

## Rapport de recherche N° 7

# Corrélation entre frottement longitudinal roue bloquée et frottement transversal à dérive élevée

B. TORCHET  
B. LAJOINIE

**CORRÉLATION ENTRE FROTTEMENT LONGITUDINAL ROUE BLOQUÉE  
ET FROTTEMENT TRANSVERSAL A DÉRIVE ÉLEVÉE**

**B. TORCHET**

Assistant à la Section  
Caractéristiques de Surface

**B. LAJOINIE**

Technicien Supérieur à la Section  
Caractéristiques de Surface

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Rédigé en février 1970



## **S O M M A I R E**

<b>RESUME EN FRANCAIS</b>	<b>5</b>
<b>PRESENTATION : R. SAUTEREY – Ph LEGER</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre 1 – LE STRADOGRAPHE DU C.E.B.T.P.</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre 2 – PLAN D'EXPERIMENTATION</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre 3 – RESULTATS</b>	<b>21</b>
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>33</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>35</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>36</b>
<b>RESUMES EN LANGUES ETRANGERES</b>	<b>38</b>



## Résumé

### Corrélation entre frottement longitudinal roue bloquée et frottement transversal à dérive élevée

La corrélation entre le frottement transversal (C.F.T.) d'une roue envirée à une dérive élevée (5 à 15°) et le frottement longitudinal d'une roue bloquée (C.F.L.) a été étudiée. Les mesures ont été effectuées avec le stradographe du C.E.B.T.P. équipé de pneumatiques lisses. Dans les deux cas, il y a glissement total dans l'aire de contact du pneumatique, soit transversalement, soit longitudinalement. Bien que la roue ne soit pas bloquée dans le cas du frottement transversal, les résultats obtenus montrent que les phénomènes d'expulsion du film d'eau sont de même nature.

La corrélation CFT-CFL a été établie pour des couples de valeurs mesurés à la même vitesse.

Les revêtements choisis sont au nombre de 14 et représentent un échantillonnage représentatif du réseau. Quels que soient la nature du revêtement, la dérive (5-10 ou 15°), et la vitesse (40-80-120 km/h) la corrélation (calculé sur ordinateur) entre CFL et CFT est bonne =  $r = 0,90$

$CFT = 1,17$	$CFL + 0,13$
$CFL = 0,67$	$CFT - 0,02$

La décroissance du CFT en fonction de la vitesse est comparable à celle obtenue en CFL. Celle-ci est bien corrélée ( $r = 0,90$ ) avec la rugosité géométrique du revêtement mesurée par la profondeur au sable.



## **R. SAUTEREY**

Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Chef du Département des Chaussées

## **Ph. LEGER**

Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Adjoint au Chef  
du Département des Chaussées  
Chef de la Section  
Caractéristiques de Surface

Laboratoire Central

## **Présentation**

On a commencé en France à étudier le frottement entre pneumatique et chaussée avec interposition d'un film d'eau en effectuant des mesures du coefficient de frottement longitudinal roue bloquée (C.F.L.). Il s'est avéré ensuite nécessaire d'effectuer également des mesures du coefficient de frottement transversal (C.F.T.) à divers angles d'envirage et ce dans deux buts :

- a) étudier le coefficient de frottement transversal maximum susceptible d'être produit au contact d'une roue et d'une chaussée donnée. Cette étude vise à rechercher si le coefficient de frottement transversal, plus facile à mesurer, notamment en continu, que le coefficient de frottement longitudinal ne serait pas un critère satisfaisant pour une auscultation rapide des chaussées plutôt qu'à chiffrer le coefficient de frottement transversal maximum mobilisable, les angles d'envirage utilisés étant en général hors des possibilités des véhicules de tourisme,
- b) étudier en fonction du revêtement la rigidité de dérive d'un pneumatique, c'est-à-dire, à faibles angles d'envirage, le rapport entre coefficient de frottement transversal et angle d'envirage, cette rigidité pouvant jouer un rôle considérable dans la stabilité véhicule.

L'étude effectuée par MM. TORCHET & LAJOINIE menée à l'aide du stradographe du C.E.B.T.P. concerne essentiellement le premier point. Les auteurs dégagent de leurs résultats de mesure une corrélation très correcte entre C.F.L. et C.F.T. la qualité de cette corrélation étant pratiquement insensible à l'angle d'envirage (entre 5° et 15°) et à la vitesse (entre 40 km/h et 120 km/h). D'autres résultats concernant les coefficients de frottement transversaux et grands angles d'envirage

en fonction de la vitesse et du revêtement sont également donnés. Il nous semble que cette étude en montrant la bonne liaison entre C.F.T. à grand angle d'envirage et le C.R.L. et donc la possibilité d'utiliser le C.F.T. pour effectuer des auscultations rapides du réseau, ainsi qu'en donnant une idée précise des précautions à prendre lors des mesures a entièrement répondu au but qu'il lui était fixé. Il convient donc, maintenant, et des essais sont d'ores et déjà entrepris, d'entamer l'étude du coefficient de frottement transversal et de la rigidité de dérive à angle d'envirage faible.

## INTRODUCTION



## GÉNÉRALITÉS

L'adhérence pneumatique-chaussée dépend d'un nombre important de paramètres liés au revêtement, au pneumatique et au véhicule lui-même.

Les études GLISSANCE ont été abordées au Laboratoire Central des Ponts & Chaussées par l'étude du frottement longitudinal d'une roue bloquée sur chaussée mouillée; en utilisant soit la remorque L.P.C. conçue et mise au point par le Laboratoire Régional de LYON, soit le stradographe du Centre d'Etudes et de Recherche du Bâtiment et des Travaux Publics (C.E.B.T.P.). Les études ont été effectuées sur un nombre important de revêtements avec des pneumatiques lisses ou sculptés.

Les résultats obtenus ont permis de fixer les caractéristiques essentielles d'un revêtement antidérapant. Ils confirment l'importance de la microrugosité des granulats, nécessaire à la rupture du film d'eau et de la macrorugosité du revêtement, nécessaire à son expulsion.

Il s'est avéré ensuite souhaitable d'étudier l'adhérence transversale d'une roue envirée. Celle-ci gouverne la stabilité du véhicule en ligne droite et la dynamique d'un véhicule négociant un virage.

## BUTS DES ESSAIS

Avant d'aborder l'étude fine des courbes d'envirage  $CFT = f(\alpha)$  en fonction de différents types de pneumatiques du commerce et sur différents revêtements caractéristiques, il nous a semblé nécessaire de comparer l'adhérence transversale (CFT) d'un pneumatique lisse ayant une dérive élevée, au frottement longitudinal (CFL) du même pneumatique, la roue étant bloquée. Dans les deux cas, les taux de glissements sont importants. Il y a glissement total de l'aire de contact soit transversalement soit longitudinalement. Une liaison entre ces deux types de frottement n'est pas évidente a priori, car dans le cas du frottement transversal la roue continue à tourner. Les phénomènes d'expulsion du film d'eau peuvent donc être totalement différents.

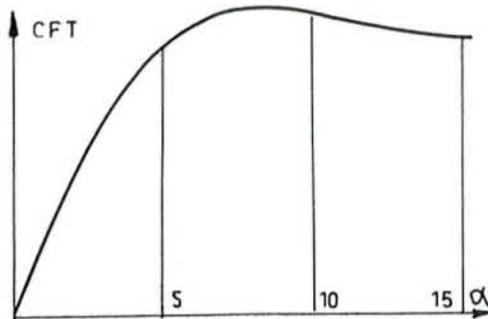
Le plan d'expérimentation a été réalisé en étroite

collaboration avec le Laboratoire Régional de LYON à partir de résultats préliminaires obtenus en 1968 (2).

Les essais statiques : pendule R.R.L., profondeur de la plage de sable, et les moulages des revêtements ont été effectués par l'équipe glissance du Laboratoire Régional de LILLE.

Les dérives ont été choisies de manière à être situées sur le palier de la courbe théorique d'envirage (1)

Fig. 1 - Courbe théorique d'envirage



La corrélation CFL-CFT a été calculée sur ordinateur pour des couples de valeurs mesurés à la même vitesse.

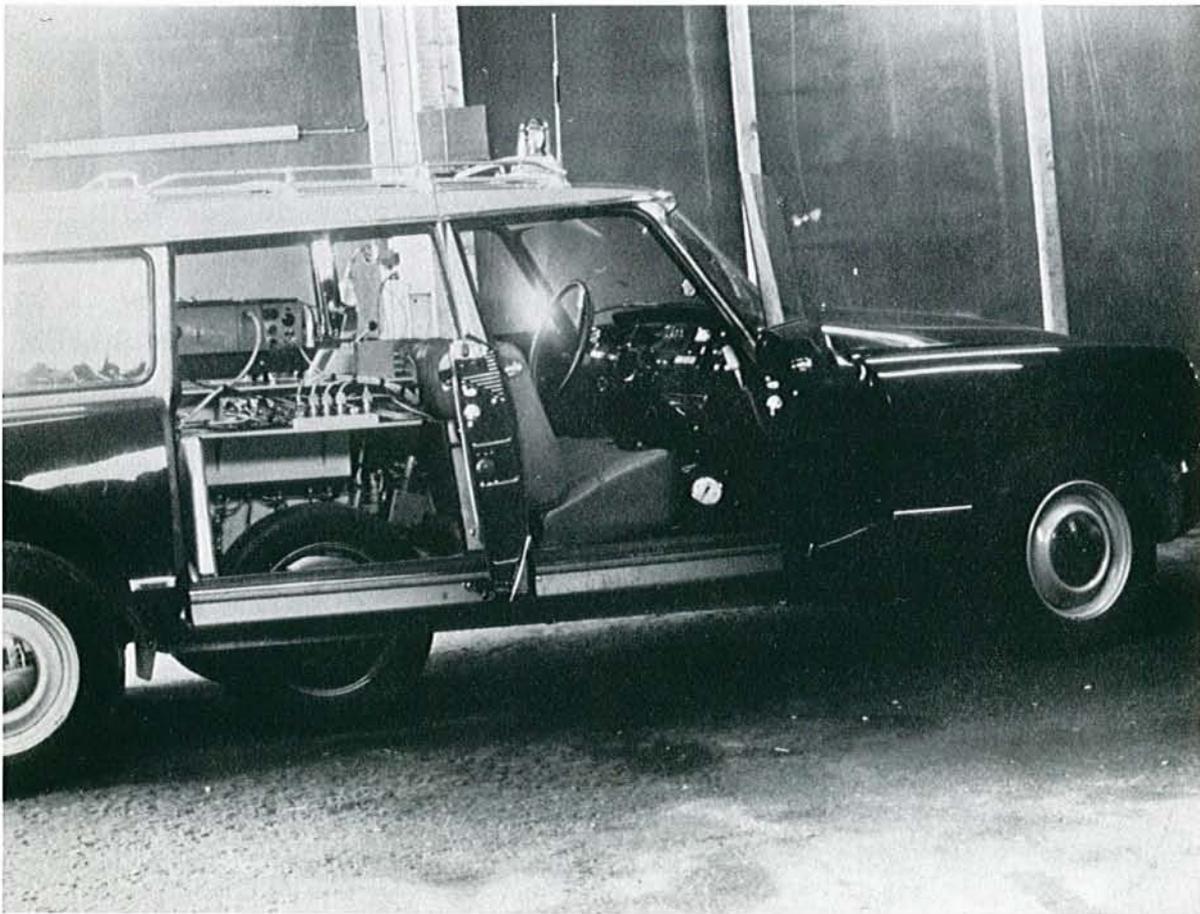
Nous avons, en outre, comparé la décroissance du CFT en fonction de la vitesse à celle obtenue en CFL.

Nous avons étudié la corrélation entre ces décroissances relatives et la rugosité géométrique du revêtement mesurée par la hauteur de sable (HS).

Tous les essais dynamiques ont été effectués avec le stradographe du C.E.B.T.P. équipé de pneumatiques lisses, sur quatorze revêtements représentatifs du réseau des autoroutes et des routes nationales.



CHAPITRE 1  
LE STRADOGAPHE DU C.E.B.T.P.



Le STRADOGAPHE du C.E.B.T.P. a été conçu et réalisé par M. TCHENG (9). Il est dérivé du stradographe 50.

Il comporte deux roues de mesure disposées à l'intérieur d'un véhicule ID CITROEN. Cet appareil permet la mesure de l'adhérence transversale et de l'adhérence longitudinale roue bloquée.

Le véhicule tracteur est un Break ID I9 CITROEN (à traction avant) qui est équipé d'un surpresseur lui permettant d'atteindre sur autoroute la vitesse de 140 km/h.

Les deux roues de mesure sont situées à l'intérieur du véhicule au niveau du centre de gravité de l'ensemble. Pour l'adhérence longitudinale (CFL), elles peuvent être freinées et bloquées par des freins à tambours. Pour l'adhérence transversale (CFT) elles peuvent être inclinées d'une dérive constante (1 à 15°) en butée positive sur des cales de différentes longueurs.

Les valeurs CFL et CFT mesurées sur chaque roue sont enregistrées sur un enregistreur ACB à galvanomètre mobile (papier photo sensible) à partir de capteurs à variation de mutuelle induction logés dans les moyeux des roues.

La charge verticale est appliquée aux roues de mesure par une suspension oléopneumatique Citroën. Les vérins sont alimentés par une centrale hydraulique indépendante.

La suspension est du type ROUE TIREE.

Il existe donc un délestage produit par les effets de frottement situés dans l'aire de contact du pneumatique et de la chaussée. Cela impose l'utilisation d'abaques de correction pour le dépouillement des enregistrements.

Les roues de mesure utilisées pour ces essais sont de dimension 155x400. Elles étaient équipées de pneumatiques lisses KLEBER. La nature de la gomme de la bande de roulement est du type "poids lourd" à très faible hystérésis et à base de caoutchouc naturel.

Les caractéristiques du pneumatique lisse STANDARD CEBTP sont les suivantes :

Dimension	:	155 x 400
Charges	:	250 kg
Pression gonflage:		1,5 bars
Résilience *	:	0°C = 47
Résilience *	:	20°C = 63
<u>Dureté shore</u>	=	<u>66</u>

L'arrosage du revêtement lors des mesures est autonome. Une citerne sous pression de grande capacité est logée à l'arrière du break. La pression est fournie par un compresseur alimenté par les batteries du véhicule. Cet équipement permet de projeter un film d'eau d'épaisseur voisine de 0,5 mm devant les roues de mesure. Cette épaisseur varie légèrement en fonction de la vitesse car le débit ne lui est pas asservi.

---

\* Les mesures de résilience sont effectuées avec un pendule Lüpcke modifié.



## CHAPITRE 2

### LE PLAN D'EXPÉRIMENTATION

#### 2.1 - GÉNÉRALITÉS

Le plan d'expérimentation a été établi à partir de deux expériences préliminaires effectuées par le Laboratoire Régional de LYON au cours des Campagnes Nationales de Glissance en 1967 et 1968.

Le pneumatique utilisé pour les essais CFL et CFT était le même : le pneu lisse standard CE.B.T.P.

En 1967 :

Les résultats obtenus ont été les suivants :

$$\text{CFT} = 1,62 \text{ CFL} + 0,08$$

coefficient de corrélation  $r = 0,78$

La corrélation est médiocre.

Les mesures avaient été effectuées sur 46 revêtements, à la vitesse de 50 km/h et pour une dérive  $\alpha = 12^\circ$

En 1968 :

Les résultats obtenus ont été les suivants :

$$\text{CFT} = 1,48 \text{ CFL} + 0,07$$

coefficient de corrélation  $r = 0,94$

La corrélation est excellente.

Les mesures avaient été effectuées sur 30 revêtements différents de ceux testés en 1967, à la vitesse de 120 km/h et pour une dérive  $\alpha = 5^\circ$ .

Les résultats obtenus en 1968 sont différents de ceux de 1967, les deux paramètres : vitesse et dérive, ayant simultanément

variés d'une expérimentation à l'autre, il nous était impossible d'en tirer des conclusions générales ni de savoir quel était le paramètre prépondérant vitesse ou dérive.

Nous avons donc entrepris une campagne de mesure tenant compte de l'influence possible de ces facteurs.

Les résultats précédents nous ont permis de limiter valablement le nombre des revêtements de manière à avoir un échantillonnage représentatif.

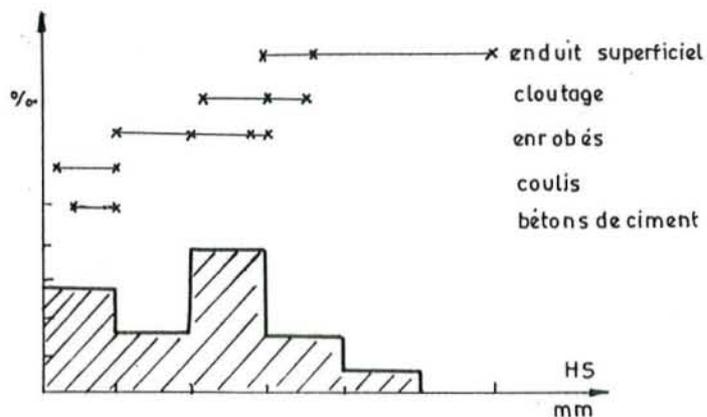
## 2.2 - CHOIX DES REVÊTEMENTS

Les revêtements ont été choisis parmi ceux testés au cours des campagnes nationales 1967 et 1968 en frottement longitudinal sur lesquels nous possédions des renseignements déjà assez complets.

Parmi ces revêtements les critères de notre choix ont été les suivants :

- site propice aux mesures à grande vitesse
- homogénéité du revêtement
- bon uni de profil en long
- bombement et devers faibles
- usure homogène, traces de circulation peu marquées.

Les familles de revêtements : enduits superficiels, enrobés cloutages, coulis et bétons de ciment sont celles généralement utilisées sur les chaussées françaises. Dans chaque famille les revêtements ont été choisis de manière à couvrir une gamme aussi large que possible de rugosités géométriques mesurées par la profondeur au sable (HS). L'ensemble des revêtements couvrant toute la gamme de 0,2 à 2,5 mm (voir figure 2).



Pour des raisons pratiques de réalisation de la campagne de mesure, les revêtements ont été localisés dans deux régions : le Nord - Pas-de-Calais et la région parisienne.

Initialement, nous avons prévu 5 enrobés au lieu de 4. Nous avons été obligés d'en supprimer un quelques jours seulement avant le début de la campagne, car l'itinéraire choisi servait de déviation à la RN 12 pendant la période prévue pour nos essais et l'intensité de la circulation rendait impossible la réalisation des mesures dans de bonnes conditions.

Dans notre panoplie de revêtements, il manque donc un enrobé grenu à hautes caractéristiques d'adhérence.

Le choix définitif a été le suivant :

- 2 bétons de ciment non striés,
- 2 coulis,
- 4 enrobés,
- 3 enduits superficiels,
- 3 cloutages,

soit au total : 14 revêtements.

Leurs caractéristiques essentielles sont consignées dans le tableau général reporté en annexe.

### *2.3 - CONDITIONS DES ESSAIS - VITESSE ET DÉRIVE*

Compte tenu de la puissance actuelle du stradographe, nous étions limité à la vitesse maxi de 120 km/h sur route nationale et à 140 km/h sur autoroute. Afin de pouvoir comparer nos résultats à ceux des campagnes précédentes, nous avons choisi les trois vitesses suivantes :

40 - 80 et 120 km/h

Pour cette première expérimentation, il nous a semblé souhaitable d'étudier le palier de la courbe d'envirage. Les études préliminaires de M. CHEVET indiquant qu'il faut pour cela se situer au delà de 5°. D'autre part, les mesures aux faibles dérives sont délicates et demandent beaucoup de précautions dans le choix des revêtements (uni notamment) si l'on veut atteindre la précision nécessaire à l'exploitation des résultats.

Le stradographe étant limité à une dérive de 15°, il n'était pas possible d'atteindre la valeur de 20° à laquelle les anglais et les belges font leurs mesures classiques de routine.

Nous avons donc choisi les valeurs de dérive suivantes :

$$\underline{\alpha = 5 - 10 \text{ et } 15^\circ}$$

#### 2.4 - DÉROULEMENT DE LA CAMPAGNE DE MESURE

Pour obtenir des résultats significatifs, il est indispensable de répéter chaque essai au moins trois fois et de considérer la moyenne et l'étendue des mesures. De cette manière nous parvenons à une précision suffisante.

Sur chaque revêtement nous avons effectué les mesures suivantes :

##### Essais CFT :

- 3 vitesses : 40 - 80 - 120 km/h
- 3 dérives : 5 - 10 - 15°
- 3 passages par essai

##### Essais CFL :

- 3 vitesses : 40 - 80 - 120 km/h
- 3 passages par essai

soit : 36 essais par revêtement

et au total : 36 x 14 = 504 essais.

L'épaisseur du film d'eau est voisine de 0,5 mm. Les essais se sont déroulés dans les régions Nord - Pas-de-Calais et parisienne, sous la protection de la gendarmerie.

Malgré les conditions météorologiques défavorables, nous avons pu effectuer tous les essais initialement prévus.

CHAPITRE 3  
RESULTATS



### 3.1 - GÉNÉRALITÉS

La difficulté des mesures dépend de la vitesse à laquelle les essais sont effectués. La précision est bien meilleure à 40 km/h qu'à 120 km/h. En effet, à faible vitesse il est beaucoup plus facile de faire les mesures exactement au même endroit donc l'hétérogénéité du revêtement intervient dans une moindre proportion. En outre, à faible vitesse l'expulsion du film d'eau est plus facile et l'adhérence est beaucoup moins influencée par les variations d'épaisseur du film d'eau. Nous constatons aussi que la précision des mesures est meilleure lorsque la dérive est élevée. Dans ce cas, le glissement total de l'aire de contact est plus franc.

On observe des différences entre les deux roues du stradographe qui proviennent de l'hétérogénéité du revêtement. La roue gauche passait dans les traces de circulation et la roue droite entre ces traces.

Pour des mesures très précises, notamment aux faibles dérives, il faut absolument améliorer la précision en choisissant des revêtements récents (2 ans) afin d'obtenir des valeurs identiques sur les deux roues de mesure. Le profil en long et en travers devront être excellents afin de supprimer les variations de charge verticale induites par les suspensions hydrauliques des roues de mesure. Il faut opérer en absence quasi totale de vent traversier qui provoque une dérive parasite au véhicule.

Néanmoins, les résultats obtenus au cours de cette campagne sont satisfaisants pour l'étude de corrélation CFL-CFT que nous avons entreprise.

### 3.2 - RÉSULTATS DE LA CORRÉLATION CFL - CFT

Pour l'étude de la liaison stochastique entre CFT et CFL nous considérons des couples de valeurs afférents à la même roue de mesure. Nous doublons ainsi le nombre de couples pour chaque revêtement. Chaque valeur est la moyenne de trois passages. Nous avons veillé à ce que les roues de mesure passent chaque fois au même endroit. De cette manière nous éliminons le paramètre : hétérogénéité du revêtement.

Le calcul des coefficients de corrélation et des droites de régression ont été effectués sur ordinateur.

En prenant tous les couples (3 vitesses, 3 dérives) nous avons obtenu les résultats suivants :

Coefficient de corrélation  $r = 0,88$

$$\text{CFT} = 1,17 \text{ CFL} + 0,13$$

$$\text{CFL} = 0,67 \text{ CFT} - 0,02$$

Le nuage des points correspondants est représenté sur la figure 3. Nous considérons que chaque revêtement donne deux points distincts. L'allure du nuage correspond à celle d'une liaison stochastique serrée. L'ellipse enveloppe est très allongée. Les droites de régression ont été tracées sur le graphique.

Puis nous avons effectué le calcul en distinguant roue droite et roue gauche. Les résultats montrent de très légères différences qui ne sont pas significatives. On peut donc bien considérer les couples afférents aux deux roues comme faisant partie d'une même population homogène.

Ensuite nous avons effectué les calculs des corrélations CFL-CFT dans tous les cas possibles de manière à étudier l'influence des facteurs vitesse et dérive.

Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau de la figure 4.

A angle de dérive constant (3 vitesses) la corrélation est légèrement meilleure pour une dérive élevée ( $\alpha = 15^\circ$ ). Les coefficients de corrélation sont croissants en fonction de la dérive. Pour une même valeur de CFL, le CFT augmente lorsque la dérive augmente de 5 à 15°. Les pentes des droites de régression augmentent avec la dérive.

A vitesse constante (3 valeurs de la dérive) la corrélation est légèrement meilleure pour une valeur de la vitesse égale à 80 km/h. Les coefficients de corrélation passent par un maximum en fonction de la vitesse. Les pentes de droites de régression ( $\text{CFT} = f(\text{CFL})$ ) sont croissantes avec la vitesse.

De ces résultats, nous pouvons conclure qu'aucun de deux paramètres : vitesse ou dérive n'est prépondérant quant à la valeur du coefficient de corrélation obtenue. Celle-ci varie de 0,85 à 0,92. Les résultats sont donc comparables.

Afin de déterminer les valeurs V et  $\alpha$  donnant la meilleure

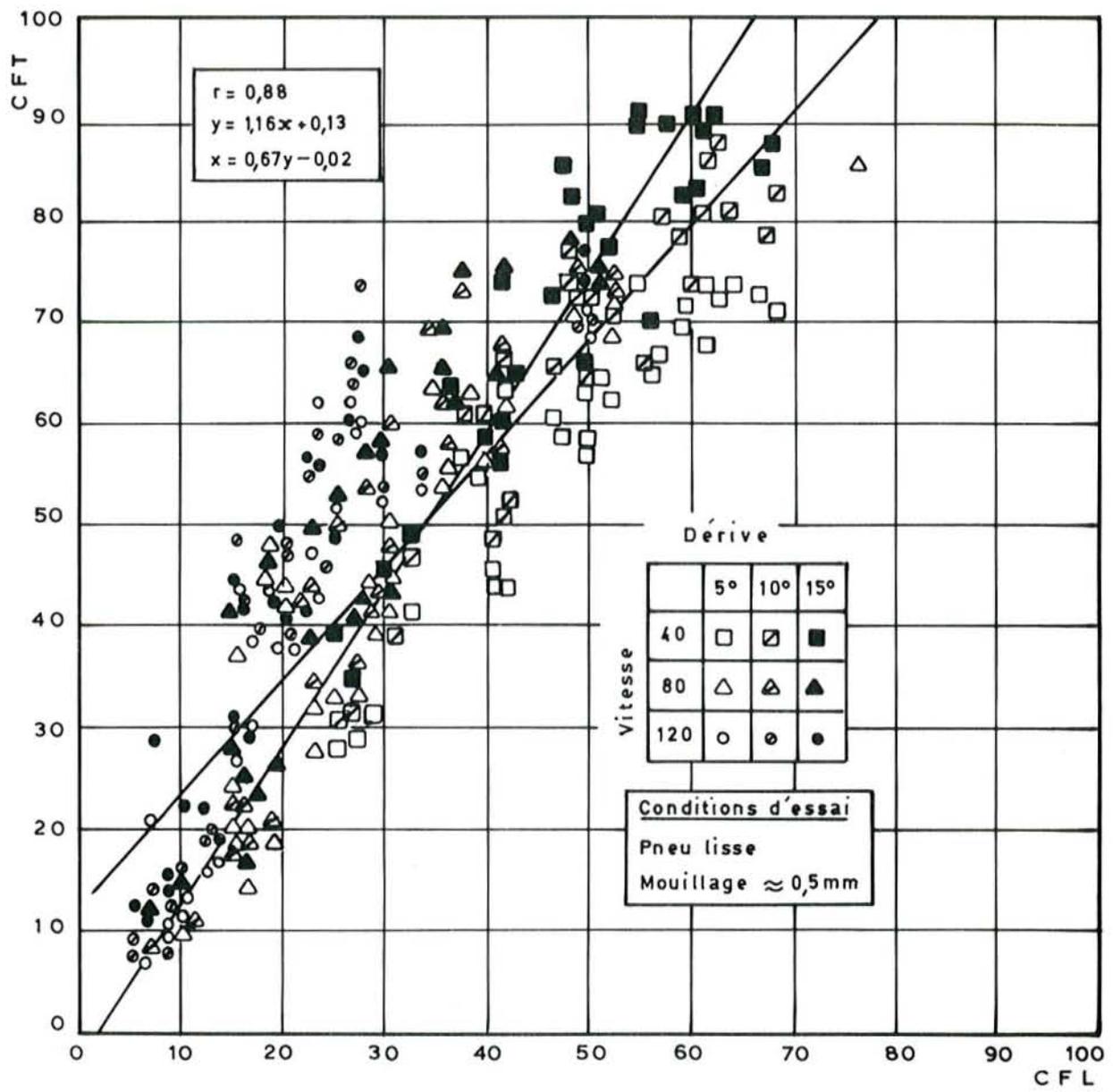


Fig. 1 — Résultats des mesures comparatives C.F.L. C.F.T.

Fig. 4 - Corrélations CFT - CFL

Conditions	r	CFL x	CFT y	y = BX + A	X = CY + D
$\alpha = 5-10-15$ V=40-80-120	0,88	0,33	0,51	y=1,17x+0,13	X=0,67Y-0,02
$\alpha = 5-10-15$ V=40-80-120 Roue G	0,87	0,33	0,51	y=1,14x+0,13	X=0,67y-0,01
$\alpha = 5-10-15$ V=40-80-120 Roue D	0,90	0,32	0,52	y=1,20x+0,13	X=0,67y-0,03
$\alpha = 5$ V=40-80-120	0,88	0,33	0,47	y=1,05x+0,12	X=0,73y-0,02
$\alpha = 10$ V=40-80-120	0,89	0,33	0,52	y=1,19x+0,13	X=0,67y-0,02
$\alpha = 15$ V=40-80-120	0,92	0,33	0,56	y=1,26x+0,15	x=0,67y-0,05
$\alpha = 5-10-15$ V=40	0,85	0,49	0,67	y=1,19x+0,08	X=0,61y+0,08
$\alpha = 5-10-15$ V=80	0,90	0,28	0,46	y=1,51x+0,04	X=0,54y+0,03
$\alpha = 5-10-15$ V=120	0,86	0,21	0,41	y=1,57x+0,09	X=0,47y+0,01
$\alpha = 5$ V=40	0,92	0,49	0,59	y=1,09x+0,06	X=0,79y+0,02
$\alpha = 5$ V=80	0,94	0,28	0,41	y=1,51x-0,01	X=0,58y+0,04
$\alpha = 5$ V=120	0,87	0,21	0,39	y=1,56x+0,07	X=0,49y+0,02
$\alpha = 10$ V=40	0,91	0,49	0,67	y=1,24x+0,07	X=0,66y+0,04
$\alpha = 10$ V=80	0,91	0,28	0,46	y=1,51x+0,04	X=0,55y+0,03
$\alpha = 10$ V=120	0,85	0,21	0,42	y=1,60x+0,09	X=0,45y+0,02
$\alpha = 15$ V=40	0,91	0,49	0,73	y=1,26x+0,12	X=0,66y+0,005
$\alpha = 15$ V=80	0,91	0,28	0,50	y=1,50x+0,08	X=0,55y+0,005
$\alpha = 15$ V=120	0,87	0,21	0,43	y=1,54x+0,11	X=0,49y-0,005

corrélation, nous avons effectué les calculs pour chaque vitesse et chaque angle. Le tableau de la figure 4 indique que les meilleurs résultats  $r = 0,94$  sont obtenus avec :

$$\begin{aligned}\alpha &= 5^\circ \\ V &= 80\end{aligned}$$

Mais les autres résultats ne s'écartent que très faiblement de cette valeur. On constate simplement une tendance = la corrélation est légèrement moins bonne à grande vitesse.

En conclusion, dans le cas de mesures de routine d'adhérence transversale il est préférable de choisir  $V = 80$  et  $\alpha = 15^\circ$  afin de pouvoir comparer nos résultats avec ceux obtenus à l'étranger = Grande Bretagne et Belgique notamment.

Notons que nos résultats concordent avec ceux trouvés en Angleterre en 1966 et qui étaient les suivants :

$$\begin{aligned}\text{CFL} &= 0,62 & \text{CFT} &+ 0,03 \\ \text{Coefficient de corrélation} &: & &0,95 \\ \text{avec } V &= 48 \text{ km/h} \\ \alpha &= 20^\circ\end{aligned}$$

### 3.3 - DÉCROISSANCE DU CFT EN FONCTION DE LA VITESSE

L'examen détaillé des courbes de décroissance du CFT en fonction de la vitesse comparées à celles du CFL nous montre que les décroissances obtenues en frottement transversal sont comparables à celles obtenues en frottement longitudinal.

Ainsi, les résultats mis en évidence pour le frottement longitudinal restent valables en frottement transversal (à dérive élevée). La décroissance dépend de la nature du revêtement. Elle est plus grande entre 40 et 80 km/h que entre 80 et 120km/h/

Les deux types de frottement sont de même nature et représentent l'adhérence d'un pneumatique sur chaussée mouillée. Les phénomènes d'expulsion du film d'eau semblent être identiques bien que la roue ne soit pas bloquée dans le cas du frottement transversal.

En examinant chaque catégorie de revêtements nos constatations sont analogues pour les deux types de frottement.

Dans le cas des coulis bitumineux (fig. 5) les caractéristiques d'adhérence sont médiocres. Les valeurs obtenues à faible vitesse sont basses et la décroissance en fonction de la vitesse est importante.

Les conclusions sont identiques pour les bétons de ciment non striés transversalement (fig. 6).

Les enrobés bitumineux (fig. 7) présentent une dispersion assez importante aux faibles vitesses. La décroissance est moyenne. Il faut noter que nous n'avons pas testé de béton bitumineux grenu à hautes caractéristiques d'adhérence qui devraient donner de meilleurs résultats.

Les enrobés cloutés (fig. 8) présentent de très bonnes caractéristiques d'adhérence à faible vitesse mais la décroissance en fonction de la vitesse semble rapide. Cela doit provenir de la nature du cloutage qui présente une structure en micropavages. Les granulats cloutés pénètrent dans l'enrobé la pointe en bas et présentent une face plane en surface.

Les enduits superficiels (fig. 9) ont des caractéristiques d'adhérence excellentes à basse vitesse, et la décroissance en fonction de la vitesse est faible. Nous avons pris la précaution d'éviter le ressuage sur les sections retenues pour nos essais.

Si nous reportons sur les courbes de décroissance du CFL en fonction de la vitesse, les valeurs obtenues au pendule RRL nous constatons qu'ils coïncident dans tous les cas avec les points de la courbe correspondant à la vitesse de 10 km/h, vitesse à laquelle le patin du pendule attaque la surface. Il y a donc homogénéité des résultats. Par contre, si on calcule la corrélation entre les valeurs RRL et le CFL - 40, nous obtenons des résultats médiocres  $r = 0,70$ .

#### 3.4 - CORRÉLATION ENTRE LA DÉCROISSANCE DU CFT EN FONCTION DE LA VITESSE ET LA RUGOSITÉ GÉOMÉTRIQUE

La rugosité géométrique est définie par la profondeur au sable (HS) mesurée d'après le mode opératoire du L.C.P.C. Les mesures ont été effectuées par le Laboratoire Régional de LILLE. Les moyennes des valeurs obtenues sur chaque revêtement sont consignées par le tableau de l'annexe .

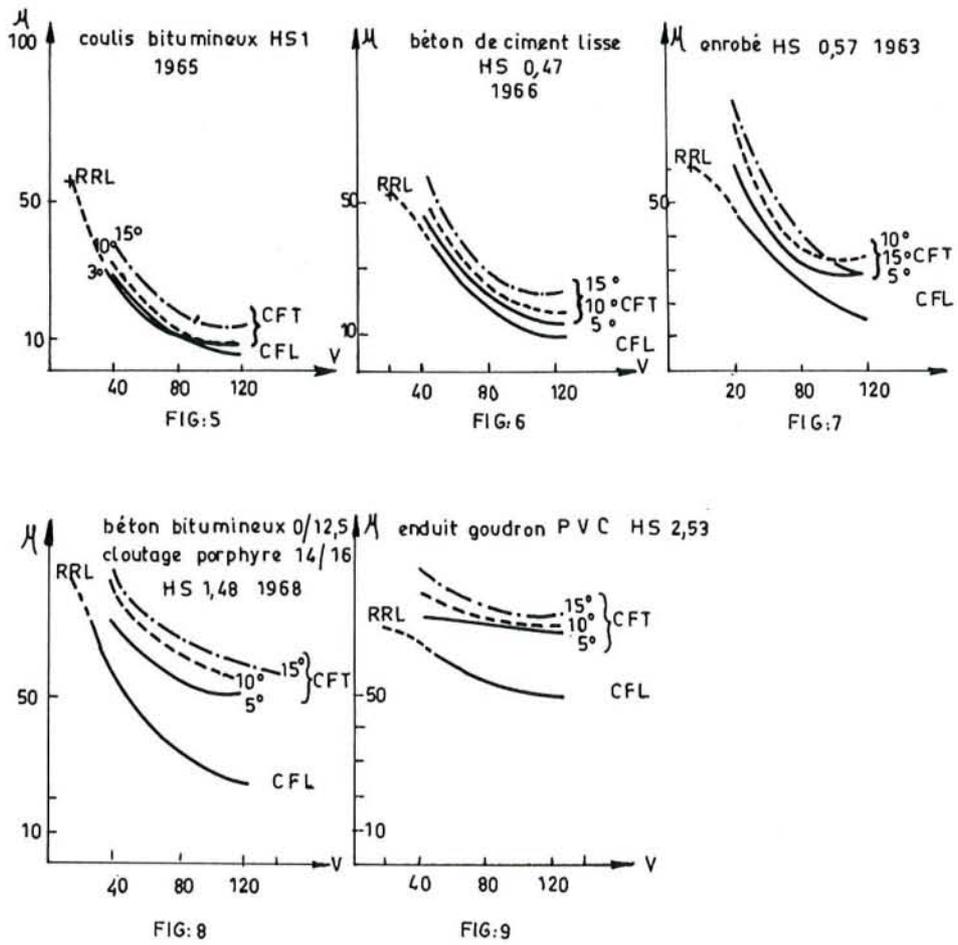


Fig. 5, 6, 7, 8, 9 : La décroissance du CFT à dérive élevée en fonction de la vitesse est comparable à celle du CFL roue bloquée

La décroissance du CFT et du CFL en fonction de la vitesse est liée par une liaison stochastique à la rugosité géométrique. Nous avons calculé les coefficients de corrélation entre :

$$HS = x \quad \text{et} \quad \frac{\phi}{\phi} \frac{120}{40} = y$$

Les calculs ont été effectués pour CFL, CFT 5°, CFT 10°, CFT 15°. Les résultats sont les suivants :

Corrélations	$\bar{x}$	$\bar{y}$	r	Régression Y = ax+b	Régression x = cx+d
$\frac{CFT \ 120}{CFT \ 40} \ 5^\circ$ & HS	1,115	0,65	0,93	y = 0,34x+0,27	x = 2,55y - 0,54
$\frac{CFT \ 120}{CFT \ 40} \ 10^\circ$ & HS	1,115	0,61	0,92	y = 0,32x+0,24	x = 2,62y - 0,47
$\frac{CFT \ 120}{CFT \ 40} \ 15^\circ$ & HS	1,115	0,58	0,94	y = 0,28x+0,26	x = 3,09y - 0,67
$\frac{CFT \ 120}{CFT \ 40}$ & HS	1,08	0,415	0,89	y = 0,20x+0,20	x = 3,88y - 0,57

Quelque soit la dérive = 5,10 ou 15° la décroissance relative  $\frac{\phi}{\phi} \frac{120}{40}$  est mieux corrélée avec HS dans le cas du frottement transversal ;

$$r = 0,93 \text{ dans le cas du frottement transversal}$$

$$r = 0,89 \text{ dans le cas du frottement longitudinal}$$

A une profondeur au sable minimum correspond une chute d'adhérence maximum en fonction de la vitesse. Un revêtement antidérapant doit posséder une rugosité géométrique suffisante pour permettre l'expulsion du film d'eau à grande vitesse. Cela est une condition nécessaire mais non suffisante.

### 3.5 - PALIERS DES COURBES D'ENVIRAGE

L'allure de la majorité des paliers des courbes d'envirage des 14 revêtements étudiés, est une droite légèrement croissante en fonction de la dérive. C'est le cas notamment des revêtements fins : (bétons de ciment non striés transversalement et coulis bitumineux) et de la plus part des revêtements grenus (enrobés et enduits superficiels). Figure 10.

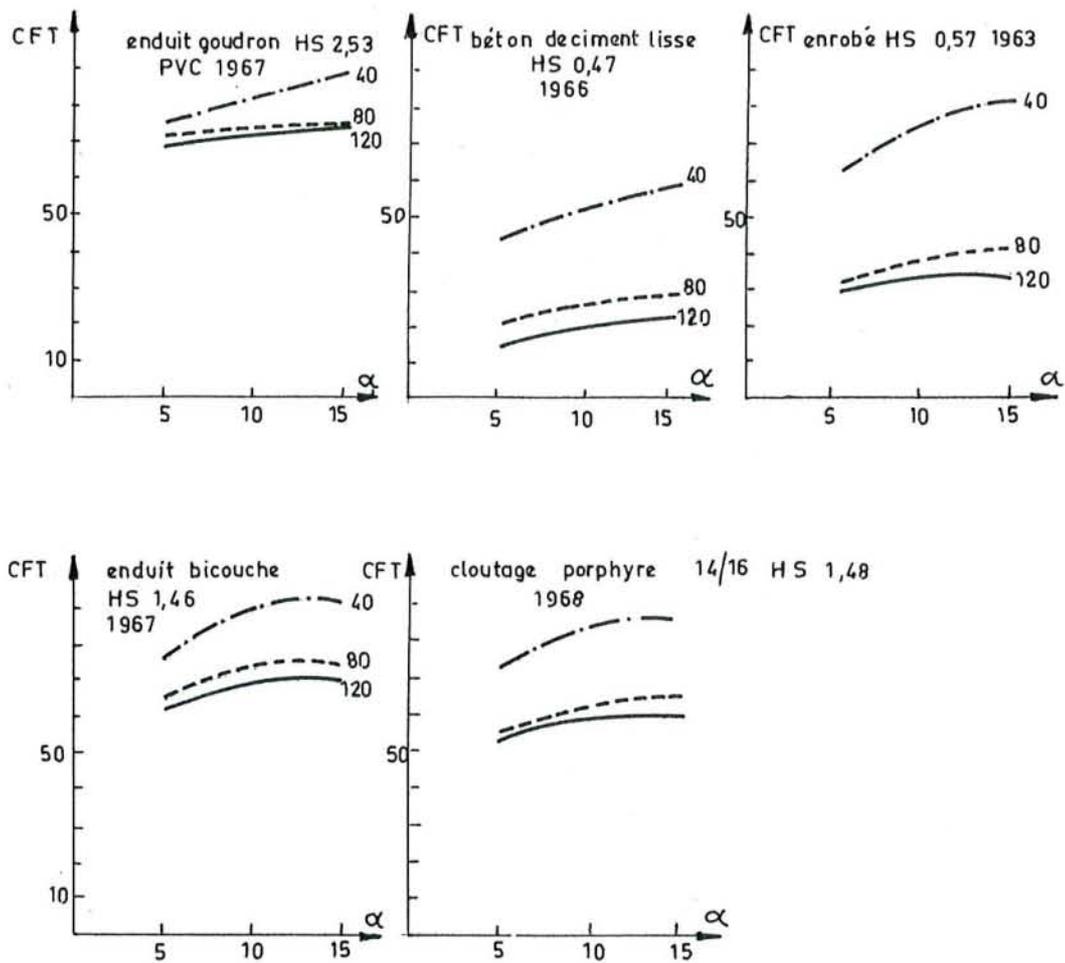


Fig. 10 — Paliers des courbes d'enivrage.

Ce sont des droites légèrement croissantes.

Certains revêtements grenus possèdent des courbes qui passent par un maximum.

Certains revêtements grenus possèdent des courbes qui passent par un maximum pour une dérive égale à  $10^\circ$ . Le maximum apparaît plus nettement à faible vitesse. C'est le cas d'un cloutage (Autoroute A-1) et d'un enduit superficiel (RN 39).

Le nombre de revêtements de chaque famille n'est pas suffisamment grand pour que nous puissions en tirer des conclusions générales applicables aux revêtements. La présence du maximum doit dépendre de la nature du revêtement mais aussi de la nature du pneumatique.

En effet la courbe théorique d'envirage (1) possède un maximum lorsque l'adhérence décroît en fonction de la vitesse.

De récents résultats expérimentaux étrangers (7) indiquent que la forme des courbes d'envirage dépend de la nature du pneumatique.

Les résultats d'une campagne de mesure que nous sommes en train de dépouiller, semblent le confirmer. Dans le cas d'un pneumatique à carcasse radiale, la présence du maximum serait liée à la stabilisation de la bande de roulement par la ceinture. Si elle est métallique donc inextensible, le maximum apparaîtrait plus nettement que si elle est en textile. Le pneumatique lisse standard du C.E.B.T.P. que nous avons utilisé pour l'étude de la corrélation CFL-CFT est à carcasse radiale et possède une ceinture textile qui conserve une forme torique au bandage. Cela provoquerait des glissements parasites (déroulement inégal) qui tendraient à faire disparaître le maximum des courbes d'envirage.

Il est probable que nous retrouverons les mêmes phénomènes en frottement longitudinal d'une roue progressivement freinée. Dans ce cas il y aurait analogie entre le frottement transversal et le frottement longitudinal pour des taux de glissement croissants. Cela est fondamental pour l'étude des systèmes de freinage antibloquant (8).



## CONCLUSIONS

Lors de cette campagne nous nous sommes volontairement limités à l'étude de la liaison stochastique entre le frottement transversal (dérive élevée) et le frottement longitudinal d'une roue bloquée. Les mesures ont été faites sur quatorze revêtements représentatifs du réseau national avec le stradographe du CEBTP équipés de pneumatiques lisses standard.

Les paramètres "vitesse" et "dérive" n'ont que peu d'influence sur le niveau de la corrélation. Cela est valable dans la gamme étudiée : dérive variant de 5 à 15° et vitesse variant de 40 à 120 km/h.

La corrélation obtenue est bonne :  $r = 0,90$ . Les droites de régression sont peu écartées l'une de l'autre. Le nuage de point a une forme elliptique convenable.

Le coefficient de frottement transversal (CFT) est dans tous les cas nettement supérieur au coefficient de frottement longitudinal (CFL):

$$\begin{aligned} \text{CFT} &= 1,17 \text{ CFL} + 0,13 \\ \text{CFL} &= 0,67 \text{ CFT} - 0,02 \end{aligned}$$

Cette étude a été effectuée avec des pneumatiques lisses standard, il serait intéressant de la reprendre avec des pneumatiques sculptés neufs du commerce, de différentes natures.

La décroissance du CFT en fonction de la vitesse est comparable à celle obtenue en CFL. Cette décroissance est liée à la rugosité géométrique par une liaison stochastique. La corrélation est légèrement meilleure en frottement transversal.

$$\begin{aligned} r &= 0,93 \text{ pour le CFT} \\ r &= 0,89 \text{ pour le CFL} \end{aligned}$$

La rugosité géométrique est mesurée par la profondeur de la tache de sable.

Une bonne adhérence nécessite une rugosité géométrique suffisante pour permettre l'évacuation du film d'eau sous le pneumatique. Cela est aussi vrai en frottement transversal qu'en frottement longitudinal. Ces deux types d'adhérence sont de même nature pour les catégories de revêtements étudiés et lorsque les taux de glissements sont importants = roue bloquée ou dérive élevée. Les phénomènes d'expulsion du film d'eau ne doivent pas être notablement modifiés, bien que la roue ne soit pas bloquée en frottement transversal.

Les meilleures caractéristiques d'adhérence sont obtenues sur les enduits superficiels. Les cloutages présentent de très bonnes caractéristiques à faible vitesse mais la décroissance en fonction de la vitesse semble importante. Celle-ci peut être due à la structure en micropavages de ce type de revêtements. Les enrobés que nous avons testés ne sont pas de formulations récentes (pas de bétons bitumineux grenus). Les résultats sont donc moyens et dispersés.

Les revêtements fins (coulis bitumineux et bétons de ciment non striés transversalement) ont de mauvaises caractéristiques d'adhérence au delà de 80 km/h.

En définitive, les caractéristiques que doivent posséder un revêtement antidérapant (microrugosité et macrorugosité) et qui ont été tirées des résultats en frottement longitudinal (campagnes nationales) sur un nombre très important de revêtements, sont confirmées par les résultats que nous avons obtenu au cours de cette campagne. Il y a analogie entre frottement transversal et frottement longitudinal lorsque les taux de glissements dans l'aire de contact sont importants (dérive élevée ou roue bloquée). Ces résultats nous suggèrent, l'hypothèse de l'analogie d'une roue progressivement envirée et d'une roue progressivement freinée.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- ( 1 ) A. JULIEN - Observations sur le comportement du pneumatique au voisinage et au delà de sa limite d'adhérence.  
Revue du Caoutchouc - Octobre 1959 - N° 10
- ( 2 ) GILES - Facteurs influençant le frottement entre pneumatique et route mouillée  
Journée d'Etude du 11 Juin 1963 - RRL.
- ( 3 ) B. SABEY - Road surface characteristics and skidding resistance  
RRL - Novembre 1965
- ( 4 ) B. SABEY - The Road Surface and SAFETY of vehicles  
London 3-4 July 1968.
- ( 5 ) J. DAUBE - Facteurs influençant le coefficient de frottement transversal  
Publication CRR Bruxelles F 30/58
- ( 6 ) D.H. COOPER - Force latérale et glissement dans l'aire de contact du pneumatique  
U.E. GOUGH  
Revue du caoutchouc - Octobre 1959 - N° 10.
- ( 7 ) K.E. HOLMES - Type forces or fonctions of Cornering and braking slip on wet road surfaces.  
RRL - Report LR 254 - 1969
- ( 8 ) J.L. HARNED - Measurement of Tire Brake force characteristics as related Design.  
L.E. JOHNSTON  
Publication General Motors - USA
- ( 9 ) Y. TCHENG - Le nouveau stradographe du C.E.B.T.P.  
Bulletin de Liaison des Ponts & Chaussées - N° Spécial F - Novembre 1966.
- ( 10 ) C. CHEVET - Etude préliminaire sur l'adhérence transversale des chaussées.  
Bulletin de liaison des Ponts & Chaussées - N° 40 - Sept. Oct. 1969.

Tableau récapitulatif

N°	SITUATION	F O R M U L A T I O N					RRL	HS
		TYPE	GRANULO.	AGREGATS	LIANTS	DOSAGE		
1	RN.25 PK.21 (Arras)	Enduit 1962	12,5/18	Porphyre St.Varent 18 k/m <sup>2</sup>	Cut-back 150/250	1,2k/m <sup>2</sup>	0,61	1,73
2	(Arras) RN.37 Pk:23.900	Cloutage 1964	0/12,5 12,5/18	Porphyre de Lessines	Bitume 80/100	7,1 %	0,78	1,62
3	(Arras) A.I Pk.168,500	Cloutage 1968	0/12,5 14/16 ou 16/18	Béton bitu. Porphyre Lessines	Bitume 80/100	6,2 %	0,72	1,48
4	(Lille) RN.353 PK.10,500	Cloutage 1966	0/12,5 16/18	Porphyre L. Quartzite	Bitume 80/100	7,1 %	0,71	1,14
5	(Lille) RN.353 PK.11	Béton bitumin. 1966	0/12,5	Porphyre L. Filler Calcaire	Bitume 80/100	6,2 %	0,73	1,31
6	(Douai) RN.17 PK.40	Coulis 1965	0/5 0/3	Sable roulé Porphyre (Lessines)	Emulsion cationique à 65 %	23,5 %	0,73	0,45
7	(Boulogne) RN.1 PK.41	Enduit 1967	12,5/18	Porphyre Lessines 15 k/m <sup>2</sup>	Goudron PVC 1/66	1,25k/m <sup>2</sup>	0,70	2,53

8	(Boulogne) RN.39 PK.7	Enduit bicouche 1967	8/12,5 3/8	Diorite de la Noubleau	Emulsion cationique à 70% bit.	I,1k/m <sup>2</sup> 1,3k/m <sup>2</sup>	0,66	1,46
9	Fontainebl. A.6 PK.76,600	Béton hydraul. 1966	20/40 0/5 5/20	Silico-calc. calcaire	CPAC 325	300 kg	0,53	0,47
10	Fontainebl. RN.7E PK.4,700	Enrobé dense 1963	0/8	Diorites	Bitume 80/100	6,4 %	0,63	0,57
11	Versailles RN.10 PK.52	Coulis 1965					0,58	0,21
12	Versailles A.13 PK.28	Béton 1967	0/5 5/25	Silico-calc.	Ciment CPR	315 kg	0,50	0,34
13	Versailles RN.I PK.32,400	Bender 1963	20/40	Laitier Porphyre	Bitume 180/220		0,65	1,35
14	Versailles RN.I PK.36,200	Enrobé 1962	0/12,5	Porphyre	Bitume 180/220	6 %	0,58	0,95

## Summary

### Correlation between longitudinal friction with a locked wheel and transverse friction at a slip angle of turning

The correlation between the sideway force coefficient (hereinafter referred to as C.F.T.) of a wheel having a slip angle (5 to 15°) and the braking force coefficient of a locked wheel (C.F.L.) has been the subject of research. The measurements were carried out with the C.E.B.T.P. stradograph fitted with smooth pneumatic tyres. In both cases, there is total slipping in the contact area of the pneumatic tyre, transversely or longitudinally. Although the wheel is not locked in the case of transverse friction, the results obtained show that the phenomena of expulsion of the film of water are of the same kind.

The correlation CFT-CFL was determined for pairs of results measured at the same speed. Fourteen surfacings were selected; these constitute a representative sample of the road network. Whatever the nature of the surfacing, the angle of turn (5, 10 or 15°) and the speed (40, 80 or 120 km.p.h.), the correlation (worked out by computer) between CFL and CFT is good =  $r = 0.90$ .

$$\begin{aligned} \text{CFT} &= 1.17 & \text{CFL} &+ 0.13 \\ \text{CFL} &= 0.67 & \text{CFT} &- 0.02 \end{aligned}$$

The decrease of the CFT in terms of speed is comparable with the decrease of the CFL. The latter is closely related ( $r = 0.90$ ) to the geometrical rugosity of the surfacing measured by the sand-depth method.

## Резюме

### Корреляция между продольным трением заблокированного колеса и поперечным трением с большим уклоном

Была изучена корреляционная связь между поперечным коэффициентом трения (С.Ф.Т.) колеса с большим продольным уклоном (5-15°) и продольным коэффициентом трения заблокированного колеса (С.Ф.Л.). Измерения проводились при помощи страдографа Экспериментального Центра Жилищного Строительства и Общественных Работ (С.Е.В.Т.Р.) с гладкими пневматиками. В обоих случаях происходит полное скольжение поверхности контакта пневматика или вдоль или поперек. Несмотря на то, что в случае измерения поперечного трения колесо не заблокировано, полученные результаты показывают, что явление выдавливания пленочной воды носит тот же характер.

Корреляция С.Ф.Т.-С.Ф.Л. была получена для спаренных результатов, соответствующих одной и той же скорости.

Исследования проводились на 14-ти выбранных покрытиях, которые представляют собой характерный выборочный образец существующей дорожной сети. Каковы бы не были покрытие, продольный уклон (5, 10 и 15°) и скорость (40, 80, 120 км/ч) получается (выкладки на ЭВМ) хорошая корреляционная связь ( $r = 0,90$ ) между С.Ф.Л. и С.Ф.Т.

$$\begin{aligned} \text{С.Ф.Т.} &= 1,17 & \text{С.Ф.Л.} &+ 0,13 \\ \text{С.Ф.Л.} &= 0,67 & \text{С.Ф.Т.} &- 0,02 \end{aligned}$$

Уменьшение поперечного коэффициента трения в зависимости от скорости сравнимо с тем, которое получается для продольного коэффициента трения. Последний хорошо коррелируется ( $r = 0,90$ ) с геометрической шероховатостью покрытия, измеренной методом засыпки песком.

## Zusammenfassung

### Korrelation zwischen der Längsreibung eines blockierten Rades und der Seitenreibung eines Rades mit starkem Abtrieb

Die Korrelation zwischen der Seitenreibung (C.F.T.) eines Rades mit einem Einschlagswinkel mit starkem Abtrieb (5 bis 15°) und der Längsreibung eines blockierten Rades (C.F.L.) ist untersucht worden. Die Messungen sind mit dem Stradographen von C.E.B.T.P., der mit abgefahrenen Reifen bestückt war, durchgeführt worden. In beiden Fällen ist das Seitwärts- oder Längsrutschen an der Berührungsfläche des Reifens hundertprozentig. Obwohl das Rad im Falle des Seitwärtsrutschens nicht blockiert ist, zeigen die Ergebnisse, dass die Ausstossvorgänge des Wasserfilms von derselben Art sind. Die Korrelation CFT-CFL wurde für Wertpaare ermittelt, die bei derselben Geschwindigkeit gemessen wurden.

Es wurden 14 Strassendecken, welche eine repräsentative Mustersammlung des Strassennetzes darstellen, ausgesucht. Bei den verschiedenen Strassendecken, Abtrieben (5-10 oder 15°) und Geschwindigkeiten (40-80-120 km/Std.) ist die Korrelation (Berechnung auf Datenverarbeitungsanlagen) zwischen CFL und CFT immer gut =  $r = 0,90$

$$\begin{array}{ll} \text{CFT} = 1,17 & \text{CFL} + 0,13 \\ \text{CFL} = 0,67 & \text{CFT} - 0,02 \end{array}$$

Das Abnehmen des CFT als Funktion der Geschwindigkeit ist vergleichbar mit dem Abnehmen, das beim CFL erreicht wurde. Hier besteht tatsächlich eine Korrelation ( $r = 0,90$ ) zwischen dem letzteren und der geometrischen Rauheit der Strassendecke, die durch die Sandtiefe gemessen wurde.

## Resumen

### Correlación entre el roce longitudinal rueda bloqueada y el roce transversal con deriva elevada

Se ha estudiado la correlación entre el roce transversal (C.F.T.) de una rueda con deriva elevada (5 a 15°) y el roce longitudinal de una rueda bloqueada (C.F.L.). Las mediciones han sido efectuadas con el estradógrafo del C.E.B.T.P. equipado con neumáticos lisos. En ambos casos hay un deslizamiento total en el área de contacto del neumático ya sea transversalmente o longitudinalmente. Aunque la rueda no esté bloqueada en el caso del roce transversal los resultados obtenidos indican que los fenómenos de expulsión del film de agua son de la misma naturaleza.

La correlación C.F.T./C.F.L. ha sido establecida para pares de magnitudes medidos a la misma velocidad.

Los revestimientos escogidos son 14 y representan un muestrario representativo de la red. Cualquiera sea la naturaleza del revestimiento, la deriva (5-10 o 15°), y la velocidad (40-80-120 km/h) la correlación (cálculos en computadora) entre C.F.L. y C.F.T. es buena =  $r = 0,90$ .

$$\begin{array}{ll} \text{CFT} = 1,17 & \text{CFL} + 0,13 \\ \text{CFL} = 0,67 & \text{CFT} - 0,02 \end{array}$$

El decrecimiento del CFT en función de la velocidad es comparable al obtenido en CFL. Este último, está bien correlacionado ( $r = 0,90$ ) con la rugosidad geométrica del revestimiento medida con la profundidad de la arena.

