont toujours supérieures. À l'exception d'un enduit, la hiérarchie en adhérence pour le pneumatique AIPCR lisse et le pneumatique neuf et usé est conservée. Les CFL pour le pneumatique usé sont légèrement supérieures à ceux mesurés avec le pneumatique AIPCR lisse. Les différences entre les valeurs des CFL s'expliquent principalement par :

- les propriétés différentes des gommages ;
- la présence de sculptures.

L'influence de la nature de la gomme peut être très importante, allant jusqu'à 20 % de différence sur le coefficient de frottement pour des mélanges dont les caractéristiques d'hystérésis varient de faible à élevé.

L'influence du type de sculpture pour la même nature de gomme est étudiée dans la référence [14]. Les écarts en μ_{\max} entre un pneumatique lisse et des pneumatiques présentant divers types de sculptures peuvent aller jusqu'à 0,4 à basse vitesse (60 km/h) et se réduisent lorsque la vitesse augmente.

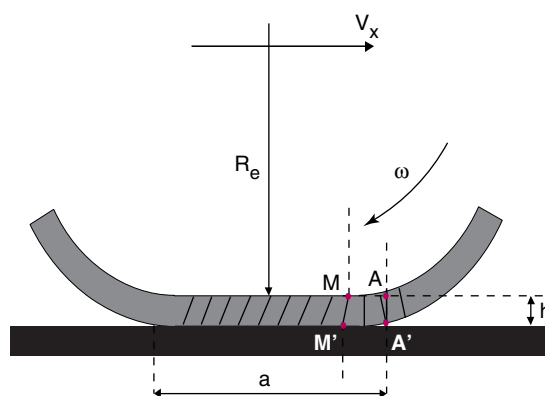
Modélisation des forces tangentielles pour un taux de glissement variable

Un modèle simple pour expliquer la différence entre le freinage avec rotation de roue et roue bloquée, établi sur une base proposée par C. Stéfani, est maintenant présenté (Fig. 6).

Dans le cas du freinage, si on considère un pavé de gomme, le processus à modéliser est le suivant* :

- le pavé de gomme entre en contact avec la chaussée ;
- la première phase est une déformation élastique qui crée un effort tangentiel proportionnel à cette déformation ;
- lorsque cet effort dépasse la limite d'adhérence, il y a glissement.

Figure 6
Notations** utilisées dans l'établissement du modèle (b largeur de l'empreinte).



À l'attaque, sur la chaussée, au temps $t = 0$, les points A et A' sont alignés à l'abscisse 0,

À l'instant t , $A \rightarrow M$ et $A' \rightarrow M'$
 $AM = \omega t Re$ et $A'M' = V_x t$

La distorsion locale γ est donnée par $(A'M' - AM)/h$

et le taux de glissement par $\kappa = (V_x - \omega Re)/V_x$ correspondant à $(A'M' - AM)/A'M'$

on a donc : $\gamma = (\kappa A'M')/h$

La contrainte de cisaillement locale est :

$$\tau = G \gamma,$$

où G est le module de cisaillement de la gomme.

Si l'on pose $AM' = x$, on a :

$$\tau = (G\kappa/h) x.$$

La condition de non-glissement est $\tau \leq q_x \mu$,

où q_x est la pression à l'abscisse x ,

on a :

$$F_z = \int_0^a b q_x dx$$

où b est la largeur de l'empreinte et a sa longueur.

Le point de rupture de l'adhésion (et d'amorce de glissement) M'_g , s'il existe, est donné par :

$$G (\kappa A'M'_g) / h = q_x \mu \text{ soit } A'M'_g = (q_x \mu h) / (\kappa G)$$

* Voir article de Joël Foucard dans ce numéro.

** Les notations sont définies en fin d'article.

Soit x_g l'abscisse de ce point.

La force totale tangentielle est donnée par :

$$F_x = \int_0^{x_g} b(G\kappa/h)x dx + \int_{x_g}^a \mu b q_x dx$$

Si l'ensemble de l'aire de contact est en déformation élastique, on a :

$$F_x = a^2 b G \kappa / 2h$$

Si l'ensemble de l'aire est en glissement, on a :

$$F_x = \int_0^a \mu b q_x dx = \mu \times F_z$$

Dans le processus de freinage, la force tangentielle correspond d'abord au cisaillement sans glissement puis à l'amorce de glissement à l'arrière et très rapidement au glissement total. L'amorce de glissement à l'arrière de l'empreinte est due, d'une part, à l'accroissement de la contrainte de cisaillement avec l'abscisse x du point M' et, d'autre part, à la forme du champ de pression en freinage (Fig. 7).

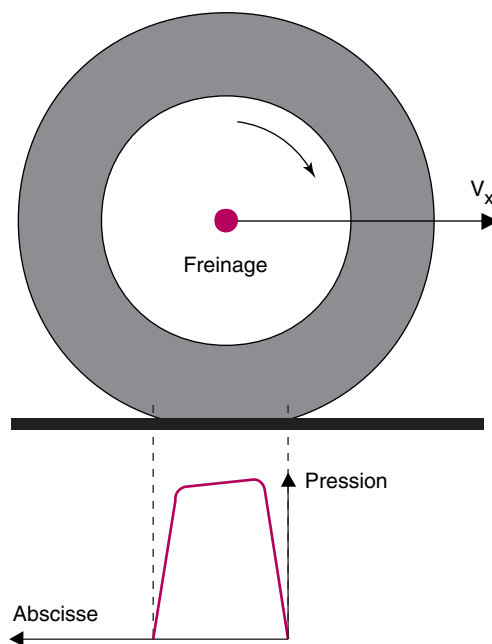


Figure 7
Champ de pression en freinage [15].

Ce modèle permet de comprendre la partie linéaire des courbes F_x/F_z (κ %) représentées sur la figure 1, mais n'explique pas la décroissance ultérieure de la courbe lorsque le taux de glissement augmente. L'hypothèse de l'invariance du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement et la dégradation de ce coefficient par échauffement expliquent probablement cette différence.

En freinage conventionnel roue bloquée ADHERA, la courbe F_x/F_z ne comprend qu'une phase de glissement total.

En freinage avec un système antibloquant, il existe en phase principale une zone où le comportement élastique domine et une zone d'amorce de glissement.

Conclusions sur la comparaison

Il a été constaté que l'adhérence « usager » peut être significativement différente selon qu'il dispose ou non d'un système antibloquant. Lorsqu'il ne dispose pas d'un système antibloquant, la courbe de décélération roue bloquée ne peut pas être déterminée à partir des données conventionnelles ADHERA. Toutefois, dans les cas étudiés, à l'exception des enduits superficiels, ces mesures traduisent bien la tendance lorsque l'on compare différents revêtements.

APPORT DES MESURES CONVENTIONNELLES À L'ÉVALUATION DU NIVEAU D'ADHÉRENCE DES PNEUMATIQUES

Dans ce chapitre, l'utilité de données conventionnelles de frottement et de texture pour l'évaluation de l'adhérence longitudinale conventionnelle et des pneumatiques est étudiée.

Mesures conventionnelles roue bloquée et texture

Il est admis que les mesures conventionnelles basses vitesses privilégient la microtexture et que la macrotexture est la caractéristique qui explique la réduction du coefficient de frottement en fonction de la vitesse. Les modèles qui ont été établis pour la courbe $CFL = f(V_x)$ (cf. Fig. 2) permettent de comprendre sa relation avec la texture de la chaussée. Le modèle du Pennsylvania Transportation Institute (PTI) [16] est le plus explicatif. Il s'applique au freinage roue lisse bloquée.

La relation proposée a la forme :

$$CFL(V_x) = CFL_0 \exp(BV_x)$$

La relation suivante, entre CFL_0 et SRT a été établie sur la base d'une importante campagne d'essais :

$$CFL_0 = -0,35 + 0,0138 \text{ SRT}$$

où SRT est la valeur mesurée avec le pendule SRT (en général comprise entre 40 et 90).

Pour le facteur B, la formule proposée est : $B = -0,041 (\text{PMT})^{-0,47}$, pour une hauteur d'eau de un millimètre. La profondeur moyenne de texture notée PMT est exprimée en millimètres. Cette valeur PMT traduit la capacité du revêtement à éviter la pénétration de la lame d'eau à l'interface pneumatique/chaussée. Ce modèle du PTI permet une prédiction avec un écart type de l'ordre de 0,10 en valeur CFL pour une vitesse de 64 km/h (soit 40 miles/h). Il définit aussi un niveau initial de frottement « très basse vitesse » noté (CFL_0).

Les travaux récents, conduits dans le cadre du programme HERMES [12], confirment les rôles respectifs des différents domaines de la texture.

Utilisation d'indices routiers pour évaluer l'adhérence longitudinale des pneumatiques

Dans le cadre de l'opération de recherche « Adhérence » du LCPC, deux campagnes d'essais ont été conduites ces dernières années, en partie pour étudier cette question.

Plan d'essais route

Un plan d'essai a été conduit entre 2000 et 2003. Sur des sections choisies sur des pistes et des zones routières, les mesures suivantes ont été effectuées :

- valeurs SRT et de profondeurs moyennes de texture à la tache ;
- estimations des coefficients de frottement μ_{\max} et μ_{bloq} avec une 406 Peugeot équipée d'un système ABS, en freinage frontal avec ABS et roue bloquée pour deux vitesses (55 et 80 km/h) [17].

De plus, des mesures de profil à haute résolution ont été effectuées sur la surface du revêtement, soit sur le site, soit sur des carottes prélevées. Ces mesures visent à étudier les relations entre des indices de microtexture et le frottement SRT, paramètre toujours pris en compte dans différents modèles publiés [18, 19].

Les résultats ont montré que la valeur SRT traduit une tendance à l'augmentation des valeurs estimées μ_{\max} et μ_{bloq} pour la vitesse moyenne de 55 km/h (Fig. 8 et 9).

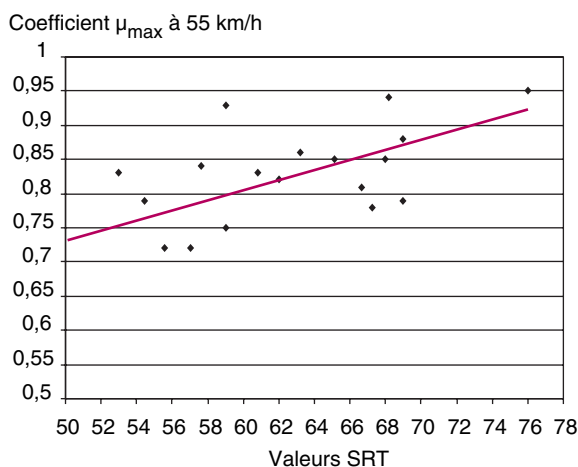


Figure 8
Relation entre les valeurs SRT et les coefficients μ_{\max} estimés par freinage frontal.

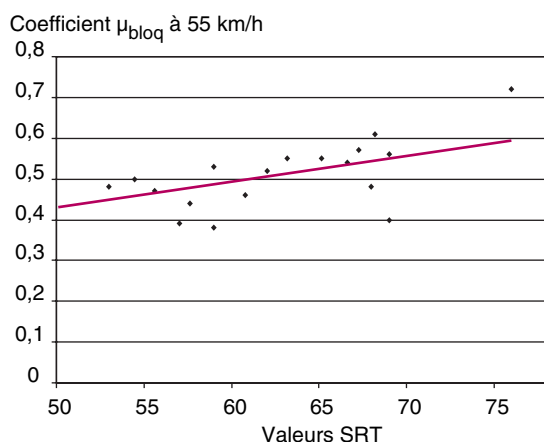


Figure 9
Relation entre les valeurs SRT et les coefficients μ_{bloq} estimés par freinage frontal.

Il convient de signaler que les valeurs μ_{\max} et μ_{bloq} sont des moyennes sur la distance de freinage frontal et que les valeurs SRT sont des moyennes sur quelques points locaux.

Une analyse de différents modèles paramétriques qui prennent en compte les différents indices de surface (frottement et texture) proposés dans la littérature a été conduite à la fin de cette campagne. Il a été conclu que les données de macrotecture, en PMT, sont insuffisantes pour établir la relation texture/adhérence, En conséquence, une nouvelle expérimentation a été réalisée en 2004.

Plan d'essais Aquitaine

Des mesures d'adhérence ont été réalisées sur douze sections routières avec les appareils suivants :

- le véhicule C35 de la société Michelin ;
- la remorque IMAG du STBA ;
- l'appareil ADHERA ;
- le pendule SRT.

Le C35 permet de monter une roue d'essais (Fig. 10) et de mesurer la force longitudinale pour un taux de glissement qui varie de 0 à 100 % pour différentes charges et différentes vitesses.

L'appareil IMAG permet de déterminer le coefficient d'adhérence pour différentes valeurs fixées du taux de glissement. Les valeurs choisies pour cette campagne ont été 10, 15 et 95 %.

Les trois premiers appareils étaient équipés avec un pneumatique mi-usé mécaniquement (4 mm de profondeur de sculptures).



□ **Figure 10**
Montage du pneumatique d'essai sur le véhicule C35 de Michelin.

Les conditions de mouillage, assez proches pour ces appareils, étaient de l'ordre de 1 mm d'eau. Des mesures de macrotexture ont été réalisées dans les traces de freinage avec l'appareil RUGO et un pas d'échantillonnage d'environ 1 millimètre. Les mesures C35 ont permis de déterminer les coefficients du modèle de représentation de Pacejka longitudinal suivant [20] :

$$F_x/F_z = D \times \sin(C \times \arctg(B \times \phi)) \text{ avec } \phi = (1-E) (\kappa + SH) + E/B \times \arctg (B \times (\kappa + SH))$$

dans lequel le produit BDC est la rigidité longitudinale, le coefficient C le facteur de forme, le coefficient D la valeur μ_{\max} , le coefficient E le facteur de courbure de la courbe après la valeur μ_{\max} et le coefficient SH la valeur de décalage de la courbe par rapport au point d'origine.

Le tableau I donne les coefficients obtenus pour les différentes planches pour des essais effectués à 60 km/h avec le pneumatique mi-usé et 1 mm d'eau.

Le modèle paramétrique ajusté n'est valable que pour la vitesse d'essai (60 km/h), la charge appliquée (450 daN), une pression de gonflage de 2,4 bars et la condition de mouillage (1 mm).

Les valeurs des coefficients « BCD », D, C, E et SH sont des moyennes calculées à partir de trois mesures, parfois assez dispersées, compte tenu des effets de trace très importants notamment pour sections de niveaux d'adhérence faibles (polissage marqué).

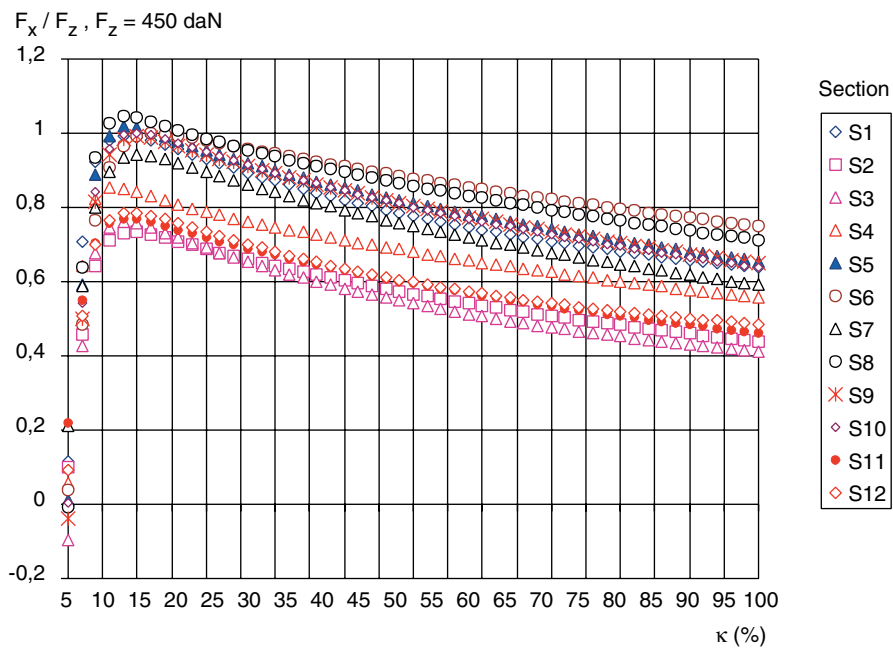
Les mesures SRT n'ont été effectuées qu'en trois points le long de la trace ; il n'a pas été possible, pour des raisons opératoires, d'effectuer plus d'essais.

La figure 11 donne les courbes F_x/F_z en fonction du taux de glissement.

TABLEAU I
Coefficient « BCD », D, C, E et μ_{bloq} pour les douze sections

	BCD (K_x)*	D	C	E	μ_{bloq}
S1	39,410	0,99	1,773	0,827	0,64
S2	24,801	0,79	1,840	0,747	0,44
S3	29,099	0,76	1,866	0,812	0,41
S4	26,130	0,91	1,732	0,574	0,56
S5	33,145	1,02	2,001	0,916	0,65
S6	24,525	1,00	1,874	0,891	0,75
S7	26,143	0,92	2,000	0,888	0,59
S8	37,460	1,05	1,957	0,926	0,71
S9	32,399	0,98	2,002	0,926	0,65
S10	39,698	1,01	1,955	0,914	0,64
S11	23,200	0,82	2,008	0,881	0,46
S12	23,624	0,83	1,885	0,833	0,49

* Voir en fin d'article.



□ **Figure 11**
 Courbes $F_x/F_z = f(\kappa)$ pour les douze sections.

Le tableau II donne la nature des revêtements.

Les courbes de la figure 11 montrent que la « hiérarchie » des sections est légèrement différente pour les valeurs μ_{\max} et μ_{bloq} , comme le montre le tableau III. La différence principale correspond à la section S6.

Les valeurs « BCD » (rigidité longitudinale K_x), D (μ_{\max}) et μ_{bloq} (cf. tableau I) sont les paramètres intéressants pour cette analyse qui vise à établir l'apport des mesures conventionnelles de frottement et de texture.

La valeur SRT est une variable explicative principale, toujours incluse dans les travaux publiés. Elle suit assez bien la tendance à l'augmentation de la valeur du CFL 40 avec un pneumatique mi-usé (Fig. 12) et de façon un peu moins bonne les résultats (μ_{\max} et μ_{bloq}) des essais faits avec le C35.

L'étude des relevés de profil et des empreintes de contact pour des revêtements dont les valeurs SRT sont très proches a montré que la densité de contact est le paramètre qui semble expliquer les valeurs les plus élevées.

L'analyse effectuée sur le produit « BCD » (rigidité longitudinale), a montré qu'il dépend :

- du niveau de frottement, mesuré avec le pendule SRT ;
- de la densité et de l'angularité des points de contact entre le revêtement et le pneumatique.

TABLEAU II
Nature des revêtements* sur les sections du plan d'essais

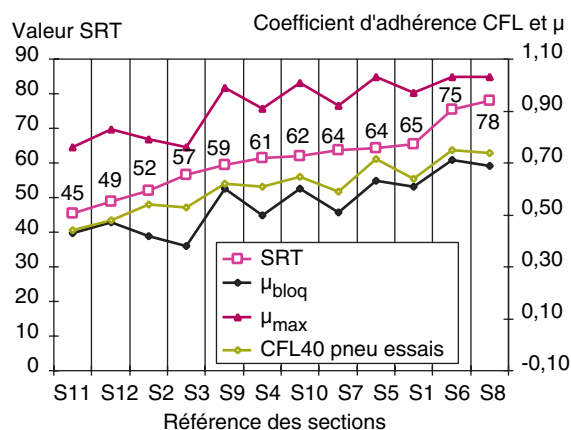
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
ESU 2/4	BBSG 0/10	BBTM 0/10	BBTM 0/10	ECF 0/6	ESU 6/10-4/6	BBTM 0/10	BBME 0/14	ECF 0/6	BBSG 0/10	ES ressué poli	ESU ressué poli

* Voir notation en fin d'article pour les sigles.

TABLEAU III
Valeurs μ_{\max} et μ_{bloq} à 60 km/h pour les douze sections (classé en μ_{\max} croissant)

	S3	S2	S11	S12	S4	S7	S9	S1	S6	S10	S5	S8
μ_{\max}	0,76	0,79	0,82	0,83	0,91	0,92	0,98	0,99	1	1,01	1,02	1,05
μ_{bloq}	0,41	0,44	0,46	0,49	0,56	0,59	0,65	0,64	0,75	0,64	0,65	0,71

□ Figure 12
Comparaison des valeurs SRT, CFL 40, μ_{\max} et μ_{bloq} .



La proportion de surface en contact s'est avérée, jusqu'à présent, un paramètre peu sensible sur cette rigidité longitudinale.

Dans la première zone, c'est-à-dire la partie linéaire des courbes de la figure 11, où le comportement élastique domine, les facteurs sensibles sont :

- la distribution et l'angularité des points de contact (domaine de la macrotexture) ;
- les irrégularités du domaine de la microtexture.

L'amorce de glissement dépend principalement de l'angularité des irrégularités du domaine de la microtexture, mais aussi de la densité des points de contact par l'intermédiaire desquels cette microtexture contribue au développement du processus de frottement.

Il s'avère donc que **toutes les échelles de la texture** jouent un rôle dans le processus de développement de la force tangentielle au cours de freinage. Les indices routiers utilisés actuellement ne donnent pas toutes les informations utiles sur le rôle joué par la macrotexture dans ce processus.

CONCLUSION

Mesures conventionnelles

L'importance du frottement basse vitesse (SRT) pour le potentiel d'adhérence estimé par les mesures conventionnelles a été rappelée. Un bon niveau de microtexture est fondamental pour obtenir des valeurs de frottement élevées. La capacité d'évacuation de l'eau à l'interface pneumatique/chaussée (PMT pour un pneumatique lisse) joue un rôle déterminant sur l'évolution de l'adhérence en fonction de la vitesse.

Adhérence des pneumatiques VL

Plusieurs caractéristiques de surface influencent l'adhérence aux faibles vitesses de glissement (cas de la valeur μ_{\max}). La valeur du SRT constitue une variable explicative importante, mais non suffisante.

Pour des formules de type BBTM avec des valeurs SRT et PMT voisines, il a été vérifié que la granularité la plus faible donnait des valeurs μ_{bloq} et μ_{\max} plus élevées (pour 1 mm d'eau).

Pour la valeur μ_{\max} , ce résultat est expliqué par l'importance de la répartition du champ de pression dans le processus d'adhésion/frottement. Ce champ de pression dépend de « l'enveloppement » des aspérités par les pavés de gomme du pneumatique.

Les variables prédictives du potentiel « maximum » de la force tangentielle F_x doivent inclure des paramètres descriptifs de ce processus, en particulier la densité d'indentation, l'angularité et la proportion de surface de l'empreinte en contact.

Apport des mesures conventionnelles

Les mesures de frottement basses vitesses et, notamment, comme le confirment les premières données, les mesures SCRIM sont des informations utiles pour évaluer le potentiel d'adhérence. Des travaux complémentaires sont toutefois nécessaires pour disposer de plus de données associées (CFT, μ_{\max} et μ_{bloq}), de manière à valider les interprétations des mesures SCRIM en terme de potentiel d'adhérence « usager ».

Les indices « volumétriques » (PMT) donnent une information sur la capacité de stockage en eau, mais ne constituent pas des variables explicatives du processus de cisaillement/glissement lors d'un freinage avec un système antibloquant.

Les variables utiles (densité d'indentation, angularité des indenteurs) peuvent être calculées à partir d'un profil de texture relevé avec un pas d'échantillonnage court (de l'ordre du millimètre).

- [1] HENRY J.J., Comparison of the Friction Performance of Passenger Car Tire and the ASTM Standard Test Tires, *ASTM Special Technical Publication*, **793**, **1983**, pp. 219-231.
- [2] GOTHIE M., Coefficient de frottement longitudinal, situation du pneu AIPCR par rapport à un pneumatique Michelin MXL usé à 75 %, FAER 1,02,42,8, **1988**.
- [3] DERIVAUX J., Opération adhérence, étude PREDIT APTP : mesures CFL pneu AIPCR par rapport à un pneumatique Pirelli sculpté sur trois virages, FAER 1 CEP 31, septembre **2002**.
- [4] ROCHE J.-P., Adhérence des revêtements, incidence du type de pneumatique et du mouillage (AIPCR/XZX neuf), FAER 2,61,17,7, **1997**.
- [5] ROCHE J.-P., Adhérence des revêtements, incidence du type de pneumatique et du mouillage (AIPCR/XZX usé), OR 11C023, **2003**.
- [6] CLARK S. K., *Mechanics of Pneumatic Tires*, U, S, Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC, **1981**.
- [7] PACEJKA H.B., *Tire and Vehicle Dynamics*, Ed : Butterworth – Heinemann, **2002**.
- [8] MF Tyre Model 5,1 Delf Tyre.
- [9] DELANNE Y., SCHAEFER G., LECHNER D., SCHMITT V., BEURIER G., Vehicle Dynamics and Tyre Road Friction Performance Models, 2nd international colloquium on vehicle tyre road interaction, Friction Potential And Safety, Prediction Of Handling Behaviour – external expert contribution, Florence, february 23rd **2001**.
- [10] GOTHIE M., Évaluation indirecte de la microtexture. Comparaison entre eux d'appareils de mesure de frottement, AER 2-02-22 6, **1996**.
- [11] WAMBOLD J.C., ANTLE C.E., HENRY J.J., RADO Z., DESCORNET G., SANDBERG U., GOTHIE M., HUSCHEK S., International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Skid Resistance and Texture Measurements, *PIARC Publication*, **01,04,T**, Paris, **1995**.
- [12] DESCORNET G., SCHMIDT B., BOULET M., GOTHIE M., DO M-T., FAFIE J., VAN DEN BOL M., ALONSO M., ROE P., FOREST R., VINER H., HERMES, Final Report, FEHRL Report 2004/1, **2004**, 358 pages.
- [13] LAGANIER R., Mesures et analyse des distances d'arrêt sur routes, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **185**, mai-juin **1993**, pp. 121-128.
- [14] WILLIAM A.R., A review of tire traction Vehicle, *Tire, Pavement Interface ASTM STP 1164*, **1992**, pp. 125-148.
- [15] GENTA G., Motor Vehicle Dynamics Modeling and simulation, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, vol. **43**, Worrrld Scientific, **1999**.
- [16] LEU M.C., HENRY J.J., Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed From Pavement Texture Measurements – TRR 666 Pavement Surface Properties Evaluation and Shoulders, **1978**, pp. 7-13.
- [17] BASER G., Front Brake Deceleration – Proposal for a procedure for evaluating wet skid resistance of a road-tire vehicle system SAE n° 69 0526 SAE, *Midyear Meeting Chicago 1969*, Méthode mise sous la forme d'une procédure GER/SCDV, **2002**.
- [18] KLEMPAU F., Development of a friction prediction system, 2nd Int, *Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction (Programme Vert)*, Florence, **2001**, pp. 213-224.
- [19] FISCHLEIN H., GNADLER R., UNRAU H.-J., The influence of the Track Surface Structure on the Frictional Force Behaviour of Passenger Car Tyres in Dry and Wet Track Surface Conditions – Der Einfluss der Fahrbohn-oberflächenstruktur auf das Krasftschlussverhalten von Pkw-Reifen ATZ worldwide, **10/2001**, vol. **103**, pp. 20-24 et pp. 950-962.
- [20] SHURING D.J., PELZ W., POTTINGER M.G., *The BNPS Model – An Automated Implementation of the Magic Formula Concept SAE 931909*, **1993**, pp. 1-15.

Notations et définitions

Notations

Les notations utilisées dans cet article sont les suivantes :

V ou V_x	vitesse longitudinale
ω	vitesse angulaire de la roue en radian par seconde
Re	rayon effectif de roulement
a, b	longueur et largeur de l'empreinte de contact du pneumatique
G	module de cisaillement de la gomme
h	hauteur des pavés de gomme

F_x	force longitudinale au contact pneumatique/chaussée
F_z	forces normales à la roue
K_x	rigidité longitudinale définie par $F_x/F_z = K_x \times \kappa$ pour κ faible (inférieur à 0,02)

Coefficients d'adhérence

CFL V	coefficient d'adhérence mesuré avec la remorque ADHERA à la vitesse V
CFT	coefficient d'adhérence mesuré avec le SCRIM à la vitesse de 60 km/h
SRT	valeur mesurée avec le pendule « Skid resistance Tester »
PMT	profondeur moyenne de texture avec des microbilles de verre en mm

Type de revêtement

BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenu
ESU	Enduit Superficiel d'Usure
ECF	Enrobé Coulé à Froid
BBME	Béton Bitumineux à Module Elevé

Définitions

- Taux de glissement longitudinal κ en freinage : $\kappa = (V_x - \omega \times R_e)/V_x$
 κ (kappa) parfois noté G, peut être exprimée en % (entre 0 et 100 %).
- Angle de dérive α : c'est l'angle entre le plan de roue et la tangente locale à la trajectoire exprimé en degrés (cf. article de Joël Foucard dans ce même numéro).

