

Classification et inventaire des indicateurs de la texture superficielle des revêtements des chaussées

Gabriele BOSCAINO
Université de Palerme (Italie)

Filippo G. PRATICO
Université de Reggio de Calabre (Italie)

RÉSUMÉ

La texture des revêtements routiers exerce une influence fondamentale sur les principaux paramètres techniques et économiques des systèmes de locomotion sur pneu.

Cependant, la structure logique, le calcul et les techniques de définition et de mesure des descripteurs sont à ce jour plutôt hétérogènes. Il est donc souhaitable de parvenir à une interprétation unifiée de l'ensemble des descripteurs.

Les liens existant entre les paramètres et les performances fonctionnelles ont été établis et les indicateurs se rapportant à la surface des chaussées ont été classés.

DOMAINE : Routes

ABSTRACT

The texture of road surfaces has a fundamental influence on the main technical and economical aspects of road transport systems.

However, the logical structure and computation techniques for defining and measuring the indices are still somewhat heterogeneous. It is therefore desirable to obtain a unified interpretation of all the indices.

The paper establishes the links between the functional performances and the texture indices.

Introduction

De nombreuses définitions du terme « texture » existent au plan international, de même qu'il existe de nombreuses classes de sous-ensembles, selon le domaine dimensionnel considéré (micro, macro, méga, irrégularités) [1, 2, 4, 7, 9].

Toutes admettent que l'interface entre la couche supérieure du revêtement (enrobé bitumineux ou béton), et l'atmosphère peut être décrite en termes de déviation par rapport à un plan euclidien (surface en \mathcal{R}^3 , profil en \mathcal{R}^2 , dimension fractale, etc.). Par ailleurs, le fonctionnement du système « chaussée-véhicule » repose justement sur l'utilisation de cette surface-limite pour la transmission des forces tangentielles de contact pneumatique-chaussée, dont le travail (fourni par une source énergétique chimique) permet le déplacement des personnes et des marchandises.

Les relevés, l'analyse et le contrôle des caractéristiques de l'entité de texture T (fig. 1, [15]) ont donc une importance fondamentale.

T agit notamment sur :

- les mécanismes d'interférence entre les ondes lumineuses et le plan de la chaussée ;
- le contrôle de la direction et de la cinématique du véhicule (paramètres macroscopiques d'adhérence) ;
- les phénomènes associés d'interaction chaussée-substances liquides-pneumatiques (drainage, éclaboussement, etc.) ;
- la production de sollicitations mécaniques (états de déformations et vibrations, etc.) au niveau de l'enrobé, des corps solides en contact (véhicules et ouvrages) et de l'atmosphère (bruit de roulement intérieur et extérieur, etc.) ;
- le rendement du système, notamment la perte d'énergie par résistance au roulement, la consommation de carburant, l'usure des pneus, etc. et les émissions de gaz.

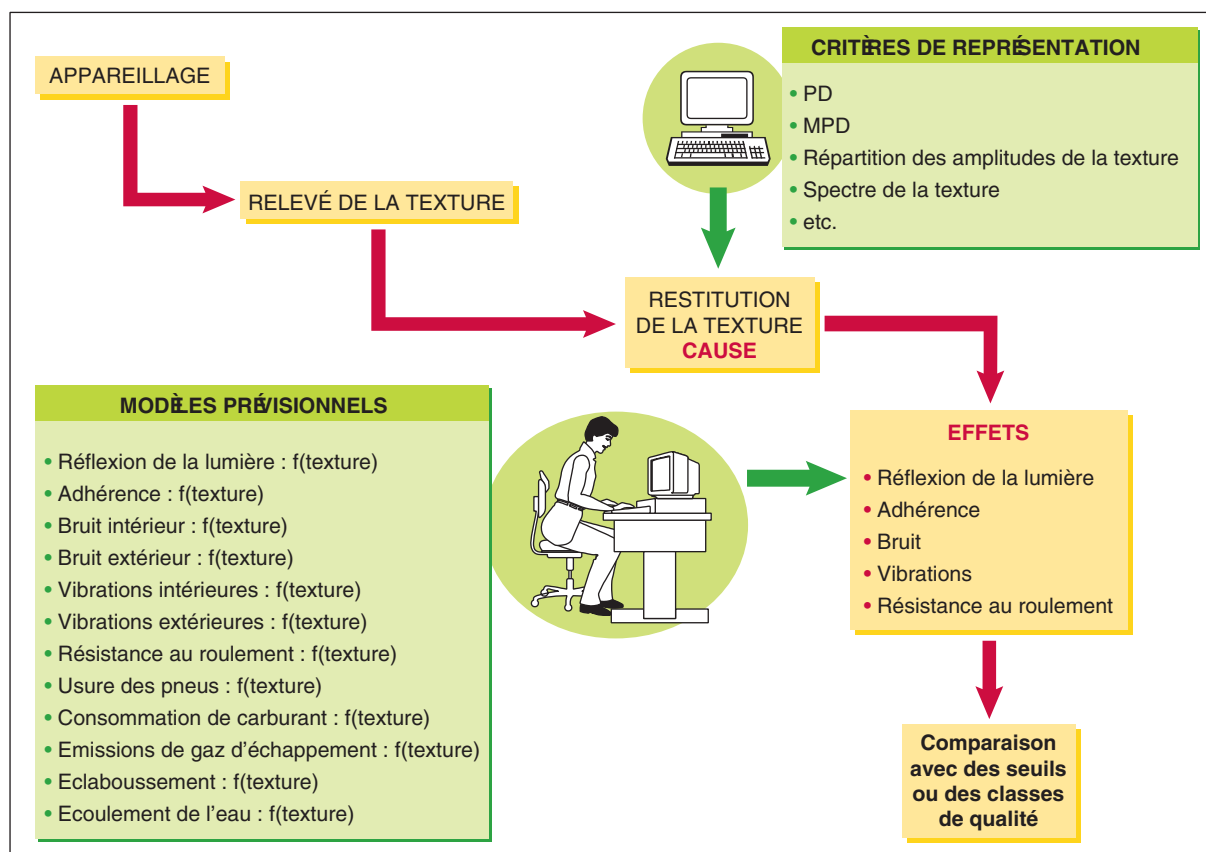


Fig. 1 - Problèmes relatifs à l'analyse de la texture pour optimiser les performances de la surface de la chaussée.

Ces actions interfèrent directement avec la satisfaction des exigences imposées globalement aux systèmes de transport, comme :

- l'application de normes de sécurité appropriées, concernant les propriétés d'adhérence, d'intégrité mécanique, de réflexion de la lumière et de confort vibratoire et acoustique ;
- la diminution des nuisances environnementales (vibrations, bruit et gaz d'échappement) ;
- la maîtrise des variables de consommation (pneus, carburant) et d'offre (niveau du service offert aux usagers, temps de parcours, etc.).

L'ensemble des activités et des stratégies devant garantir le maintien au cours du temps de ces caractéristiques nécessite des instruments de mesure, des méthodes d'analyse et de calcul permettant une maîtrise de l'entretien consciente, motivée et efficace, pour assurer la permanence des paramètres de surface.

Compte tenu de ce qui précède et de l'importance stratégique d'une articulation rigoureuse de l'analyse de ce sujet amplement abordé dans la littérature scientifique, il est utile de bâtir et de valider un cadre référentiel commun à l'analyse et à la codification de la structure logique des paramètres de texture et à leur catalogage.

Contraintes imposées par le processus de recueil des données

Les procédés cognitifs et décisionnels associés à la texture T dépendent des *mesures* prises sur site ou en laboratoire.

Toute *méthode de relevé* emploie des *dispositifs expérimentaux et de mise en œuvre*, indispensables à la détermination d'*indicateurs* de description de la texture.

Le but de toute méthode de relevé du relief d'une surface est de restituer (graphiquement ou numériquement) tous les aspects et toutes les particularités de celle-ci.

Toutefois, les relevés effectués puis soumis à l'analyse ne sont jamais le reflet exact de l'état réel du revêtement, s'agissant d'entités géométriques identifiées par une succession de « hauteurs » qui approchent, discrètement, les hauteurs réelles. Pour que cette approche soit correcte et représentative, il est donc nécessaire de poser un nombre considérable de *conditions*. Parmi celles-ci :

- le caractère représentatif et la dimension adéquate de l'échantillon,
- la qualité des techniques de restitution et de représentation.

Afin que ces contraintes soient satisfaites, il est plausible d'attribuer à l'élément T (interprété, par exemple, en tant qu'ensemble de n couples x, z) des conditions de stationnarité et d'ergodicité essentielles à la définition et à l'utilisation d'un certain nombre d'indicateurs décrits ici.

Structure des indicateurs de texture

Les écrits scientifiques traitant des indicateurs de texture se caractérisent par la multiplicité et l'hétérogénéité de leur approche.

Les concepts de base des différentes techniques de classification que l'on peut tirer de ces écrits concernent généralement :

- la technologie de relevé (par contact, laser, etc.),
- la typologie du revêtement de référence (indicateurs d'usure classiques ou drainants),
- leurs propriétés logiques et mathématiques.

On suppose ici que les méthodes et les indicateurs permettant d'interpréter la texture peuvent être, en premier lieu, organisés selon une structure logique binaire, par exemple, par bifurcations successives, comme décrit ci-après (fig. 2) :

- **critères extrinsèques** (T_e) ou indirects ; on considère dans ce cas les propriétés dérivées de caractéristiques géométriques particulières comme, par exemple, pour la méthode du drainage [$\rho^2(T_e, T) \gg 0$] ;
- **critères intrinsèques** (T_i) ou directs ou géométriques : en font partie tous les critères fondés sur le relevé des caractéristiques géométriques au sens large y compris, par exemple, l'analyse d'images [$\exists A : T_i = A(x, y)$].

Au niveau de la constitution même de la matière et, plus particulièrement, des mélanges bitumineux et des bétons qui font généralement l'objet de ces études, mais aussi à cause de l'existence de caractéristiques liées à des métrologies profondément distinctes (concernant tantôt la surface d'un grain dur individuel, tantôt l'ensemble des éléments), le besoin d'analyses rapportées à des classes dimensionnelles individuelles s'est par ailleurs manifesté. Cela a été possible grâce aux outils issus de la théorie de l'analyse du signal et, tout particulièrement, de l'analyse de Fourier.

Dans l'ensemble, il est par conséquent plausible de différencier les indicateurs intrinsèques T_i , dont chacun concerne une technique donnée de représentation de la surface (T_{ib}) ou/et du profil (T_{im}), selon les deux ensembles suivants :

- **b.1) Les descripteurs agrégés** [$\partial A / \partial \lambda_i = 0$], pour lesquels l'information fournie ne se réfère pas à la seule classe des fréquences spatiales mais, plutôt, à l'effet de l'ensemble des longueurs d'onde et des amplitudes associées, en un mot de la surface, traduit par un seul indicateur. Parmi les indicateurs stationnaires agrégés, on peut repérer ceux qui se rapportent essentiellement au profil (T_{ima}) et ceux qui se rapportent à la surface (T_{iba}) ;
- **b.2) Les descripteurs espace-fréquence** (ou désagrégés ou spectraux, [$\partial A / \partial \lambda_i \neq 0$]), fondés sur la décomposition du profil en composantes élémentaires (harmoniques), à chacune desquelles correspondent des longueurs d'onde « représentatives » λ_j ainsi que les fréquences spatiales correspondantes $f_{sj} = 1/\lambda_j$; pour ces paramètres, la description de la surface ou du profil peut toujours (et cela de manière intentionnelle) être rapportée à une classe de longueurs d'onde. À cet ensemble appartiennent des paramètres à une seule variable (T_{ismd}) ou à deux variables (T_{isbd}).

Le caractère à une ou deux variables, agrégé ou spectral, des indicateurs intrinsèques peut être aussi transposé à l'intérieur de la classe des indicateurs non stationnaires (T_{in-s}).

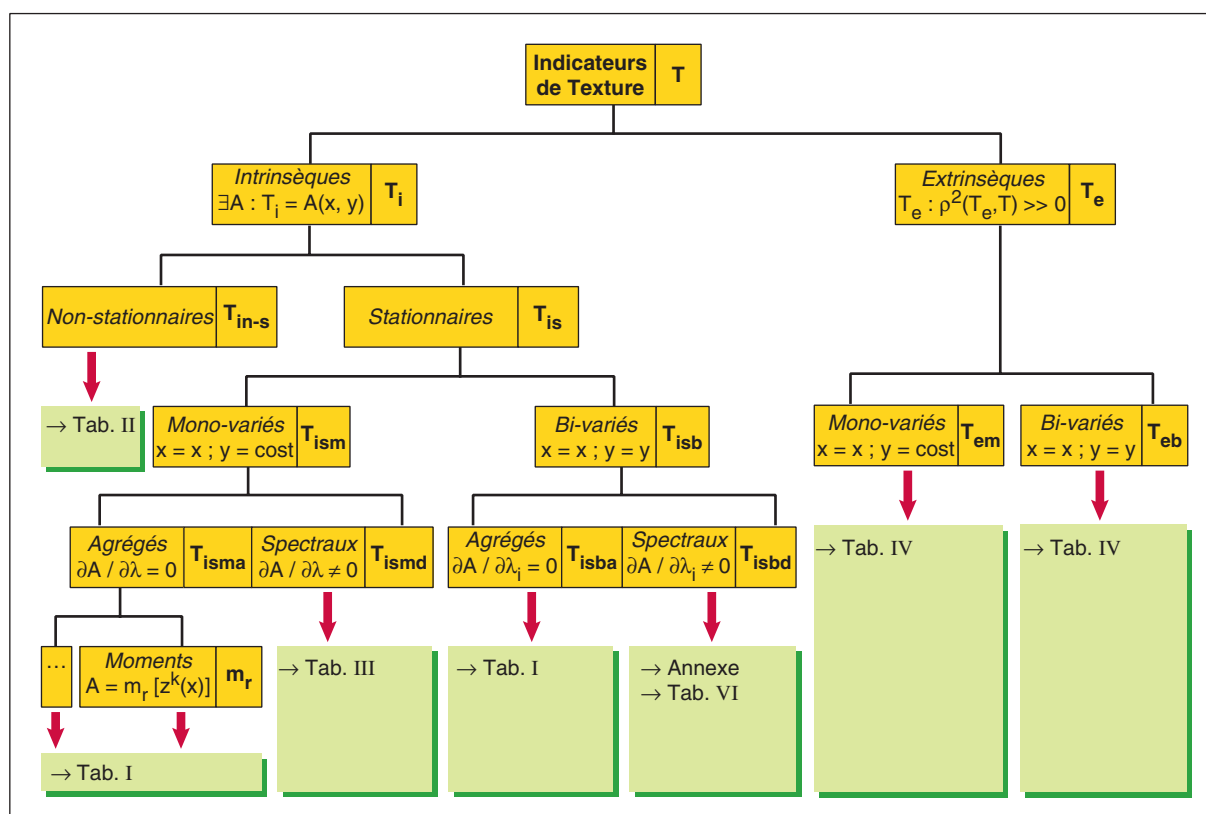


Fig. 2 - Codage des indicateurs de texture du revêtement des chaussées.

Il apparaît clairement que la pluralité des signaux routiers peut être justement ramenée à cette condition de stationnarité. Pour étayer cet argument, il peut être utile de prendre en compte, par exemple, le vaste contenu informationnel pouvant être conféré à la condition de stationnarité (faible, forte, par référence à un signal ou à un « ensemble », etc. [15]).

Toutefois, en ce qui concerne les défauts éventuels tels que les fissures ou les trous, on peut considérer qu'il existe toujours, sous des contraintes particulières, une condition évidente de non-stationnarité analysable par référence à des indicateurs de position (moyenne), de dispersion ou bien de distribution de fréquence.

Plus précisément, si le couple d'axes (x, y) est rapporté à la surface routière non dégradée, les z(x) revêtent des valeurs négligeables à échelle « macroscopique », à l'exception des défauts D. Cela s'exprime à l'aide d'une fonction de pondération h(x') qui propage le long des abscisses la réponse du véhicule à une excitation unitaire en abscisse x_D, réponse qui reste un certain temps significativement différente de zéro :

$$\begin{cases} z(x) \rightarrow 0 & \forall x < x_D, \forall x > x_D + d \\ \exists x' : h(x') >> 0 \end{cases}$$

Ces remarques justifient l'attribution aux descripteurs de propriétés à caractère *transitoire* concernant ces défauts « ponctuels ».

De plus, ceux-ci peuvent être considérés en tant que paramètres relatifs à une excitation de type « choc aléatoire » (*random shock*), avec un début et une fin bien définis, à la manière d'un événement tellurique, d'une explosion, etc.

L'analyse d'un tel phénomène pourrait par ailleurs être effectuée selon des techniques spectrales (même si elles sont formalisées par une référence ponctuelle). Il existe également une classe non spectrale de descripteurs qui concerne ces événements aléatoires tout particulièrement (tableau II, T_{in-s}). L'objectif principal n'est pas tant de déterminer la réponse du véhicule et/ou des occupants, mais plutôt d'évaluer l'ampleur et la gravité de la dégradation.

Analyse et performances des descripteurs de texture

L'ensemble des indicateurs décrits ci-dessus est reporté de manière synthétique dans les tableaux I à IV, tirés de sources bibliographiques nationales et internationales, concernant des disciplines, tantôt du domaine mécanique, tantôt du domaine routier et qui renvoient aux références bibliographiques [1 à 18]. Par l'énumération des descripteurs, une première tentative de classification exhaustive a été réalisée mais d'autres intégrations restent possibles.

Les aspects logiques et mathématiques indispensables à l'évaluation des applications potentielles sont traités dans l'annexe.

Les nombreux paramètres identifiés et décrits sont tous, théoriquement, susceptibles de fournir des informations sur l'état fonctionnel de la surface du plan de la chaussée ; ils concernent, notamment, des performances d'adhérence (A), de bruit (B) et de confort vibratoire (C) (tableaux I à IV). Les correspondances performance-descripteur ont été cernées en partie sur une base scientifique (ce thème a fait l'objet d'un projet de grand intérêt national – PRIN « Progetto di Rilevante Interesse Nazionale » – financé par le ministère de l'université du Gouvernement italien) et, d'autre part, par induction.

Les indicateurs intrinsèques découlent d'une interprétation purement géométrique de la surface de la chaussée.

Ces derniers sont nombreux et il est parfois difficile d'en définir l'utilité effective pour l'ingénieur, mais ils font l'objet d'un nombre croissant d'appareillages sophistiqués et de modèles fondés sur la physique des surfaces de contact.

TABLEAU I
Descripteurs intrinsèques agrégés (fig. 2)

N°	Symbole	Dim.	Définition	Code (fig. 2)	Champ
1	n/L	[L ⁻¹]	Average asperity density (Densité moyenne des aspérités)	T _{isma}	A
2	R _{max}	[L]	Maximum peak-to-valley height (Distance maximale sommet-creux)	T _{isma}	A
3	R _t	[L]	Peak-to-valley height (Distance sommet-creux)	T _{isma}	A
4	R _z	[L]	Average peak-to-valley height (Distance moyenne sommet-creux)	T _{isma}	A
5	MAA, (Σh/n)	[L]	Mean Apparent Amplitude, Average asperity height (Amplitude moyenne apparente)	T _{isma}	A
6	(Σh/n)	[L]	Average Asperity height (Hauteur moyenne des aspérités)	T _{isma}	A
7	(Σh/n)/(L/n)	[L ⁰]	Average shape factor (Facteur de forme moyen)	T _{isma}	A
8	\bar{Z}	[L]	$Z_{\text{moyen}} = \sum_i z_i p(z_i)$. Ligne moyenne, moyenne arithmétique	T _{isma}	A
9	R _a	[L]	$R_a = \sum_i z_i - Z_{\text{moyen}} \cdot p(z_i)$. Average Roughness ou Centre-line average (Rugosité moyenne)	T _{isma}	A
10	R _u	[L]	$Z_{\text{max}} - Z_{\text{moyen}}$. Levelling Depth (Profondeur de nivellement)	T _{isma}	A
11	R _m	[L]	Mean Depth (Profondeur moyenne). La profondeur moyenne des ornières (RMD Rut Mean Depth) selon E1703-E1703M-95 ASTM peut être reliée à ce paramètre.	T _{isma}	A
12	R _p	[L]	$R_p = \sum_i (z_{\text{max}} - z_i) \cdot p(z_i)$. Depth of surface smoothness (Profondeur des aspérités superficielles)	T _{isma}	A
13 14	PD MPD (MPD Short)	[L]	Profile Depth ; Mean Profile Depth (Profondeur du profil ; profondeur moyenne du profil, établie selon des longueurs d'onde comprises entre 2,5 et 100 mm). Le paramètre MPD Short (mesuré, par exemple, à l'aide d'un dispositif Texture Meter monté sur véhicule SCRIM) est en revanche établi selon des longueurs d'onde comprises entre 2,5 et 10 mm.	T _{isma}	A
15	z ₄	[L ⁰]	$z_4 = [\sum (\Delta x_i)_+ - \sum (\Delta x_i)_-] / L$. Paramètre relatif au pourcentage des segments du profil à dénivellement positif	T _{isma}	A
16 17 18 19 20	R _q , σ z SD SMTD CSMTD	[L]	$R_q \approx \sigma \approx z_1 \approx [\sum (z - Z_{\text{moyen}})^2 p(z)]^{0.5}$. Root-mean-square roughness (16. Rugosité moyenne quadratique) ; Standard Root-mean-square (17. Ecart type) ; Standard Deviation (18. Ecart type) ; Sensor Measured Texture Depth (19. Profondeur de texture mesurée par capteurs) ; Corrected SMTD (20. Profondeur de texture mesurée par capteurs et corrigée) ;	T _{isa}	A

TABLEAU I (suite)
Descripteurs intrinsèques agrégés (fig. 2)

N°	Symbole	Dim.	Définition	Code (fig. 2)	Champ
21	TDMA	[L]	σ . Texture depth of macrotexture (Profondeur de la macro-texture)	T _{isa}	A
22	S _k	[L ⁰]	$S_k = \sigma^{-3} \cdot \Sigma(z - z_{\text{moyen}})^3 \cdot p(z)$. Skewness (Coefficient d'asymétrie)	T _{isma}	A
23	K	[L]	$S_k = \sigma^{-4} \cdot \Sigma(z - z_{\text{moyen}})^4 \cdot p(z)$. Kurtosis (Coefficient d'aplatissement)	T _{isma}	A
24	z ₂	[L ⁰]	$z_2 = [\Sigma z'^2 p(z)]^{0.5}$. Valeur moyenne quadratique des dénivellements	T _{isma}	A
25	z ₃	[L ⁻¹]	$z_3 = [\Sigma z''^2 p(z)]^{0.5}$. Valeur moyenne quadratique de la dérivée seconde	T _{isma}	A
26	r _e	[L]	$r_e = r \cdot N_k$. Rayon efficace	T _{isma}	A
27	D _f	[L ₀]	$ = k \cdot u^{1-D_f}$. Dimension fractale D _f	T _{isma}	A
28	W	[L]	Mean groove width (Largeur moyenne des rainures)	T _{isma}	A, B
29	D	[L]	Mean groove depth (Profondeur moyenne des rainures)	T _{isma}	A, B
30	S	[L]	Span (pitch) (Entre-axe maximal entre les vides)	T _{isma}	A, B
31	VarW	[L ²]	Variance in width (Variance de la largeur W)	T _{isma}	A, B
32	VarD	[L ²]	Variance in depth (Variance de la profondeur D)	T _{isma}	A, B
33	VarS	[L ²]	Variance in span (Variance de l'entre-axe maximal)	T _{isma}	A, B
34	NumGRV	[L ⁰]	Nombre de rainures	T _{isma}	A, B
35-36	NumGRVD ≤ (x _i)	[L ⁰]	Number of grooves with depth D less or equal to x _i (Nombre de rainures de profondeur D inférieure ou égale à x _i ; x _i est généralement exprimé en pouces x ₁ ou x ₂)	T _{isma}	A, B
37	NumGRV W ≤ (1/8)	[L ⁰]	Number of grooves with width W less or equal to 1/8" (Nombre de rainures de largeur W – dans la section du profil – inférieure ou égale à 1/8 de pouce (3,175 mm))	T _{isma}	A, B
38	NumGRV G ≤ (1/8)	[L ⁰]	Number of grooves with width W or Depth D less or equal to 1/8" (Nombre de rainures de largeur W – dans la section du profil – ou de profondeur D inférieure ou égale à 1/8 de pouce.	T _{isma}	A, B
39	TAWRG	[L ⁰]	Total area within the 10 foot segments with recognizable grooves (Pourcentage de zone présentant des rainures décelables à l'aide d'appareils)	T _{isma}	A, B
40	MPDwG	[L]	Mean profile depth with grooves (40.MPD établi en prenant en compte les rainures superficielles) ;	T _{isma}	A, B
41	MPDnoG	[L]	Mean profile depth with no grooves (41.MPD établi sans prendre en compte les rainures superficielles)		
42	A _r	[L]	$A_r = n^{-1} \cdot (\Sigma a_{ri})$. Roughness width (Distance moyenne entre les n sommets du profil)	T _{isma}	A
43	A _w	[L]	$A_w = n^{-1} \cdot (\Sigma a_{wi})$. Mean waviness width (Distance moyenne entre les sommets du profil)	T _{isma}	A
44	l _t (c)	[L]	$l_t(c) = \Sigma l_i(c)$. Bearing lenght at height c from mean line (Longueur portante à la hauteur c par rapport à la ligne moyenne)	T _{isma}	A
45	λ _a	[L]	$\lambda = 2\pi R_g / (\text{mean slope})$. Average wavelength (Longueur d'onde moyenne)	T _{isma}	A
46	MTD	[L]	Mean Texture Depth ; Hauteur de sable ; NASA Gease Smear Parameter. Il s'agit d'indicateurs intrinsèques bi-variables dont l'analyse expérimentale permet d'obtenir, de fait, une approximation du rapport entre $\int_s z(x, y) dx dy$	T _{isba}	A
47	HS		et $\int_s dx dy$, un moment d'ordre I. Au niveau de la maintenance, MTD peut être calculé par la relation MTD = 0,2 mm + MPD. Il existe de nombreux autres sigles désignant des indicateurs mesurés à l'aide de différents dispositifs (souvent à haut rendement) et assimilables au paramètre HS.		
48	NASA G.S.P.				
49-54	A, B, C, D, E, F		Paramètres qualitatifs-quantitatifs, concernant essentiellement la macro et la micro texture, définis dans ASTM E770 ; au premier abord, on peut les considérer comme relatifs à l'ensemble des indicateurs intrinsèques, bi-variables, agrégés.	T _{isa}	A

TABLEAU II
Descripteurs intrinsèques agrégés de dégradation (fig. 2)

N°	Symbole	Dim.	Définition	Code (fig. 2)	Champ
55 56 57 58	ACA NTP ARV MAS	[L ⁰]	Descripteurs intrinsèques concernant surtout des typologies individuelles de dégradation et de défauts : 55. Area of cracking ACA (Zone de fissuration, rapport entre l'aire de fissuration et l'aire totale du revêtement ; la zone de fissuration est définie comme la somme des aires des rectangles présentant des fissures) ; 56. Number of standard potholing NTP (trous ; défini en nombre de trous de rayon supérieur à 150 mm et de profondeur supérieure à 25 mm, présents sur la voie sur une longueur de 1 km) ; 57. Ravelled area ARV (indicateur des phénomènes de désenrobage des couches superficielles ; égal au pourcentage de surface sujette au phénomène d'égrenage) ; 58. Le descripteur MAS (Mean Absolute Slope), mesuré, par exemple, à l'aide d'appareils ARAN, concerne la régularité de la surface de la chaussée et est utilisé tout particulièrement pour les revêtements en béton où le seuil admissible supérieur pour un revêtement neuf est égal à 3 mm/m.	T _{in-s}	A, B, C
59 60 61	PSI PCI DS (Amm)	[L ⁰]	Descripteurs intrinsèques (c'est-à-dire dépendant uniquement de caractéristiques géométriques), exprimant de manière synthétique l'état de dégradation de la surface : 59. Le descripteur PSI (Present Serviceability Index), utilisé par l'AASHTO pour la conception de revêtements, est un paramètre représentatif de l'état de dégradation du revêtement. Il est déterminé par la moyenne des variations de dénivèlement du profil longitudinal, la longueur des lésions présentes, la surface des trous et des rapiéçages et la profondeur des ornières. 60. Le descripteur PCI (Pavement Condition Index), adopté par les normes FAA (Federal Aviation Administration), est un indicateur adimensionnel, variable entre 0 et 100 (optimal), représentatif de l'état de dégradation du revêtement (généralement aéroportuaire). 61. L'indice de détérioration DS (Distress), souvent dénommé Amm est égal à $\sum D_{ik}$, D_{ik} étant le degré de sévérité (égal à 0, 1, ..., 3) pour la typologie de détérioration i ($i = 1, \dots, 7$), pour le k -ième sous-tronçon de chaussée. DS se réfère à une zone d'un kilomètre de longueur, discrétisée en n sous-tronçons d'indice k .	T _{in-s}	A, B, C

TABLEAU III
Descripteurs intrinsèques désagrégés (fig. 2)

N°	Symbole	Dim.	Définition	Code (fig. 2)	Champ
62 63 64 65 66 67	PSD PS c_k , L_T a_5 , a_{mega} H_{APL} I_{NBO}	[L ³][L ²] [L ⁰] [L] [L] [L ⁰]	Descripteurs spectraux : 62. Power Spectral Density (Densité spectrale de puissance des amplitudes PSD) ; 63. Power Spetrum (Spectre de puissance, PS) ; 64. Texture amplitudes (Amplitudes de texture, c_k), Texture Level (Niveau de texture, L_T) ; 65. Amplitude de texture associée à la longueur d'onde égale à 5 mm (a_5 , établie en référence aux centres de bande à 4 mm, 5 mm et 6,3 mm) ou à 25 mm (a_{mega} , établie sur la base des amplitudes pour 20 mm, 25 mm et 31 mm) ; 66. Amplitude des irrégularités pour une région de longueur d'onde déterminée (H_{APL}) ; 67. Classe d'indicateurs déterminés en associant une grandeur scalaire comprise entre 0 et 10 à des ondes courtes, moyennes, longues (I_{NBO} , Notation par Bandes d'Onde – NBO [14, 15]). Par extension, en référence au profil transversal du plan de la chaussée, l'indice RMD (Rut Depth Mean)- profondeur moyenne des ornières – peut encore être relié au paramètre H_{APL} selon E1703-E1703M-95 ASTM.	T _{ismd}	A, B, C

TABLEAU IV
Descripteurs extrinsèques (fig. 2)

N°	Symbole	Dim.	Définition	Code (fig. 2)	Champ
68	a, a ₀ ;	[L ⁰]	Descripteurs extrinsèques (liés à la texture mais non à sa géométrie) : 68. a : sound absorption coefficient (coefficient d'absorption (nuisance sonore) ; a ₀ : sound absorption coefficient in normal incidence (coefficient d'absorption en incidence normale → nuisance sonore) ; 69. British Portable Tester Number (BPN, → friction rasante) ; 70. Coefficient d'adhérence transversale CAT (mesuré, par exemple, par SCRIM) ; 71. Nombre de Grip NG (appareil : Grip Tester) 72. Drainabilité ; 73. International Roughness Index (→ Confort) ; 74. Riding Comfort Index (→ Confort) ; 75. International Friction Index.	T _e	A, B, C
69	BPN ;	[L ⁰]			
70	CAT ;	[L ⁰]			
71	NG ;	[L ⁰]			
72	Drainabilité ;	[L ³ /T]			
73	IRI ;	[L ⁰]			
74	RCI ;	[L ⁰]			
75	IFI ;	[L ⁰]			

Il faut ici souligner que bien qu'il soit possible, dans les faits, d'identifier le domaine de pertinence primaire (A, B, C, etc.) de chacun des paramètres décrits, il n'est possible de définir des seuils de performance de référence que dans un nombre de cas limité. Le tableau V présente un cadre de référence possible étendu aux grandeurs techniques et contractuelles auxquelles un ingénieur européen s'intéresse traditionnellement. Les seuils d'acceptation reportés ici (lorsque cela est possible) revêtent un caractère indicatif. Ils sont tirés des écrits scientifiques européens et des cahiers des charges spéciaux les plus utilisés en Italie.

TABLEAU V
Performances et valeurs-limites des paramètres de texture actuellement pris en compte au niveau contractuel

Performances primaires	A Adhérence		B Bruit de roulement			C Confort vibratoire	
Domaine de texture	Micro-	Macro-	Micro-	Macro-	Méga - irrégularités	Macro-	Méga-irrégularités
Indicateur {seuil d'acceptation}	BPN {45 ÷ 55} ; CAT {45 ÷ 65}	HS {0.3 ÷ 0.6} ; CAT {45 ÷ 65} ; Drainabilité {8 ÷ 12dm ³ /min} (*)	a ₀ {0.15 ÷ 0.30}	a ₀ {0.15 ÷ 0.30} ; HS{0.3 ÷ 0.6}	PSD	H _{APL} {4 ÷ 30 mm} ; PSD ; PSI {2.5 ÷ 3}	H _{APL} {4 ÷ 30 mm} ; PSD ; PSI {2.5 ÷ 3} ; RCI {4.5} ; IRI {4 ÷ 6 mm/m} ; MAS {25 mm/m}
<p><i>Note 1</i> Il s'agit généralement de seuils inférieurs, à l'exception de H_{APL}, IRI, MAS, pour lesquels sont fournies les valeurs limites supérieures ;</p> <p><i>Note 2</i> (*) Défini par référence aux enrobés drainants phono-absorbants.</p>							

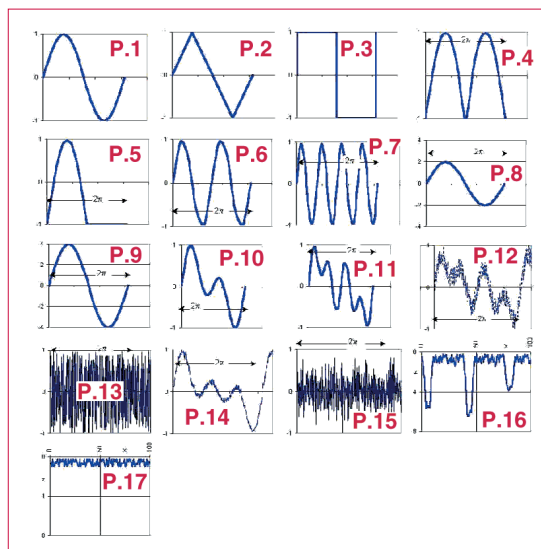
Analyse de la sensibilité des indicateurs

La comparaison des caractéristiques de chaque indicateur et de leur sensibilité aux variations structurales du profil est motivée par l'existence d'un nombre très important d'indicateurs, dont, d'ailleurs, une partie seulement peut être immédiatement interprétée et appliquée dans le cadre routier.

Les valeurs limites de l'ensemble des paramètres extrinsèques sont le fruit d'années d'expérimentations et aboutissent à l'établissement de normes contractuelles. Tel n'est pas le cas, en revanche, pour les indicateurs intrinsèques auxquels on dédie pourtant de plus en plus d'appareils complexes et efficaces. Ajoutons qu'il existe de nombreuses expériences prouvant le contenu informationnel

élevé qu'ils offrent en matière aussi bien de conditions d'adhérence que de conditions de bruit et de confort vibratoire [6, 7, 8, 9].

C'est pourquoi nous avons jugé utile d'analyser dix-sept profils idéaux (fig. 3) ; le critère de choix a été déterminé par la nécessité d'apprécier le rôle des caractéristiques individuelles, notamment les caractéristiques de forme d'onde (profils P.1, P.2, P.3, P.4 et P.5), de longueur d'onde (profils P.1,



a. Définition des profils étudiés.

Indicateur T	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	15	16	22	23	24	25
Profil P					6				12			20				
P.1	0,2	2,0	2,0	2,0	2,0	0,3	0,0	0,6	1,0	1,0	0,0	0,7	0,0	1,5	0,7	0,7
P.2	0,2	2,0	2,0	2,0	2,0	0,3	0,0	0,5	1,0	1,0	0,0	0,6	0,0	1,8	0,4	0,0
P.3	0,2	2,0	2,0	2,0	2,0	0,3	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0
P.4	0,3	2,0	2,0	2,0	2,0	0,6	0,3	0,7	1,3	0,0	0,6	0,6	0,5	1,9	1,4	1,4
P.5	0,2	2,0	2,0	2,0	2,0	0,3	-0,4	0,4	1,4	0,6	0,0	0,8	0,7	1,8	1,0	1,0
P.6	0,3	2,0	2,0	2,0	2,0	0,6	0,0	0,6	1,0	1,0	0,0	0,7	0,0	1,5	1,4	2,8
P.7	0,6	2,0	2,0	2,0	2,0	1,3	0,0	0,6	1,0	1,0	0,0	0,7	0,0	1,5	2,8	11,3
P.8	0,2	4,0	4,0	4,0	4,0	0,6	0,0	1,3	2,0	2,0	0,0	1,4	0,0	1,5	1,4	1,4
P.9	0,2	8,0	8,0	8,0	8,0	1,3	0,0	2,6	4,0	4,0	0,0	2,8	0,0	1,5	2,8	2,8
P.10	0,3	2,0	2,0	2,0	1,2	0,4	0,0	0,5	1,0	1,0	0,0	0,6	0,0	2,3	0,9	1,7
P.11	0,6	2,0	2,0	2,0	1,0	0,6	0,0	0,5	1,0	1,0	0,0	0,5	0,0	1,8	1,5	5,2
P.12	19,0	2,0	2,0	2,0	0,3	4,9	0,0	0,4	1,0	1,0	0,0	0,4	0,0	2,0	11,9	1280
P.13	20,1	1,9	1,9	1,9	0,9	18,3	0,0	0,5	1,0	1,0	0,0	0,6	0,0	1,7	51,5	564
P.14	18,0	0,4	0,4	0,4	0,1	1,8	0,0	0,3	1,0	1,0	0,0	0,5	0,0	3,0	3,4	353
P.15	24,0	1,7	1,7	1,7	0,5	12,0	0,0	0,2	1,0	1,0	0,0	0,3	0,1	3,1	28,5	3130
P.16	0,4	6,8	6,8	6,8	0,9	0,3	1,5	1,2	1,4	4,6	0,0	1,6	1,7	4,9	0,8	1,1
P.17	0,4	0,9	0,9	0,9	0,5	0,2	0,6	0,2	0,4	0,4	0,0	0,3	0,3	1,8	0,5	0,8

b. Valeurs des indicateurs T pour chaque profil.

Fig. 3 - Analyse de la sensibilité des indicateurs pour 17 profils types.

P.6 et P.7), d'amplitude (profils P.1, P.8 et P.9), de composition fréquentielle (profils P.1, P.10 et P.11), d'interaction bruit-signal (profils P.1, P.12, P.13, P.14 et P.15), de présence de fissures et de rainures (profils P.16 et P.17). Pour chaque configuration géométrique, en fonction des définitions fournies précédemment, on a fait correspondre les indicateurs T susceptibles de prendre des valeurs significatives (la numérotation des indicateurs T de la figure 3 coïncide avec celle des tableaux I à IV. Le modèle de référence des différentes configurations est un profil sinusoïdal, périodique en 2π et d'amplitude unitaire.

L'analyse de la sensibilité a permis l'acquisition d'informations fondamentales concernant l'aptitude des descripteurs individuels à cerner et à évaluer les différentes caractéristiques du profil des amplitudes (fig. 4 et tableau A2 en annexe).

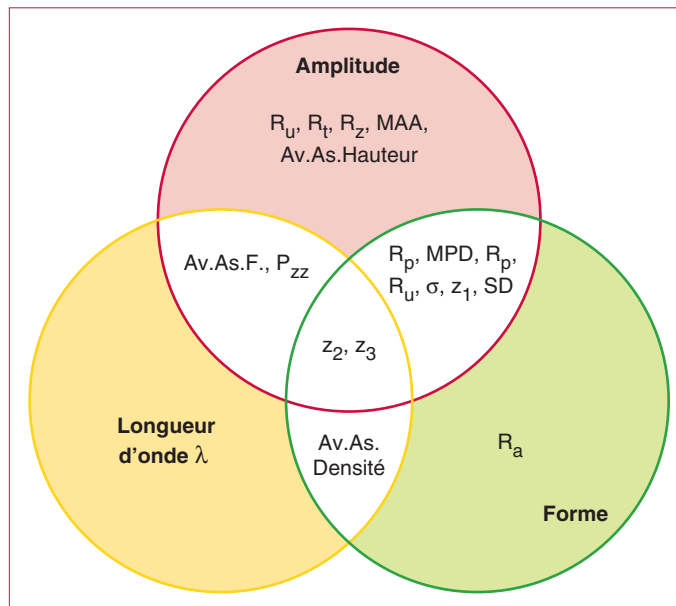


Fig. 4 - Analyse de la sensibilité des indicateurs. Conclusions.

Les techniques de calcul utilisées pour l'analyse de la sensibilité des indicateurs ont été appliquées successivement à deux catégories d'enrobés (fig. 5), l'un de type traditionnel (sx) et l'autre de type drainant et absorbeur de bruit (dx).

Dans ce but, on a eu recours à un système spécifique intégré pour le relevé et l'analyse de la texture superficielle : le SIRAT. Mis au point par le département d'Ingénierie des infrastructures de voirie de l'université de Palerme [16, 17, 18], il est composé de trois modules :

- **PROF.IM (PROFilomètre pour IMages)** : façonneur spécial de lumière, expressément conçu et réalisé pour projeter sur la chaussée une strie lumineuse fine et nette ; celle-ci, en recouvrant les micro- et macro-aspérités de la surface, en suit le profil en l'éclairant. À l'intérieur de l'appareil, il a été prévu un emplacement pour accueillir un appareil photo (*Nikon F70*), avec équipement *macro*, permettant d'obtenir une image du profil ;
- **DIG.IM (DIGitalisation des IMages)** : à l'aide d'un scanner (*Nikon CoolSCAN 2000*) pour pellicules photo *négatives*, à très haute résolution (environ un million de pixels pour chaque mm^2 de photogramme), les « données » de profil sont numérisées et stockées sur PC en vue de leur traitement ;
- **SCAN.IM (Balayage de l'image)** : logiciel dédié qui identifie le profil $z(x)$ par micro-lecture en pixels des photogrammes numérisés, en permettant leur restitution en tant que *matrice colonne* en coordonnées $(x ; z)$ dans un format de fichier compatible avec les logiciels de calcul les plus connus (Excel, MatLab, etc.).

Nous avons pu de cette manière évaluer l'efficacité descriptive des indicateurs intrinsèques agrégés et spectraux au niveau de la caractérisation des performances de la couche. En ce qui concerne l'estimation prévisionnelle des caractéristiques d'adhérence sur sol mouillé, par exemple, nous

avons constaté l'efficacité des indicateurs de classe MPD (fig. 5), dont les valeurs sont, en effet, plus élevées pour les surfaces présentant des coefficients d'adhérence plus importants, à vitesse élevée, sur sol mouillé (dans ce cas précis, les revêtements drainants).

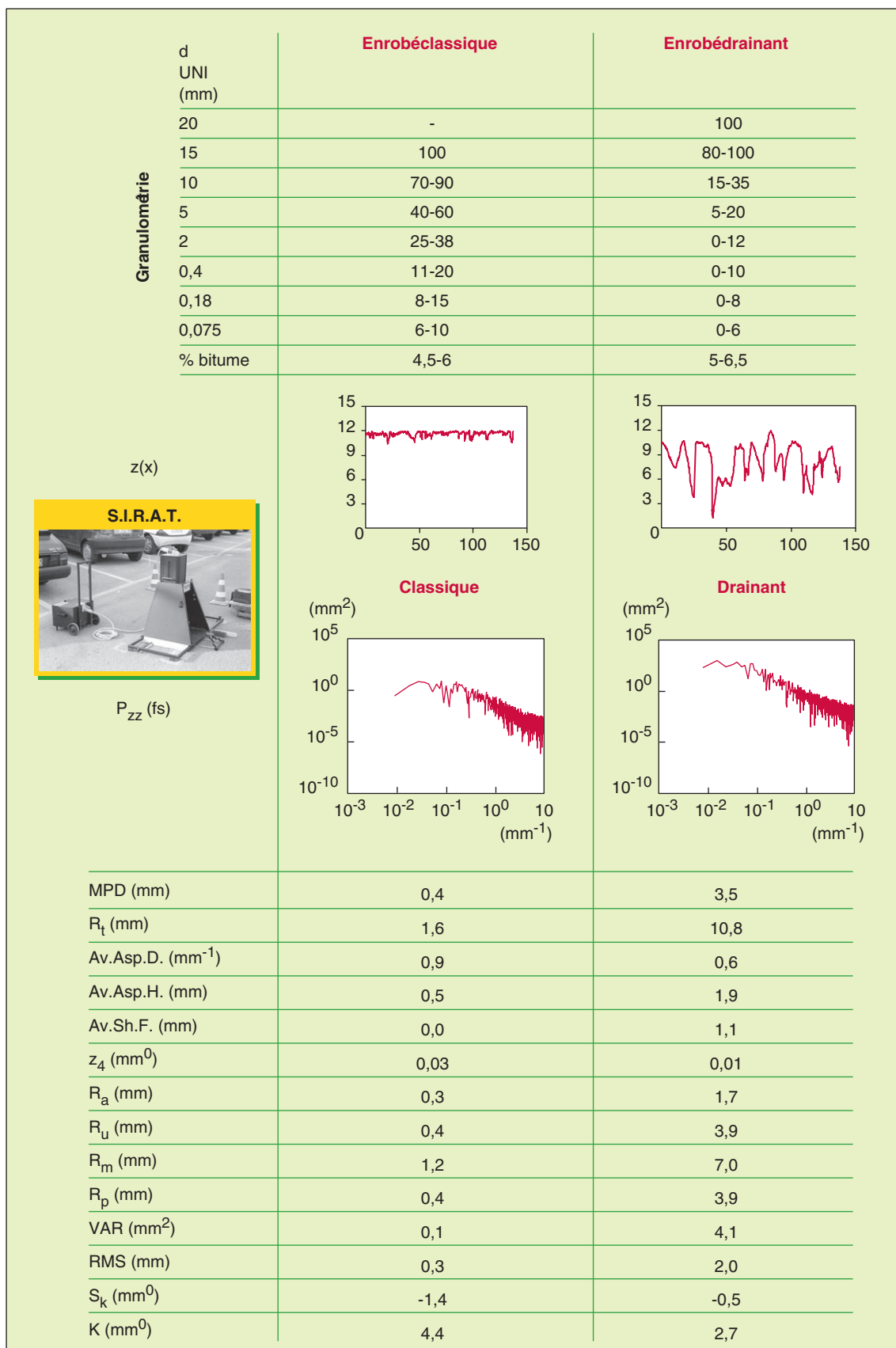


Fig. 5 - Indicateurs intrinsèques spectraux (en haut) et agrégés (en bas) mesurés avec SIRAT.

Conclusion

La couche de surface des chaussées peut jouer le rôle de « révélateur » au niveau de la superstructure, aussi bien en ce qui concerne les caractéristiques strictement fonctionnelles (adhérence, régularité, rugosité, propriétés optiques, drainabilité, etc.) que pour les caractéristiques proprement mécaniques (portance, résistance à la fatigue pour des températures moyennement basses, résistance à l'orniérage pour des températures moyennement hautes, etc.).

Elle constitue en outre un support technique indispensable pour définir la stratégie d'entretien la plus appropriée (traitements superficiels, recharges, scellements, démolitions, etc.). Les présentes études ont débuté par la systématisation et le classement des indicateurs traités dans le cadre d'études internationales, y compris dans d'autres secteurs disciplinaires.

Cette analyse s'est concrétisée par des tests spécifiques concernant la satisfaction des propriétés fondamentales des signaux (stationnarité en premier lieu). Sur la base des résultats ainsi obtenus, nous avons jugé possible de codifier un arbre des descripteurs structuré par catégories de stationnarité, spectralité, dépendance vis-à-vis d'une ou plusieurs variables indépendantes et caractère intrinsèque. Enfin, pour estimer la réponse des indicateurs aux différents signaux type, nous avons établi dix-sept fiches de confrontation et nous avons présenté deux applications expérimentales.

Les analyses et les résultats des calculs ne permettent pas de définir une « Science de la texture » pouvant être mise en œuvre sans autres études. Toutefois, avec un certain optimisme, il est possible d'affirmer que ces recherches vont permettre d'accentuer l'importance des indicateurs spectraux et de leurs prescriptions dans le cadre des tableaux spéciaux de normalisation. En effet, leur portée pourrait et devrait croître de plus en plus, permettant, tout particulièrement, une synergie accrue et souhaitable au niveau technique entre les exigences classiques (adhérence, régularité, portance, etc.) et les exigences environnementales (minimalisation des bruits de roulement, etc.). En conclusion, l'importance des descripteurs typiquement « performanciers » (adhérence, etc.) souvent mesurés à l'aide de systèmes à haut rendement, tout comme celle des descripteurs pouvant être relevés *de visu* et concernant l'état de dégradation d'ensemble, sont toutes deux confirmées.

ANNEXE

Descripteurs intrinsèques agrégés et spectraux

Descripteurs intrinsèques agrégés

Les critères intrinsèques peuvent être introduits en considérant, dans l'espace défini par les trois coordonnées x, y, z , une portion de la surface de la chaussée en tant que fonction normale d'équations paramétriques : $x = x(u, v)$ $y = y(u, v)$ $z = z(u, v)$.

Une fois la direction orthogonale du plan de chaussée associée à l'axe z , on impose l'équation $z = A(x, y)$.

Le caractère réel de $A(x, y)$ et de $z(x)$ en garantit la possibilité théorique d'analyse, à l'aide des propriétés différentielles projectives (existence des plans tangents de référence, etc.) et métriques (utilisation d'abscisses curvilignes, indicateurs métriques de courbure, etc.) bien connues.

Dans une représentation non désagrégée en classes de longueurs d'onde, ils peuvent être classés en fonction des moments $m_r[z^k(x)]$ d'ordre r des dérivées k -èmes $z^k(x)$, où $z^0(x)$ est $z(x)$ et $z^k(x)$, la dérivée k -ème de $z(x)$ par rapport à la variable x . Les moments $m_r[z^k(x)]$ concernent en général un traitement statistique des données relevées, c'est-à-dire des $z(x)$, pour l'échantillon pertinent. D'où la possibilité de définir et de déterminer la fonction de distribution $\phi(z)$ (de dimensions égales à $[L^0]$, où L indique une longueur), la densité de probabilité $\phi(z)$ $[L^{-1}]$, et, dans l'espace discret, la valeur $p(z)$ $[L^0]$ de la probabilité référencée à la i -ème des z relevées. Il en résulte, par exemple, que l'expression de $m_r[z(x)]$ peut s'écrire également à l'aide des paramètres de dispersion statistique :

$$m_r[z(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} (z - \bar{z})^r \cdot \phi(z) \cdot dz \quad \text{continu, } [L^r])$$

$$m_r[z(x)] = \sum_z (z - \bar{z})^r \cdot (p)z \quad \text{(discret, } [L^r])$$

$$m_r[z(x)] = \frac{1}{L} \int_0^L (z - \bar{z})^r \cdot dx \quad (\text{continu, } [L^r])$$

$$m_r[z(x)] = \frac{1}{L} \sum (z - \bar{z})^r \cdot \Delta x \quad (\text{discret, } [L^r]).$$

En termes de dimensions, z étant une longueur, $m_r[z^k(x)]$ a des dimensions égales à $[L^{r-k}]$.

Dans le cadre des calculs statistiques des données relevées, il peut être utile de recourir à la courbe de surface portante d'Abbott et Firestone (*Abbott Bearing Curve*), $B(z)$ (fig. A1). Dans l'espace discret, elle peut être mesurée à l'aide du rapport entre la somme $I_t(z) = \sum I_i(z)$ des mesures des segments d'intersection entre une droite générique d'ordonnée égale à z et le profil et la longueur totale L de l'échantillon considéré : $B(z) = I_t(z)/L$. Cette fonction exprime le pourcentage par rapport à la population totale des hauteurs du profil supérieures à une valeur donnée z : d'où l'interprétation, provenant de la mécanique et de la métallurgie et généralisée par extension de \mathfrak{R}^1 à \mathfrak{R}^2 , de *fraction portante de la surface*. En vertu d'une telle caractéristique théorique, la courbe de surface portante d'après Abbot et Firestone relative à un point z donné peut également être obtenue par l'intégration de la densité de probabilité $\varphi(z)$ (si cette dernière est connue). Dans une telle hypothèse, lorsque l'axe des z est orienté de haut en bas, $B(z)$ va tendre vers $\varphi(z)$ (fig. A1) ; dans le cas contraire, $B(z)$ sera assimilable à $\varphi(-z + \Delta z)$, avec Δz d'excursion totale du profil.

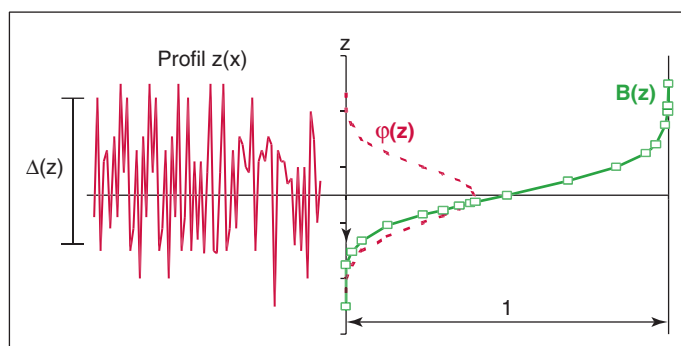


Fig. A1 - Densité $\varphi(z)$ de probabilité et courbe $B(z)$ d'Abbott pour un profil $z(x)$.

L'extension aux distributions de probabilité où la variable dépendante est une fonction de deux variables stochastiques dépendantes, est plutôt immédiate. Dans ce cas, il faut ajouter à la variable indépendante x la variable « conjointe » y , ce qui a des conséquences en termes de fonctions de distribution, de densité de probabilité et processus d'intégration et/ou sommation.

Descripteurs intrinsèques spectraux

À l'aide d'algorithmes spécifiques, il est possible d'obtenir (dans des hypothèses données et en utilisant des processus spécifiques de calcul numérique [15]) à partir du profil $z(x)$ (en tant que processus stationnaire, ergodique et à distances discrètes) des fonctions spectrales, autrement dit des fonctions de fréquence spatiale.

La logique à laquelle répondent de tels processus inférentiels se fonde sur la déduction d'un paramètre quadratique moyen à l'aide d'une fonction (généralement dans le discret) faisant référence à une classe de longueurs d'onde déterminée $\lambda([L^1]$, ou bien, par équivalence, de fréquences spatiales $f_s([L^{-1}])$, ou encore de numéros d'onde $2\pi f_s([L^{-1}])$.

Approximativement, il est possible de distinguer, dans un premier temps, deux approches différentes :

- I – Rapport (différentiel) de la puissance aux fréquences spatiales (Densité Spectrale de Puissance, DSP, mono- ou bilatère) ;
- II – Formulation de la puissance (non rapportée aux fréquences) relative à une bande de fréquence standard donnée de valeur au centre donnée ; on fait référence, dans ce cas, aux diagrammes de périodes et aux spectres de niveaux (de T).

Le tableau A1 résume certains des processus les plus répandus, concernant tout particulièrement les paramètres spectraux [15].

①, ②, ③ et ④ se réfèrent au groupe I (rapport différentiel), et ⑤, ⑥ et ⑦ au groupe II. Il est essentiel de remarquer par ailleurs que ce dernier comprend également le spectre des coefficients c_k , déterminable opérationnellement, avec un temps machine plus important, par un développement en série de Fourier plus simple. Concernant ceux-ci, il est possible de noter que :

- l'opérateur DSP $G(f_s)$ peut revêtir une importance particulière dans la modélisation des phénomènes vibratoires

[1, 6, 14, 15], de génération de bruit de roulement [12], et, plus généralement, dans la paramétrisation du manque de confort véhicule dû à des défauts de profil de la chaussée ;

➤ l'opérateur P_{zz} [15], assimilable à l'intégrale de celui qui précède dans les différents domaines de longueurs d'onde, est caractérisé par sa capacité à prendre une valeur finie même en cas de profil idéal constitué par un processus mono-fréquentiel pur et, aussi, par sa capacité à être adopté, à condition de prendre les mesures qui s'imposent, pour la description des états transitoires (c'est-à-dire par fonction de paramètre non stationnaire et spectral) ;

➤ le niveau de texture $L_T(\lambda)$ a trouvé une application courante (cf. les écrits scientifiques du secteur) dans la description de l'importance synergique des différentes classes de texture en termes de génération de bruit de roulement [8] ou, par exemple, en ce qui concerne les propriétés d'adhérence.

Les opérateurs spectraux bi-variables (T_{ibd} , cf. expression) n'ont pas trouvé à ce jour une application spécifiquement technique ; en principe, ils pourraient revêtir une importance considérable pour l'évaluation synergique des dégradations aussi bien du plan longitudinal que du plan transversal (par exemple, les ornières).

TABLEAU A1
Indicateurs désagrégés

Définition	Algorithme d'estimation possible	Grandeurs de calcul
① $G(f_s) = \lim_{\Delta f_s \rightarrow 0} \frac{\Psi_z^2(f_s, \Delta f_s)}{\Delta f_s} ; G(f_s) = 2 \cdot S(f_s)$	$G_z(f_s) \approx \frac{\hat{\Psi}_z^2(f_s, B_e)}{B_e}$	$\hat{\Psi}_z^2(f_s, B_e) \approx \frac{L}{1} \cdot \int_0^L z^2(x, f_s, B_e) dx$
② $S(f_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau_s) \exp[-i2\pi f_s \tau_s] d\tau_s ; G(f_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} 2R(\tau_s) \exp[-i2\pi f_s \tau_s] d\tau_s$	$\hat{G}_z(f_{sk}) \approx \frac{2h}{N} \cdot Z(k) ^2$	$Z(k) = \sum_{n=1}^N z(n) \exp\left[-\frac{i(k-1)2\pi(n-1)}{N}\right]$
③ $S_s(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau_s) \exp[-i\Omega \tau_s] d\tau_s ; G_s(f_s) = 4 \cdot \pi \cdot S_s(\Omega)$	$S_s(\Omega_k) \approx \frac{2L}{2\pi} Z_s(k) ^2$	$Z_s(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z(n) \exp\left[-\frac{i2\pi(k-1)(n-1)}{N}\right]$
④ $S_{yz}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{yz}(\tau_s) \exp[-i\Omega \tau_s] d\tau_s$		
⑤ $P_{zz}(\Omega) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \gamma_{xx}(m) \exp[-i\Omega m]$	$P_{zz}(k) = \frac{1}{N} \cdot Z(k) ^2$	$Z(k) = \sum_{n=1}^N z(n) \exp\left[-\frac{i(k-1)2\pi(n-1)}{N}\right]$
⑥ $c_k = \frac{2}{N} \{ [\text{real} Z(k+1)]^2 + [\text{imag} Z(k+1)]^2 \}^{0,5}$		$Z(k) = \sum_{n=1}^N z(n) \exp\left[-\frac{i(k-1)2\pi(n-1)}{N}\right]$
⑦ $L_T(\lambda) = 10 \log \frac{h^2}{h_0^2}$	$L_T(\lambda_k) = 10 \log \frac{c_k^2}{h^2}$	$c_k = \frac{2}{N} \{ [\text{real} Z(k+1)]^2 + [\text{imag} Z(k+1)]^2 \}^{0,5}$ $f_s = 1/\lambda$
Légende		
x	[L]	Distances, axe des abscisses
L	[L]	Demi-période, demi-distance d'échantillonnage
n	[L ⁰]	Indice du compteur naturel des distances
N	[L ⁰]	Nombre naturel, nombre total des abscisses contrôlées ; valeur maximale de l'indice n ; N (discret) correspond à 2L (continu) ; nombre total des points contrôlés.
l	[L]	Longueur d'onde
f _s , f _{sk}	[L ⁻¹]	Fréquence spatiale (k-ème), réciproque de la longueur d'onde relative. Dans l'ISO, f _s est parfois dénommée n.
k	[L ⁰]	Indice ou exposant, compteur naturel des fréquences spatiales
-Ω	[L ⁻¹]	Numéro d'onde, égal à 2π fois la fréquence spatiale

TABLEAU A1 (suite)
Indicateurs désagrégés

B_e	$[L^{-1}]$	Largeur de la bande de fréquence spatiale
$z(x)$	$[L]$	Profil, symbole général relatif aux variations continues et aux signaux analogiques
$\{z(n)\}, z(n)$	$[L]$	Profil, séquence d'échantillons $z(n)$; la séquence peut être indiquée plus simplement en omettant les accolades ; symbole général relatif aux variations discrètes et aux signaux numériques.
$E_{z(n)}$	$[L^2]$	Énergie de la séquence des $z(n)$; dans le cas du profil de la chaussée, cet indicateur est infini.
i		Nombre imaginaire ; le carré est égal à -1 et il est adimensionnel.
$Z(k)$	$[L]$	Transformée discrète de Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT) de la séquence $z(n)$ pour la fréquence spatiale f_{sk}
$Z(f_s, 2L)$	$[L^2]$	Transformée (continue) de Fourier avec gamme d'intégration finie
DFS		Discrete Fourier Series (Séries discontinues de Fourier)
a_k, b_k, c_k		Coefficients de Fourier ; a_k et b_k ont la dimension $[L]$ d'une longueur et représentent des grandeurs réelles ; c_k est une grandeur généralement complexe, dont le module (souvent désigné aussi par c_k) possède les dimensions d'une longueur. La représentation des c_k (modules), ou des a_k ou encore des b_k en fonction des fréquences spatiales, est souvent dénommée Spectrogramme.
$Z(f_s) ; Z(\Omega)$	$[L^2]$	Transformée (continue) de Fourier de la fonction $z(x)$, évaluée pour la fréquence spatiale f_s . Les bornes d'intégration sont $+$ et $-\infty$
FFT		Fast Fourier Transform (Transformée rapide de Fourier)
$E[z^2(n)]$	$[L^2]$	Puissance moyenne (valeur quadratique moyenne) des $z(n)$; coïncide avec la variance si la moyenne du processus est nulle.
$\lambda_{zz}(m)$	$[L^2]$	Séquence d'autocovariance du profil z ; en tant que séquence, elle est définie dans le discret ; coïncide avec la séquence d'autocorrélation si le processus aléatoire (par exemple, le profil) a une moyenne nulle.
$\phi_{zz}(m)$	$[L^2]$	Séquence d'autocorrélation du profil z ; en tant que séquence, elle est définie dans le discret ; m est un nombre naturel et indique une abscisse du profil z .
$R_z(\tau_s)$	$[L^2]$	Fonction d'autocorrélation du profil z ; définie dans le continu ; τ_s est définie dans le continu, indique une abscisse du profil et a les dimensions d'une longueur.
R_{yz}	$[L^2]$	Fonction de corrélation bi-variables. Aujourd'hui, elle n'est pas utilisée dans les applications techniques.
$G_z(f_s) ; PSD$	$[L^3]$	Densité spectrale de puissance (unilatère) du profil z ; définie dans le continu, pour des fréquences spatiales entre 0 et $+\infty$, à travers des processus de filtrage et d'interaction d'amplitude des aspérités au carré. Dans ISO, elle est dénommée aussi $G_d(n)$. PSD : Power Spectral Density, Densité spectrale de puissance (DSP).
w_1, w_2	$[L^0]$	Coefficients non négatifs, adimensionnels, mis en relation avec l'inclinaison de $G_z(f_s)$ dans un plan bilogarithmique.
$S_z(f_s)$	$[L^3]$	Densité spectrale de puissance (bilatère) du profil z ; définie dans le continu, pour des fréquences spatiales entre $-\infty$ et $+\infty$; c'est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation relative $R_z(m)$; avec une fréquence spatiale générique donnée f , pour le même profil, la densité spectrale de puissance unilatère est égale au double de la densité spectrale de puissance bilatère.
S_{yz}	$[L^3]$	Densité spectrale de puissance (bilatère et bivariée). Aujourd'hui dépourvue d'applications techniques.
$P_{zz}(f_s), P_{zz}(k)$	$[L^2]$	Diagramme de périodes ou spectre de puissance PS (Power Spectrum) du profil z ; défini dans le discret en fonction des transformées discrètes.
$L_T(\lambda)$	$[L^0]$	Niveau de texture, pour une longueur d'onde donnée.

Analyse de la sensibilité

Sur la base de l'examen des 314 résultats numériques et des 68 diagrammes obtenus (Densité de probabilité $\varphi(z)$; fonctions de distribution $\varphi(z)$, spectres des amplitudes $c_k(f_s)$, spectres de puissance des amplitudes $P_{zz}(f_s)$), il a été possible d'élaborer le tableau A2.

Il est essentiel de préciser que, pour chaque paramètre objet de confrontation, il subsiste une proximité évidente entre les aspects mathématiques (habituellement non liés à la période historique) et ceux ayant trait à l'application et à la dimension (ces derniers concernant un cadre technologique précis). L'utilisation de l'ensemble de ces grandeurs pour ces mêmes 17 profils « prototypes » a donc imposé, dans un certain nombre de cas, de particulariser la structure conceptuelle d'origine au moyen d'un certain nombre d'hypothèses supplémentaires simples.

TABLEAU A2

Analyse de la sensibilité des indicateurs

- Le paramètre « densité moyenne des aspérités » fournit une évaluation réciproque de la distance moyenne entre les aspérités, il augmente lors de la diminution de cette dernière et reste inchangé lors des « dilatations » ou des « contractions » de l'axe des z ; la « forme » de l'onde en elle-même n'exerce sur celui-ci aucune influence de taille.
- R_{\max} , R_t , R_z , MAA et « hauteur moyenne des aspérités », qui, substantiellement, se rapportent tous au concept d'amplitude totale (par ex. amplitude crête à crête) des déviations de la planéité, ne sont pas influencés, fondamentalement, ni par la forme ni par le « pas » de l'onde et augmentent si l'amplitude crête à crête augmente.
- Le paramètre « facteur de forme moyen » n'est pas substantiellement affecté par la forme de l'onde et augmente en cas d'accroissement du nombre et de la hauteur des aspérités.
- La forme de l'onde influe sur la rugosité moyenne R_a . Ce paramètre prend des valeurs maximales pour une onde carrée et réduites pour une onde triangulaire ; pour un profil sinusoïdal idéal il augmente de manière linéaire avec l'amplitude. Finalement, R_a fournit une mesure « brute » de la « rugosité » de la surface, sans référence explicite à la classe dimensionnelle dans la direction horizontale. En ce qui concerne cette dernière, par ailleurs, pour un profil sinusoïdal, il est nécessaire de remarquer l'invariance de R_a pour des variations de longueur d'onde. Enfin, on remarque que, pour deux échantillons de longueur L , lorsque la surface comprise entre z et la ligne médiane (égale à $R_a \cdot L$) est constante, R_a reste inchangé.
- En ce qui concerne la profondeur moyenne R_m , si l'on schématise le profil en ondes carrées, il atteint des valeurs d'autant plus élevées que le rapport entre la largeur des aspérités et celle des concavités est plus important.
- R_p , R_u , MPD ne varient pas si seule la longueur d'onde d'une sinusoïde subit une mutation, mais augmentent, en revanche, de manière linéaire avec l'amplitude de l'onde. La surface (creuse) entre les aspérités contiguës est déterminante : lorsque celle-ci augmente, ces paramètres sont plus élevés.
- L'indicateur z_4 concerne le caractère plus ou moins pentu des segments du profil présentant une inclinaison positive ou négative ; dans le cas idéal où $z(x) = a_1 \sin(a_2 x)$, z_4 est égal à zéro, et la somme des segments « ascendants » est égale à celle des autres segments « descendants ». Pour une surface fondamentalement aléatoire, il prend une valeur proche de 0, indiquant par cela l'absence dans le profil de propriétés distinctement directionnelles ; ces dernières pourraient influencer, sous forme différenciée, par exemple, au niveau de l'adhérence et de la réflexion optique.
- En ce qui concerne la classe des indicateurs à laquelle appartiennent R_q , σ , et z_1 , en posant l'hypothèse d'un profil idéal constitué par une onde, la forme exerce sur ces derniers une influence fondamentale ; ces paramètres deviennent quantitativement plus importants si l'amplitude d'une sinusoïde augmente, restant, en revanche, fondamentalement inchangés, si seule la longueur d'onde se modifie. Pour un profil ayant une distribution des amplitudes assimilable à une courbe gaussienne, le rapport σ/R_a tend à prendre des valeurs proches de 1.25. Un tel quotient, de variance nulle en ce qui concerne les modifications du pas ou/et des amplitudes d'une onde sinusoïdale, est minimisé par les ondes carrées et puise des valeurs plutôt élevées dans le cas d'une « intermittence » du signal de texture. À travers l'analyse du paramètre z_1 (analogue d'un point de vue conceptuel à R_q et σ) il est possible d'obtenir des informations quant aux propriétés de réflexion de la lumière sur la surface. En outre, étant donné que $\sigma^2 = E[(z - z_{\text{media}})^2]$, et que le paramètre désagrégé $R(\tau)$ (fonction d'auto corrélation spectrale) est égal à $R(\tau) = E[z(x) \cdot z(x + \tau)]$, σ^2 fournit une évaluation immédiate de $R(0)$.
- Il faut souligner la grande proximité de MTD (Vol. patch method), SMTD et CSMTD. En outre, les statistiques de dispersion SD, SMTD, CSMTD et TDMA concernent, mis à part les procédures et les technologies, l'ensemble auquel appartiennent R_q , σ , z_1 dont il a été déjà question : les observations concernant la sensibilité aux variations du modèle de profil sont par conséquent confirmées.
- S_k est égal à zéro lorsque la densité de probabilité $\varphi(z)$ des amplitudes est symétrique, donc fondamentalement proche de la même valeur aussi en cas de signal présentant des composantes fortuites. En ce qui concerne K , une distribution des amplitudes avec $K \gg 3$, par exemple une courbe leptocurtique, possède, en pourcentage, « plus » d'amplitudes proches de 0 et la densité de probabilité relative $\varphi(z)$ a des ordonnées plus élevées par rapport à une variable gaussienne. Aussi bien S_k que K sont des paramètres qui caractérisent la forme des densités de probabilité des $z(x)$. Ils sont donc à variance nulle lorsque cette forme est inchangée.
- Dans le cas d'une onde sinusoïdale, z_2 augmente si, pour des valeurs constantes des autres facteurs, la longueur d'onde diminue. Dans ce cas, en effet, bien que la plage d'oscillation crête à crête reste inchangée, la distance relative entre le sommet et la concavité se réduit. Au contraire, si la longueur d'onde d'une sinusoïde est constante, cette grandeur augmente linéairement avec l'amplitude. Calculé rigoureusement, ce paramètre serait non défini dans le cas d'une discontinuité de la dérivée première (par exemple, pour une onde triangulaire). Si l'on fait abstraction, en revanche, de ces singularités, z_2 devient un indicateur qui augmente avec le nombre d'aspérités par échantillon.
- Si les autres facteurs sont maintenus constants, z_3 augmente lors de la diminution de la longueur d'onde : la distance nécessaire pour passer de $z' = 0$ au sommet à $z' = 0$ dans le creux est, en effet, réduite. Lorsque, au contraire, l'amplitude d'un profil sinusoïdal idéal subit une augmentation, la valeur de z_3 est augmentée de manière linéaire.
- En résumé, on estime que les paramètres MPD , σ , z_2 , z_3 , ainsi que MPD_{noG} (lorsqu'on s'intéresse à l'état de porosité), peuvent fournir un tableau préliminaire suffisamment exhaustif. Cette considération découle partiellement de l'analyse des fiches obtenues et aussi du fait que les paramètres restants peut être ramenée à ces mêmes paramètres.

TABLEAU A2 (suite)

Analyse de la sensibilité des indicateurs

- En ce qui concerne l'effet de l'amplification des z d'un facteur y , à l'augmentation des amplitudes du profil z selon un facteur y , P_{zz} augmente d'un facteur y^2 . On obtient ainsi, $[P_{zz}(f_{si}) \cdot (P_{zz}(f_{sj}))^{-1}]^{0,5} \approx [z(f_{si}) \cdot (z(f_{sj}))^{-1}]$, en concordance avec ce qui concerne les modèles de PSD(f_s) MIRA, Dodds and Robson, et ISO 8608 :1995(E).
- En ce qui concerne l'inclinaison plus importante de $P_{zz}(f_s)$, lors de l'augmentation de l'inclinaison entre deux fréquences, au plan f_s - P_{zz} , une telle inclinaison est proportionnelle à la différence entre les carrés des amplitudes aux deux fréquences considérées.
- Concernant l'effet des phénomènes de réduction du diamètre des rainures de surface, il est possible d'observer qu'une réduction, même considérable, du diamètre des rainures (par exemple, d'un revêtement drainant) peut ne provoquer aucune modification substantielle de PS. P_{zz} est, par conséquent, un indicateur qui n'est pas toujours efficace.
- Si, toutes choses étant égales par ailleurs, la profondeur des rainures de distance moyenne égale à $1/f_s$ décroît, $P_{zz}(f_s)$ diminue comme le carré de f_s .
- En cas de modification de la forme de l'onde uniquement, P_{zz} garde pratiquement la même allure et les mêmes valeurs. D'éventuels phénomènes perturbateurs (« zigzags ») peuvent être associés au pas d'échantillonnage.
- En ce qui concerne l'influence des phénomènes de symétrie de type $z(x) = -z(x + J)$, la transition depuis les profils correspondant à $z(x) = -z(x + J)$, J réel, vers des profils non caractérisés par cette condition peut ne pas entraîner de modification substantielle pour P_{zz} . Lorsque, en revanche, cette transition est associée à l'« apparition » d'harmoniques, cela entraîne une présence d'ordonnées « individuelles » dans le spectrogramme.
- On observe que, pour découpler les composantes gaussiennes ou fortuites, les spectrogrammes peuvent se révéler peu efficaces. En revanche, l'identification, à l'aide du diagramme, de la densité de probabilité est immédiate : la courbe étant fondamentalement « plate » dans le cas de composantes fortuites et, à l'opposé, en forme de « cloche » dans le cas de composantes gaussiennes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AA.VV., ASTM STP 583, *Surface Texture versus Skidding*, juin 1974.
- [2] AUTRET P. et al., *Guide d'auscultation des chaussées souples*, Collection du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Édition Eyrolles, Paris, 1977.
- [3] ISO 2631-2, *Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration*, 1985.
- [4] Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale, B.U. CNR, 125, 1988.
- [5] LUCAS J., L'analyse de la macrotexture des revêtements routiers, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 176, novembre-décembre 1991, pp. 127-132.
- [6] HUNT H.E.M., Modelling of road vehicles for calculation of traffic-induced ground vibration as a random process, *Journal of Sound and Vibration*, 1991.
- [7] LUCAS J., BEGOU P.A., Description de la macrotexture et de la microtexture, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 185, mai-juin 1993, pp. 63-74.
- [8] SANDBERG U., *Design and maintenance of low noise road surfaces*, 1995.
- [9] AA. VV., *International Experiment, Expérience internationale AIPCR de comparaison et d'harmonisation des mesure d'adhérence et de texture*, AIPCR, 1995.
- [10] MINH-TAN DO, LUCAS J., Contact pneu/chaussée, apport de la microtexture du revêtement, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 196, mars-avril 1995, pp. 5-17.
- [11] ISO 13473-1, *Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part.1 : Determination of Mean Profile Depth*, 1997.
- [12] BOSCAINO G., LA TORRE F., PRATICO F.G., *Rumore e vibrazioni da traffico L'influenza delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni – Cap.1 Rumore di rotolamento*, Quaderno AIPCR, Vérone, 18-21 mai 1998.
- [13] BRILLET F., LEPERT Ph., Une recherche menée dans le cadre européen : le contrat PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) d'analyse du comportement des infrastructures routières, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 223, septembre à décembre 1999, pp. 13-25.

- [14] BRANCO F.E.F., Symposium international sur l'impact environnemental des défauts d'uni des routes, *Routes Roads*, **304**, octobre **1999**.
- [15] BOSCAINO G., PRATICO F.G., *La tessitura superficiale delle pavimentazioni stradali*, Palerme, octobre **1999**.
- [16] BOSCAINO G., PRATICO F.G., *L'analisi della tessitura stradale attraverso il sistema SIRAT*, X Convegno SIV, Catania (Italy), 26-28 octobre **2000**.
- [17] BOSCAINO G., MINNELLA A. I., VAIANA R., *SIRAT : Un sistema integrato per il rilievo e l'analisi della tessitura superficiale*, X Convegno SIV, Catania (Italy), 26-28 octobre **2000**.