

**Proposition de norme européenne relative
à la résistance au dérapage des revêtements routiers**

Programme d'appui scientifique
à la normalisation

volet II

Rapport final

Services fédéraux des
AFFAIRES SCIENTIFIQUES,
TECHNIQUES ET CULTURELLES

CENTRE DE RECHERCHES ROUTIERES
Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-Loi du 30.01.1947
BOULEVARD DE LA WOLUWE 42, 1200 BRUXELLES

Rapport final

CONTRAT DE RECHERCHE NO/C3/004

PROPOSITION DE NORME EUROPEENNE
RELATIVE A LA RESISTANCE AU DERAPAGE
DES REVETEMENTS ROUTIERS

Coordonnateur et Rapporteur : Guy DESCORNET, Dr.Sc.

Mai 1998

CENTRE DE RECHERCHES ROUTIERES
Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-Loi du 30.01.1947
BOULEVARD DE LA WOLUWE 42, 1200 BRUXELLES

Rapport final

CONTRAT DE RECHERCHE NO/C3/004

PROPOSITION DE NORME EUROPEENNE
RELATIVE A LA RESISTANCE AU DERAPAGE
DES REVETEMENTS ROUTIERS

Coordonnateur et Rapporteur : Guy DESCORNET, Dr.Sc.

Mai 1998

I. Composition du Comité d'Accompagnement

Dhr. R.JORDENS, Ing., Afdelingshoofd, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde(NL), Voorzitter CEN/TC227/WG5/TG1

Dhr. F.MONTENY, Diensten van de Eerste Minister, Wetenschappelijke, Technische en Culturele Aangelegenheden

M. F.BEUGNIES, Ir., Ingénieur-Directeur a.i., Ministère des Communications et de l'Infrastructure, Administration de la Réglementation de la Circulation et de l'Infrastructure (ARCI), Direction Routes: Normes et Banques de Données

M. J.WUSTEMBERGHS, Ing., Conseiller, Institut Belge de Normalisation

Dhr. L.HELEVEN, Ir., Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Weg en Verkeer, Afdeling Wegenbouwkunde, Dienst Structuren

M. J.CROCHET, Ir., Ingénieur Principal des Ponts et Chaussées, Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports, Direction générale des Routes et Autoroutes, Direction des Structures Routières

M. D.GORLE, Dr.-Ir., Directeur, Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Departement Research, Ontwikkeling en Toepassing

M. G.DESCORNET, Dr.Sc., Chef de projet, Centre de Recherches Routières, Département Recherche, Développement et Application

II. Remerciements

Nous remercions les services du Premier Ministre pour les Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles pour leur financement du projet et, en particulier, Monsieur F.MONTENY pour son soutien constant et attentif.

Nous remercions les services du LIN et du MET pour leur excellente collaboration à ce projet, en particulier Messieurs L.HELEVEN (LIN), J.CHAVET (MET) et J.CROCHET (MET) pour l'exécution de la campagne de mesures de glissance.

Que soient également remerciés les autres membres du Comité d'Accompagnement et plus particulièrement Monsieur R.A.P.JORDENS, qui a volontiers effectué de longs déplacements matinaux pour assister à diverses réunions dont celles du C.A. et Monsieur D.GORLE pour son suivi attentif et sa présidence efficace et conviviale du C.A.

Davantage qu'un remerciement, c'est de la reconnaissance que nous devons à Messieurs J.M.DESMET et B.BERLEMONT pour leur dévouement et leur compétence dans l'exécution des tâches techniques et l'exploitation des importantes quantités de données. Nous devons en particulier à B.BERLEMONT la réalisation du CD_ROM annexé. Enfin, nous remercions l'AIPCR pour son autorisation de reproduction de certains extraits de la base de données de la première expérience internationale dans l'Annexe 1 (CD-Rom) afin de la rendre plus complète.

III. Synthèse

Il y a en Europe plus d'une douzaine de modèles différents d'appareils de mesure de la résistance au dérapage des revêtements routiers. Jusqu'à présent, chaque pays utilise un ou deux type d'appareils sur base duquel ou desquels les spécifications sont établies au niveau des cahiers des charges et des politiques d'entretien. Or, avec l'ouverture du marché unique, il y a un besoin d'uniformisation pour permettre à tout entrepreneur de s'adapter à des spécifications différentes ainsi qu'aux responsables des réseaux routiers de garantir des conditions de sécurité homogènes d'un pays à l'autre. Cette uniformisation est entreprise au niveau du CEN notamment par le groupe CEN/TC227/WG5. Un des objectifs actuels de ce groupe est d'élaborer un projet de norme définissant une procédure uniforme de détermination de la résistance au dérapage sur base d'une mesure dynamique. On comprend sans peine qu'une telle procédure, pour être acceptée par la majorité des pays peut difficilement faire appel à un appareil unique. C'est pourquoi la philosophie adoptée consiste à établir des formules de conversion entre les différents appareils de façon à permettre à chacun de continuer, au moins pendant une période transitoire, d'utiliser sa méthode propre. Anticipant ce besoin, l'AIPCR a réalisé une expérience internationale de comparaison entre les différents appareils et méthodes de mesure de frottement et de texture superficielle des revêtements de routes et d'aérodromes. Cette expérience a fait l'objet d'un rapport final édité par l'AIPCR fin 1995. Tous les appareils et méthodes de mesures utilisés en Europe étaient représentés plus 1 engin américain, 1 canadien et 2 japonais. Cette expérience a fourni une base de données considérable qui s'avère précieuse pour le travail de normalisation. Et l'analyse de ces données présentée dans le rapport final démontre la possibilité d'harmoniser quasi tous les appareils participants au moyen d'une formule empirique leur permettant de raccorder leurs résultats de mesures à une échelle commune baptisée (un peu prématurément) "IFI-Indice de Frottement International", moyennant la prise en compte d'une mesure de la macrotexture. On peut dire "prématurément" car, si cette expérience était un prérequis indispensable, elle ne permet pas d'établir sans travaux complémentaires un projet de norme acceptable au niveau européen.

C'est pourquoi l'objectif général du projet consistait à élaborer un projet de norme européenne moyennant l'exécution des travaux complémentaires indispensables.

Rappelons la définition de l'IFI par l'AIPCR:

$$IFI = A + B * F * \exp\left[\frac{(\tau * V - S_R)}{(a + b * T)}\right] + C * T$$

- avec:
- F : coefficient de frottement mesuré
 - V : vitesse de mesure
 - S_R: vitesse de glissement (entre pneu et revêtement) de référence (60 km/h)
 - T : profondeur de texture
 - τ : taux de glissement
 - a,b : coefficients déterminés empiriquement permettant de compenser l'influence de la vitesse sur le coefficient de frottement à partir de la mesure de texture (T)

A,B,C : coefficients propres à chaque appareil, déterminés empiriquement.

Le premier travail a été de reprendre l'analyse de la base de données de l'expérience AIPCR afin de déterminer les valeurs optimales à attribuer aux paramètres qui entrent dans la définition de l'IFI. Par "valeurs optimales", on entend: qui permettent au sous-ensemble des appareils européens de reproduire l'IFI avec la meilleure précision possible. Afin que la redéfinition de l'IFI privilégie les appareillages et méthodes de mesure réellement en usage en Europe et dans la perspective de l'élaboration d'une norme CEN portant sur des essais dynamiques, on a sélectionné un total de 21 appareils selon ces deux critères. Postérieurement à l'expérience AIPCR et sur base des données acquises à cette occasion, la norme ISO 13473-1 a été élaborée, laquelle définit la manière de calculer la profondeur moyenne de profil à partir des mesures profilométriques. Il convient donc d'en tenir compte ici, d'autant que l'adoption de cette norme est actuellement prévue par le CEN/TC227/WG5. Or, le CRR est le seul parmi les équipes participantes à avoir enregistré et archivé tous les profils mesurés sous forme digitale, ce qui permet le retraitement de ces derniers par la nouvelle méthode. Par ailleurs, il a été nécessaire de compléter l'analyse par une évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de l'IFI.

Cette analyse complémentaire nous a amenés à définir un "EFI-European Friction Index" qui présente, par rapport à l'IFI proposé par l'AIPCR, les avantages suivants:

- Le rôle de la mesure de texture et donc des erreurs supplémentaires qu'elle peut introduire, a été minimisé de deux façons. Premièrement, par un choix rationnel de la vitesse de référence, on minimise l'importance de la correction de l'influence de la vitesse; cette vitesse de référence optimale est de 30 km/h. Deuxièmement, on a montré qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter un terme dépendant de la texture (coefficient C dans la formule ci-dessus) à la définition de l'EFI pour les appareils utilisant des pneus sculptés.
- Ce dernier aspect introduit une simplification, donc une harmonisation plus complète, puisqu'au contraire de l'IFI, la définition de l'EFI est unique quel que soit le type de pneu utilisé par un appareil donné.
- L'EFI tient compte de la définition normalisée ISO de la profondeur de texture estimée à partir d'une mesure profilométrique.
- Sa définition est basée sur les données relatives aux appareillages (dynamiques) européens. Cette base de données plus restreinte que celle de l'expérience AIPCR permet donc d'obtenir des valeurs de répétabilité et de reproductibilité mieux représentatives des performances que l'on peut attendre des systèmes de mesure mis en oeuvre en Europe, donnée dont la connaissance est requise par les travaux de normalisation. La répétabilité de l'EFI a été évaluée à 0.08 en moyenne sur l'ensemble des appareils et des sites mesurés et sa reproductibilité inter-appareils a été évaluée à 0.14.
- Mais son principal avantage tient à ce qu'il réduit considérablement ou même annule en moyenne les écarts systématiques entre les valeurs de coefficients de frottement délivrées par différents types d'appareils; c'est précisément en cela que le but de l'harmonisation est atteint même si c'est au prix d'une reproductibilité moins bonne qu'entre appareils de même type.

Le second objectif du projet était de valider l'extension de l'EFI a certains types de revêtements insuffisamment ou pas du tout pris en compte dans l'expérience AIPCR, notamment les différents matériaux et technologies des revêtements routiers représentatifs des usages et tendances en Europe dans ce domaine. On a dans ce but effectué avec la collaboration des Administrations Régionales une campagne de mesures de glissance à l'aide du SCRIM du LIN et de l'Odoliographe du MET et de texture à l'aide du profilomètre à laser du CRR sur 23 sections de routes présentant 1/3 de revêtements classiques comme témoins et 2/3 de revêtements soit nouvellement introduits soit d'application plus restreinte (notamment: enrobé drainant, béton de ciment drainant, Splitt Mastix Asphalt, coulis résineux gravillonné, et divers autres types de couches minces). Le critère de validation de l'EFI par rapport à un revêtement donné était que ce dernier obéisse à la formule établie empiriquement qui permet de prédire la susceptibilité du coefficient de frottement vis-à-vis de la vitesse de glissement en fonction de la profondeur de texture. Compte-tenu de la précision de cette formule, on peut dire que, d'après les données AIPCR (à l'exception des cas particuliers des revêtements de deux terrains d'aviation américains en Espagne) aussi bien que d'après les essais complémentaires effectués en Belgique, aucun type de revêtement ne s'écarte significativement et systématiquement dans un sens donné de la relation susdite.

Enfin, conformément au troisième et dernier objectif, un projet de norme a été élaboré, lequel :

- 1) définit l'EFI, càd la formule grâce à laquelle on peut passer d'une méthode de mesure à une autre avec indication de la marge d'erreur associée à cette conversion. La formule est essentiellement la même que ci-dessus, mais les coefficients correspondants ont été recalculés et le coefficient C a disparu.
- 2) propose une procédure d'étalonnage des appareils de mesure de frottement basée sur l'EFI. Il suffit pour maintenir l'EFI que des sous-ensembles réduits (deux ou trois) d'appareils se réunissent périodiquement pour se comparer et ajuster leurs coefficients A et B. Mais ces réunions doivent être organisées de façon à éviter, par le respect de certains critères d'appariement, que des sous-ensembles d'appareils ne s'écartent progressivement l'un de l'autre.

Ce projet a été présenté au groupe CEN/TC227/WG5 pour la première fois lors de la réunion des 21-22 novembre 1997 à Bruxelles. Une version amendée compte-tenu des remarques du groupe a été représentée lors de la réunion des 25-26 mai 1998 et c'est la troisième révision consécutive à cette dernière réunion qui est fournie en annexe au rapport sous forme de document séparé.

Pour tirer pleinement bénéfice du travail accompli, on recommande ce qui suit.

1. La démonstration de la faisabilité de la conversion dans une échelle uniforme des différentes mesures de glissance pratiquées en Europe devrait être diffusée et exploitée comme argument décisif justifiant, au niveaux des organismes de normalisation, des gestionnaires des routes, des entrepreneurs de voiries, des fournisseurs de matériaux de construction routière et des fournisseurs de matériel de mesure, l'adoption de la politique dite "d'harmonisation" plutôt que celle de "normalisation". L'harmonisation, moyennant l'application du concept de l'EFI, permet aux utilisateurs de continuer de pratiquer leurs essais et d'alimenter leurs banques de données routières sans rupture avec le passé qui signifierait l'abandon d'investissements importants et d'une longue expérience acquise, qu'entraînerait la normalisation d'une méthode unique. Ce qui n'interdit pas de préparer l'élaboration d'une méthode d'essai unique, Européenne ou plus largement internationale, pour dans les quinze ou vingt ans à venir. Le recours à l'EFI aura alors permis d'assurer une transition que l'on pourrait qualifier de démocratique.
2. Ceci implique que les autorités scientifiques, administratives et politiques concernées soutiennent la mise sur pied urgente d'une organisation Européenne pour l'étalonnage régulier des appareils de mesure de la glissance comme proposé dans le projet de norme. Cette organisation ne doit pas nécessairement disposer de pistes d'essai de référence; le projet de norme ne l'exige pas, les comparaisons entre appareils pouvant se dérouler en principe et en général dans n'importe quel pays ou région d'Europe pourvu que les critères édictés dans la norme puissent y être respectés. L'important est qu'il existe une équipe dédiée à plein temps à l'organisation des tests, à l'interprétation des résultats, à la délivrance de certificats, etc., et susceptible de se déplacer sur le lieu qui aura été considéré comme le plus approprié du point de vue pratique et économique pour la rencontre de tel ou tel sous-ensemble (sans doute deux ou trois appareils, la plupart du temps).

IV. Abréviations

AIPCR	Association Mondiale de la Route
B	Ensemble des appareils à pneu lisse ("Blank")
BB	Béton bitumineux
BC	Béton de ciment
BD	Béton drainant
CEN	Comité Européen de Normalisation
CFL	Coefficient de frottement longitudinal
CFT	Coefficient de frottement transversal
CRR	Centre de Recherches Routières
E	Enduisage
ED	Enrobé drainant
EFI	European Friction Index
ESHHP	Enduit superficiel à haute performance
ETD	Estimation de MTD à partir de MPD ("Estimated Texture Depth")
G	Ensemble ("General") des appareils sans distinction du type de pneu
IFI	International Friction Index
ISO	International Standardization Organization
LIN	Dienst Leefmilieu en Infrastructuur
MET	Ministère wallon de l'Équipement et des Transports
MPD	Profondeur du profil de la texture ("Mean Profile Depth")
MTD	Profondeur de texture obtenue par une méthode volumétrique ("Mean Texture Depth")
RMD	Revêtement mince discontinu
RMS	Ecart quadratique moyen ("Root Mean Square") du profil de la texture
RMTO	Revêtement mince à texture ouverte
RP	Ensemble des appareils à pneu rainuré ("Ribbed") ou présentant une sculpture quelconque ("Patterned")
RUMG	Revêtement ultra-mince grenu
SCRIM	Sideways force Coefficient Routine Investigation Machine
SCRIMTEX	SCRIM associé à un profilomètre à laser mesurant la macrotexture
SMA	Splitt mastix asfalt
SSTC	Services des affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles

V. Symboles

μ	Moyenne
ρ	Coefficient de corrélation
σ	Ecart-type
τ	Taux de glissement
A, a	Ordonnée à l'origine d'une droite de régression
B, b	Coefficient angulaire d'une droite de régression
E	Valeur estimée de EFI
F	Coefficient de frottement
$F_{10, \dots, F_{90}}$	Valeur du coefficient de frottement ramenée à la vitesse de glissement de 10, ..., 90 km/h
F_S	Valeur du coefficient de frottement ramenée à la vitesse de glissement S
F_0	Coefficient de frottement extrapolé à vitesse nulle
i	Indice variant selon l'appareil considéré
j	Indice variant selon la demi-section considérée
J	Nombre total de demi-sections
m	Indice distinguant les mesures répétées par un appareil donné sur une demi-section donnée
n	Nombre de mesures considérées dans un calcul de régression
N	Nombre total d'appareils
R	Indice affectant une valeur dépendant du choix de S_R
r	Répétabilité
R	Reproductibilité
S	Vitesse de glissement
S_0	Paramètre décrivant l'influence sur le coefficient de frottement de la vitesse de glissement; plus simplement : "paramètre de vitesse"
S_0^*	Paramètre de vitesse optimum pour une demi-section donnée
S_0^{**}	Paramètre de vitesse optimum prédit sur base de la texture
S_R	Vitesse de glissement de référence
T	Profondeur de texture
x	Indice variant selon le type de mesure de texture considéré

VI. Introduction

Il y a en Europe plus d'une douzaine de modèles différents d'appareils de mesure de la résistance au dérapage des revêtements routiers. Jusqu'à présent, chaque pays utilise un ou deux type d'appareils sur base duquel ou desquels les spécifications sont établies au niveau des cahiers des charges et des politiques d'entretien. Or, avec l'ouverture du marché unique, il y a un besoin d'uniformisation pour permettre à tout entrepreneur de s'adapter à des spécifications différentes ainsi qu'aux responsables des réseaux routiers de garantir des conditions de sécurité homogènes d'un pays à l'autre. Cette uniformisation est entreprise au niveau du CEN notamment par le groupe CEN/TC227/WG5 dont R.JORDENS, J.CHAVET, L.HELEVEN et G.DESCORNET font partie. Un des objectifs actuels de ce groupe est d'élaborer un projet de norme définissant une procédure uniforme de détermination de la résistance au dérapage sur base d'une mesure dynamique. On comprend sans peine qu'une telle procédure, pour être acceptée par la majorité des pays ne peut pas faire appel à un appareil unique. C'est pourquoi la philosophie adoptée consiste à établir des formules de conversion entre les différents appareils de façon à permettre à chacun de continuer, au moins pendant une période transitoire, d'utiliser sa méthode propre. Anticipant ce besoin, l'AIPCR a réalisé une expérience internationale de comparaison entre les différents appareils et méthodes de mesure de frottement et de texture superficielle des revêtements de routes et d'aérodromes. Cette expérience a fait l'objet d'un rapport final édité par l'AIPCR fin 1995. Tous les appareils et méthodes de mesures utilisés en Europe étaient représentés plus 1 engin américain, 1 canadien et 2 japonais. Cette expérience a fourni une base de données considérable qui s'avère précieuse pour le travail de normalisation. Et l'analyse de ces données présentée dans le rapport final démontre la possibilité d'harmoniser quasi tous les appareils participants au moyen d'une formule empirique leur permettant de raccorder leurs résultats de mesures à une échelle commune baptisée un peu prématurément "IFI", moyennant la prise en compte d'une mesure de la macrotecture. On peut dire "prématurément" car si cette expérience était un prérequis indispensable, elle ne permet pas d'établir sans travaux complémentaires un projet de norme acceptable au niveau européen.

L'objectif général du projet consiste à élaborer un projet de norme européenne moyennant l'exécution de travaux complémentaires indispensables, à savoir:

- 1) Reprendre l'analyse de la base de données en la restreignant aux appareils dynamiques utilisés en Europe et en reconsidérant la vitesse de référence adoptée empiriquement dans la définition de l'IFI dans le but de redéfinir un IFI optimisé pour les besoins de la normalisation européenne, c'ad un EFI.
- 2) Compléter l'analyse par une évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité associées à l'EFI.

- 3) Etendre la validité de l'EFI aux types de revêtements et matériaux nouveaux insuffisamment ou pas du tout pris en compte dans l'expérience AIPCR. Le programme prévoit donc la réalisation de mesures de frottement et de texture au moyen des différents appareils disponibles en Belgique sur une sélection des différents types de revêtements représentatifs.

Le projet de norme devra:

- 1) Définir l'EFI, c'ad par quelle formule on peut passer d'une méthode de mesure à une autre avec indication de la marge d'erreur associée à cette conversion.
- 2) Proposer une procédure d'étalonnage des appareils de mesure de frottement.

VII. Analyse de la base de données de l'expérience internationale (AIPCR 1992)

Rappelons que l'objectif consiste ici, à partir de la base de données de l'expérience AIPCR, à déterminer les valeurs optimales à attribuer aux paramètres qui entrent dans la définition de l'IFI « Indice de Frottement International » proposé dans le rapport de l'expérience AIPCR. Par "valeurs optimales", on entend : qui permettent au sous-ensemble des appareils européens de reproduire l'IFI avec la meilleure précision possible.

VII.1 Sélection des séries de mesures à prendre en compte

Afin que la redéfinition de l'EFI privilégie les appareillages et méthodes de mesure réellement en usage en Europe, on a sélectionné, en accord avec le Comité d'Accompagnement¹, les fichiers suivants² dans la base de données de l'expérience AIPCR. En outre, dans la perspective de l'élaboration d'une norme CEN portant sur les essais dynamiques, on n'a pas retenu les méthodes d'essai statiques.

VII.1.1 Friction

Fichiers retenus:

B1LKD.FR	B2SLP.FR	B5SLP.FR	C5.FR	C9.FR	D2.FR	D5.FR
B1SLP.FR	B3.FR	C1.FR	C6E.FR	C10.FR	D3.FR	D6.FR
B2LKD.FR	B5LKD.FR	C3B.FR	C8.FR	D1E.FR	D4.FR	D8.FR

Fichiers écartés:

A12.FR	Non européen. N'a en outre pas fonctionné correctement.
A13.FR	Non européen.
A14.FR	Pendule. Pas dynamique ni vraie grandeur.
B1ABS.FR	Système ABS. Vitesse réelle de glissement inconnue.
B4ESLP.FR	Bien qu'europpéen, n'a pas été retenu car ses conditions de mesure ne sont pas « pures » (mélange de vitesse et de taux de glissement variable)
B4ESWP.FR	Bien qu'europpéen, n'a pas été retenu car ses conditions de mesure ne sont pas « pures » (mélange de vitesse et de taux de glissement variable, d'où inadéquation du modèle AIPCR)
B5ABS.FR	Système ABS. Vitesse réelle de glissement inconnue.
B6501.FR	Non européen.
B6524.FR	Non européen.

¹ PV de la réunion du Comité d'Accompagnement du 14.11.96.

² Afin de ne pas encombrer l'écriture, on reprend les désignations attribuées aux différentes méthodes d'essai dans le rapport de l'expérience internationale. Le **Tableau 1** et le **Tableau 2** donnent la correspondance entre la désignation et l'appareil, la méthode de mesure et la nationalité de l'équipe de mesure respectivement pour la glissance et la texture.

B6CHP.FR	Non européen.
B6ULT.FR	Non européen.
B7.FR	Pendule. Pas dynamique ni vraie grandeur.
B10E.FR	N'a mesuré que quatre sites.
C3E.FR	Grand nombre de mesures erronées dues à un problème mécanique (voir les coefficients de corrélations médiocres avec les autres SCRIM dans le rapport AIPCR [réf.1, p.105])
C4.FR	Non européen.
D7B.FR	N'a mesuré que 13 sites et les résultats sont en général mal corrélés avec les autres appareils.

Il y a donc au total 21 appareils retenus.

VII.1.2 Texture

Fichiers retenus:

A1.TX	A3E.TX	D2.TX	D5.TX
A2.TX	A4.TX	D3.TX	
A3B.TX ³	A5.TX	D4.TX	

Fichiers écartés:

A8.TX	Essai statique. Norme non européenne.
A12.TX	Non européen. N'a en outre pas fonctionné correctement.
B8.TX	Essai statique.
B11E.TX	Essai statique. Norme non européenne.

Postérieurement à l'expérience AIPCR (notamment sur base des informations acquises à cette occasion), la norme ISO 13473-1 [réf.2] a été élaborée qui définit la manière de calculer la profondeur moyenne de profil à partir des mesures profilométriques. Il convient donc d'en tenir compte ici, d'autant que l'adoption de cette norme est actuellement envisagée par le CEN/TC227/WG5. Or, le CRR est le seul parmi les équipes participantes à avoir enregistré et archivé tous les profils mesurés sous forme digitale, ce qui permet le retraitement de ces derniers par la nouvelle méthode. Bien que pas vraiment dynamique, c'est la version stationnaire (A5) du profilomètre à laser du CRR qui a été retenue car elle est en fait mobile (tractée à faible vitesse par un véhicule) mais surtout car elle est plus précise que la version proprement dynamique (A4).

³ Retenu bien que d'origine non européenne (Canada) car plusieurs exemplaires sont en service en Europe.

VII.1.3 Sites

Rappelons que chaque site de mesure était constitué de deux demi-sections contiguës de 75 m de longueur chacune, la demi-section B suivant la demi-section A. Le site 3 ayant été écarté car mesuré par un seul appareil, on a, au total, 106 demi-sections.

VII.2. Traitement des données

La base de données de l'expérience AIPCR comporte une série de fichiers (en ASCII) d'extension .FR et .TX pour les résultats de mesures de frottement et de texture, respectivement⁴. Le traitement des données retenues a été effectué selon les étapes suivantes.

1. Chaque fichier *.FR a été complété par une colonne intitulée "RELSP" (pour « relative speed ») donnant pour chaque mesure individuelle la vitesse de glissement réelle S par la formule appropriée :

$$S = V * \sin(\alpha) \quad \text{pour les appareils de type CFT, avec } \alpha = \text{angle d'environnement,}$$

$$S = \tau * V \quad \text{pour les appareils de type CFL, avec } \tau = \text{taux de glissement} \\ \text{(pour les mesures à roue bloquée, } \tau = 1)$$

2. Pour chaque demi-section (A et B) indépendamment et pour chaque appareil on a calculé par les moindres carrés la régression linéaire

$$\ln(F_{mij}) = A_{ij} + B_{ij} * S_{mij}$$

avec F le coefficient de frottement mesuré et S la vitesse relative de glissement. Les résultats suivants ont été archivés:

- A_{ij}: Ordonnée à l'origine
- B_{ij}: Coefficient angulaire
- ρ_{ij}: Coefficient de corrélation
- σ_{ij}: Ecart-type résiduel
- n_{ij}: Nombre de points
- m: N° d'ordre de la mesure dans la série
- i: Appareil considéré
- j: Demi-section considérée

⁴ Ces données initiales étant propriété de l'AIPCR, elles n'ont pas été reprises dans notre Annexe 1 (CD-ROM). Seuls y figurent les résultats découlant de nos nouvelles analyses.

Ces régressions ne seront pas utilisées dans la suite des calculs visant à déterminer l'EFI. Elles sont utilisées ici pour vérifier cas par cas la validité du modèle exponentiel "AIPCR". A l'examen visuel du graphique de chaque équation exponentielle

$$F = F_0 * \exp(- S/S_0)$$

avec $F_0 = \exp(A_{ij})$ et $S_0 = - 1/B_{ij}$, on a éliminé les séries de mesures présentant une anomalie, telle que: point erratique, pente nulle ou positive, nombre de données inférieures à trois ou concentrées dans une plage de vitesses trop étroite, etc. Seuls 19 cas semblables ont été repérés (sur plus de 2000 séries au total), à savoir les séries suivantes (la **Figure 1** et la **Figure 2** illustrent respectivement : une série normale et une série aberrante) :

<u>Appareil</u>	<u>Demi-section</u>
B1SLP:	26.2A
B3:	24A, 24B
C10:	63B
D2:	62A
D4:	26.2A, 26.2B, 68A, 81.2B, 81.3A, 81.4B,
D5:	26.2A, 26.2B, 33.3A, 33.3B, 81.1A, 81.2A
D6:	17B
D8:	19B

Tous ces graphiques sont visibles en **Annexe 1**.

- On a associé à chaque fichier *.FR un fichier résultat *.FR' qui reprend la liste des demi-sections avec les paramètres A, B, F_0 , S_0 , ρ , σ et n correspondants. Tous ces résultats, y compris ceux qui ont fait l'objet d'une mise à l'écart, sont tabulés dans l'**Annexe 1**.
- On a complété les fichiers FR' avec des colonnes F_{10} , F_{20} , F_{30} , F_{40} , F_{50} , F_{60} , F_{70} , F_{80} et F_{90} c'ad les F recalculés pour les valeurs de S de 10 à 90 km/h, ceci pour mise en ordre et archivage des résultats et pour la visualisation et l'impression ultérieure si nécessaire des figures correspondant aux séries de mesures assorties de leurs paramètres et courbes de régression. Ces résultats sont tabulés dans l'**Annexe 1**.
- On a retraité toutes les mesures de texture effectuées à l'aide du profilomètre à laser du CRR (appareil A5) pour produire les nouvelles valeurs de MPD (profondeur moyenne de profil) selon la norme ISO 13473-1. Nous symbolisons cette nouvelle variable par T_{A5ISO} . Les valeurs moyennes par demi-sections des anciennes valeurs T_{A5MPD} et T_{A5ISO} sont présentées au **Tableau 3** et la **Figure 3** permet de les comparer. La régression linéaire entre les deux valeurs s'écrit :

$$T_{A5ISO} = 0.04 + 0.78 * T_{A5MPD}$$

avec un coefficient de corrélation de 0.988, un écart-type résiduel et une ordonnée à l'origine pratiquement négligeables. On admettra donc la relation de proportionnalité

$$T_{A5ISO} / T_{A5MPD} = 0.78.$$

6. On a constitué un fichier "TEXTURE" donnant pour chaque demi-section les différentes mesures de textures fournies par les appareils retenus (cfr. supra) plus A5/ISO, à savoir :

A1/RMS	A2/RMS	A2/MPD	A2/TDMA	A3B/TX1	A3B/TX2 ⁵
A3E/RGH1	A42/RMS	A42/MPD ⁶	A5/MPD	D2/MTD	D3/RA
D3/RQ	D4/CSMTD	D5/SMTD	A5/ISO		

Les trois fichiers en italique gras sont repris dans l'Annexe 1.

7. On a constitué 11 fichiers nommés "TabX" donnant pour chaque site/section la valeur de "X" fournie par chaque appareil (une colonne par appareil) avec $X = S_0, F_0, F_{10}, \dots, F_{90}$. N'ont pas été considérées les valeurs de F_S pour lesquelles la vitesse S est en-dehors de la plage de mesure réelle de l'appareil sauf cependant les valeurs qui correspondent à la dizaine immédiatement inférieure et à la dizaine immédiatement supérieure à la plage de mesure. Ces fichiers sont repris dans l'Annexe 1.

8. A partir des fichiers de données initiales (un fichier par appareil comportant 52 pages reprenant chacune les mesures sur deux demi-sections):

- on a calculé pour chaque série de mesures (m) par appareil (i) et par demi-section (j) la moyenne $\langle \ln F \rangle_{ij}$ des valeurs de $\ln(F)$ et la moyenne $\langle S \rangle_{ij}$ des valeurs de S et retenu le nombre n_{ij} de mesures dans la série;
- à partir d'ici, les calculs ont été menés séparément pour l'ensemble des appareils utilisant soit des pneus lisses, soit des pneus sculptés, soit tous sans distinction, ce qui se traduit par la présentation des résultats systématiquement en trois exemplaires notés « G » pour « General », « B » pour « Blank » (lisses) et « RP » pour « Ribbed or patterned » (nervurés ou à dessin complexe).
- pour une cinquantaine de valeurs de S_0 allant de 10 à 500 par progression géométrique, on a calculé l'écart-type résiduel σ_{ij} des séries de mesures $\{F_{mij}\}$ par rapport à la courbe d'équation

$$F = \text{EXP}\{\langle \ln F \rangle_{ij} - (S - \langle S \rangle_{ij})/S_0\}$$

qui correspond, dans le graphique $\ln F$ vs. S , une droite de pente variable et passant par le centre de gravité des points représentatifs des résultats de mesures de l'appareil considéré sur la demi-section considérée. Ces graphiques sont visibles dans l'Annexe 1.

⁵ Pour A3B, on a les moyennes sur les trois vitesses de mesure: 30, 60 et 80 km/h.

⁶ Pour A42, on a attribué à chaque demi-section la moyenne des deux, seule valeur fournie par l'appareil.

- on a calculé pour chaque demi-section (j) l'écart-type résiduel moyen global

$$\langle \sigma \rangle_j = \text{SQRT} \left\{ \frac{\sum_i n_{ij} \sigma_{ij}^2}{\sum_i n_{ij}} \right\}$$

pour chaque valeur de S_o .

pour chaque demi-section (j), on a tracé le graphique de $\langle \sigma \rangle_j$ en fonction de S_o et on a déterminé (par interpolation parabolique entre les trois points les plus bas) la valeur S_{oj}^* de S_o qui minimise $\langle \sigma \rangle_j$ pour la demi-section j (voir l'exemple de la **Figure 4**). Ces graphiques sont visibles dans l'**Annexe 1**.

Cette façon de déterminer une valeur « moyenne » de S_o caractéristique de la demi-section mais commune à tous les appareils prend en compte chaque mesure individuelle avec strictement le même poids. Notamment, l'influence de l'écart d'une mesure donnée par rapport au modèle est la même pour toutes les mesures quel que soit l'appareil considéré, quelle que soit la vitesse de mesure et quel que soit le nombre de mesures effectuées par l'appareil sur le site. Cette méthode diffère de celle qui est décrite dans le rapport de l'expérience AIPCR [réf.1, p.128] laquelle effectue un simple moyennage des S_o issus de l'adaptation par régression du modèle exponentiel à chaque série de mesures d'un appareil donné sur le site considéré, ce qui reviendrait, dans notre schéma de traitement, à prendre pour valeur optimum S_{oj}^* la moyenne des S_{oj} de chaque appareil par la formule :

$$S_{oj}^* = \frac{\sum_i (-1/B_{ij})}{\sum_i n_{ij}}$$

Or, cette méthode introduit deux espèces de biais.

Premièrement, les valeurs élevées de S_o ont plus de poids que les valeurs faibles. A la limite, il suffit d'un cas où le coefficient de frottement ne diminue quasi pas avec la vitesse pour que, la valeur de S_o correspondante tendant vers l'infini, celle-ci détermine la moyenne à elle seule.

Deuxièmement, les valeurs de S_o provenant des appareils qui opèrent à faible vitesse de glissement sont plus sensibles aux erreurs de mesures de F que celles qui sont calculées sur une plage plus large de vitesses. Or, on leur accorde le même poids.

La méthode adoptée ici accorde exactement le même poids à chaque mesure individuelle et la valeur optimum de S_o pour une demi-section donnée est celle qui minimise la somme des carrés de toutes les déviations par rapport aux courbes F(S).

La **Figure 5** donne un exemple d'ajustement d'exponentielles de même pente à un ensemble de séries de mesures réalisées par différents appareils sur une même demi-section.

9. Pour toute les valeurs de vitesse de référence S_R allant de 10 à 90 par pas de 10 km/h, on a effectué les opérations suivantes :

- pour chaque mesure (mesure m , appareil i , demi-section j), calcul et tabulation à part avec la vitesse de glissement correspondante S_{mij} en première colonne de la valeur du coefficient de frottement F_{Rmij} ramené à la vitesse de référence par la formule:

$$F_{Rmij} = \exp\{\ln F_{mij} - (S_R - S_{mij})/S_{0j}^*\}$$

- calcul de la valeur moyenne des F_{Rmij} sur tous les appareils pour chaque demi-section:

$$\langle F_R \rangle_j = \sum_m \sum_i F_{Rmij} / \sum_i n_{ij}$$

Cette valeur correspond à la valeur « idéale » (« golden value ») définie dans le rapport de l'expérience AIPCR [réf.1, p.127]. Pour chaque appareil et pour chaque valeur de S_R , on a dessiné le graphique des F_{Rmij} en fonction de $\langle F_R \rangle_j$ en réunissant toutes les demi-sections sur le même graphique (**Figure 6**) et on a calculé les paramètres A_{Ri} , B_{Ri} , ρ_{Ri} et σ_{Ri} de la régression linéaire :

$$\langle F_R \rangle_j = A_{Ri} + B_{Ri} * F_{Rmij}$$

On a ensuite recherché tous les écarts par rapport à la régression qui dépassent $3\sigma_{Ri}$ pour constater qu'en général, lorsque qu'un tel écart se présente; il signale un décalage systématique important de l'ensemble de la série de mesures auquel il appartient. Il s'agit des séries suivantes (exemple **Figure 7**):

- Des graphiques sans distinction des types de pneus :

C1:	61A, 61B, 82.3A, 82.3B
C5	66A, 66B
C8:	26.1A, 26.1B, 82.3A
C9:	26.1A, 26.1B
C10	26.1A, 26.1B, 50A, 50B
D6:	26.1A, 26.1B, 33.1A, 33.1B, 34A, 34B
D8:	81.3A, 81.3B

- Des graphiques particuliers aux pneus lisses :

C8:	26.1B
D2:	12A, 12B
D6:	26.1A, 34A, 34B, 50B, 53A
D8:	81.3A, 81.3B

- Des graphiques particuliers aux pneus sculptés :

B5LKD: 82.2A, 82.2B, 82.3A, 82.3B

C1: 82.1A, 82.3B

A ce stade de l'analyse, ces données ont été conservées; on verra ultérieurement si leur élimination entraîne une amélioration significative de la précision de l'EFI. Tous ces graphiques sont visibles dans l'Annexe 1, y compris ceux qui ont fait l'objet d'une mise à l'écart dans la suite des calculs.

11. On a dessiné (**Figure 8**) le graphique, en fonction de S_R , des valeurs relatives et absolues de l'écart-type résiduel global σ_R sur l'ensemble des mesures. On constate que les valeurs relatives croissent légèrement avec S_R , ce qui s'explique si l'on remarque que dans le diagramme de $\ln F$ en fonction de S , la prédiction de $\langle F_R \rangle_j$ à partir d'une mesure F_{Rmij} se fait à l'aide de droites parallèles de pente $-1/S_{qj}^*$ ce qui fait que les écarts ne varient pas avec le choix de S_R . Or, les écarts relatifs ne sont autres que les écarts sur $\ln F$, d'où le caractère approximativement constant du σ_R relatif. Quant au σ_R absolu, il diminue lorsque S_R augmente de même qu'à valeur de S_0 égale, l'écart entre deux courbes exponentielles décroissantes dans le diagramme de F en fonction de S décroît lorsque S croît.
12. On a dessiné les graphiques des S_{qj}^* en fonction de la mesure de texture T_{ISO} et ce soit en distinguant les appareils à pneus lisses (**Figure 9**) des appareils à pneus sculptés (**Figure 10**), soit en les réunissant tous (**Figure 11**). On constate à vue que 3 sites fournissent des résultats qui s'écartent sensiblement de l'ensemble, à savoir:
 - Les 2 demi-sections du site n°34
 - Les 8 demi-sections du site n°81
 - Les 2 demi-sections du site n°82.2

Le site 81 est en fait la piste d'atterrissage principale de la base aérienne de la NASA à Moron (Espagne). Une explication pourrait être suggérée par l'observation par les participants que ce revêtement, de macrotecture relativement fine ($0.44 < T_{ISO} < 0.57$ mm), semble comporter des granulats faits d'une roche volcanique extrêmement rugueuse au toucher. Il ne s'agit manifestement pas d'erreurs de mesures ou de conditions de mesure anormales puisque les résultats donnés par tous les appareils contribuent à la détermination des S_{qj}^* . Ces cas particuliers méritent donc d'être gardés en mémoire comme justiciables d'investigations ultérieures. Néanmoins, pour l'heure, nous devons les écarter de l'analyse. Ceci fait, on a calculé les paramètres a_{ISO} , b_{ISO} et σ_{ISO} de la régression⁷:

$$S_{qj}^* = a_{ISO} + b_{ISO} * T_{ISO}$$

(sur base des données de l'appareil A5).

⁷ L'indice ISO rappelle que d'autres mesures de texture figurent dans la base de données.

Le site 82 est situé sur une autre base de la NASA à Rota en Espagne. Ici, l'explication pourrait être que des traces de gomme laissées par les pneus d'avions à l'atterrissage étaient présentes à certains endroits des sections de mesure. Peut-être étaient-elles plus étendues ou plus marquées sur les sections 82.2 que sur les deux autres sections voisines.

Le site 34 est le seul revêtement routier de type ESHP constitué de fines pierrailles très abrasives répandues sur une couche d'accrochage en époxy. Le cas est donc analogue à celui de la piste de Moron, quoique beaucoup moins marqué. En outre, ces sections ne se distinguent que dans le cas des pneus lisses.

Ces 12 demi-sections particulières ont été écartées. Les **Figure 12**, **Figure 13** et **Figure 14** montrent les nouveaux graphiques expurgés et les résultats des régressions actualisées sont donnés dans le **Tableau 4**. Notons que dorénavant c'est la profondeur de texture selon la norme ISO qui devra être prise en compte.

Ici, un fait remarquable apparaît, à savoir qu'aucun des trois sites en enrobés drainants ne se distinguent comme on aurait pu le penser vu le caractère particulier de leur macrotexture. Dans le rapport AIPCR, ils avaient été écartés a priori sans autre justification.

13. Enfin, les traitements n°9 et 10 ont été répétés en utilisant les valeurs (S_{qj}^*) de S_{qj}^* prédites à partir des valeurs de profondeur de texture selon l'ISO, ce qui conduit à des valeurs finales de A_{RI} , B_{RI} , ρ_{RI} et σ_{RI} .

VII.3 Séparation entre types de pneus

Les appareils qui mesurent la glissance à l'aide d'un pneu lisse doivent en principe être plus sensibles à la macrotexture du revêtement testé que ceux qui utilisent un pneu sculpté puisque les premiers demandent à la macrotexture d'effectuer tout le travail de drainage tandis que les seconds assurent eux-mêmes en partie ce drainage grâce aux canaux gravés dans leur bande de roulement. Par conséquent, on doit s'attendre à ce que les paramètres du modèle AIPCR pour un site donné diffèrent de façon significative selon le type de pneu, notamment le paramètre S_0 . C'est pourquoi les étapes 8 à 13 ont été répétées en séparant les sous-ensembles d'appareils utilisant soit un pneu lisse (C3B, C5, C6E, C8, C9, C10, D1E, D2, D3, D4, D5, D6, D8), soit un pneu sculpté (B1LKD, B1SLP, B2LKD, B2SLP, B3, B5LKD, B5SLP, C1). Il apparaît en effet que les relations entre S_0 et T_{ISO} (**Figure 12** et **Figure 13**) sont significativement différentes (d'un point de vue statistique⁸) selon le type de pneu. Cependant, la corrélation est sensiblement meilleure lorsque l'on considère l'ensemble des appareils sans distinction entre les pneus. L'écart-type résiduel sur S_0 est de 20 km/h pour l'ensemble alors qu'il est respectivement de 21 et 29 km/h pour les séries correspondant aux pneus sculptés ou lisses. Notons qu'il n'y a pas nécessairement de paradoxe car les valeurs de S_0 diffèrent entre les trois séries puisqu'elles résultent chaque fois d'une nouvelle adaptation optimale par les moindres carrés appliqués à l'ensemble des séries de mesures par demi-section et par appareil.

⁸ Sur base du test de SNEDECOR-FISHER pour la comparaison des pentes.

VII.4 Choix de la vitesse de référence

A ce stade, la prédiction du coefficient de frottement harmonisé, appelons le déjà l'EFI, à partir d'une mesure particulière F_{mij} à la vitesse S_{mij} se fait par la formule⁹

$$EFI_j = A_{Ri} + B_{Ri} * F_{mij} * \exp\{(S_{mij} - S_R)/(a_{ISO} + b_{ISO} * T_{ISO})\}$$

Les différents appareils opèrent dans des plages de vitesses différentes. Or, un appareil capable de mesurer à la vitesse de référence S_R pourra se passer de la connaissance de la macrotecture, l'argument de l'exponentielle ci-dessus s'annulant. En général, l'importance de la prise en compte de la mesure de texture sera d'autant plus grande que la vitesse de mesure S_{mij} sera plus éloignée de la vitesse de référence. Par conséquent, plus l'écart entre la plage de mesure d'un appareil et S_R sera grand plus sensible sera l'influence de toute imprécision de l'appareil x utilisé pour la mesure de texture (du fait des erreurs de mesure sur T_x aussi bien que de l'inexactitude de la formule de prédiction de S_{q^*}) sur l'exactitude de la prédiction de l'EFI par cet appareil. Afin de minimiser cette source d'erreur, il convient donc de choisir une valeur de S_R qui corresponde, dans un certain sens, à la moyenne des vitesses pratiquées par les différents appareils. Cette vitesse de référence optimale sera plus précisément celle qui minimise l'écart-type calculé sur l'ensemble des demi-sections j des différences entre d'une part l'EFI $_x$ obtenu en utilisant la prédiction de S_{q^*} à partir d'une autre mesure de texture T_x que la mesure normalisée ISO, les paramètres A_{Ri} et B_{Ri} restant inchangés puisqu'ils font partie de la définition de l'EFI, et d'autre part sa valeur « vraie » $\langle F_R \rangle_j$. En effet, l'EFI étant défini sur base de la mesure nouvellement normalisée T_{ISO} , on peut considérer comme représentatives de la source d'erreurs due à la mesure de la texture, les différences de prédictions de S_{q^*} entre les différentes méthodes de mesure de texture retenues et la mesure ISO. Les fichiers relatifs aux mesures de texture ne donnent que les valeurs moyennes par demi-section. Ni les écarts entre mesures répétées, ni les écarts entre mesures ponctuelles réparties sur la section n'ont été archivés. Par conséquent, la méthode proposée pour déterminer une valeur optimale de la vitesse de référence ne prend pas en compte les erreurs intrinsèques de mesures (notamment la répétabilité), mais seulement l'inexactitude ou l'incertitude sur la formule de prédiction de S_{q^*} .

On a donc calculé l'estimation E_{Rmixj} de $\langle F_R \rangle_j$ à partir de toutes les F_{mij} et pour toutes les vitesses de référence par la formule

$$E_{Rmixj} = A_{Ri} + B_{Ri} * F_{mij} * \exp\{-(S_R - S_{mij})/S_{oxj}^{**}\}$$

dans laquelle

$$S_{oxj}^{**} = a_x + b_x * T_{xj}$$

ce qui donne

$$E_{Rmixj} = A_{Ri} + B_{Ri} * F_{mij} * \exp\{-(S_R - S_{mij})/(a_x + b_x * T_{xj})\}$$

⁹ L'indice j sous EFI rappelle que l'EFI caractérise une demi-section indépendamment de la méthode de mesure utilisée.

On calcule ensuite les moyennes quadratiques absolue et relative des différences entre E_{Rmixj} et $\langle F_R \rangle$ en sommant sur toutes les mesures de friction effectuées par tous les appareils sur tous les sites et en sommant en outre sur toutes les mesures de texture autres que ISO.

$$\sigma_{R,x,abs} = \text{SQRT} \left\{ \sum_x \sum_j \sum_i \sum_m (E_{Rmixj} - E_{Rmi,ISO,j})^2 / \sum_x \sum_j \sum_i \sum_m 1 \right\}$$

$$\sigma_{R,x,rel} = \text{SQRT} \left\{ \sum_x \sum_j \sum_i \sum_m [(E_{Rmixj} - E_{Rmi,ISO,j}) / E_{Rmi,ISO,j}]^2 / \sum_x \sum_j \sum_i \sum_m 1 \right\}$$

Les écarts-types obtenus (**Figure 15** et **Figure 16**) en fonction de la vitesse de référence exhibent un minimum aux environs de $S_R=30\text{km/h}$, valeur que nous proposons dorénavant pour la définition de l'EFI. Dès lors, on peut donner les paramètres de régression permettant à chaque appareil de prédire cet EFI, soit sans distinction du type de pneu (1^{ère} partie du **Tableau 5**), soit selon le type de pneu (2^{ème} partie du **Tableau 5**).

VII.5 Répétabilité de l'EFI.

La répétabilité de chaque méthode de mesure de F a été étudiée et rapportée dans le rapport AIPCR [réf.1, p.45]. Elle portait sur les écarts entre mesures répétées dans les mêmes conditions, notamment à la même vitesse de consigne¹⁰. Ce qui nous occupe ici, c'est la répétabilité de la valeur de l'EFI quelle que soit la vitesse pratiquée puisque la prise en compte de la texture n'est autre qu'une correction de l'influence de la vitesse qui ramène l'EFI à une vitesse de référence fixe. Comme déjà signalé plus haut, on ne possède de mesures répétées que pour la glissance et non pour la texture, laquelle n'a été archivée qu'en valeur moyenne par demi-section. Par conséquent, la répétabilité de l'EFI considérée ici suppose que les mesures de F sont répétées et converties en termes d'EFI en utilisant une même valeur de T mesurée une seule fois sur le site considéré.

On a donc calculé la répétabilité de l'EFI par demi-section par les formules normalisées [réf.4]:

$$\begin{aligned} N &= \sum_i 1 \\ n_{ij} &= \sum_m 1 \\ \mu_{ij} &= \sum_m \text{EFI}_{est,mij} / n_{ij} \\ \sigma_{ij} &= \text{SQRT} \left\{ \sum_m (\text{EFI}_{est,mij} - \mu_{ij})^2 / (n_{ij} - 1) \right\} \\ \sigma_{rj} &= \text{SQRT} \left\{ \sum_i (n_{ij} - 1) \sigma_{ij}^2 / (\sum_i n_{ij} - N) \right\} \\ r_j &= 2\sqrt{2} \sigma_{rj} \end{aligned}$$

¹⁰ Bien que, très souvent, les vitesses étaient relativement différentes de la consigne, ce qui est de nature à influencer les valeurs de répétabilité.

Ces calculs ont été effectués d'une part sur les données expurgées qui servent à la définition de l'EFI et d'autre part sur les données initiales intégrales non-expurgées. Les résultats sont donnés au **Tableau 6**. En moyenne sur l'ensemble des sites, et selon les formules normalisées :

$$J = \sum_j 1$$

$$r = \sum_j r_j / J$$

on obtient une répétabilité de 0.08 à 0.10 selon que l'on considère les données expurgées ou non expurgées. On remarquera que le fait de traiter les appareils en une ou deux classes séparées selon le type de pneu utilisé n'influence pratiquement pas la répétabilité de l'EFI.

VII.6 Reproductibilité de l'EFI

La détermination de l'EFI nécessitant une mesure de glissance et une mesure de texture, en toute rigueur la reproductibilité dépend à la fois des deux types de mesures. Elle est en l'occurrence caractérisée par l'écart-type des différences de valeurs de l'EFI - toutes choses égales - entre paires de systèmes de mesure différents. Par système de mesure, on doit comprendre l'association d'une méthode de mesure de F et d'un appareil qui délivre une mesure de T conforme à la norme ISO. Bien que les deux mesures, friction et texture, puissent être combinées dans un même engin comme dans le cas des SCRIMTEX, les appareils de mesures de F et de T ne doivent pas, en principe, être considérés comme appariés, mais plutôt comme indépendants, c'ad que n'importe quelle méthode de mesure de F peut être associée, pour une campagne de mesures donnée, à n'importe quelle méthode de mesure de T_{ISO}. C'est, en tout cas, une hypothèse qui nous place du côté de la sécurité en maximisant les déviations possibles. Dans ces conditions, la reproductibilité globale de l'EFI à la vitesse de référence optimale S_R=30 km/h devrait être caractérisée par les écarts entre paires de systèmes de mesure (F, T_{ISO}), toutes les combinaisons possibles étant prises en compte. Malheureusement, seul notre appareil est en mesure de donner les valeurs ISO des textures considérées dans l'expérience AIPCR. Par conséquent, il ne nous est pas possible d'effectuer l'estimation de la reproductibilité de l'EFI à partir de couples variés de mesures (F, T_{ISO}). Le calcul ci-dessous ne prend donc en compte que les déviations de la prédiction de l'EFI dues à l'utilisation d'appareils de mesure de friction différents, la mesure de texture étant supposée effectuée avec le même appareil. Dans ces conditions, la reproductibilité de l'EFI se calcule comme suit, selon les formules normalisées [réf. 4]:

$$n_j = \{(\sum_i n_{ij})^2 - \sum_i n_{ij}^2\} / \{(N-1) \sum_i n_{ij}\}$$

$$\mu_j = \sum_i n_{ij} \mu_{ij} / \sum_i n_{ij}$$

$$\sigma_{Rj}^2 = \{(\sum_i n_{ij} (\mu_{ij} - \mu_j)^2) / (N-1) - \sigma_{Tj}^2\} / n_j$$

$$R_j = 2\sqrt{2} \text{ SQRT}(\sigma_{Rj}^2 + \sigma_{Tj}^2)$$

$$R = \sum_j R_j / J$$

Les résultats sont donnés dans le bas du **Tableau 6**. Suivant que les données sont expurgées ou non-expurgées, on obtient des valeurs de reproductibilité globale de l'EFI comprises entre 0.14 et 0.17. Ici, comme pour la répétabilité, la considération séparée des deux types de pneus n'apporte pas d'amélioration significative.

La reproductibilité de l'EFI peut être appréciée sous un autre angle : celui de l'harmonisation entre les diverses méthodes de mesure. Prenons l'exemple de deux appareils belges ayant participé à l'expérience AIPCR à savoir le SCRIM du LIN et l'Odoligraphe du MET et comparons leurs résultats de mesure sur un même demi-site et à la même vitesse. La **Figure 26** et la **Figure 27** montrent la distribution des écarts entre les deux mesures respectivement sur base du coefficient de frottement (CFT) évalué par chaque appareil selon sa méthode propre et sur base du coefficient de frottement harmonisé, c'est-à-dire l'EFI. On constate que le passage à l'EFI non seulement réduit significativement l'écart absolu moyen, en l'occurrence de 0.08 à 0.01 mais l'écart-type est également réduit de 0.08 à 0.05. Cette quasi annulation de l'écart moyen n'est autre que le but recherché par l'harmonisation à savoir : permettre aux différents appareils d'exprimer leur résultats dans une même échelle de coefficient de frottement.

VII.7 Exactitude de l'EFI

Il n'existe pas de valeur absolue, exacte du coefficient de frottement pneu/revêtement vu le grand nombre de facteurs en jeu et la difficulté, voire l'impossibilité pratique de définir, maintenir et reproduire des surfaces et/ou des pneus de référence qui pourraient servir d'étalons stables. En fait, l'EFI est une référence « flottante » susceptible de dériver avec l'ensemble des appareils sur lesquels sa définition est basée. Par conséquent, l'exactitude de la valeur de l'EFI n'a pas de sens. Néanmoins, on pourrait considérer l'exactitude d'un appareil donné comme la précision avec laquelle il approche de la valeur de l'EFI. Dans ce sens, l'exactitude de l'appareil (i) ne serait autre que l'écart-type résiduel σ_i de la régression qui détermine les paramètres A_i et B_i tels que repris dans le **Tableau 5**. En moyenne sur l'ensemble des appareils, on obtient un écart-type résiduel sur la prédiction de l'EFI de 0.050 (en valeur relative : 9.4 %) tous types de pneus confondus et de 0.047 (en valeur relative : 9.0 %) si l'on traite séparément les pneus de type B de ceux de type RP.

VII.8 Sensibilité de l'EFI aux imprécisions sur l'estimation de S_{0j}^*

La prédiction (S_{0j}^{**}) de S_{0j}^* à partir de la profondeur de texture (**Figure 14**) est entachée d'une imprécision qui peut être décrite par l'écart-type résiduel par rapport à la régression

$$S_{0j}^{**} = a + b * ETD_{ISO}$$

lequel vaut $\sigma_{Sp} = 20$ km/h après élimination des données aberrantes. L'imprécision qui en résultera sur la prédiction de l'EFI dépendra de l'écart entre la vitesse de glissement pratiquée et la référence de 30 km/h et aussi du niveau de frottement mesuré. L'écart-type σ_{EFI} de cette source d'erreurs potentielles s'obtient par dérivation de la formule donnant l'EFI par rapport à S_p :

$$\sigma_{\text{EFI}} = \sigma_{\text{Sp}} * B * F * ((30-S)/(S_{\text{oj}}^{**})^2) * \exp((S-30)/S_{\text{oj}}^{**})$$

ou, d'une façon générale, puisque A et B sont voisins respectivement de zéro et de l'unité, en remplaçant σ_{Sp} par sa valeur et en éliminant F pour faire apparaître EFI:

$$\sigma_{\text{EFI}} = 20 * \text{EFI} * \text{ABS}((30-S)/(S_{\text{oj}}^{**})^2)$$

Les valeurs de σ_{EFI} sont tabulées du Tableau 10 au Tableau 15.

VIII. Campagne de mesures complémentaires (SSTC 1997)

Rappelons que l'objectif de cette campagne de mesures est de chercher à étendre la validité de l'IFI au cas des revêtements à texture anisotrope (béton de ciment strié), aux revêtements à texture ouverte (enrobé drainant, revêtement mince à texture ouverte, revêtement mince discontinu, revêtement ultra-mince grenu) et aux matériaux spéciaux (enduit superficiel à haute performance), insuffisamment pris en compte dans l'expérience AIPCR. Ceci nécessite une campagne de mesures sur routes.

VIII.1 Sélection des sites

La sélection de 25 sites de mesure est présentée au **Tableau 7**. L'échantillonnage comporte : 8 revêtements classiques (1 enduisage, 3 bétons bitumineux type I, 4 bétons de ciment dénudés) et 17 revêtements spéciaux (4 enrobés drainants, 1 enduit superficiel à haute performance, 1 béton de ciment drainant, 1 béton bitumineux type II 0/10, 1 béton de ciment dénudé fin 0/7, 5 revêtements minces à texture ouverte, 2 revêtements ultra-minces grenus, 1 revêtement mince discontinu, 1 béton de ciment strié).

VIII.2 Appareillage utilisé

On a utilisé l'Odoliographe du MET et le SCRIMTEX du LIN. Le premier est le même appareil qui participa à l'expérience AIPCR. Le second est un nouvel appareil en principe de caractéristiques et de performances identiques à celles du SCRIM du LIN qui participa à l'expérience AIPCR.

VIII.3 Déroulement de la campagne

Toutes les mesures prévues ont été effectuées sauf sur les sites 15 et 25 devenus impraticables à l'époque de la campagne de mesure. Les mesures de glissance ont été effectuées du 1er au 7 avril 1997. Les mesures de textures ont été effectuées du 8 avril au 21 mai 1997. Les conditions de mesure ont été strictement identiques à celles de l'expérience AIPCR. Notamment, les sections de 150 m ont été divisées en deux et les résultats donnés pour chaque demi-section de 75 m, les mesures de glissance ont été répétées à raison de deux passages à chacune des trois vitesses de consigne, à savoir: 30, 60 et 90 km/h. Les mesures de texture ont été effectuées à raison de quatre points de mesure par demi-section dont les valeurs moyennes ont été rapportées.

VIII.4 Résultats

Les résultats détaillés sont donnés en **Annexe 1**. Les données réduites, notamment les paramètres de la régression exponentielle sur les mesures de friction en fonction de la vitesse de glissement, sont rassemblés dans le **Tableau 8** et le **Tableau 9**.