

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
Joseph JALKH

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ESTIMATION DU PROFIL LONGITUDINAL
POST-RÉHABILITATION D'UNE CHAUSSÉE FLEXIBLE

MONTREAL, LE 25 FÉVRIER 2015

©Tous droits réservés, Joseph Jalkh, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Gabriel Assaf, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Christian Gargour, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Kamal Al-Haddad, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

28 JANVIER 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ESTIMATION DU PROFIL LONGITUDINAL POST-RÉHABILITATION D'UNE CHAUSSÉE FLEXIBLE

Joseph JALKH

RÉSUMÉ

Depuis 1994, le ministère des Transports du Québec impose des spécifications contractuelles sur l'indice de rugosité international à la suite d'une réhabilitation ou d'une réfection d'une chaussée flexible. Cette intervention de planage et de ressurfaçage avec absence de correction des singularités manquerait à ces exigences contractuelles.

Ce mémoire décrit le développement d'un outil qui permet l'estimation du profil longitudinal post-réhabilitation d'une chaussée flexible. Cet outil numérique permet l'analyse des profils longitudinaux à différentes échelles fréquentielles, l'identification des sous-lots non conformes aux exigences contractuelles et l'estimation par filtrage de la qualité d'uni de la chaussée après ressurfaçage.

Dans le cadre de ce mémoire, le filtrage par seuillage d'ondelettes de Daubechies d'ordre 3 a été envisagé. L'étude des méthodes classiques d'estimation par seuillage nous a permis de développer un estimateur par seuillage adapté à une intervention de planage et de ressurfaçage, qui atténue les coefficients d'ondelette au-dessus d'un seuil calculé tout en accommodant la continuité fréquentielle.

Les performances des opérateurs d'estimations décrits, par rapport au risque de l'estimation du profil longitudinal post-réhabilitation et l'indice de rugosité international, ainsi que la prédominance de la nouvelle loi sur les méthodes classiques seront mises en évidence dans une étude postérieure.

Mots clés : Indice de rugosité international (IRI), filtrage, chaussée, ondelettes, méthodes de seuillage, pseudo-profiles, uni.

DEVELOPMENT OF A TOOL FOR ESTIMATING THE LONGITUDINAL POST-REHABILITATION PROFILE OF A FLEXIBLE PAVEMENT

Joseph JALKH

ABSTRACT

Since 1994, the ministère des Transports du Québec has been imposing contractual specifications on the international roughness index after the rehabilitation of a flexible pavement. This smoothing or resurfacing intervention, without correction of singularities, would not respect these contractual requirements.

This dissertation outlines the development of a tool that allows for the estimation of the post-rehabilitation, longitudinal profile of a flexible pavement. This digital tool allows for the analysis of longitudinal profiles at different frequency scales, the determination of sublots that are not compliant to the contractual requirements and the estimation, by filtering, of the quality of the pavement's evenness after resurfacing.

In this dissertation, filtering by Daubechies wavelets thresholding, with maximum number of vanishing moments equal to 3, was contemplated. The study of conventional estimation methods by thresholding has allowed us to develop an estimator by thresholding that is suited to a smoothing and resurfacing intervention, which mitigates the wavelet coefficients below a calculated threshold, while taking into account the frequential continuity.

The performances of the estimation operators outlined herein, with relation to the risk of estimation of the longitudinal profile post-rehabilitation and to the international roughness index, as well as to the preponderance of the new legislation on conventional methods, will be highlighted in a subsequent study.

Key words : International roughness index (IRI), filtering, pavement, wavelets, thresholding methods, pseudo-profile, evenness.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Envergure	2
1.4 Méthodologie.....	3
 CHAPITRE 2 REVUE DOCUMENTAIRE	 5
2.1 Introduction	5
2.2 La transformée de Fourier	5
2.3 L'analyse temps-fréquence.....	6
2.4 La transformée de Fourier à fenêtre	7
2.5 La transformée en ondelettes.....	8
2.5.1 Définition d'une ondelette	9
2.5.2 Transformées en ondelettes.....	9
2.6 Bases d'ondelettes	10
2.6.1 Approximations multirésolution	10
2.6.2 Fonction d'échelle.....	12
2.7 Les ondelettes de Daubechies.....	12
2.7.1 Les filtres associés aux fonctions d'échelle	13
2.7.2 Moments nuls des ondelettes	13
2.7.3 Les ondelettes à support compact	14
2.7.4 Mesures de régularité par ondelettes.....	14
2.7.5 Décomposition et reconstruction par ondelettes	14
2.8 Conclusion.....	15
 CHAPITRE 3 UNI DE LA CHAUSSÉE	 17
3.1 Introduction	17
3.2 L'uni des chaussées	17
3.3 Défauts d'uni de la chaussée souple et longueurs d'ondes	18
3.4 L'IRI (Indice de rugosité international)	22
3.5 Appareils de mesure de l'uni longitudinal	26
3.6 Conclusion.....	28
 CHAPITRE 4 LES MÉTHODES DE FILTRAGE	 29
4.1 Introduction	29
4.2 Densité spectrale de puissance	29
4.3 Filtrage par moyenne mobile.....	31
4.4 Filtrage par bandes passantes	32
4.5 Filtrage par ondelette.....	34
4.5.1 Méthode de seuillage	35
4.5.1.1 Seuillage dur	36

4.5.1.2	Seuillage doux.....	37
4.5.1.3	Seuillage de Kwon.....	38
4.5.2	Choix du seuil.....	39
4.5.2.1	Seuil universel.....	39
4.5.2.2	Seuils SURE.....	40
4.6	Conclusion.....	41
CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE UTILISÉE ET DIAGNOSTIC PRÉLIMINAIRE ...		43
5.1	Introduction.....	43
5.2	Présentation et analyse des pseudo-profils.....	43
5.3	Description de la méthodologie.....	46
5.3.1	Méthodes de calcul du Seuil.....	47
5.3.1.1	Méthode du seuil universel.....	47
5.3.1.2	Méthode des seuils SURE multi-échelles.....	48
5.3.1.3	Méthode des seuils multi-échelles.....	48
5.3.2	Estimation des pseudo-profils avant ressurlaage.....	49
5.3.3	Choix de la fonction analysante.....	51
5.3.4	Estimateur par seuillage proposé.....	52
5.4	Diagnostic préliminaire.....	54
5.5	Conclusion.....	55
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		57
ANNEXE I DÉCOMPOSITION D'UN SIGNAL.....		59
ANNEXE II DÉCOMPOSITION ET RECONSTRUCTION D'UN SIGNAL.....		61
ANNEXE III FILTRAGE D'UN SIGNAL.....		65
ANNEXE IV MÉTHODE DU SEUIL UNIVERSEL- SEUILLAGE DOUX.....		69
BIBLIOGRAPHIE.....		73

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Les défauts de surface d'une chaussée souple et leurs causes probables dans les différentes couches de la structure19
Tableau 3.2	Les défauts de surface d'une chaussée souple et leurs causes probables dans les différentes couches de la structure.....20
Tableau 3.3	Montant d'ajustement relatif à l'uni de surface par segment.....25
Tableau 5.1	Méthodes de débruitage utilisées54
Tableau 5.2	Méthodes de débruitage utilisées55

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 2.1	Pavage temps-fréquence pour la transformée en ondelette discrète.....	8
Figure 3.1	Relation entre les fréquences de résonances, la vitesse du véhicule et la longueur d'onde du profil longitudinal de la chaussée	22
Figure 3.2	Modèle du quart de véhicule.....	23
Figure 3.3	Amplitude de la fonction de réponse du modèle de quart de véhicule aux fréquences.....	26
Figure 4.1	La réponse du nombre d'onde normalisé aux filtres des moyennes mobiles.....	32
Figure 4.2	Les gains de filtres passe-bas de Butterworth d'ordre n en fonction de la fréquence	34
Figure 4.3	La fonction d'un estimateur par seuillage dur pour T=1	36
Figure 4.4	La fonction d'un estimateur par seuillage doux pour T=1.....	37
Figure 4.5	La fonction de l'estimateur Kwon pour T=1 et $\mu=10, 100, 10000$	38
Figure 5.1	Tronçon considéré du boulevard Pie-IX à Laval	44
Figure 5.2	Distribution de l'IRI dans les deux directions avant ressurfaçage.....	45
Figure 5.3	Profils longitudinaux postréhabilitation bidirectionnels ayant fait l'objet de la simulation.....	46
Figure 5.4	Pseudoprofils longitudinaux estimés avant ressurfaçage.....	50
Figure 5.5	Valeurs de l'IRI des pseudoprofils longitudinaux estimés pré-réhabilitation.....	50
Figure 5.6	Caractéristiques fréquentielles des sous-espaces de projection.....	52
Figure 5.7	La fonction de l'estimateur proposé pour T=1, K=2 et $\mu=10, 100, 10000$	53

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AMR	Analyse Multi-Résolution
ASTM	American Society for Testing and Materials
$A_t(s)$	Accélération verticale du capteur de hauteur
b	Longueur de base des moyennes mobiles
Cs	Constante de l'amortisseur de la suspension
d_j	Coefficients en ondelette des données bruitées
DLC	Direction du Laboratoire des Chaussées
DSP	Densité Spectrale de Puissance d'un signal
f, ω	La fréquence (Hz)
f_c	Fréquence de coupure
$f(X)$	La densité de probabilité d'un bruit blanc gaussien
$\tilde{f}(t)$	Signal estimé
$f(t), s(t)$	Le signal à traiter
$\hat{f}(\omega), \hat{s}(f)$	La transformée de Fourier du signal à traiter
$g(t)$	La fonction fenêtre à choisir
$H(f)$	La fonction de transfert du filtre
$H(x)$	Mesure du capteur de hauteur
$\hat{h}(w)$	Le filtre associé à la fonction d'échelle $\Phi(t)$
IRI	L'indice de rugosité international
K	Paramètre de réduction du seuil
Ks	Constante de ressort de la suspension

K_t	Constante de ressort du pneu
$L^2(\mathbb{R})$	L'espace des fonctions continues d'une variable réelle et de carré intégrable
L_s	Longueur du segment à étudier
M	Nombre de coefficients en ondelette à l'échelle considérée
MAD	Valeur médiane des déviations absolues par rapport à la médiane
MTQ	Ministère des Transports du Québec
M_u	Masse non suspendue
M_s	Masse suspendue
N	Nombre de données disposées
n	Ordre du filtre
N_d	Nombre de décomposition
p, P	Le nombre de moments nuls de l'ondelette
$P_{V_j f}$	La projection d'un signal sur une fonction d'échelle
$P_{W_j f}$	La projection sur une fonction ondelette
$r(f(t))$	Risque de l'estimation du signal
RTRRMS	Response-Type Road Roughness Measured Systems
R_{xx}	Autocorrélation du profil longitudinal de la chaussée
s	Le coefficient d'échelle
SURE	Stein Unbiased Risk Estimator
S_{xx}	Densité spectrale de puissance du profil longitudinal de la chaussée
T	Seuil estimé
t	La localisation du signal
\bar{t}	La valeur de position moyenne

TRRL	Transport and Road Research Laboratory
u, τ	Le paramètre de translation de la fenêtre
V	Vitesse du véhicule
V_j	Sous-espaces fermés
V_{80}	Vitesse de référence de 80km/h
$\bar{\omega}$	La valeur de fréquence moyenne
$w_b[m]$	Coefficient du bruit
X	Variable aléatoire continue
x	Distance longitudinale
$x(l)$	Profil longitudinal de la chaussée
y_f	Profil longitudinal filtré de la chaussée
$Y(l)$	Le signal de sortie du filtre
Y_r	Relevé du profil longitudinal de la chaussée
Z	Élévation du pseudoprofil
Z_s	Élévation de la masse suspendue
Z_u	Élévation de la masse non suspendue
\dot{Z}_s	Vitesse de la masse suspendue
\dot{Z}_u	Vitesse de la masse non suspendue
$Z(x)$	Profil longitudinal calculé
$\eta(d_{j,m}, T)$	Fonction de seuillage
$\eta_H(d_j, T)$	Estimateur par seuillage dur
$\eta_K(d_j, T)$	Estimateur par seuillage de Kwon

XVIII

$\eta_p(d_j, T, K)$	Estimateur par seuillage proposé
$\eta_s(d_j, T)$	Estimateur par seuillage doux
λ	Variable positive désignant le seuil
μ	Paramètre de Kwon
μ_N	Moyenne de la variable aléatoire normale
$\tilde{\sigma}$	Écart-type estimé de la variable aléatoire normale ;
$\tilde{\sigma}_j$	Écart-type estimé de la variable aléatoire normale à l'échelle considérée
σ^2	La variance de la variable aléatoire normale
σ_t^2	La variance autour de la localisation moyenne
σ_ω^2	La variance autour de la fréquence moyenne
$\Phi(t)$	La fonction d'échelle
$\left\{ \phi_{j,m} \right\}_{m \in \mathbb{Z}}$, $\left\{ \psi_{L-N_d, k} \right\}_{k \in \mathbb{Z}}$	Bases orthonormées de V_j et W_j
$\psi(x)$	La fonction ondelette
$\left\{ \langle f(t), \psi_{j,m} \rangle \right\}_{m \in \mathbb{Z}}$, $\left\{ \langle f(t), \phi_{L-N, k} \rangle \right\}_{k \in \mathbb{Z}}$	Coefficients de la décomposition du signal $f(t)$ sur une base orthonormée

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'indice de rugosité international (IRI) est devenu l'échelle standard de prédiction de l'uni de la chaussée dans de nombreux pays du monde depuis son établissement en 1986. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) impose depuis 1994 des spécifications contractuelles sur l'IRI à la suite d'une réhabilitation ou d'une réfection d'une chaussée. Cet indice indispensable dans le système de gestion routière influe crucialement sur l'espérance de vie de la chaussée d'où il est nécessaire d'envisager des exigences d'uni plus sévères et ainsi amener tous les intervenants à mettre en œuvre des méthodes plus talentueuses.

Selon les instructions du MTQ, les sous-lots assujettis aux exigences d'uni ne doivent pas comprendre des joints de dilatation, des dalles d'approche, des tabliers de viaduc ou de pont, des intersections, des regards, des puisards, des zones de transition (*début et fin de chantier*), ou autres contraintes provoquant un arrêt de la paveuse. Nonobstant ces instructions, dans le cas d'une réhabilitation de chaussée, une intervention de planage et de ressurfaçage avec absence de correction des singularités manquerait aux exigences contractuelles de l'IRI.

1.2 Objectifs

Dans ce cadre de contrat de performance basé sur l'IRI, mesure quantifiable de l'uni, il est important de développer un outil d'analyse des profils longitudinaux relevés pré-réhabilitation pour apprécier la réduction des distorsions lors d'une intervention de planage et de ressurfaçage. Basée sur la théorie des ondelettes pour l'analyse des profils longitudinaux à différentes échelles et le filtrage des profils longitudinaux pré-réhabilitation, cette approche suggérée permettra :

- a) de décrire les propriétés des profils longitudinaux à plusieurs échelles de fréquence (cycles/m) simultanément;
- b) d'étudier la régularité locale des profils longitudinaux à une échelle de fréquence élevée;
- c) d'identifier les sous-lots non conformes aux exigences contractuelles de l'IRI;
- d) d'estimer les profils longitudinaux post-réhabilitation ainsi que les valeurs de l'IRI correspondantes.

1.3 Envergure

La transformée en ondelettes présente des caractéristiques importantes pour l'analyse des profils longitudinaux. Par son association de la distance et la fréquence, basée sur l'inégalité de Heisenberg, elle permet d'extraire les informations sur une base de fonctions élémentaires concentrées en distance et fréquence. En déterminant d'une façon précise le paramètre de l'échelle, on découvrira les caractéristiques et les propriétés des singularités du profil longitudinal de la chaussée, d'où sa caractéristique nommée zoom multi-échelle.

Selon le TRRL, les défauts observables du profil longitudinal de la chaussée peuvent être classés selon cinq catégories (Mann et McManus, 1999). La distinction nette de ces cinq catégories de défauts est possible par l'intermédiaire des longueurs d'onde incluses dans chacune de ces catégories. Les défauts liés à la structure de la chaussée, et influents sur le confort et la sécurité, correspondent en général à des longueurs d'onde comprises entre 0.5m jusqu'à 35m. Cette gamme de longueurs d'onde dépend du module de rigidité de la chaussée, du temps, du climat, des propriétés du sol naturel et de la vitesse de roulement.

Pour départager les défauts et estimer le profil longitudinal post-réhabilitation, plusieurs types de filtre liés au concept d'analyse des ondes ont été appliqués. La transformation de Fourier, la moyenne mobile et le filtre de Butterworth, des algorithmes de filtrage classiques, ne permettent pas d'éliminer complètement l'influence des fissures et de les distinguer des joints de dilatation ou de rupture. Ce projet de recherche propose l'application de la méthode de

filtrage des signaux aléatoires à l'aide des ondelettes réelles de Daubechies pour trouver le profil longitudinal postréhabilitation.

La méthode de filtrage des signaux à l'aide des ondelettes comporte trois étapes. La première étape consiste à représenter le signal en ondelette en calculant les coefficients d'échelle et les coefficients d'ondelette pour les résolutions concernées; la deuxième étape consiste à éliminer le bruit tout en contractant les coefficients d'ondelette à l'aide d'une fonction de seuillage continue et la troisième étape consiste à appliquer la formule de synthèse à partir des coefficients d'échelle et des coefficients d'ondelette filtrés pour obtenir le signal estimé.

1.4 Méthodologie

Les travaux présentés dans ce mémoire consistent, dans un premier temps, à représenter le profil longitudinal pré-réhabilitation sur sept échelles de bandes de fréquence par la transformation en ondelette de Daubechies d'ordre 3. Le profil longitudinal pré-réhabilitation est généré à partir du profil longitudinal postréhabilitation altéré par un bruit gaussien blanc additif de variance σ^2 . Basés sur cette hypothèse d'estimation du profil longitudinal pré-réhabilitation, les estimateurs par seuillage des ondelettes, développés par Donoho et Johnstone, seront appliqués. Le choix du seuil sera imposé par les trois méthodes suivantes : *(i)* seuil universel; *(ii)* seuils SURE multi-échelles; *(iii)* seuils multi-échelles. Le profil longitudinal postréhabilitation estimé sera déterminé par la formule de reconstruction à partir des coefficients de projections contractés.

Dans un deuxième temps, on présente une nouvelle méthode de seuillage fondée sur la méthode de Kwon, mais dont la valeur absolue de l'amplitude de tous les coefficients au-dessus du seuil est diminuée d'une valeur égale au seuil. Cette méthode nous permet de lisser les transitions brusques du signal et remédier à la discontinuité fréquentielle. La performance de la méthode proposée a été expérimentée et comparée aux méthodes de Donoho et

Johnstone, en utilisant le logiciel MATLAB, sur des tronçons de l'autoroute 25, entre le boulevard Henri-Bourassa et la Montée St-François dans les villes de Montréal et Laval.

Dans le cadre de ce mémoire, dans le chapitre 2, nous commençons par un rappel sur la transformée de Fourier, outil d'analyse des propriétés temporelles et fréquentielles d'un signal; ensuite, nous consacrerons une section sur l'analyse temps-fréquence et ses limites imposées par le théorème d'incertitude. Nous montrerons la transformée en ondelette suivie par une présentation des bases d'ondelettes. Les ondelettes de Daubechies, d'ordre 3, ont été choisies comme base orthogonale ayant la capacité à approximer le profil longitudinal pré-réhabilitation tout en minimisant le risque. Nous soulignerons l'importance des moments nuls des ondelettes ainsi que les mesures de régularité par ondelettes.

Dans le chapitre 3, nous définirons l'uni des chaussées et les types de dégradation affectant l'uni de la chaussée souple ainsi que les longueurs d'onde associées. Ces paramètres nous permettront de développer l'approche suggérée d'une manière concrète. Nous présenterons le concept de l'indice de rugosité international, caractéristiques et méthode de calcul, ainsi que l'appareil de mesure de l'uni longitudinal.

Dans le chapitre 4, nous décrirons les trois principales méthodes employées pour l'analyse du profil longitudinal de la chaussée; la moyenne mobile, la densité spectrale de puissance et le filtre de Butterworth. La méthode de filtrage par ondelette sera montrée en détail selon la méthode décrite par Donoho et Johnstone, base de l'approche développée.

Dans le chapitre 5, la première section décrit la méthodologie utilisée : (i) Méthodes de seuillage utilisées et choix du seuil; (ii) Estimation du profil longitudinal postréhabilitation; (iii) Choix de la fonction analysante. La deuxième section rapporte sur la simulation et les résultats obtenus par les différentes méthodes exposées. La performance de ces méthodes sera discutée selon les critères distinctifs en termes du risque de l'estimation du profil et de la valeur de l'IRI.

CHAPITRE 2

REVUE DOCUMENTAIRE

2.1 Introduction

En général, les méthodes employées en traitement du signal pour sélectionner les informations importantes consistent à appliquer des opérateurs invariants, dans l'espace ou dans le temps, laissant à l'égard le traitement de ces informations telles que la méthode nommée transformée de Fourier. Dans le cadre de ce projet, on présentera les transformations qui permettent de :

- calculer la transformée du signal modulé à partir de sa transformée initiale;
- déterminer les caractéristiques fréquentielles locales et globales du signal;
- reconstruire le signal à partir des coefficients de sa transformée.

Dans ce deuxième chapitre, on introduira la transformation de Fourier et la transformation de Fourier à fenêtre glissante tout en présentant les limitations et les avantages de chaque transformation. Par la suite, on définira les fonctions ondelettes et l'on présentera le concept de l'analyse multirésolution, étant donné que les fonctions d'ondelettes sont construites et cadrées à partir d'une analyse multirésolution. On poursuivra en donnant les caractéristiques des fonctions d'échelle et d'ondelette de Daubechies.

2.2 La transformée de Fourier

En 1807, Joseph Fourier présenta à l'Institut de France un mémoire où il déclare que toute fonction périodique peut être décomposée en séries trigonométriques convergentes; cette idée de séries de Fourier a été complétée par la théorie des intégrales de Fourier (Mallat, 2000). L'intégrale de Fourier est un outil fondamental dans l'étude des ondelettes. Elle est utilisée pour concevoir les filtres des fonctions d'échelle et des ondelettes, qui à leur tour nous

permettent de construire les fonctions d'échelle et les ondelettes. On définit la transformée de Fourier d'un signal $s(t)$ par la formule suivante :

$$\hat{s}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-i2\pi f t} dt, \quad (2.1)$$

Où

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{le signal à traiter;} \\ f &= \text{la fréquence (Hz).} \end{aligned}$$

Cette transformée de Fourier mesure "combien" il y a d'oscillation dans le signal $s(t)$ à la fréquence f (Mallat, 2000). Comme la transformée de Fourier est obtenue en corrélant le signal à traiter avec une sinusoïde dont le support couvre tout l'axe réel, sa valeur dépend des valeurs du signal sur tout l'axe réel. Cette contrainte complexifie l'analyse des propriétés locales du signal à partir de la transformée de Fourier et rend l'intégrale de Fourier inadéquate pour les signaux transitoires.

2.3 L'analyse temps-fréquence

La construction d'une transformée basée sur des fonctions bien concentrées en temps et en fréquences, appelées atomes temps-fréquences, est arrimée par le principe d'incertitude de Heisenberg. Ce théorème montre qu'on ne peut arbitrairement réduire à la fois l'incertitude sur la position et sur la quantité de mouvement d'une particule; d'où la variance temporelle et la variance fréquentielle du signal satisfont (Mallat, 2000) :

$$\sigma_t^2 \sigma_\omega^2 \geq \frac{1}{4} \quad (2.3)$$

Où,

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{\|f\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \bar{t})^2 |f(t)|^2 dt, \quad \text{la variance autour de la localisation moyenne;}$$

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{2\pi\|f\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \bar{\omega})^2 |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega, \quad \text{la variance autour de la fréquence moyenne;}$$

$$\bar{t} = \frac{1}{\|f\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} t |f(t)|^2 dt, \quad \text{la valeur de position moyenne;}$$

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2\pi\|f\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega, \quad \text{la valeur de fréquence moyenne.}$$

Cette inégalité montre que les atomes temps-fréquence possèdent des boîtes de Heisenberg de surface $\sigma_t \cdot \sigma_\omega$, centrées en $(\bar{t}, \bar{\omega})$. Cette limite de résolution, conjointe en temps et en fréquence, a été palliée par l'approche temps-échelle qui consiste à appliquer le même concept que la transformation de Fourier à fenêtre glissante, mais où les fonctions de base possèdent des boîtes de Heisenberg de tailles variables.

2.4 La transformée de Fourier à fenêtre

Pour remédier à l'inconvénient de la transformation de Fourier qu'on a mentionné auparavant et qui est lié au fait du manque d'information temporelle du signal, Dennis Gabor a introduit en 1946 les atomes de Fourier à fenêtre. La méthode consiste à pondérer le signal par une fonction fenêtre de sorte à conserver uniquement les parties d'intérêt du signal. Concrètement, la transformation de Fourier à fenêtre glissante du signal s'obtient par la formule suivante (Mallat, 2000):

$$\hat{s}(f, g_\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-i2\pi f t} \bar{g}(t - \tau) dt, \quad (2.2)$$

Où

- $s(t)$ = le signal à traiter;
- f = la fréquence (Hz);
- $g(t)$ = la fonction fenêtre à choisir;
- τ = le paramètre de translation de la fenêtre.

Cette intégrale démontre que la multiplication du signal par l'atome défini localise l'intégrale de Fourier au voisinage de $t = \tau$. Lorsque la fonction fenêtre est gaussienne, l'intégrale est

nommée transformation de Gabor. La limite de cette intégrale de Gabor se résume dans la largeur fixe de la fenêtre diminuant l'intérêt à localiser les hautes fréquences, caractéristiques des phénomènes de transition, ainsi que les basses fréquences ou les longueurs d'onde s'étalant le long de l'axe temporelle.

2.5 La transformée en ondelettes

En 1983, Jean Morlet fut la première personne à avoir proposé le nom d'ondelette et à avoir utilisé la méthode dans l'analyse de données issues de sondages sismiques effectués pour des recherches géologiques (Truchetet, 1998). Cette méthode d'analyse est une transformation qui fournit les caractéristiques fréquentielles des signaux non stationnaires tout en conservant la localisation en vue d'une représentation ou d'une analyse espace-échelle qui est de l'intérêt de notre projet.

Dans le cadre de ce projet, nous présenterons les ondelettes correspondant à l'analyse espace-échelle, dont les fonctions de base reposent sur une forme unique de longueur de segment proportionnelle à l'échelle spatiale de résolution liée à leur fréquence par l'inégalité de Heisenberg. La figure (2.1) représente les pavages du plan temps-fréquence pour la représentation temps-échelle (Truchetet, 1998).

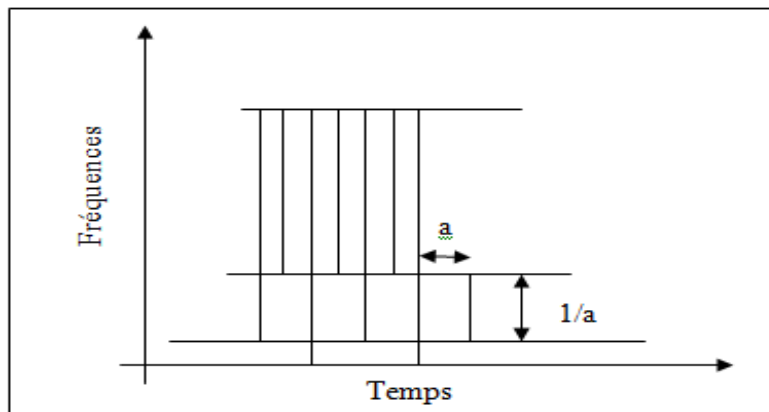


Figure 2.1 Pavage temps-fréquence pour la transformée en ondelette discrète

2.5.1 Définition d'une ondelette

Une ondelette est une fonction $\psi(x)$ vérifiant la condition d'admissibilité ou d'existence explicitée par l'équation (2.1) (Truchetet, 1998):

$$\int_0^{+\infty} |\hat{\psi}(w)|^2 \frac{dw}{|w|} = \int_{-\infty}^0 |\hat{\psi}(w)|^2 \frac{dw}{|w|} < \infty \quad (2.1)$$

Où

w = la fréquence (Hz);

$\hat{\psi}(w)$ = la transformée de Fourier de la fonction $\psi(x)$.

En général, cette relation est reformulée par une condition flexible indiquant que seulement la fonction ondelette doit être de moyenne nulle. Cette fonction analysante, utilisée dans la transformation en ondelette pour décomposer les signaux sur la fonction d'ondelette translatée et dilatée, n'est efficace que si elle est bien restreinte en espace et en fréquence.

2.5.2 Transformées en ondelettes

La transformée en ondelette est utilisée pour l'analyse des composantes transitoires de durée différentes des signaux. Cette méthode se sert des atomes dont les supports temporels ont des tailles variables (Mallat, 2000). La transformée en ondelette de la fonction $f(t)$ au temps u et à l'échelle s est donnée par l'équation (2.2) (Mallat, 2000) :

$$W f(u, s) = \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{\psi}\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (2.2)$$

L'équation de la transformée en ondelettes peut-être exposée comme étant le produit de convolution d'une fonction par des filtres passe-bande dilatés. La transformée est dyadique si le coefficient d'échelle s est égal à 2. Les transformées en ondelettes sont classées selon des familles qualifiées de discrètes ou continues et redondantes ou non. Les transformées en ondelettes continues sont déterminées en adoptant un facteur d'échelle et un pas de translation appartenant à l'ensemble des nombres réels. Ce type de transformées en

ondelettes, réalisé par une méthode approximative et discrète, est effectivement très redondant, car l'espace temps-fréquence est balayé de manière continue.

Les transformées en ondelettes discrètes traitent l'échantillonnage de l'espace-temps-fréquence avec rigueur et fournissent une mesure de l'éventuelle redondance obtenue. La fonction projetée sur un sous-espace créée par une famille d'ondelette, est continue et n'est calculée que numériquement à partir des coefficients dénombrables de la transformée en ondelettes sur les intervalles du sous-espace temps-fréquence. Dans le cadre de ce projet, nous présenterons les transformées en ondelettes dyadiques et non redondantes établies sur une base d'ondelettes orthonormées à partir d'une analyse multirésolution.

2.6 Bases d'ondelettes

2.6.1 Approximations multirésolution

L'approximation multirésolution, développée par Mallat et Meyer, est fondée sur l'idée que la modification de la résolution d'un signal permet de ne traiter que les détails intéressants pour une analyse donnée. La définition d'une analyse multirésolution établit les propriétés mathématiques, qui consistent à subdiviser l'espace des fonctions continues d'une variable réelle et de carré intégrable, $L^2(\mathbb{R})$, en sous-espaces V_j fermés, emboîtés les uns dans les autres et sont un changement d'échelle de l'espace V_0 (Mallat, 2000).

Soit $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ un ensemble de sous-espaces de $L^2(\mathbb{R})$. $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ définit une analyse multirésolution (AMR) de $L^2(\mathbb{R})$ si les six conditions suivantes sont satisfaites (Mallat, 2000):

- la première condition, intitulée la translation, exprime l'invariance de toute translation de longueur proportionnelle à l'échelle 2^j dans un sous-espace V_j ; ou :

$$f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(t - 2^{-j}k) \in V_j$$

- la deuxième condition, intitulée la croissance, indique qu'une approximation à la résolution 2^j contient toute l'information nécessaire au calcul d'une approximation à une résolution plus raffinée 2^{j+1} ; ou :

$$V_j \subset V_{j+1}$$

- la troisième condition, intitulée la dilatation, exprime que la dilatation par 2 des fonctions du sous-espace V_j amoindrit les détails et garantit une approximation plus grossière à une résolution 2^{j-1} ; ou :

$$f(t) \in V_{j-1} \Leftrightarrow f(2t) \in V_j$$

- la quatrième condition, intitulée la séparabilité, exprime que l'on perd tous les détails de la fonction quand la résolution tend vers 0; ou :

$$\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$$

- la cinquième condition, intitulée la densité, indique la convergence de la fonction projetée quand la résolution tend vers l'infini; ou :

$$\overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j} = L^2(\mathfrak{R})$$

- la sixième condition, intitulée la base orthonormée, exprime l'existence d'une base orthonormée qui peut s'interpréter comme une cellule unitaire de la résolution; ou :
il existe une fonction $\Phi(t) \in V_0$, nommée fonction d'échelle, tel que l'ensemble des fonctions $\{\Phi(t-k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ engendre une base orthonormée de V_0 .

Se basant sur les conditions de dilatation et de base orthonormée, la famille de fonction $\{2^{j/2}\Phi(2^j t - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ forme une base à toutes les échelles 2^j .

2.6.2 Fonction d'échelle

La projection orthogonale de la fonction $f(t)$ sur un sous-espace V_j est une approximation de cette fonction à l'échelle 2^j . La base orthonormée du sous-espace V_j est construite en translatant de $2^j k$ unités et en dilatant verticalement d'un facteur $2^{j/2}$ et horizontalement d'un facteur 2^j par rapport à la fonction de base orthonormée $\Phi(t)$ du sous-espace V_0 , telle que définie dans les conditions d'une AMR de $L^2(\mathbb{R})$. La fonction d'échelle d'une AMR $\{V_j\}$ est explicitée par l'équation (2.3) (Mallat, 2000) :

$$\Phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Phi(2^j t - k) \quad (2.3)$$

Pour améliorer l'approximation des fonctions $f(t)$ de $L^2(\mathbb{R})$, nous projetons sur un espace d'indice supérieur. Dans certaines applications, il est nécessaire d'enregistrer le détail des projections sur des espaces consécutifs. Pour cela nous définissons l'espace W_j , le complément de V_j dans V_{j+1} , par :

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j$$

L'ensemble des fonctions formant une base orthonormée de l'espace W_j est noté $\{\Psi_{j,k} = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$.

2.7 Les ondelettes de Daubechies

En 1987, Ingrid Daubechies a construit une famille de fonctions de base dans le cadre de l'analyse multirésolution en ondelettes (Daubechies, 1992). Ces ondelettes sont caractérisées par la compacité de leur support tout en préservant l'orthonormalité par translation de ces fonctions. L'avantage d'une fonction de base en ondelette à support compact réside dans son filtre associé qui procure une économie en coût de calcul du fait que le filtrage peut être appliqué par un simple produit de convolution court. Un des inconvénients des ondelettes de Daubechies est la propriété antisymétrique qui n'a aucune incidence sur notre cas d'étude. Le choix de l'ondelette dans une application de débruitage relève de sa capacité à produire un

maximum de coefficients d'ondelettes négligeables dans les échelles fines. Cette capacité dépend de la taille du support, du nombre de moments nuls de l'ondelette et essentiellement de la régularité du signal à étudier (Mallat, 2000).

2.7.1 Les filtres associés aux fonctions d'échelle

Les ondelettes de Daubechies sont des fonctions, continues et à support compact, calculées à partir des filtres associés de forme trigonométrique de degré fini, satisfaisant les conditions énoncées par Ingrid Daubechies (Daubechies, 1992) :

$$(i) \quad \left| \hat{h}(\pi) \right| = 0 \quad \text{où} \quad \hat{h}(w) = \sum_{k=0}^L h_k e^{-ikw} ; \quad (2.3)$$

$$(ii) \quad \left| \hat{h}(w) \right|^2 + \left| \hat{h}(w + \pi) \right|^2 = 2 ; \quad (2.4)$$

$$(iii) \quad \hat{h}(w) = \left(\frac{1 + e^{iw}}{2} \right)^N R(e^{-iw}) \quad \text{où} \quad \sup_w \left| R(e^{-iw}) = \sum_{t=0}^m r_t e^{-itw} \right| \leq 2^{N-1/2} . \quad (2.5)$$

La fonction d'échelle $\Phi(t)$ à support compact telle que $\hat{h}(w)$ est le filtre associé est unique à une constante multiplicative près et satisfait (Daubechies, 1992) :

$$\hat{\Phi}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \prod_{j=1}^{\infty} \hat{h}\left(\frac{w}{2^j}\right) \quad w \in \mathbb{R} \quad (2.6)$$

2.7.2 Moments nuls des ondelettes

Le nombre de moments nuls d'une ondelette est le degré ultime des polynômes orthogonaux à la fonction d'ondelette considérée. Cette caractéristique de l'ondelette entraîne une décroissance des coefficients d'ondelette aux échelles les plus fines ce qui est opportun pour la compression, le débruitage et la vitesse de calcul (Mallat, 2000).

Par définition, une fonction d'ondelette possède p moments nuls si

$$\int_{\mathbb{R}} t^l \Psi(t) dt = 0 \text{ pour } l = 0, 1, \dots, (p-1) \quad (2.7)$$

Les polynômes de degré $p-1$ orthogonaux à la fonction d'ondelette peuvent s'écrire sous forme d'une combinaison linéaire des fonctions d'échelle, base d'une AMR.

2.7.3 Les ondelettes à support compact

Les ondelettes de Daubechies sont caractérisées par leur support de longueur minimale par rapport au nombre de moments nuls donnés. Ces ondelettes orthogonales possèdent des supports de longueur d'au moins égaux à $2p-1$, où p est le nombre de moments nuls de l'ondelette considérée (Daubechies, 1992). Le choix d'une ondelette à support court permet de déceler les irrégularités incluses dans les signaux et d'avoir des temps de calcul plus courts, mais un compromis temps-fréquence doit être déterminé.

2.7.4 Mesures de régularité par ondelettes

La régularité des ondelettes de Daubechies s'accroît en augmentant le nombre de moments nuls. L'influence de cette régularité sur la reconstitution du signal à partir de ses coefficients d'ondelettes se traduit par une erreur régulière comparée à une erreur irrégulière, à énergie égale dans le cas d'ondelettes ayant un support compact de petite taille. Un meilleur compromis entre les supports d'ondelettes et les nombres de moments nuls peut être obtenu en appliquant le traitement par multiondelettes de Geronimo et al, car il utilise plusieurs fonctions d'ondelettes et fonctions d'échelle (Mallat, 2000).

2.7.5 Décomposition et reconstruction par ondelettes

Une transformée en ondelette décompose successivement chaque projection d'une fonction $f(t)$ sur une fonction d'échelle $P_{V_{j+1} f}$ en une projection sur une fonction d'échelle et une fonction d'ondelette de résolution moins raffinée $P_{V_j f}$ et $P_{W_j f}$ respectivement. À la reconstruction, $P_{V_{j+1} f}$ est calculée à partir de $P_{V_j f}$ et de $P_{W_j f}$.

La décomposition en ondelettes se calcule par les formules suivantes (Ruch, 2009) :

$$\begin{aligned} P_{V_{j+1},f}(t) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle f(t), \Phi_{j+1,k}(t) \rangle \Phi_{j+1,k}(t) \\ &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n \Phi_{j,n}(t) + \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n \Psi_{j,n}(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Où,

$$\begin{aligned} a_k &= \langle f(t), \Phi_{j+1,k}(t) \rangle, \\ b_n &= \langle f(t), \Phi_{j,n}(t) \rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \bar{h}_{k-2n}, \\ c_n &= \langle f(t), \Psi_{j,n}(t) \rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k (-1)^n \bar{h}_{1+2n-k}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

La reconstruction en ondelettes se calcule par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} P_{V_{j+1},f}(t) &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} b_n \Phi_{j,n}(t) + \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n \Psi_{j,n}(t) \\ &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle f(t), \Phi_{j+1,k}(t) \rangle \Phi_{j+1,k}(t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Où,

$$\begin{aligned} b_n &= \langle f(t), \Phi_{j,n}(t) \rangle, \\ c_n &= \langle f(t), \Psi_{j,n}(t) \rangle, \\ a_k &= \langle f(t), \Phi_{j+1,k}(t) \rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} b_k \bar{h}_{k-2n} + \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k (-1)^n \bar{h}_{1+2n-k}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Les fonctions $\Phi(t)$ et $\Psi(t)$ sont les fonctions d'échelle et d'ondelette pour une AMR, respectivement.

2.8 Conclusion

Ce deuxième chapitre a présenté un sommaire important pour le traitement du signal basé sur la transformation de Fourier et la transformée en ondelette, méthode d'analyse espace-échelle. La méthode d'approximation multirésolution, qui permet de prononcer les caractéristiques fréquentielles à de multiples résolutions, a été définie ainsi que les ondelettes

de Daubechies, fonctions de base pour l'étude des profils longitudinaux de la chaussée. Les formules de décomposition et de construction par ondelettes ont été décrites pour les versions discrètes des signaux qui seront seuls envisagées dans le cadre de ce projet. Dans les chapitres suivants, les défauts de la chaussée et les gammes de longueurs d'onde liées seront présentés ainsi que la méthode de filtrage accommodé basée sur le seuillage par ondelettes.

CHAPITRE 3

UNI DE LA CHAUSSÉE

3.1 Introduction

L'uni longitudinal des chaussées constitue une des qualités d'usage de la route. Les irrégularités du profil longitudinal de la chaussée, dont les longueurs d'onde varient entre 0.5m et 35m, ont un effet néfaste sur le confort du conducteur et des passagers dû aux vibrations du volant et de la caisse, sur la sécurité en provoquant des sollicitations dynamiques élevées aux véhicules en mode de freinage ou d'accélération transversale et sur le coût de fonctionnement des voitures, voire la consommation en carburant et l'incidence sur la fréquence de réparation et l'usure de la voiture. Ils sont aussi la cause de la surcharge dynamique des poids lourds qui réduit la durée de vie de la structure de la chaussée.

L'uni longitudinal d'une chaussée, défini académiquement comme un signal aléatoire, se mesure à l'aide d'appareils classés en deux familles : les appareils de type réponse et les appareils de type Profilomètre. Au Québec, le ministère des Transports mesure l'uni selon l'indice de rugosité international et l'inclut comme exigence contractuelle d'acceptation des travaux; de ce fait, seuls les appareils de type Profilomètre seront considérés pour la mesure de la qualité du profil longitudinal. Des exigences supplémentaires sur la gamme de longueurs d'onde des défauts liée au confort et la sécurité, fonction de la vitesse maximale de circulation, devront être imposées.

3.2 L'uni des chaussées

La valeur moyenne de l'estimation et l'IRI, associées à l'uni de la chaussée, sont les deux critères d'évaluation de la performance des méthodes utilisées pour estimer le profil longitudinal post-réhabilitation de la chaussée. Il est donc, d'une nécessité primordiale de définir l'uni longitudinal de la chaussée, facteur fort sensible aux usagers de la route.

La rugosité de la chaussée est l'ensemble des variations en élévation de la surface de la chaussée provoquant les vibrations des voitures circulant sur la chaussée (Sayers, 1986). Dans le cadre de ce projet, les dénivellations ou les irrégularités par rapport au profil longitudinal théorique de la chaussée seront considérées. Ces défauts sont situés dans une gamme de longueurs d'onde variant entre 0.5m et 35m. Le relevé des élévations est réalisé par un profilomètre inertiel de classe-1 conformément à la norme ASTM E-950 (infoDLC, MTQ, mai 2011). Les qualités de l'uni de la chaussée sont liées aux facteurs associés aux types de véhicules, à la circulation, aux conditions climatiques, au temps, à l'environnement, aux types de chaussées et aux méthodes d'exécution ou de réparation des chaussées (Vaillancourt, 2004).

3.3 Défauts d'uni de la chaussée souple et longueurs d'ondes

Dans la bibliographie, on trouve quatre critères de classement des dégradations des chaussées. Ces critères sont identifiés selon la nature, l'origine, l'objectif de l'entretien qui leur correspond et tout simplement selon l'ordre alphabétique. Pour les chaussées souples, le classement par nature est adopté pour sa simplicité, sa simultanéité avec les relevés et l'exploitation fréquentielle du profil longitudinal de la chaussée (Assaf, 2010).

Le type de chaussée rencontré dans cette étude est la chaussée souple ou flexible. La structure d'une chaussée souple est composée d'une couche de revêtement traitée aux liants hydrocarbonés et d'une ou de plusieurs couches granulaires, le tout assurant une répartition des charges sur les sols d'infrastructure. Les rôles supplémentaires spécifiques à chaque couche sont décrits comme suit (Assaf, 2010) :

- revêtement : (i) imperméabiliser le corps de la chaussée; (ii) assurer le confort et la sécurité de l'utilisateur;
- fondation : (i) constituer une plate-forme pour le revêtement; (ii) protéger les sols d'infrastructure du gel;

- sous-fondation : (i) constituer une plate-forme pour la fondation; (ii) satisfaire un bon drainage de la fondation; (iii) protéger les sols d'infrastructure du gel; (iv) éviter la contamination du corps de la chaussée par les sols d'infrastructure.

Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent les défauts de surface d'une chaussée souple et leurs causes probables dans les différentes couches de la structure (Assaf, 2010).

Tableau 3.1 Les défauts de surface d'une chaussée souple et leurs causes probables dans les différentes couches de la structure

Dégradations	Revêtement	Matériaux granulaires	Infrastructure
Fissure transversale	-Retrait thermique -Fragilisation du bitume -Joints sous-jacents -Joint de construction -Épaisseur insuffisante		
Fissure en pistes de roues	-Fatigue du revêtement -Trafic lourd ou intense	-Mauvais drainage -Capacité structurale faible -Mauvais matériaux	-Capacité structurale faible -Mauvais drainage
Fissure longitudinale hors pistes de roues	-Joint de construction -Ségrégation de l'enrobé -Fragilisation du bitume		-Infra. gélive et/ou déform. différentiel.
Fissure de gel		-Mauvais drainage	-Infra gélive et déform. différentiel. -Remblai instable
Fissure en rives	-Manque de support latéral -Structure discontinue -Apport d'eau de ruissellement		-Assèchement de l'infra
Fissure polygonale	-Retrait thermique -Fragilisation du bitume	-Mauvais drainage -Capacité structurale faible	-Infra gélive
Fissure parabolique	-Épaisseur insuffisante -Défaut de mise en œuvre -Efforts tangentiels importants		
Carrelage	-Fragilisation du bitume -Trafic lourd ou intense	-Capacité structurale faible -Mauvais matériaux	
Lézarde		-Mauvais drainage	-Infra gélive et/ou déform. différentiel. -Remblai instable
Flache	-Défauts de surface -Mauvais drainage -Compactage insuffisant	-Compactage insuffisant -Mauvais matériaux	-Remblai instable -Mauvais matériaux
Ornière à faible rayon	-Enrobé à stabilité insuffisante -Compactage insuffisant -Usure de l'enrobé en surface -Trafic lourd ou intense	-Matériaux instables	
Ornière à grand rayon	-Trafic lourd ou intense -Usure de l'enrobé en surface -Attrition des matériaux -Accumulation des déformations permanentes.	-Mauvais drainage -Compactage insuffisant -Capacité structurale faible -Attrition des matériaux	

Tableau 3.2 Les défauts de surface d'une chaussée souple et leurs causes probables dans les différentes couches de la structure

Dégradations	Revêtement	Matériaux granulaires	Infrastructure
Gonflement/ Bourrelet	-Efforts tangentiels importants -Effet thermique aux raccords de différentes structures.		-Infra gélive et/ou déform. différentiel.
Affaissement	-Structure discontinue	-Mauvais matériaux -Compactage insuffisant -Manque de support latéral	-Remblai instable -Assèchement de l'infra -Mauvais matériaux -Réseaux souterrains -Infra. gélive et/ou déform. différentiel.
Soulèvement différentiel		-Mauvais drainage -Matériaux sensibles à l'humidité	-Infra. gélive et/ou déform. différentiel. -Nappe phréatique élevée -Matériaux hétérogènes -Réseaux souterrains à faible profondeur -Structure discontinue
Ondulation à ondes courtes	-Enrobé à stabilité insuffisante -Mauvaise qualité de travail -Sollicitations tangentielles élevées	-Capacité structurale faible	
Désenrobage et arrachement	-Drainage inadéquat -Mauvais dosage ou enrobage du bitume - Compactage insuffisant -Agréats hydrophiles ou bitumophobes -Trafic lourd ou intense -Fragilisation du bitume		
Pelade	-Épaisseur insuffisante -Trafic lourd ou intense -Mauvaise adhérence de la couche de roulement		
Nids de poule	-Épaisseur insuffisante -Trafic lourd ou intense -Défaut de fabrication ou de mise en œuvre	-Capacité structurale faible	
Ressuage	-Surdosage du bitume -Trafic lourd ou intense sous température élevée -Excès de liant d'accrochage -Mauvaise formulation de l'enrobé		
Dénivellation et fissuration autour des regards et puisards	-Dégradation de la cheminée par la saumure	-Impacts dynamiques cumulant des déform. permanentes -Perte de matériaux autour de la structure -Consolidation ou tassement de la chaussée -Cycle de gel et de dégel engendrant des déformations permanentes	
Coupe et tranchée (Fissuration ou affaissement)	-Manque d'étanchéité du joint de coupe	-Compactage insuffisant des matériaux de remblayage -Hétérogénéité des matériaux -Relâchement des contraintes dû à la perte de support latéral -Remblayage incomplet sous les bords du revêtement	

Les défauts observables du profil longitudinal de la chaussée peuvent être classifiés selon cinq gammes de longueurs d'onde (Mann et McManus, 1999) :

- faibles longueurs d'onde, 0 à 0.5m, liées à la texture de la surface et au mélange bitumineux;
- petites longueurs d'onde, 0.5 à 2 m, liées aux défauts dans les couches de revêtement et de fondation granulaire;
- moyennes longueurs d'onde, 2 à 3 m, associées aux déformations dans la couche d'infrastructure;
- grandes longueurs d'onde, 3 à 35 m, associées à l'affaissement ou au soulèvement de l'infrastructure;
- très grandes longueurs d'onde, 35 à 100 m, correspondantes au profil longitudinal théorique de la chaussée.

La rugosité de la chaussée peut générer simultanément une accélération verticale et latérale dans un véhicule. L'accélération verticale est le principal facteur affectant le confort des usagers et découle de l'uni longitudinal de la chaussée. Les défauts de planéité de la chaussée, affectant le confort et la sécurité des usagers, sont responsables de quatre types de mouvement du véhicule : (i) le pompage ou le mouvement vertical du véhicule ; (ii) le roulis ou l'oscillation du véhicule autour de son axe longitudinal ; (iii) le lacet ou l'oscillation du véhicule autour de l'axe vertical ; (iv) le tangage ou le mouvement oscillatoire du véhicule dans le sens du roulement (Haas, 1994).

Le modèle du quart de véhicule est utilisé pour expliquer les mouvements verticaux prédominants et déterminer les deux fréquences de résonances, soit 1 à 1,5 Hz pour le mouvement de caisse, et 10 à 12 Hz pour le mouvement de roues (SETRA, 1993).

La figure 3.1 montre la relation entre les fréquences de résonances, la vitesse du véhicule et la longueur d'onde du profil longitudinal de la chaussée.

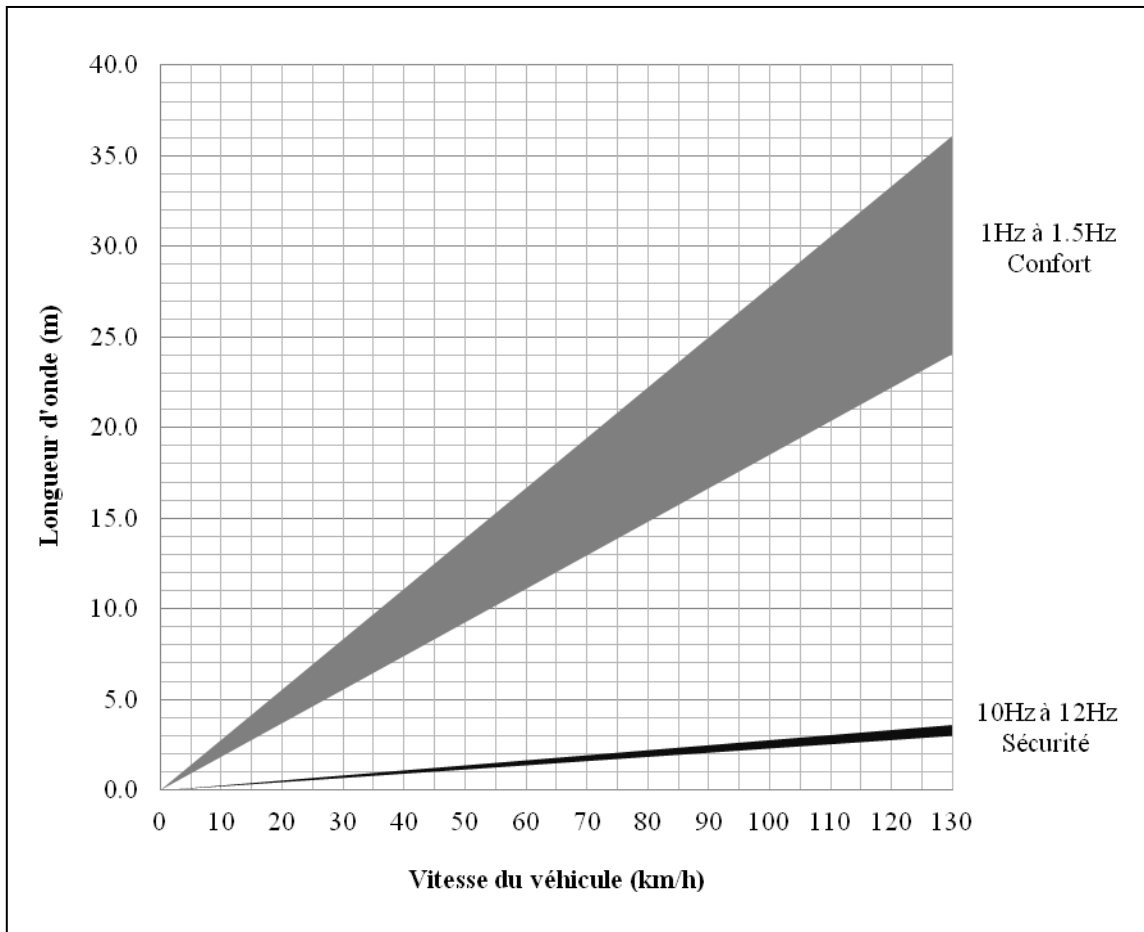


Figure 3.1 Relation entre les fréquences de résonances, la vitesse du véhicule et la longueur d'onde du profil longitudinal de la chaussée

3.4 L'IRI (Indice de rugosité international)

L'indice de rugosité international (IRI) est un indicateur standard caractéristique de la rugosité de la chaussée calculé à partir d'une simulation du quart de véhicule roulant à une vitesse de 80 km/h sur le profil longitudinal mesuré. Cette transformation mathématique du profil longitudinal mesuré est caractérisée par: (i) son invariabilité par rapport au temps et sa validité sur tous les types de chaussée, (ii) sa compatibilité avec toutes les méthodes de mesure du profil longitudinal de la route, (iii) sa valeur relevant du confort des usagers, de la

sécurité et du coût de fonctionnement des véhicules, (iv) sa validité comme référence de calibration des systèmes de mesure de type réponse (Sayers, 1986).

À l'université du Michigan, des études de simulation de véhicule ont démontré que les modèles analogiques du demi-véhicule et du véhicule intégral ne procurent pas un avantage sur le modèle analogique du quart de véhicule par rapport au calibrage des systèmes de mesure de type réponse et dont les calculs sont plus compliqués (Haas, 1994). Les paramètres du modèle du quart de véhicule comprennent la masse suspendue associée à la masse du châssis supportée par une roue; les constantes du ressort et de l'amortisseur formant la suspension; la masse non suspendue associée aux masses du pneu, de la roue, de la moitié de l'essieu et de la suspension; et la constante de ressort du pneu. La figure 3.2 présente d'une façon simplifiée le modèle du quart de véhicule.

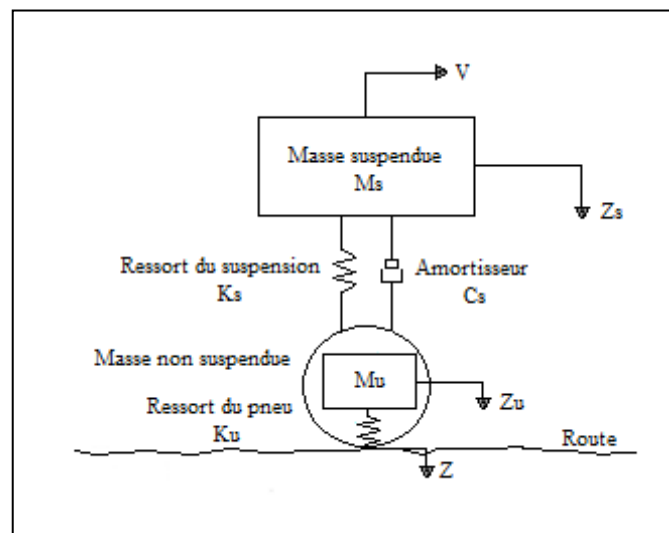


Figure 3.2 Modèle du quart de véhicule
Adaptée de Haas (1994)

En appliquant la seconde loi de Newton sur la masse suspendue M_s et la masse non suspendue M_u , on obtient les deux équations différentielles (3.1) et (3.2) qui décrivent le mouvement du modèle du quart de véhicule :

$$Ms\ddot{Z}_s + Cs(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + Ks(Z_s - Z_u) = 0 \quad (3.1)$$

$$Ms\ddot{Z}_s + Mu\ddot{Z}_u + Kt(Z_u - Z) = 0 \quad (3.2)$$

Où,

- Z = Élévation du pseudoprofil
- Z_s = Élévation de la masse suspendue
- Z_u = Élévation de la masse non suspendue
- K_s = Constante de ressort de la suspension
- C_s = Constante de l'amortisseur de la suspension
- K_t = Constante de ressort du pneu
- M_s = Masse suspendue
- M_u = Masse non suspendue

Les termes d'élévations marqués par un point ou un double point représentent la vitesse et l'accélération respectivement.

Les systèmes de mesure de type réponse mesurent le mouvement vertical entre l'essieu et le châssis du véhicule. La simulation du quart de véhicule nécessite le calcul de cette différence en élévation en intégrant la différence en vitesse entre la masse suspendue et la masse non suspendue suscitant l'indice de rugosité international, l'IRI (3.3):

$$IRI = \frac{1}{L_s} \int_0^{L_s/V_{80}} |\dot{Z}_s - \dot{Z}_u| dt \quad (3.3)$$

Où,

- L_s = Longueur du segment de 100m
- V₈₀ = Vitesse de référence de 80km/h

Dans le devis relatif à l'uni de surface en enrobé, le ministère des Transports du Québec exige une valeur limite de l'IRI de 1.7km/m pour l'acceptation de l'uni de surface du segment de 100m de longueur. Pour chacune des voies assujetties aux exigences d'uni, le montant d'ajustement relatif à l'uni de surface applicable à chacun des segments de 100m acceptés est indiqué au tableau 3.3 (infoDLC, avril 2003).

Pour des raisons techniques, les appareils de mesure de l'uni de la chaussée ne calculent le profil longitudinal que dans une gamme de longueurs d'onde liée aux qualités d'intérêt de la chaussée, soit de 0.3 à 500m. L'analyse de l'IRI agit comme un filtre qui atténue considérablement les oscillations de la route dont les valeurs des fréquences se situent hors de l'intervalle délimité par les valeurs 0,8 et 17Hz (Sayers, 1986). Le graphe de la figure 3.3 montre l'amplitude de la fonction de réponse aux oscillations de la route de différentes fréquences temporelles, basée sur les équations différentielles du modèle de référence du quart de véhicule.

Tableau 3.3 Montant d'ajustement relatif à l'uni de surface par segment

Valeur d'IRI retenue du segment accepté (m/km)	Montant d'ajustement relatif à l'uni de surface (\$)
IRI ≤ 0,8	100
0,8 < IRI ≤ 0,9	50
0,9 < IRI ≤ 1,0	20
1,0 < IRI ≤ 1,1	10
1,1 < IRI ≤ 1,2	0
1,2 < IRI ≤ 1,3	-10
1,3 < IRI ≤ 1,4	-20
1,4 < IRI ≤ 1,5	-100
1,5 < IRI ≤ 1,6	-500
1,6 < IRI ≤ 1,7	-1000

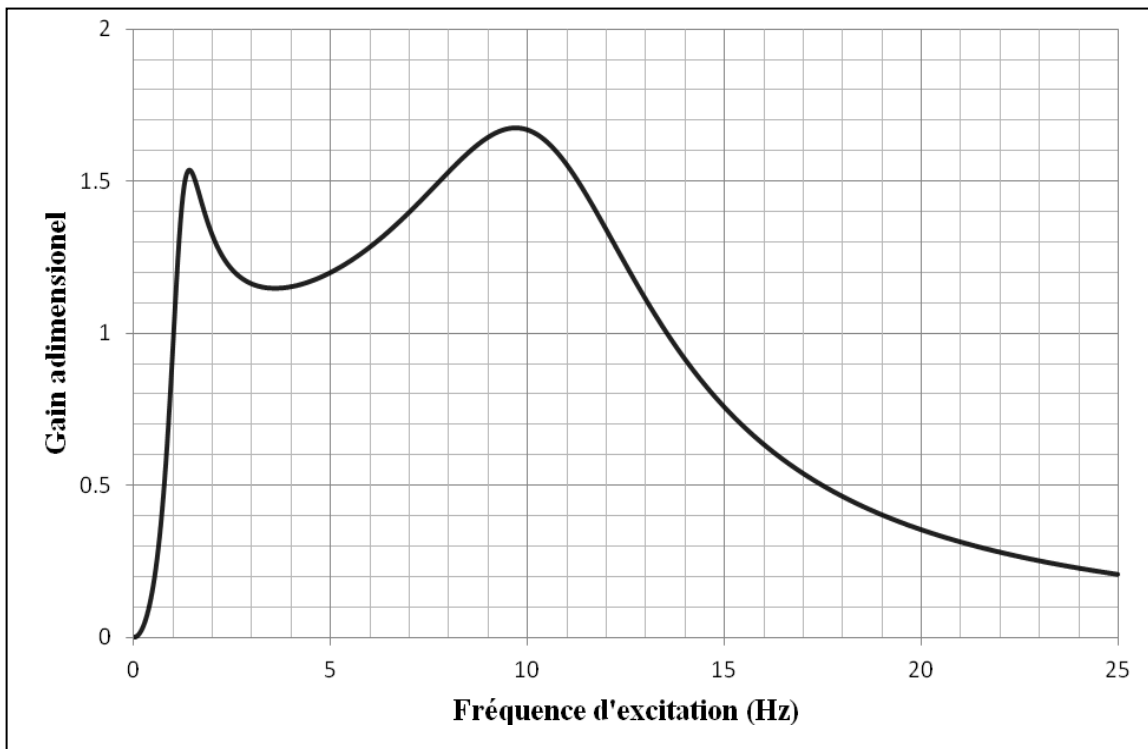


Figure 3.3 Amplitude de la fonction de réponse du modèle de quart de véhicule aux fréquences

3.5 Appareils de mesure de l'uni longitudinal

Les systèmes de mesure de la rugosité de la surface de la chaussée sont définis hiérarchiquement en quatre catégories, s'étalant des méthodes profilométriques rigoureuses et susceptibles à des analyses détaillées (2 groupes), aux systèmes de mesure de type réponse (response-type road roughness measured systems (RTRRMS's)) exploités pour leur praticité et leur rapidité, à l'évaluation subjective où la précision n'est pas essentielle (Sayers, 1986).

La première catégorie, *Profils de précision*, représente les normes de précision les plus élevées pour la mesure de l'IRI. Elle nécessite que le profil longitudinal dans une trace de

roue soit déterminé pour calculer la valeur de l'IRI. L'exactitude des appareils à grand rendement doit être validée vis-à-vis une procédure établie telle que celle du niveau et de la mire. La deuxième catégorie, *Autres méthodes profilométriques*, inclut toutes les méthodes de détermination de l'IRI basée sur le profil longitudinal mesuré dont la précision ne vérifie pas les exigences de la première catégorie. La troisième catégorie, *IRI estimé à partir des équations de corrélation*, comprend les méthodes de mesure de l'IRI utilisant la corrélation comme approche de calibrage du type d'instrumentation ou de véhicule utilisé pour obtenir les mesures brutes de la rugosité. Les RTRRMS's étalonnés par corrélation sont qualifiés de la troisième catégorie. La quatrième catégorie, *Évaluation subjective et mesures non calibrées*, est constituée par les méthodes de calibrage par description. Cette équivalence approximative est établie par la comparaison à des descriptions verbales ou graphiques des chaussées identifiées par leurs valeurs associées de l'IRI. Un RTRRMS non calibré est classé dans cette catégorie (Sayers, 1986).

Le MTQ mesure le profil longitudinal de la chaussée à l'aide d'un profilomètre inertiel de catégorie 1, le *Road Surveyor profilometer T-6500*. Les mesures du pseudoprofil sont effectuées dans les deux traces de roue à tous les 50 mm de route auscultée. La moyenne de 7 lectures dans un intervalle mobile de 300 mm est calculée à tous les 150 mm, puis enregistrée comme donnée de pseudoprofil conformément à la norme *Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial* (ASTM E950) (infoDLC, MTQ, février 1997).

Le principe de mesure du pseudoprofil est fondé sur la combinaison des lectures de trois capteurs: un capteur de hauteur infrarouge, un accéléromètre et un capteur de distance longitudinale. La hauteur de référence mobile est définie par l'intégrale double de l'accélération verticale du capteur de hauteur, mesurée par l'accéléromètre. Le capteur de hauteur mesure la distance entre le véhicule et la chaussée. Les mesures des distances longitudinales servent à associer les chaînages aux profils d'élévation (Karamihas et Gillespie, 1999). Elson Spangler et William Kelly ont décrit mathématiquement la méthode de mesure du profil longitudinal de la chaussée par l'équation :

$$Z(x) = H(x) + \iint_x A_t(s)/V^2 dsds$$

(3.1)

Où,

 x = distance longitudinale $Z(x)$ = profil longitudinal calculé $H(x)$ = mesure du capteur de hauteur $A_t(s)$ = accélération verticale du capteur de hauteur V = vitesse du véhicule

3.6 Conclusion

Ce troisième chapitre a présenté la définition et la méthode de calcul de l'IRI, critère d'acceptation des travaux de revêtement des chaussées par le MTQ. Il a montré que les longueurs d'onde des défauts de surface d'une chaussée sont groupées en cinq catégories liées aux défauts dans les couches de la structure et leurs causes probables de dégradations, et dont certaines affectent la sécurité et le confort des usagers de la route. Enfin, les différents systèmes de mesures de la rugosité de la surface de la chaussée présentés quantifient l'uni de la chaussée et ne décrivent pas les propriétés fréquentielles et la régularité locale du profil longitudinal de la chaussée ce qui justifie l'importance de développer un nouvel outil d'analyse du profil longitudinal de la chaussée.

CHAPITRE 4

LES MÉTHODES DE FILTRAGE

4.1 Introduction

Ce chapitre résume l'état de connaissance de la recherche concernant le filtrage d'un profil longitudinal d'une chaussée. Les approches de filtrage générales sont d'abord présentées pour ensuite faire place aux techniques de débruitage par ondelettes. Ces méthodes de filtrage générales furent développées et décrites en détail dans le Word Bank Technical Paper no. 46, Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements (Sayers, 1986).

Les trois méthodes de filtrage couramment utilisées sont : La densité spectrale de puissance est l'outil qui aide à déceler les erreurs de mesure obtenue par le profilomètre inertiel et à identifier les types de dégradations dominantes dans le profil longitudinal de la chaussée; la moyenne mobile est appliquée sur les profils longitudinaux de la chaussée pour séparer les différents types de rugosité ou éliminer l'influence des fissures et le filtre Butterworth est utilisé pour traiter les mesures du profil longitudinal de la chaussée réalisées à partir des instruments de précision (Sayers, 1996).

Dans le cadre de ce projet, nous passerons en revue les méthodes de filtrage par ondelette développées par Donoho et Johnstone (1994, 1995), et Kwon (2002). Ces méthodes sont basées sur des estimateurs par seuillages servant à supprimer les bruits additifs et à restaurer les signaux dégradés par les filtres de lissage, dans l'hypothèse où le signal est un processus déterministe et le bruit qui l'affecte est gaussien et blanc.

4.2 Densité spectrale de puissance

L'uni longitudinal d'une chaussée est défini académiquement comme un signal aléatoire décrit en matière de sa densité spectrale de puissance, fonction de la fréquence en cycles par

unité de distance. La densité spectrale de puissance d'un signal, à puissance finie, est définie comme étant la transformée de Fourier de sa fonction d'autocorrélation, produit scalaire du signal et de son retardé. La densité spectrale de puissance, notée simplement par DSP, est calculée par les formules suivantes (Davis & Thompson, 2001) :

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\delta) e^{-i2\pi f\delta} d\delta \quad (4.1)$$

et,

$$R_{xx}(\delta) = \lim_{L_s \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{L_s} \int_0^L x(l) x(l - \delta) dl \right] \quad (4.2)$$

Où,

- S_{xx} = densité spectrale de puissance de $x(l)$ ($m^3/cycle$);
- R_{xx} = autocorrélation de $x(l)$ (m^2);
- $x(l)$ = profil longitudinal de la chaussée (m);
- L_s = longueur du tronçon à l'étude (m);
- f = variable fréquentielle (cycle/m).

Pour tenir compte des différents types d'instruments de mesure du profil longitudinal de la chaussée, de l'effet de bord dû à la longueur finie du tronçon à l'étude et du caractère discret du signal aléatoire obtenu; une méthode de calcul de la densité spectrale de puissance, nommée « Élimination de dérive », fut développée et décrite en détail dans le Word Bank Technical Paper no. 46, Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements (Sayers, 1986). La DSP est un outil qui aide à révéler les erreurs de mesure obtenue par le profilomètre inertiel et à identifier les types de dégradations dominantes des chaussées envisagées sans toutefois les localiser.

4.3 Filtrage par moyenne mobile

La moyenne mobile consiste en un filtre caractérisé par son atténuation des petites longueurs d'onde. Le filtre des moyennes mobiles ou le filtre passe-bas, appliqué à des intervalles de longueur égale au contact du pneu, permet par un calcul simple et intuitif de lisser le profil longitudinal de la chaussée; il est défini mathématiquement par la formule suivante (Sayers, 1986) :

$$y_f(x) = 1/b \int_{x-b/2}^{x+b/2} Y_r(X) dX \quad (4.3)$$

Où,

- y_f = profil longitudinal filtré de la chaussée (m);
- Y_r = relevé du profil longitudinal de la chaussée (m);
- x = distance longitudinale (m);
- b = longueur de base des moyennes mobiles (m);
- X = variable d'intégration (m).

Pour mettre en relief les petites longueurs d'onde du profil longitudinal de la chaussée, grand intérêt dans le domaine des chaussées, on procède à l'application du filtre antilissage ou passe-haut qui consiste à soustraire du profil initial le profil filtré par lissage. Le graphe de la figure 4.1 montre le gain des différents sinusoides, caractéristiques d'un profil longitudinal d'une chaussée et filtrées par les filtres des moyennes mobiles passe-bas et passe-haut, en fonction du rapport de la longueur de base des moyennes mobiles aux longueurs d'onde des sinusoides.

Bien que les filtres des moyennes mobiles sont appliqués sur les profils longitudinaux de la chaussée pour séparer les différents types de rugosité ou éliminer l'influence des fissures; leur bande de transition prolongée graduellement, la bande de rejet ondulatoire du filtre de lissage et la bande passante amplificative du filtre antilissage distordent le profil filtré et les disqualifient de filtre idéal pour la séparation des sinusoides de différentes longueurs d'onde.

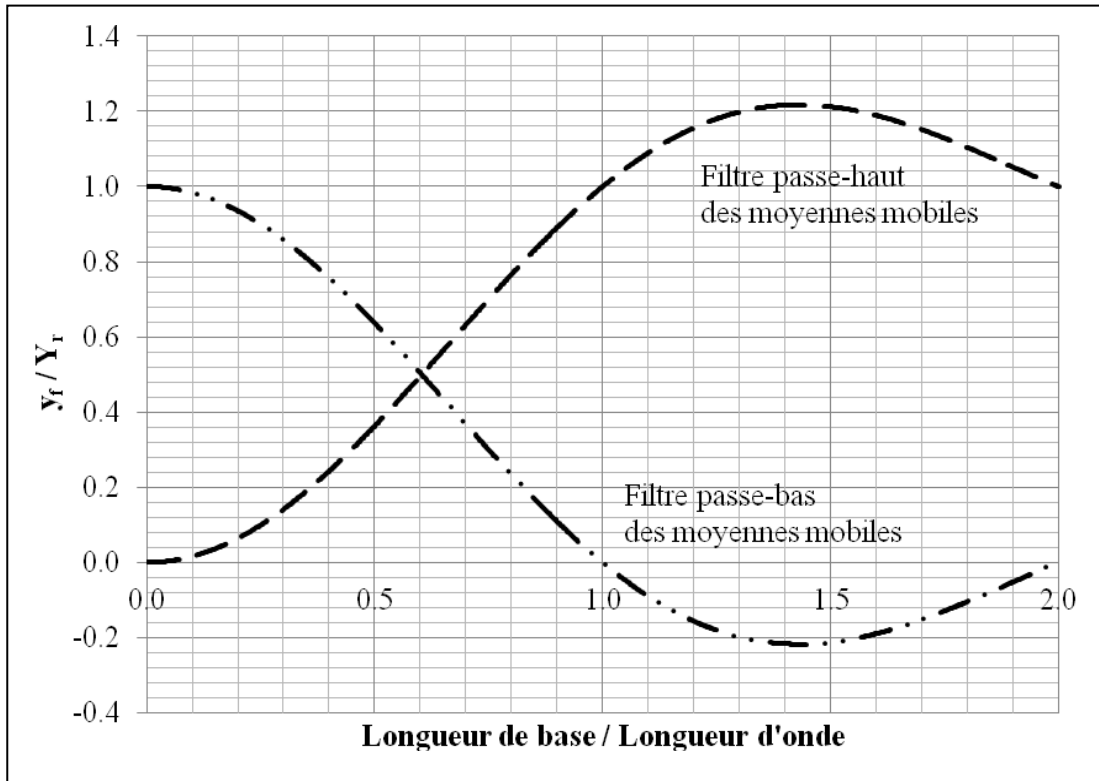


Figure 4.1 La réponse du nombre d'onde normalisé aux filtres des moyennes mobiles

4.4 Filtrage par bandes passantes

Le filtrage dans le domaine fréquentiel est une opération consistant à modifier la transformée de Fourier du signal composite; suivi du calcul de la transformée de Fourier inverse pour obtenir le signal utile (Gonzalez, 2008). L'expression permettant de connaître la sortie du filtre $Y(l)$, est de la forme :

$$Y(l) = \int_{\Re} H(f) \hat{X}(f) e^{i 2\pi f l} df \quad (4.4)$$

Où,

$\hat{X}(f)$ = la transformée de Fourier du signal composite $X(l)$ (m²/cycles);

$H(f)$ = la fonction de transfert du filtre;
 $Y(l)$ = le signal de sortie du filtre (m);
 f = variable fréquentielle (cycles/m).

Le filtre Butterworth est un outil utilisé dans le traitement des mesures du profil longitudinal de la chaussée, réalisées à partir des instruments de précision (Sayers, 1996). En terme analogique, le filtre passe-bas de Butterworth a pour module de gain complexe :

$$|H_n(i2\pi f)| = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}} \quad (4.3)$$

Où,

f = variable fréquentielle (cycles/m);
 f_c = fréquence de coupure (cycles/m);
 n = ordre du filtre.

À l'intérieur de la bande passante, le module du gain du filtre passe-bas est relativement constant et sa phase varie linéairement résultant d'un signal retardé, mais le moins déformé (Mari, 2001). Le graphe de la figure 4.2 montre le gain en amplitude des différentes fréquences normalisées par rapport à la fréquence de coupure f_c , selon l'ordre n du filtre passe-bas de Butterworth. Même si le fait que le filtre de Butterworth est une bonne approximation, aussi meilleure que l'ordre n est élevé, il n'élimine pas l'influence des fissures dans le profil longitudinal de la chaussée lors du calcul des indices de rugosité, malgré la simultanéité d'un filtrage par moyenne mobile (Kawamura, 2013).

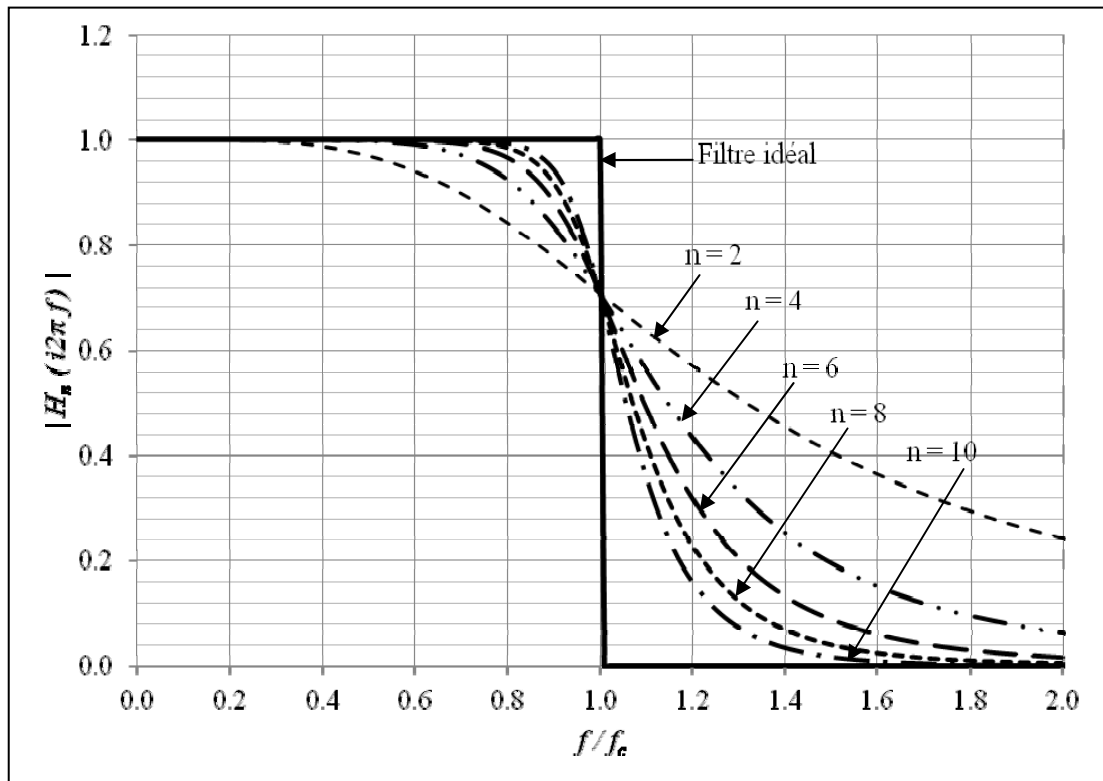


Figure 4.2 Les gains de filtres passe-bas de Butterworth d'ordre n en fonction de la fréquence

4.5 Filtrage par ondelette

Le filtrage par ondelette consiste à développer un estimateur par seuillage étudié dans des bases d'ondelettes et de paquets d'ondelettes, servant à supprimer les bruits additifs et à restaurer les signaux dégradés par les filtres de lissage. Des opérateurs d'estimations non linéaires à partir de représentations compactes sont aussi simples, performants et minimisent le risque autant que le modèle probabiliste utilisé du signal exploite l'information préalablement (Mallat, 2000).

Dans le cadre de ce projet, nous revoyons les méthodes de Donoho et Johnstone (1994, 1995) qui s'appuient sur l'hypothèse selon laquelle le signal est un processus déterministe et le bruit qui l'affecte est gaussien et blanc. Cette hypothèse a permis de développer la fonction de

filtrage des coefficients en ondelettes du signal bruité. L'hypothèse développée par Cressie et Huang (1998), où le processus déterministe est altéré par un gaussien stationnaire, atteint de meilleures reconstructions de signaux que leurs prédécesseurs (Labbé, 1999).

Selon Donoho et Johnstone, la méthode de reconstruction d'un signal, basée sur le débruitage des coefficients en ondelettes des données bruitées, comporte quatre étapes :

- représenter les données bruitées en ondelettes,
- estimer le seuil qui minimise l'estimateur sans biais du risque,
- contracter les coefficients en ondelettes par la fonction de seuillage,
- reconstruire par la transformée en ondelette inverse le signal débruité.

Dans cette méthode de reconstruction d'un signal, les coefficients d'échelle sont inaltérés car ils sont accordés au signal débruité.

4.5.1 Méthode de seuillage

Dans une série d'articles, Donoho et Johnstone ont introduit les méthodes de seuillage basées sur la supposition que les coefficients en ondelettes de petite amplitude sont attribuables uniquement au bruit gaussien et blanc (Donoho et Johnstone, 1994). Ces estimateurs de seuillage sont le seuillage dur et le seuillage doux, d'où découle la méthode du seuillage dur modifié de Kwon (Kwon, 2002).

4.5.1.1 Seuillage dur

Un estimateur par seuillage dur s'implémente à l'aide de la fonction définie par (Donoho et Johnstone, 1994) :

$$\eta_H(d_j, T) = \begin{cases} d_j & |d_j| > T \\ 0 & |d_j| \leq T \end{cases} \quad (4.4)$$

Où,

d_j = Coefficients en ondelette des données bruitées;

T = Seuil estimé.

Le graphe de la figure 4.3 montre la fonction d'un estimateur par seuillage dur dans le cas où le seuil estimé est égal à l'unité.

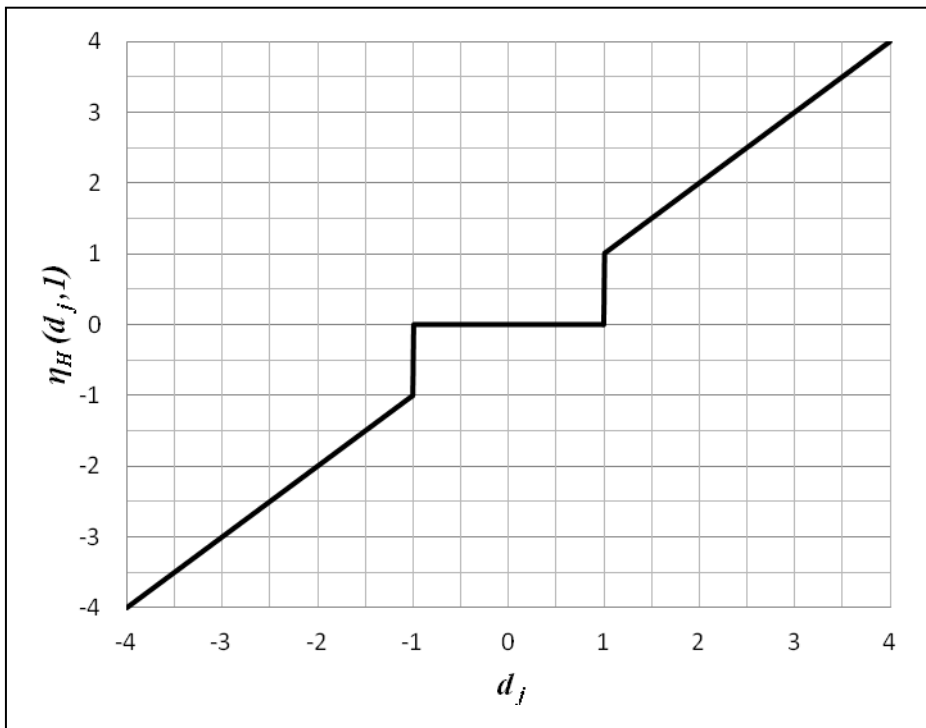


Figure 4.3 La fonction d'un estimateur par seuillage dur pour T=1

4.5.1.2 Seuillage doux

Un estimateur par seuillage doux s'implémente à l'aide de la fonction définie par (Donoho et Johnstone, 1993) :

$$\eta_S(d_j, T) = \begin{cases} (|d_j| - T) \cdot \text{signe}(d_j) & |d_j| > T \\ 0 & |d_j| \leq T \end{cases} \quad (4.5)$$

Où,

d_j = Coefficients en ondelette des données bruitées;
 T = Seuil estimé.

Dans une base d'ondelettes, la réduction des coefficients bruités de grande amplitude, d'une valeur égale au seuil estimé, ne permet de conserver que les variations transitoires du signal original, sans en ajouter d'autres, attribuables au bruit (Mallat, 2000). Le graphe de la figure 4.4 montre la fonction d'un estimateur par seuillage doux dans le cas où le seuil estimé est égal à l'unité.

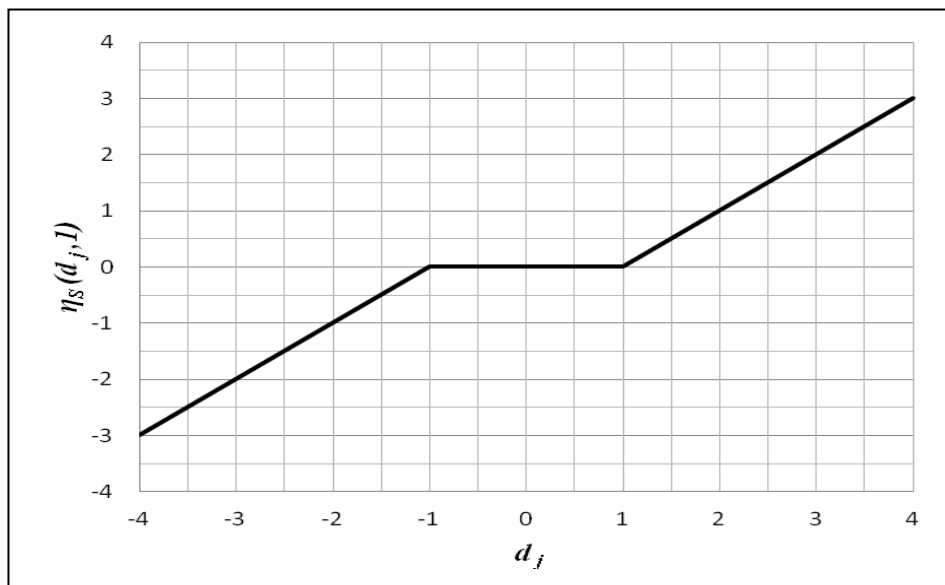


Figure 4.4 La fonction d'un estimateur par seuillage doux pour T=1

4.5.1.3 Seuillage de Kwon

L'un des principaux problèmes de l'estimateur par seuillage dur ou doux est la discontinuité fréquentielle. Ce problème induit des artefacts et une dégradation du signal débruité. Pour remédier à ce problème, Kwon a modifié la fonction de l'estimateur par seuillage dur en une fonction non linéaire dépendant d'une loi logarithmique de variable μ , soit (Kwon, 2002) :

$$\eta_K(d_j, T) = \begin{cases} d_j & |d_j| > T \\ T \cdot \left\{ \frac{1}{\mu} \cdot [(1 + \mu)^{|d_j|/T}] - 1 \right\} \cdot \text{signe}(d_j) & |d_j| \leq T \end{cases} \quad (4.6)$$

Où,

d_j = Coefficients en ondelette des données bruitées;

T = Seuil estimé;

μ = Paramètre de Kwon.

Cet estimateur par seuillage se caractérise par sa fonction continue, la contribution de tous les coefficients en ondelettes et leur intégrité au-delà du seuil estimé. Le graphe de la figure 4.5 montre la fonction d'un estimateur par seuillage dur modifié dans le cas où le seuil estimé est égal à l'unité pour différentes valeurs de μ .

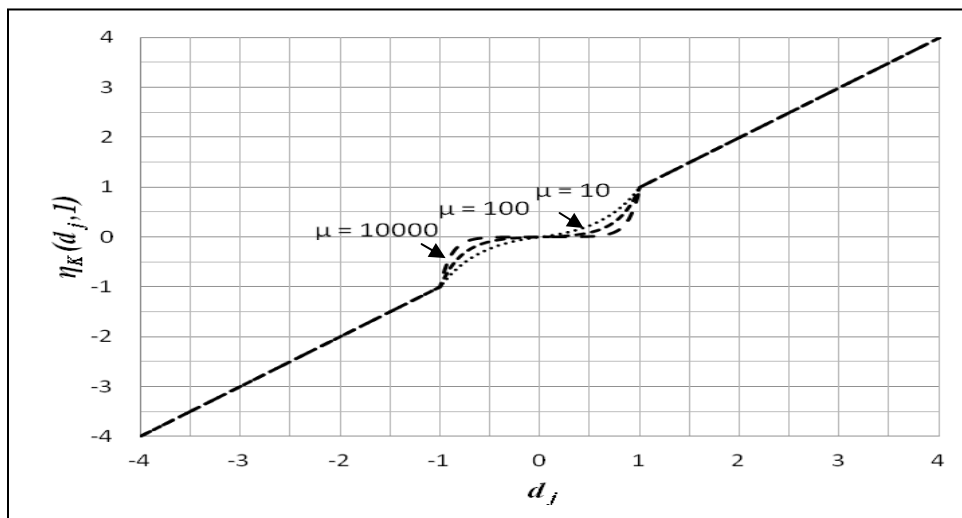


Figure 4.5 La fonction de l'estimateur Kwon pour $T=1$ et $\mu=10, 100, 10000$

4.5.2 Choix du seuil

Le seuil T est choisi généralement pour être avec une forte probabilité juste au-dessus du niveau maximum des coefficients du bruit (Mallat, 2000). Nonobstant, l'objectif est de minimiser l'erreur d'estimation mesurée qui, dans le cadre de cette thèse, sera établie en matière de référence à la distance euclidienne. Cette fonction de coût ne modélise pas parfaitement les dégradations, mais elle est mathématiquement simple et suffisamment précise dans le cas de notre simulation numérique.

Le risque de l'estimation du signal original est calculé en moyenne par rapport à la distribution de probabilité du bruit par la formule (Mallat, 2000) :

$$r(f(t)) = E \left\{ \|f(t) - \tilde{f}(t)\|^2 \right\} \quad (4.7)$$

Où,

$f(t)$ = signal original;

$\tilde{f}(t)$ = signal estimé.

4.5.2.1 Seuil universel

Dans le cas d'un seuillage dur ou doux, Donoho a démontré, dans l'hypothèse d'un bruit blanc et gaussien de moyenne zéro et de variance σ^2 , l'amplitude maximale du bruit a une très forte probabilité d'être limitée par deux valeurs définies par l'équation suivante (Mallat, 2000) :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \Pr \left(T - \frac{\sigma \log_e \log_e N}{\log_e N} < \max_{0 \leq m < N} |w_b[m]| \leq T \right) \quad (4.8)$$

Où,

T = valeur du seuil inférieure à la valeur $\sigma (2 \cdot \log_e N)^{1/2}$;

N = nombre de données disposées;

$w_b[m]$ = coefficient du bruit.

Pour réduire le risque, on utilise en pratique pour un seuil doux une valeur deux fois plus petite que celle d'un seuil dur estimée moins grande que $T = \sigma (2.\log_e N)^{1/2}$ (Mallat, 2000).

4.5.2.2 Seuils SURE

Le risque par seuillage peut être réduit par un raffinement du seuillage, basé sur la méthode développée par Stein (SURE, pour unbiased risk estimator), qui consiste à minimiser une estimation non biaisée du risque. L'unique estimation sans biais du risque est définie pour un seuillage doux, par la formule (Donoho, 1994) :

$$\tilde{r}(f(t), \lambda) = \sum_{k=l}^M |d_k|^2 - (M-l)\sigma^2 + l(\sigma^2 + \lambda^2) \quad (4.9)$$

Où,

- $f(t)$ = signal original;
- M = nombre de coefficients en ondelette à l'échelle considérée;
- d_k = coefficients en ondelette classés en ordre décroissant;
- l = l'indice tel que $|d_l| \leq \lambda \leq |d_{l+1}|$;
- λ = variable positive désignant le seuil, de portée égale à $\sigma (2.\log_e M)^{1/2}$.

La minimisation de l'estimation non biaisée du risque pour un seuillage doux, par rapport à la variable λ , peut mener à un choix d'un seuil trop petit lorsque l'énergie du signal est trop faible devant celle du bruit (Mallat, 2000). Pour remédier à ce problème, Donoho et Johnstone ont proposé la simultanéité avec la méthode du seuil universel appliquée à chaque échelle pour la détermination du seuil, soit (Mallat, 2000):

$$T = \begin{cases} \sigma \sqrt{2.\log_e M} & \text{si } \sum_{k=0}^M |d_k|^2 - M\sigma^2 \leq \sigma^2 M^{1/2} (\log_e M)^{3/2} \\ \arg \min_{0 \leq \lambda \leq \sigma \sqrt{2.\log_e M}} \tilde{r}(f(t), \lambda) & \text{si } \sum_{k=0}^M |d_k|^2 - M\sigma^2 > \sigma^2 M^{1/2} (\log_e M)^{3/2} \end{cases} \quad (4.10)$$

4.6 Conclusion

Ce quatrième chapitre a présenté les trois modèles préliminaires et a mis en évidence l'absence de ces modèles à permettre d'estimer les profils longitudinaux post-réhabilitation ainsi que les valeurs de l'IRI. La revue des méthodes de filtrage par ondelette proposées par Donoho et Johnstone, ont permis d'identifier des techniques de filtrage simples et performantes et ont indiqué qu'un modèle d'estimation par seuillage répondra aux besoins du projet.

Pour bénéficier des avantages de chacune des méthodes présentées, une combinaison de deux techniques pourrait atteindre des résultats meilleurs qu'exploiter distinctement. Le prochain chapitre viendra expliquer en détail la méthode de seuillage par ondelette et l'estimateur par seuillage qui a été développé spécifiquement pour ce projet et qui potentiellement permettra d'estimer le profil longitudinal post-réhabilitation de la chaussée après un resurfaçage sachant son profil pré-réhabilitation.

CHAPITRE 5

MÉTHODOLOGIE UTILISÉE ET DIAGNOSTIC PRÉLIMINAIRE

5.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude qui a été effectuée dans le but de développer un modèle qui permettra l'estimation du profil longitudinal post-réhabilitation de la chaussée ainsi que la valeur de l'IRI correspondante. Cette étude est constituée de deux parties principales :

La première partie comprend l'estimation du pseudoprofil avant resurfacement par l'ajout d'un bruit gaussien et blanc; et la description de la méthodologie de l'approche de débruitage utilisée basée sur la fonction analysante de Daubechies et les fonctions de seuillage incluant celle d'un seuil doux modifié;

La deuxième partie consiste à débruiter plusieurs pseudoprofils estimés, selon une simulation des méthodes présentées via la programmation dans un environnement Matlab. Trente-six profils post-réhabilitation de 100 m de long et fournis par le ministère des Transports du Québec ont été envisagés. Chacun de ces profils a été altéré par un bruit gaussien de moyenne nulle afin de générer le profil avant resurfacement. Les résultats des simulations selon les différentes méthodes utilisées sont présentés et évalués par rapport à l'indice établi en matière de référence à la distance euclidienne. Enfin, une discussion de l'étude et des résultats par rapport à l'indice de rugosité international conclut le chapitre.

5.2 Présentation et analyse des pseudo-profils

La performance des méthodes de seuillage développées pour un filtrage par ondelette a été étudiée sur des profils estimés pré-réhabilitations de tronçons du boulevard Pie-IX, d'une longueur totale d'environ 2000 m. Le segment de cette autoroute ayant fait l'objet de l'étude est caractérisé par deux voies dans chaque direction, séparée par un terre-plein, et situé dans la municipalité de Laval, située dans la municipalité régionale de comté de Laval-Mille-Îles et faisant partie de la circonscription électorale provinciale de Mille-Îles. La figure 5.1 montre le tronçon considéré du boulevard Pie-IX à Laval.

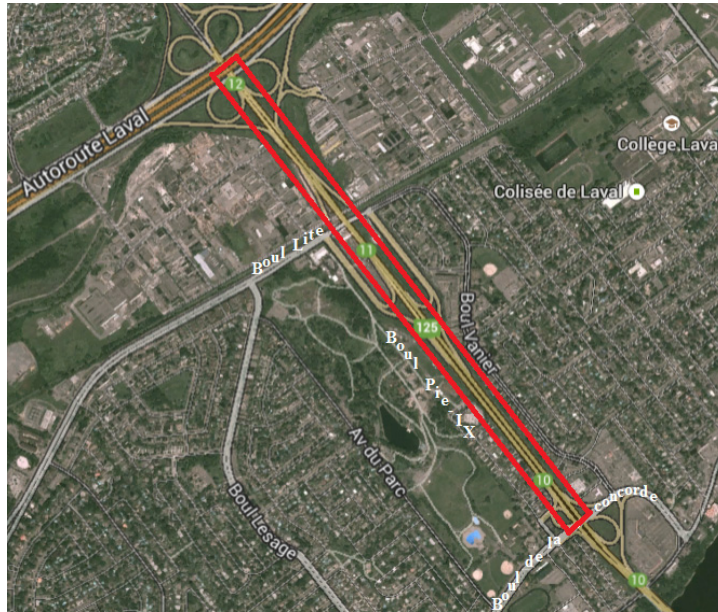


Figure 5.1 Tronçon considéré du boulevard Pie-IX
  Laval

L'étude de réhabilitation du boulevard Pie-IX   Laval, effectu e selon les termes de la Direction du Laboratoire des Chaussées (DLC) du MTQ, spécifie un planage et un ressurfaçage de 50 mm tout en excluant la nécessité d'une couche de correction préalablement au ressurfaçage pour corriger les distorsions restantes afin de se conformer aux exigences d'uni sp cifi es. La chaussée r habilit e est rep r e sur la route par le centre du boulevard de la Concorde et le centre de l'autoroute 440 sur la structure Pie-IX, correspondant aux chainages [0+000 et 2+100], déterminés aux fins d'études. La figure 5.2 indique, pour chaque direction, l'IRI été calculé à un intervalle de 100 m avant ressurfaçage, à partir des données recueillies avec l'appareil multifonctions du MTQ.

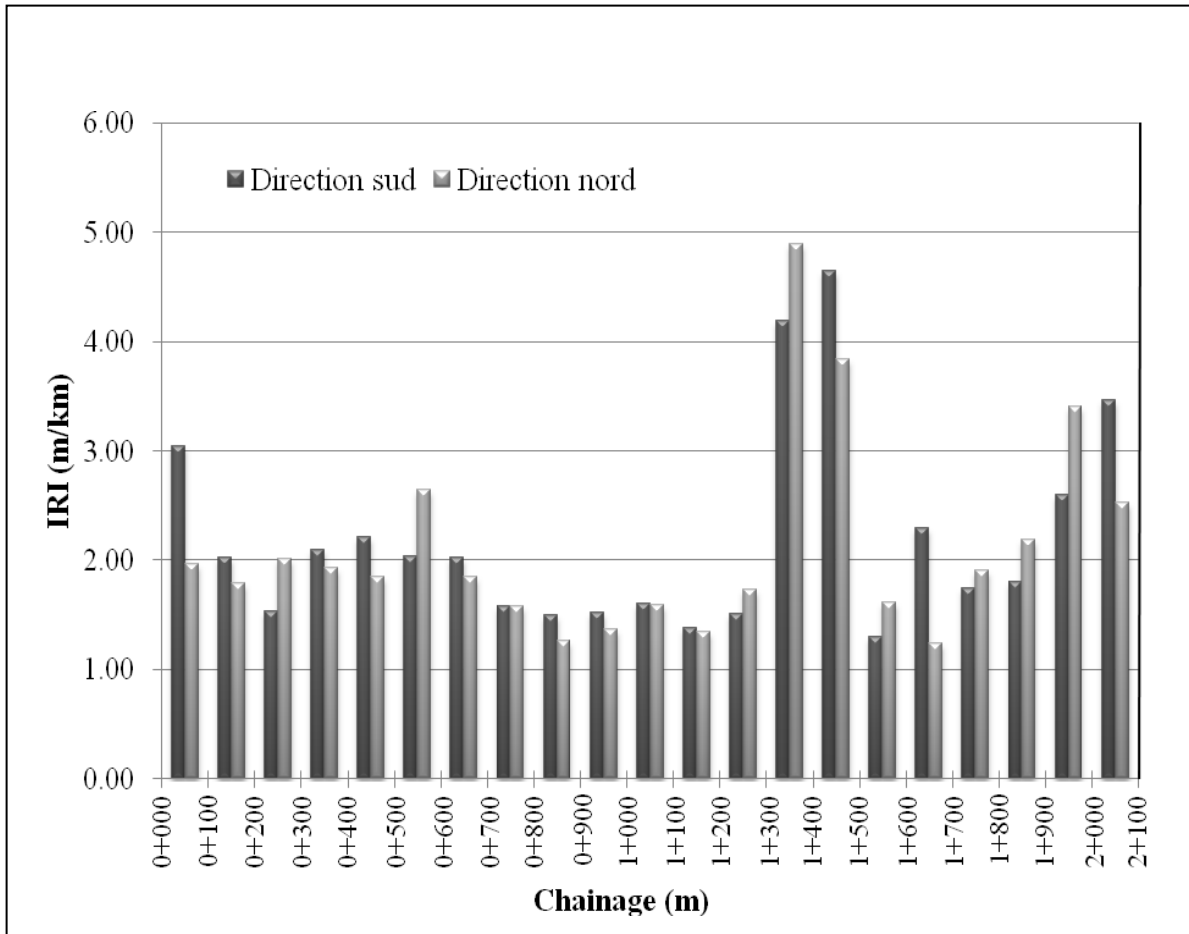


Figure 5.2 Distribution de l'IRI dans les deux directions avant ressurfaçage

Le choix des tronçons de l'autoroute ayant fait l'objet de l'application de la méthode de filtrage par ondelette a été fondé sur les hypothèses suivantes :

- absence de puisards en rive de la trace de roue;
- exclusion de la structure et des abords des viaducs;
- élimination des profils aux voisinages des bretelles d'accès;
- manque de structure surplombant la voie de roulement.

Malgré la véracité de ces hypothèses, l'atteinte d'un profil post-réhabilitation, établi par la méthode de filtrage par ondelette, dépend beaucoup de l'état initial de la route et de l'attention portée aux diverses étapes de mise en œuvre au moment de la construction. Pour

évaluer la méthode proposée dans chaque direction envisagée, les profils longitudinaux post-réhabilitation des tronçons considérés sont situés dans les traces des roues localisées de part et d'autre du milieu de la chaussée (figure 5.3).

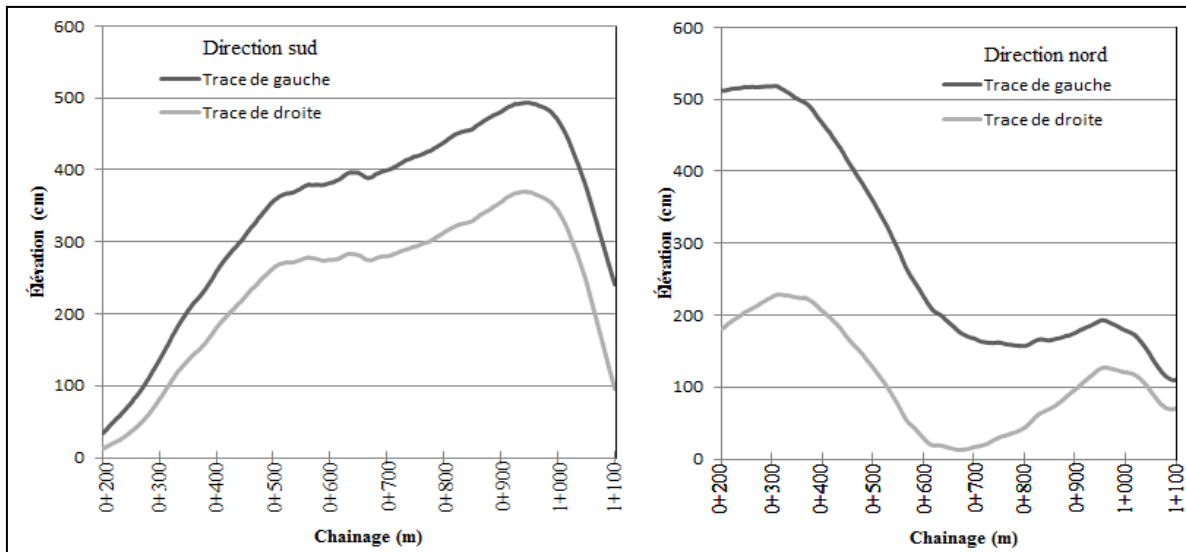


Figure 5.3 Profils longitudinaux post-réhabilitation bidirectionnels ayant fait l'objet de la simulation

5.3 Description de la méthodologie

Un estimateur par seuillage sur une base d'ondelette discrète effectue un lissage adaptatif dont les paramètres dépendent de la régularité du signal. Donoho et Johnstone ont démontré que le risque d'estimation est d'autant plus faible que l'énergie du signal non bruité est absorbée par quelques coefficients en ondelettes. Un estimateur de seuillage sur une base d'ondelette discrète s'écrit (Van Fleet, 2009) :

$$\tilde{f}(t) = \sum_{j=L-1}^{L=N_d} \sum_m \eta(d_{j,m}, T) \langle f(t), \psi_{j,m} \rangle \psi_{j,m} + \sum_k \eta(a_{L-N_d,k}, T) \langle f(t), \phi_{L-N_d,k} \rangle \phi_{L-N_d,k} \quad (5.1)$$

Où,

$f(t)$ = signal bruité;

$$\begin{aligned}
\{\phi_{j,m}\}_{m \in \mathbb{Z}}, \{\psi_{L-N_d,k}\}_{k \in \mathbb{Z}} &= \text{bases orthonormées de } V_j \text{ et } W_j; \\
\{\langle f(t), \psi_{j,m} \rangle\}_{m \in \mathbb{Z}}, \{\langle f(t), \phi_{L-N_d,k} \rangle\}_{k \in \mathbb{Z}} &= \text{coefficients de la décomposition du signal } f(t) \\
&\quad \text{sur une base orthonormée d'ondelettes;} \\
\eta(d_{j,m}, T), \eta(a_{L-N_d,k}, T) &= \text{fonction de seuillage;} \\
N_d &= \text{nombre de décomposition;} \\
\tilde{f}(t) &= \text{signal estimé à l'échelle } 2^L \text{ du signal } f(t); \\
T &= \text{seuil estimé.}
\end{aligned}$$

Dans le cadre de ce projet, nous présenterons trois méthodes de calcul du seuil T :

- la méthode du seuil universel;
- la méthode des seuils SURE multi-échelles;
- la méthode des seuils multi-échelles.

5.3.1 Méthodes de calcul du Seuil

5.3.1.1 Méthode du seuil universel

La méthode du seuil universel ou à échelle unique consiste à calculer la valeur du seuil T en se basant sur l'estimation de la variance du bruit déterminé à l'aide des valeurs des coefficients d'ondelettes à l'échelle la plus fine. En négligeant l'influence du signal débruité, la variance σ^2 du bruit est estimée par la valeur médiane des déviations absolues par rapport à la médiane des coefficients d'ondelettes, variables aléatoires gaussiennes indépendantes de moyenne nulle et de variance σ^2 , soit par l'équation (Van Fleet, 2009) :

$$\tilde{\sigma} = \frac{MAD(|\langle f, \psi_{L-1,m} \rangle|)_{m \in \mathbb{Z}}}{0.6745} \quad (5.2)$$

Où,

$\tilde{\sigma}$ = écart-type estimé du bruit;

$$MAD(|\langle f, \psi_{L-1,m} \rangle|) = \text{médiane} (|\langle f, \psi_{L-1,m} \rangle| - \text{médiane} (\langle f, \psi_{L-1,m} \rangle)|)$$

Afin d'éliminer l'influence du problème de bord qui engendre de grands coefficients d'ondelettes, causé par l'étude des signaux finis de longueur 100m, l'estimation du seuil T a été effectuée en excluant les valeurs de bord. Un seuil $T = \tilde{\sigma} (2 \cdot \log_e N)^{1/2}$ est adopté bien qu'un seuil moins grand réduit dans de nombreux cas le risque. Le problème de bord a été résolu par trois méthodes décrites en détail dans le livre intitulé une exploration des signaux par ondelettes (Mallat, 2000). L'estimation par seuillage est ensuite appliquée sur les coefficients d'ondelettes, à chaque échelle en considérant le seuil T ; les coefficients d'échelles ne subissent aucun changement.

5.3.1.2 Méthode des seuils SURE multi-échelles

Dans la méthode des seuils SURE multi-échelles, le calcul de la valeur des seuils est établi pour un seuillage doux à partir des coefficients d'ondelettes bruités. L'algorithme adopté pour le calcul des seuils SURE se résume en deux phases (Mallat, 2000).

La première phase consiste à calculer un estimateur de la variance σ^2 du bruit à l'aide de l'équation (5.2) à l'échelle la plus fine. La deuxième phase consiste à déterminer un seuil adaptatif T_j à chaque échelle et à partir de ses coefficients bruités $\left\{ \langle f, \psi_{j,m} \rangle \right\}_{m \in \mathbb{Z}}$ tout en appliquant le système d'équations (4.8).

Le seuillage doux est ensuite effectué aux coefficients d'ondelettes, à chaque échelle avec un seuil T_j correspondant; les coefficients d'échelles ne subissent aucun changement.

Dans le cas d'un seuil dur, Mallat propose de multiplier par deux les seuils SURE calculés pour un seuillage doux pour obtenir un risque de même ordre.

5.3.1.3 Méthode des seuils multi-échelles

La méthode des seuils multi-échelles est appliquée dans un cas de bruit aléatoire ayant un spectre continu dont la densité spectrale de puissance varie avec la fréquence. Elle consiste à calculer un seuil approprié à chaque échelle à partir de ses coefficients d'ondelettes $\left\{ \langle f, \psi_{j,m} \rangle \right\}_{m \in \mathbb{Z}}$. Le seuil T_j est déterminé par l'équation (Kwon, 2002) :

$$\begin{cases} T_j = \tilde{\sigma}_j (2 \cdot \log_e N)^{1/2} \\ \tilde{\sigma}_j = \frac{MAD(|\langle f, \psi_{j,m} \rangle|)_{m \in Z}}{0.6745} \end{cases} \quad (5.3)$$

Où,

N = nombre de données disposées;

$\tilde{\sigma}_j$ = écart-type estimé à l'échelle considérée.

L'estimateur par seuillage est ensuite appliqué aux coefficients d'ondelettes, à chaque échelle avec le seuil T_j correspondant; les coefficients d'échelles ne subissent aucun changement.

5.3.2 Estimation des pseudo-profil avant resurfaçage

L'estimation des pseudoprofils avant resurfaçage a été développée par l'ajout d'un bruit blanc gaussien, de moyenne nulle et d'écart type σ , aux pseudoprofils postréhabilitation correspondants. Ce bruit blanc est un signal aléatoire présent à toutes les fréquences et possédant la caractéristique d'une densité spectrale de puissance constante. Les échantillons successifs de ce signal aléatoire sont des variables aléatoires non corrélées. L'expression de la densité de probabilité d'un bruit blanc gaussien est donnée par la formule suivante (Baillargeon, 1989) :

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X-\mu_N}{\sigma}\right)^2} \quad (5.4)$$

Où,

X = variable aléatoire continue;

μ_N = moyenne de la variable aléatoire normale;

σ = écart-type de la variable aléatoire normale;

Une série de tests de simulation a été effectuée, dans un environnement MATLAB, sur une base de données d'échantillons de profils postréhabilitation de 100 m de long fournie par le MTQ afin de déterminer l'écart-type qui permettra de générer les profils pré-réhabilitations de similitude équivalente en valeur d'IRI, calculé à un intervalle de 100 m avant

ressurfaçage. Les figures 5.4 et 5.5 représentent, dans chaque direction envisagée, les pseudoprofils longitudinaux pré-réhabilitations estimés par l'ajout d'un bruit blanc gaussien ainsi que les valeurs de l'IRI correspondantes.

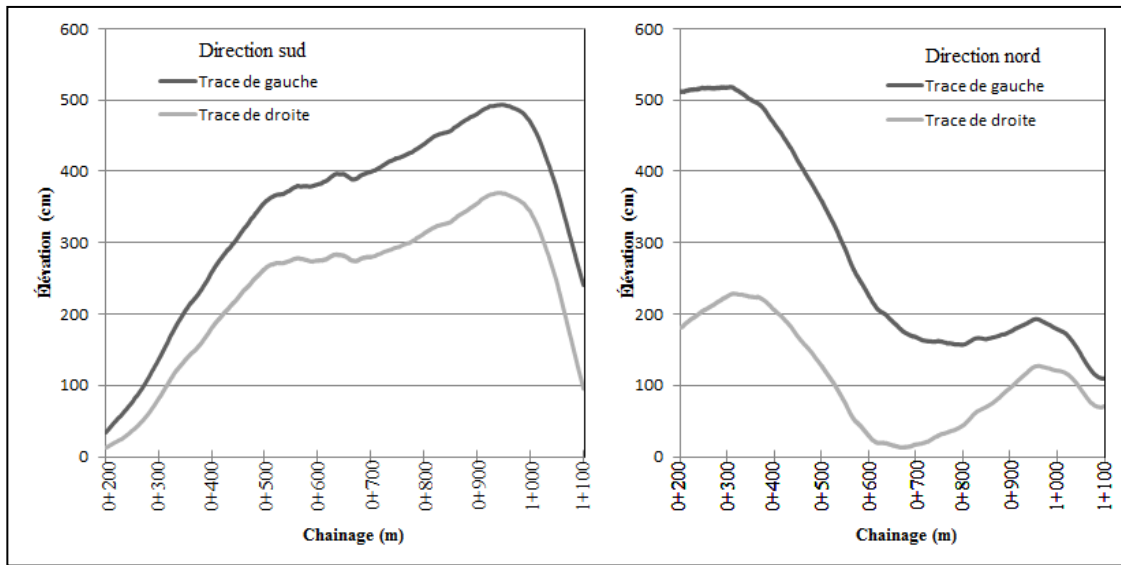


Figure 5.4 Pseudoprofils longitudinaux estimés avant ressurfaçage

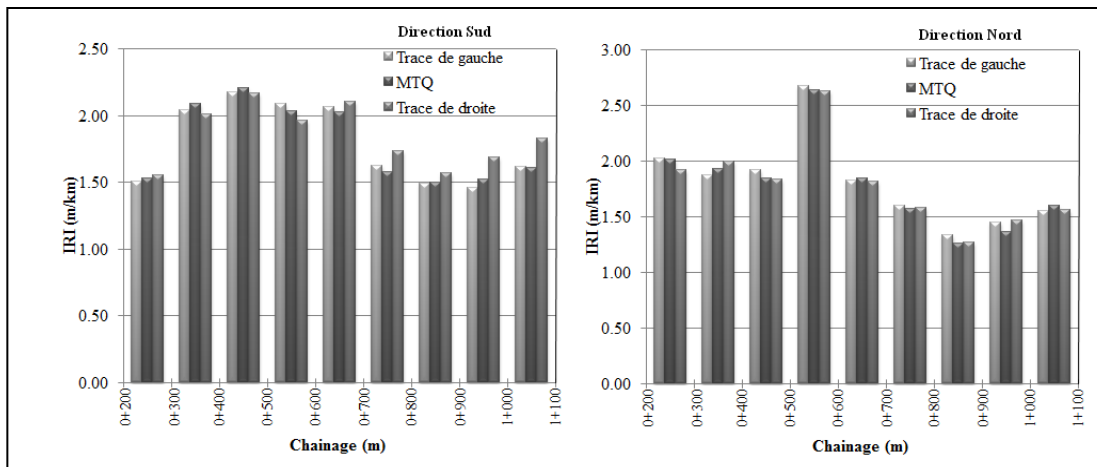


Figure 5.5 Valeurs de l'IRI des pseudoprofils longitudinaux estimés pré-réhabilitation

5.3.3 Choix de la fonction analysante

Les performances de l'estimation par seuillage dépendent de la capacité à approximer le signal bruité par une base d'ondelettes, dans le cas d'un bruit blanc gaussien. Une combinaison de bases orthogonales établit une meilleure base pour l'estimation du signal qu'une base unique (Mallat, 2000).

Dans une application de débruitage, le choix d'une base d'ondelettes est guidé par l'approximation du signal avec un maximum de coefficients d'ondelettes proche de zéro dans les échelles fines. Cette contrainte dépend de la régularité du signal, du nombre de moments nuls de l'ondelette et de la taille de son support (les ondelettes Coiflettes, Daubechies, Symlets, etc.).

Les ondelettes de Daubechies ayant P moments nuls possèdent le support de taille minimale égal à $[-P+1, P]$. Nonobstant, la minimisation du risque estimé résulte du choix de la meilleure base d'ondelettes.

Dans le cadre de ce projet, seules les ondelettes de Daubechies ont été exploitées pour les applications considérées. Le choix de ces ondelettes d'ordre 3 est basé sur les points suivants :

- la simplicité et la résolution appropriée dans les domaines profils et fréquences;
- les caractéristiques fréquentielles adéquates des échelles de décomposition par la transformée en ondelettes discrète;
- la documentation élaborée sur l'analyse par ondelettes des profils longitudinaux de la chaussée (Papagiannakis, 2007; Wei Liu, 2005).

Dans le cadre de ce projet, l'échelle la plus fine est déterminée au niveau sept en raison des mesures du pseudoprofil effectuées à un intervalle de 50 mm de l'autoroute auscultée. Le graphe de la figure (5.6) présente les caractéristiques fréquentielles des sous-espaces de projection, calculées par la transformation discrète de Fourier.

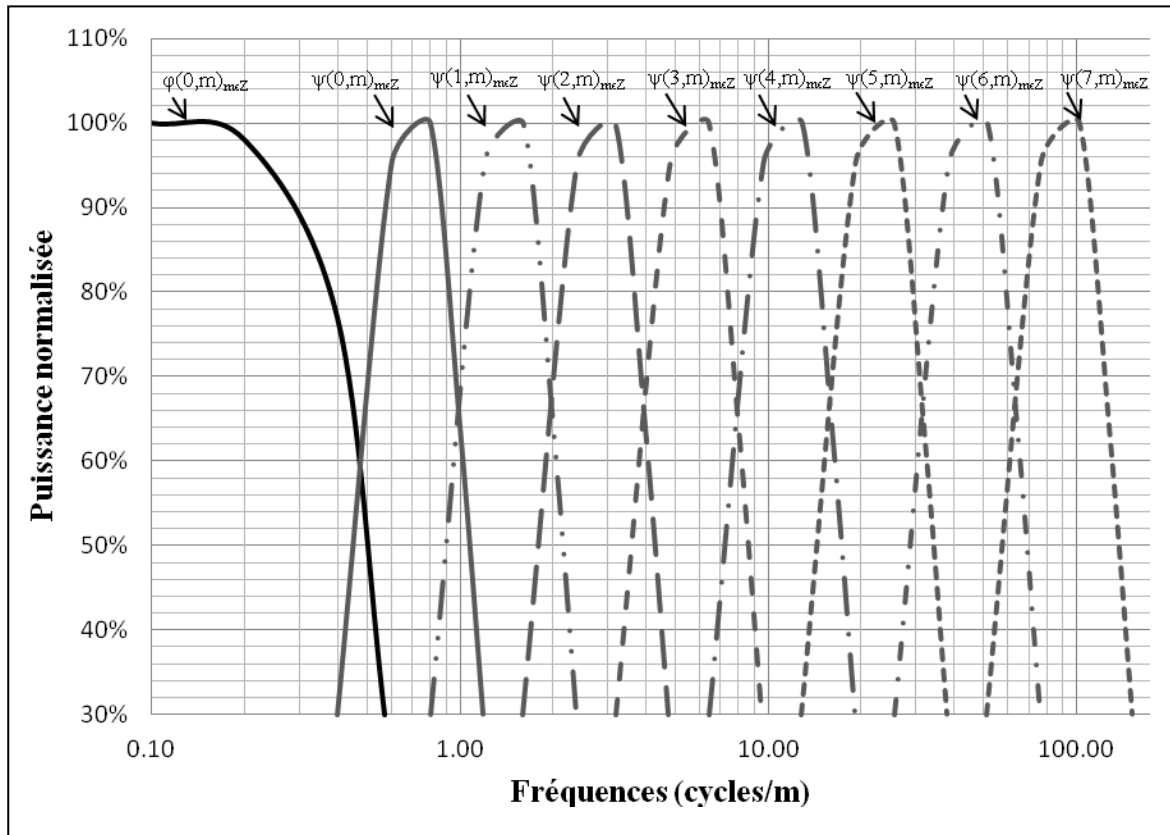


Figure 5.6 Caractéristiques fréquentielles des sous-espaces de projection

5.3.4 Estimateur par seuillage proposé

Les estimateurs par seuillage les plus exploités dans les revues documentaires de débruitage dans l'intention d'améliorer leur exploit sont le seuil dur et le seuil doux. Dans le même objectif, Kwon a modifié la fonction de l'estimateur par seuillage dur pour préserver la continuité fréquentielle. Dans l'évidence d'une intervention de planage et de ressurlage, les variations transitoires du signal correspondantes à des coefficients d'ondelette de grande amplitude sont altérées; d'où la nécessité de développer un seuil doux modifié tout en accommodant la continuité fréquentielle. Ce seuil doux modifié est défini par la fonction non linéaire suivante:

$$\eta_p(d_j, T, K) = \begin{cases} (|d_j| - \frac{T}{K}) \cdot \text{signe}(d_j) & |d_j| > T \\ \frac{T}{K} \cdot \left\{ \frac{1}{\mu} \cdot [(1 + \mu)^{|d_j/T|} - 1] \cdot \text{signe}(d_j) \right\} & |d_j| \leq T \end{cases} \quad (5.5)$$

Où,

- d_j = Coefficients en ondelette des données bruitées;
- T = Seuil estimé;
- K = Paramètre de réduction du seuil;
- μ = Paramètre de Kwon.

Cet estimateur par seuillage se caractérise par sa fonction continue, la contribution de tous les coefficients en ondelettes et leur réduction au-delà du seuil estimé. Le graphe de la figure 5.7 montre la fonction de l'estimateur proposé dans le cas où le seuil estimé est égal à l'unité et le paramètre de réduction est égal à deux, pour différentes valeurs de μ .

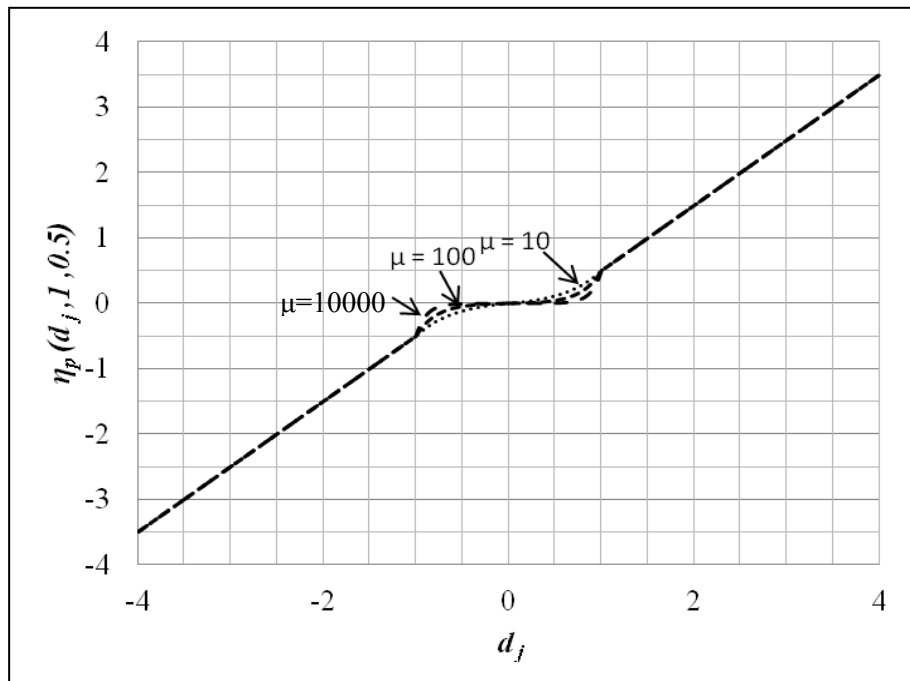


Figure 5.7 La fonction de l'estimateur proposé pour $T=1$, $K=2$ et $\mu=10, 100, 10000$

5.4 Diagnostic préliminaire

Après avoir estimé les profils longitudinaux pré-réhabilitations de la chaussée, par l'ajout d'un bruit blanc gaussien d'écart-type $\sigma_{\text{réel}}$, ils ont été débruités par les trois méthodes exposées précédemment en exploitant les fonctions des estimateurs par seuillage doux, dur, dur modifié (Kwon) et doux modifié (méthode proposée). Les méthodes de seuillage ont été dressées dans deux tableaux précisant les différentes valeurs envisagées de μ (100, 10 000, 1 000 000) (tableaux 5.1 et 5.2).

Tableau 5.1 Méthodes de débruitage utilisées

Indice	Seuil estimé	Éstimateur de seuillage	Écart-type du bruit
1	Seuil universel	Doux	$\sigma_{\text{estimé}}$
2			$\sigma_{\text{réel}}$
3		Dur	$\sigma_{\text{estimé}}$
4			$\sigma_{\text{réel}}$
5		Kwon ($\mu=10^2$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
6			$\sigma_{\text{réel}}$
7		Kwon ($\mu=10^4$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
8			$\sigma_{\text{réel}}$
9		Kwon ($\mu=10^6$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
10			$\sigma_{\text{réel}}$
11		Doux modifié ($\mu=10^2$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
12			$\sigma_{\text{réel}}$
13		Doux modifié ($\mu=10^4$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
14			$\sigma_{\text{réel}}$
15		Doux modifié ($\mu=10^6$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
16			$\sigma_{\text{réel}}$

Pour évaluer la performance des méthodes utilisées dans l'environnement MATLAB, le risque de l'estimation du signal $r(f(t))$, défini par l'équation (4.5), est choisi comme critère d'évaluation. Les simulations sont effectuées, à partir de l'échelle 2^7 sur une base d'ondelettes de Daubechies d'ordre 3. Une comparaison en termes de valeurs de l'IRI avant resurfacement a été exécutée sur les résultats des simulations pour trouver la méthode optimale qui estime la valeur post-réhabilitation de l'IRI.

Tableau 5.2 Méthodes de débruitage utilisées

Indice	Seuil estimé	Éstimateur de seuillage	Écart-type du bruit
17	Seuil SURE	Doux	$\sigma_{\text{estimé}}$
18			$\sigma_{\text{réel}}$
19		Dur	$\sigma_{\text{estimé}}$
20			$\sigma_{\text{réel}}$
21		Kwon ($\mu=10^2$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
22			$\sigma_{\text{réel}}$
23		Kwon ($\mu=10^4$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
24			$\sigma_{\text{réel}}$
25		Kwon ($\mu=10^6$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
26			$\sigma_{\text{réel}}$
27		Doux modifié ($\mu=10^2$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
28			$\sigma_{\text{réel}}$
29		Doux modifié ($\mu=10^4$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
30			$\sigma_{\text{réel}}$
31		Doux modifié ($\mu=10^6$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
32	$\sigma_{\text{réel}}$		
33	Seuils multi-échelles	Doux	$\sigma_{\text{estimé}}$
34			$\sigma_{\text{réel}}$
35		Dur	$\sigma_{\text{estimé}}$
36			$\sigma_{\text{réel}}$
37		Kwon ($\mu=10^2$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
38			$\sigma_{\text{réel}}$
39		Kwon ($\mu=10^4$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
40			$\sigma_{\text{réel}}$
41		Kwon ($\mu=10^6$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
42			$\sigma_{\text{réel}}$
43		Doux modifié ($\mu=10^2$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
44			$\sigma_{\text{réel}}$
45		Doux modifié ($\mu=10^4$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
46			$\sigma_{\text{réel}}$
47		Doux modifié ($\mu=10^6$, $k=1$)	$\sigma_{\text{estimé}}$
48			$\sigma_{\text{réel}}$

5.5 Conclusion

Les résultats des simulations de débruitage selon les méthodes des estimateurs par seuillage exposées dans ce chapitre ainsi que la comparaison en terme d'IRI effectuée montre l'importance de disposer d'une panoplie de données concrètes sur les profils avant et après ressurlage, afin de valider de façon rigoureuse l'application développée dans ce mémoire.

L'hypothèse de l'altération du signal par un bruit gaussien devra donc être validée par une étude plus exhaustive se basant sur des données réelles représentatives de l'ensemble des situations que l'on retrouve sur les chaussées en général.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire a permis de présenter un outil d'estimation des profils longitudinaux post-réhabilitation d'une chaussée, fondé sur la méthode de filtrage par ondelette. Cet outil est caractérisé par le lissage des transitions brusques du signal tout en conservant la continuité fréquentielle.

La performance de cette méthode est restée dans le cadre théorique pour diverses raisons notamment la limite de temps, la version limitée du logiciel MATLAB et le manque de données fiables requises pour la démonstration de l'outil. Une attention particulière devra être portée pour ce qui concerne :

- le profil pré-réhabilitation de la chaussée;
- le mesurage de l'uni longitudinal par différents appareils de la catégorie profils de précision;
- le relevé des profils transversaux et longitudinaux, avant et après resurfacement, à la fois l'été et l'hiver;
- la large gamme d'IRI qui sert à approfondir l'étude paramétrique;
- les relevés des puisards, des regards, des bretelles d'accès, des abords des viaducs, des intersections, des arrêts, de la structure de la chaussée et du réseau souterrain;
- les types de machines utilisées lors des travaux de réhabilitation de la chaussée;
- les critères adoptés pour déterminer l'épaisseur de scarification de la couche de revêtement.

L'application des ondelettes de bord pour éviter de créer de grands coefficients d'ondelettes près des bords, le choix de la meilleure base de paquets d'ondelettes qui donnent une approximation plus compacte et qui révèle mieux l'échelle espace-fréquence, seront les avenues de recherche dans notre thèse de doctorat.

ANNEXE I

DÉCOMPOSITION D'UN SIGNAL

ALGORITHME-A I-1 DÉCOMPOSITION D'UN SIGNAL VIA LA TRANSFORMATION EN ONDELETTE DISCRÈTE

```
1  % Multilevel discrete wavelet decomposition Program
2  clc; clear all; close all;

3  % load the file signal
4  importRprofil ('c:\profil.xlsx');

5  % The wavelet decomposition process of the signal

6  % The wavelet decomposition of the signal at level 6
7  sig = [0;0;0; a7; 0;0];
8  [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
9  DCPHI6 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
10 DCPSI6 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

11 % The wavelet decomposition of the signal at level 5
12 sig = [0;0;0; DCPHI6; 0;0];
13 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
14 DCPHI5 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
15 DCPSI5 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

16 % The wavelet decomposition of the signal at level 4
17 sig = [0;0;0; DCPHI5; 0;0];
18 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
```

```
19   DCPHI4 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
20   DCPSI4 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

21   % The wavelet decomposition of the signal at level 3
22   sig = [0;0;0; DCPHI4; 0;0];
23   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
24   DCPHI3 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
25   DCPSI3 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

26   % The wavelet decomposition of the signal at level 2
27   sig = [0;0;0; DCPHI3; 0;0];
28   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
29   DCPHI2 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
30   DCPSI2 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

31   % The wavelet decomposition of the signal at level 1
32   sig = [0;0;0; DCPHI2; 0;0];
33   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
34   DCPHI1 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
35   DCPSI1 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

36   % The wavelet decomposition of the signal at level 0
37   sig = [0;0;0; DCPHI1; 0;0];
38   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
39   DCPHI0 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
40   DCPSI0 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector
```

ANNEXE II

DÉCOMPOSITION ET RECONSTRUCTION D'UN SIGNAL

ALGORITHME-A II-2 DÉCOMPOSITION ET DE RECONSTRUCTION D'UN SIGNAL VIA LA TRANSFORMATION EN ONDELETTE DISCRÈTE

```
1  % Multilevel discrete wavelet decomposition and reconstuction Program
2  clc; clear all; close all;

3  % load the file signal
4  importRprofil ('c:\profil.xlsx');

5  % The wavelet decomposition process of the signal

6  % The wavelet decomposition of the signal at level 6
7  sig = [0;0;0; a7; 0;0];
8  [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
9  DCPHI6 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
10 DCPSI6 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

11 % The wavelet decomposition of the signal at level 5
12 sig = [0;0;0; DCPHI6; 0;0];
13 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
14 DCPHI5 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
15 DCPSI5 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

16 % The wavelet decomposition of the signal at level 4
17 sig = [0;0;0; DCPHI5; 0;0];
18 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
```

```
19   DCPHI4 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
20   DCPSI4 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

21   % The wavelet decomposition of the signal at level 3
22   sig = [0;0;0; DCPHI4; 0;0];
23   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
24   DCPHI3 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
25   DCPSI3 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

26   % The wavelet decomposition of the signal at level 2
27   sig = [0;0;0; DCPHI3; 0;0];
28   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
29   DCPHI2 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
30   DCPSI2 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

31   % The wavelet decomposition of the signal at level 1
32   sig = [0;0;0; DCPHI2; 0;0];
33   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
34   DCPHI1 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
35   DCPSI1 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

36   % The wavelet decomposition of the signal at level 0
37   sig = [0;0;0; DCPHI1; 0;0];
38   [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
39   DCPHI0 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
40   DCPSI0 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

41   % The wavelet reconstruction process of the signal

42   % The wavelet reconstruction of the signal at level 1
```



```
43   C = [DCPHI0; DCPSI0];
44   L = [length(DCPHI0); length(DCPSI0); length(DCPHI1)];
45   RCPHI1=waverec(C,L,'db3');

46   % The wavelet reconstruction of the signal at level 2
47   C = [RCPHI1; DCPSI1];
48   L = [length(RCPHI1); length(DCPSI1); length(DCPHI2)];
49   RCPHI2=waverec(C,L,'db3');

50   % The wavelet reconstruction of the signal at level 3
51   C = [RCPHI2; DCPSI2];
52   L = [length(RCPHI2); length(DCPSI2); length(DCPHI3)];
53   RCPHI3=waverec(C,L,'db3');

54   % The wavelet reconstruction of the signal at level 4
55   C = [RCPHI3; DCPSI3];
56   L = [length(RCPHI3); length(DCPSI3); length(DCPHI4)];
57   RCPHI4=waverec(C,L,'db3');

58   % The wavelet reconstruction of the signal at level 5
59   C = [RCPHI4; DCPSI4];
60   L = [length(RCPHI4); length(DCPSI4); length(DCPHI5)];
61   RCPHI5=waverec(C,L,'db3');

62   % The wavelet reconstruction of the signal at level 6
63   C = [RCPHI5; DCPSI5];
64   L = [length(RCPHI5); length(DCPSI5); length(DCPHI6)];
65   RCPHI6=waverec(C,L,'db3');

66   % The wavelet reconstruction of the signal at level 7
```

```
67   C = [RCPHI6; DCPSI6];
68   L = [length(RCPHI6); length(DCPSI6); length(e)];
69   RCPHI7=waverec(C,L,'db3');

70   % Multilevel discrete wavelet transform Error
71   ERRPHI7=RCPHI7-a7;
```

ANNEXE III

FILTRAGE D'UN SIGNAL

ALGORITHME-A III-3 FILTRAGE D'UN SIGNAL VIA LA TRANSFORMATION EN ONDELETTE DISCRÈTE

```
1  % Denoising Program via a multilevel discrete wavelet transform
2  clc; clear all; close all;

3  % load the file signal
4  importRprofil ('c:\profil.xlsx');
5  lengthSig = input('Longueur du signal (m): ');
6  stepSig = input('Intervalle de mesure du signal (m): ');
7  numData = lengthSig/stepSig;

8  % The wavelet decomposition process of the signal

9  % The wavelet decomposition of the signal at level 6
10  sig = [0;0;0; a7; 0;0];
11  [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
12  DCPHI6 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
13  DCPSI6 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

14 % The wavelet decomposition of the signal at level 5
15  sig = [0;0;0; DCPHI6; 0;0];
16  [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
17  DCPHI5 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
18  DCPSI5 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector
```

```
19 % The wavelet decomposition of the signal at level 4
20 sig = [0;0;0; DCPHI5; 0;0];
21 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
22 DCPHI4 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
23 DCPSI4 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

24 % The wavelet decomposition of the signal at level 3
25 sig = [0;0;0; DCPHI4; 0;0];
26 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
27 DCPHI3 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
28 DCPSI3 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

29 % The wavelet decomposition of the signal at level 2
30 sig = [0;0;0; DCPHI3; 0;0];
31 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
32 DCPHI2 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
33 DCPSI2 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

34 % The wavelet decomposition of the signal at level 1
35 sig = [0;0;0; DCPHI2; 0;0];
36 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
37 DCPHI1 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
38 DCPSI1 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector

39 % The wavelet decomposition of the signal at level 0
40 sig = [0;0;0; DCPHI1; 0;0];
41 [CA1,CD1]=dwt(sig,'db3');
42 DCPHI0 = CA1(2:length(CA1)-1,1); % Approximation Coefficients Vector
43 DCPSI0 = CD1(2:length(CD1)-1,1); % Detail Coefficients Vector
```

```

44 % Denoising the signal
[DCPSI6DE, DCPSI5DE, DCPSI4DE, DCPSI3DE, DCPSI2DE, DCPSI1DE, ...
DCPSI0DE] = DENOISING (DCPSI6, DCPSI5, DCPSI4, DCPSI3, DCPSI2, ...
DCPSI1, DCPSI0, numData);

45 % The wavelet reconstruction process of the signal

46 % The wavelet reconstruction of the signal at level 1
47 C = [DCPHI0; DCPSI0DE];
48 L = [length(DCPHI0); length(DCPSI0DE); length(DCPHI1)];
49 RCPHI1DE=waverec(C,L,'db3');

50 % The wavelet reconstruction of the signal at level 2
51 C = [RCPHI1DE; DCPSI1DE];
52 L = [length(RCPHI1DE); length(DCPSI1DE); length(DCPHI2)];
53 RCPHI2DE=waverec(C,L,'db3');

54 % The wavelet reconstruction of the signal at level 3
55 C = [RCPHI2DE; DCPSI2DE];
56 L = [length(RCPHI2DE); length(DCPSI2DE); length(DCPHI3)];
57 RCPHI3DE=waverec(C,L,'db3');

58 % The wavelet reconstruction of the signal at level 4
59 C = [RCPHI3DE; DCPSI3DE];
60 L = [length(RCPHI3DE); length(DCPSI3DE); length(DCPHI4)];
61 RCPHI4DE=waverec(C,L,'db3');

62 % The wavelet reconstruction of the signal at level 5
63 C = [RCPHI4DE; DCPSI4DE];
64 L = [length(RCPHI4DE); length(DCPSI4DE); length(DCPHI5)];

```

```
65   RCPHI5DE=waverec(C,L,'db3');

66   % The wavelet reconstruction of the signal at level 6
67   C = [RCPHI5DE; DCPSI5DE];
68   L = [length(RCPHI5DE); length(DCPSI5DE); length(DCPHI6)];
69   RCPHI6DE=waverec(C,L,'db3');

70   % The wavelet reconstruction of the signal at level 7
71   C = [RCPHI6DE; DCPSI6DE];
72   L = [length(RCPHI6DE); length(DCPSI6DE); length(a7)];
73   RCPHI7DE=waverec(C,L,'db3');

74   % Multilevel discrete wavelet transform Error
75   ERRPHI7=RCPHI7DE-a7;
```

ANNEXE IV

MÉTHODE DU SEUIL UNIVERSEL- SEUILLAGE DOUX

ALGORITHME-A IV-1 FILTRAGE DES COEFFICIENTS D'ONDELETTE VIA L'ESTIMATEUR PAR SEUILLAGE DOUX- MÉTHODE DU SEUIL UNIVERSEL

```
1  function [DCPSI6DE, DCPSI5DE, DCPSIDE, DCPSI3DE, DCPSI2DE, ...
      DCPSI1DE, DCPSI0DE] = DENOISING (DCPSI6, DCPSI5, DCPSI4, ...
      DCPSI3, DCPSI2, DCPSI1, DCPSI0, numData)

2  % Denoising the signal: Method of universal threshold- Soft thresholding
3  DCPSI = [DCPSI6' DCPSI5' DCPSI4' DCPSI3' DCPSI2' DCPSI1' DCPSI0'];
4  LDCPSI = length(DCPSI);
5  DCPSIDE = zeros(1,LDCPSI);
6  MADDCPSI6 = median(abs(DCPSI6-median(DCPSI6)));
7  sigma = MADDCPSI6/0.6745;
8  lambda = sigma*((2*log(numData))^(0.5));
9  for i=1:LDCPSI
10     if abs(DCPSI(1,i)) <= abs(lambda)
11         DCPSIDE(1,i)=0;
12     else DCPSIDE(1,i)= sign(DCPSI(1,i))*(abs(DCPSI(1,i))-abs(lambda));
13     end
14 end

15 % The filtered wavelet coefficients at level 6
16 DCPSI6DE = zeros(length(DCPSI6),1);
17 for i=1:length(DCPSI6)
18     DCPSI6DE(i)= DCPSIDE(1,i)';
```

```
19     end

20     % The filtered wavelet coefficients at level 5
21     DCPSI5DE = zeros(length(DCPSI5),1); j=i;
22     for i=1:length(DCPSI5)
23         j=j+i;
24         DCPSI5DE(i)= DCPSIDE(1,j)';
25     end

26     % The filtered wavelet coefficients at level 4
27     DCPSI4DE = zeros(length(DCPSI4),1);
28     for i=1:length(DCPSI4)
29         j=j+i;
30         DCPSI4DE(i)= DCPSIDE(1,j)';
31     end

32     % The filtered wavelet coefficients at level 3
33     DCPSI3DE = zeros(length(DCPSI3),1);
34     for i=1:length(DCPSI3)
35         j=j+i;
36         DCPSI3DE(i)= DCPSIDE(1,j)';
37     end

38     % The filtered wavelet coefficients at level 2
39     DCPSI2DE = zeros(length(DCPSI2),1);
40     for i=1:length(DCPSI2)
41         j=j+i;
42         DCPSI2DE(i)= DCPSIDE(1,j)';
43     end
```



```
44 % The filtered wavelet coefficients at level 1
45   DCPSI1DE = zeros(length(DCPSI1),1);
46   for i=1:length(DCPSI1)
47       j=j+i;
48       DCPSI1DE(i)= DCPSIDE(1,j)';
49   end

50 % The filtered wavelet coefficients at level 0
51   DCPSI0DE = zeros(length(DCPSI0),1);
52   for i=1:length(DCPSI0)
53       j=j+i;
54       DCPSI0DE(i)= DCPSIDE(1,j)';
55   end
56 end
```


BIBLIOGRAPHIE

- Assaf, Gabriel J. 2010. *MGC-835 : Évaluation des chaussées : notes du cours MGC-835*. Programme de Maîtrise en génie de la construction. Montréal : École de Technologie Supérieure, pagination multiple 392 p.
- Baillargeon, Gérald. 1989. *Probabilités, statistiques et technique de régression*. Trois-Rivières, Québec : Éditions SMG, 631 p.
- Chang, Sungwook, Y. Kwon, Sung-il Yang et I-Jae Kim. 2002. « Speech Enhancement for non-stationary noise environment by adaptive wavelet packet ». In *Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings of the International Conference of the IEEE*. (Orlando, FL, USA, 13-17 Mai 2002), Vol. 1, p. 561-564, IEEE.
- Daubechies, Ingrid. 1992. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics, 357 p.
- Davis, Bruce R., A. G. Thompson. 2001. «Power Spectral Density of Road Profiles». *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol. 35, No. 6, p. 409-415
- Donoho, David L. 1995. «Denoising by soft thresholding». *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 41, No. 3, p. 613-627.
- Donoho, David L., Johnstone, Iain M. 1994. «Threshold selection for wavelet shrinkage of noisy data». In *Engineering in Medicine and Biology Society, 1994. Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE* . (Baltimore, MD, 3-6 novembre 1994), Vol. 1, p. A24-A25, IEEE.
- Durand, Jean-Marie. 1997. «La mesure d'uni au moyen du profilomètre inertiel». *Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec*, Vol. 1, No. 2, 2 p.
- Gillespie, Thomas D., Michael W. Sayers et Cesar A.V. Queiroz. 1986. *The international road roughness experiment: establishing correlation and a calibration standard for measurements*. Word Bank Technical paper number 45, The World Bank, Washington, D.C., U.S.A., 454 p.
- Fortin, André. 2001. *Analyse numérique pour ingénieurs*, 2^e éd. Montréal: Presses Internationales Polytechniques, 487 p.
- Gillespie, Thomas D., Michael W. Sayers et William D. O. Paterson. 1986. *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements*. Word Bank Technical paper number 46, The World Bank, Washington, D.C., U.S.A., 88 p.

- Gonzalez, Rafael C., Richard E. Woods. 2008. *Digital image processing*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 954 p.
- Groupe national "Caractéristiques de surface des chaussées". 1993. *L'uni longitudinal des chaussées*. Bagneux, France : S.E.T.R.A., ISSN 1152-2844, 8 p.
- Haas, Ralph, John P Zaniewski et W. Ronald Hudson. 1994. *Modern Pavement Management*. Malabar, Florida: R. E. Krieger, 583 p.
- Halim, Rafik. 2011. «Véhicule d'auscultation des chaussées». *Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec*, Vol. 16, No. 2, 3 p.
- Karamihas, Steven. M., Thomas D. Gillespie, Starr D. Kohn et Rohan W. Perera. 1999. *Guidelines for longitudinal pavement profile measurement, Final report*. «National Cooperative Research Program», NCHRP Project 10-47. Transportation Research Institute, The University of Michigan, 169 p.
- Kawamura, Akira, Kazuya Tomiyama et Tateki Ishida. 2013. *Improving the quality of profile measurements by lifting wavelet filters*. No. 13-3405. Washington, DC, U.S.A.: Transportation Research Board, 15 p.
- Labbé, Chantal. 1999. « Débruitage de signal à l'aide des ondelettes de Daubechies, réelles et complexes ». Mémoire de maîtrise en sciences des mathématiques. Montréal, Université de Montréal, 160 p.
- Mallat, Stéphane G. 2000. *Une exploration des signaux en ondelettes*. Palaiseau, France : Éditions de l'École polytechnique, 637 p.
- Mari, Jean-Luc, François Glangeaud et Françoise Coppens. 2001. *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens : Techniques de base*, Volume 2. Paris : Éditions Technip, 268 p.
- McManus, K., R. Hassan et J. Holden. 1999. «Predicting pavement deterioration modes using waveband analysis » In *Seventh International Conference on Low-Volume Roads*. (Baton Rouge, Louisiana, Mai 23-26), Vol. 2, p.181-187. Washington, DC, U.S.A.: Transportation Research Record.
- Papagiannakis, A. T., H. M. Zelelew et B. Muhunthan. 2007. «*A wavelet interpretation of vehicle-pavement interaction*». *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8, No. 3, p. 245-252
- Ruch, David K., Patrick J. Van Fleet. 2009. *Wavelet theory: an elementary approach with applications*. Hoboken, N.J. : John Wiley & Sons, 480 p.

- Sayers, Michael W., Steven. M. Karamihas. 1996. *Interpretation of road roughness profile data, Final report*. «Federal Highway Administration», Contract DTFH 61-92-COOI43. Transportation Research Institute, The University of Michigan. 166 p.
- Sayers, Michael W., Steven. M. Karamihas. 1998. *The little book of profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles*. Transportation Research Institute, The University of Michigan, 100 p.
- Tremblay, Guy, Mathieu Grondin et Pierre Langlois. 2003. «Bonnes pratiques pour l'obtention d'un bon uni de chaussée». *Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec*, Vol. 8, No. 4, 2 p.
- Truchetet, Frédéric. 1998. *Ondelettes pour le signal numérique*. Paris, France : Éditions Hermès, 156 p.
- Vaillancourt, Michel. 2004. *Méthodologie de modélisation de l'uni des chaussées souples et impact des sols d'infrastructure*. Thèse de doctorat en génie, Montréal, École de technologie supérieure, 321 p.
- Wei, Liu, T. F. Fwa et Zhao Zhe. 2005. «Wavelet analysis and interpretation of road roughness». *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 2, Février, p. 120-130