



HAL
open science

Analyse des états de surface en science des matériaux : caractérisation multi-échelles par ondelette et détermination de l'anisotropie des surfaces

Zahra Khawaja

► **To cite this version:**

Zahra Khawaja. Analyse des états de surface en science des matériaux : caractérisation multi-échelles par ondelette et détermination de l'anisotropie des surfaces. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Technologie de Compiègne, 2014. Français. NNT : 2014COMP2139 . tel-01081204

HAL Id: tel-01081204

<https://theses.hal.science/tel-01081204v1>

Submitted on 7 Nov 2014

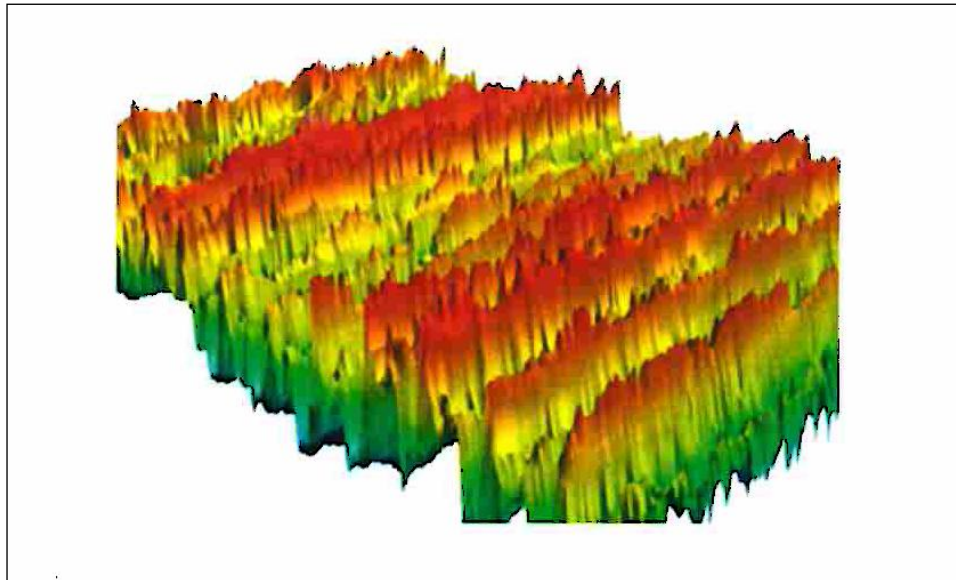
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Par Zahra KHAWAJA

Analyse des états de surfaces en science des matériaux : caractérisation multi-échelles par ondelette et détermination de l'anisotropie des surfaces

Thèse présentée
pour l'obtention du grade
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 21 janvier 2014
Spécialité : Mécanique avancée

D2139



THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

École Doctorale: Sciences pour l'Ingénieur

Spécialité : **Mécanique Avancée**

Présentée par

Zahra KHAWAJA

Analyse des états de surfaces en science des matériaux : Caractérisation multi-échelles par ondelette et détermination de l'anisotropie des surfaces

Thèse soutenue le **21 Janvier 2014** devant le jury composé de :

M. Thierry GUERRA,	Professeur, U. de Valenciennes	(Président)
M. Jérôme ANTONI	Professeur, INSA de Lyon	(Rapporteur)
M. MATHIA Thomas	Directeur de recherche, ECL	(Rapporteur)
M. Maxence BIGERELLE	Professeur, U. de Valenciennes	(Directeur)
M. Gildas GUILLEMOT	Chargé de recherche, EMP	(Directeur)
M. Alain RASSINEUX	Professeur, UTC	(Examineur)
M. Pierre-Emmanuel MAZERAN	Maître de conférences, UTC	(Examineur)

REMERCIEMENTS

L'étude décrite dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet FONCRUG financé par la région Picardie et cofinancé par l'Europe. Elle a été effectuée à l'UTC au sein du laboratoire Roberval. Qu'il me soit permis ici de remercier tous les partenaires de ce projet.

Alors, parce que je vais sûrement en oublier, je tiens à commencer par remercier toutes celles et ceux sans qui je n'aurais jamais pu en être là aujourd'hui, pour leur soutien, leur confiance surtout, parce que ça n'a pas toujours été facile.

Je tiens ensuite à remercier Monsieur Jean-Marc ROELANDT, directeur du Laboratoire Roberval, et Monsieur Alain RASSINEUX, de m'avoir accueillie à Roberval et permis d'effectuer ce travail de thèse. Je remercie l'École Doctorale Monsieur Olivier GAPENNE et l'Université de Technologie de Compiègne pour m'avoir accueillie, et pour m'avoir permis d'effectuer des charges d'enseignements en parallèle de la thèse. Je remercie notamment Mandâmes Odile LECLERC et Marion KACZKOWSKI Marion pour leur disponibilité et pour avoir toujours facilité les démarches administratives.

Je souhaite remercier mes directeurs de thèse Messieurs Maxence BIGERELLE et Gildas GUILLEMOT pour toute la confiance qu'ils m'ont accordée. Leurs conseils avisés ont grandement contribué à l'avancement de ces travaux.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à Madame Salima BOUVIER et Monsieur Sergio Rodriguez, pour leur soutien permanent et leur disponibilité. Leur aide précieuse et leur capacité à partager leurs connaissances scientifiques m'ont été très bénéfiques lors de la réalisation de ce travail.

Je remercie Monsieur Thierry GUERRA pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je suis très sensible à l'honneur que me font Messieurs Jérôme ANTONI et MATHIA Thomas en acceptant de juger ce travail et d'en être rapporteurs et membres du jury.

Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude envers Messieurs Alain RASSINEUX et Pierre-Emmanuel MAZERAN qui ont accepté d'être examinateurs de ce mémoire.

A tous les membres du laboratoire Roberval, j'adresse ma sympathie. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler à votre côté.

Et par delà de tout mes remerciements, un grand merci à mon époux Ali pour son affection et pour la patience qu'il a prouvé envers moi ainsi qu'à mes parents et mes sœurs pour leurs soutiens tout au long de ces années.

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis qui ont contribué de manière indirecte à l'aboutissement de ce travail.

RÉSUMÉ

Analyse des états de surfaces en science des matériaux : Caractérisation multi-échelles par ondelette et détermination de l'anisotropie des surfaces

Le contrôle et à la maîtrise de l'état des surfaces est un besoin majeur pour les industriels. De nombreuses études sur les interactions entre la morphologie de surface et les mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques, ont été réalisées. Cependant une caractérisation plus précise en fonction des domaines et des besoins est nécessaire. Elle consiste à chercher les paramètres de rugosité les plus pertinents qui relient la topographie d'une surface aux phénomènes physiques qu'elle subit ou aux propriétés du matériau dont elle est composée.

Dans ce travail, un logiciel pour caractériser l'état de surface a été développé. Cet outil nommé « MesRug » permet de calculer des paramètres de rugosité et d'extraire les plus pertinents ainsi que de définir l'échelle la plus adéquate pour une application donnée. La recherche des paramètres les plus pertinents se fait par une approche statistique (l'analyse de la variance 'ANOVA' combinée avec la théorie du Bootstrap).

Une caractérisation a été effectuée en utilisant des données de mesures (2D) sur des surfaces abrasives. L'influence de la forme des ondelettes discrètes et continues sur la détection de l'échelle pertinente du mécanisme d'abrasion a été testée. On déduit que la décomposition en ondelettes permet de quantifier et de localiser les échelles de l'abrasion des processus d'usinage pour tous les paramètres du processus. Cependant, la pertinence de caractériser les échelles appropriées d'abrasion ne dépend pas de la forme de l'ondelette.

Dans ce travail, un nouveau paramètre de rugosité 3D est proposé pour quantifier la régularité d'une surface indépendamment de l'amplitude et des unités de longueur de balayage. L'efficacité de ce paramètre est testée sur des surfaces périodiques bruitées avec différents degrés d'anisotropie. La valeur de ce paramètre est comprise entre zéro (bruit parfait) et 100% (surface sinusoïdale parfaite). Il nous a permis de détecter les directions d'anisotropie de régularité pour une surface donnée.

Mots clés: Rugosité, analyse de la variance, Bootstrap, ondelettes, décomposition multi-échelle, régularité des surfaces,...

ABSTRACT

Analysis of surface states in materials science: Multi-scale wavelet characterization and determination of the anisotropy of the surfaces

Monitoring and control of the state of the surfaces is a major need for industry. Numerous studies on the interactions between the surface morphology and the physical, chemical or mechanical mechanisms have been conducted. However, a more precise characterization related to industrial domains and needs is necessary. It consists in finding the most relevant roughness parameters that connect the topography of a surface with the physical phenomena which it undergoes or in the properties of the material of which it consisted.

In this work, a software designed to characterize the surface condition was developed. This tool named "MesRug" allows to calculate roughness parameters then extract the most relevant ones and to define the most appropriate scale for a given application. The search for the most relevant parameters is done by a statistical approach (analysis of variance ANOVA combined with the theory of Bootstrap).

A characterization was performed using (2D) data of measurement on abrasive surfaces. The influence of the form of discrete and continuous wavelet on the detection on the relevant scale mechanism of the abrasion was tested. We conclude that the wavelet decomposition allows to quantify and localize the scales of abrasion of the machining process for all process parameters. However, the relevance of appropriate scales to characterize abrasion does not depend on the shape of the wavelet.

In this work, a new 3D roughness parameter is proposed to quantify the smoothness of a surface, independently of the amplitude and the scanning length units of the surface. The efficiency of this parameter is tested on noisy periodic surfaces with varying degrees of anisotropy. The value of this parameter is between zero (perfect sound) and 100 % (sine perfect surface). It enables us to identify the anisotropy directions of regularity for a given surface.

Keywords: Roughness analysis of variance, Bootstrap, wavelet multiscale decomposition, regularity of surfaces,...

1 Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	9
Références bibliographiques	13
CHAPITRE 1	
1 Contexte	15
2 Outils de caractérisation statistique.....	15
3 Présentation du système MesRug.....	17
4 Format de stockage des données topographiques de surface	18
4.1 L'entête.....	19
4.2 L'espace des données.....	20
4.3 L'espace additionnel.....	21
5 Structure de traitement	21
6 Lecture du fichier des méthodes de redressement et des paramètres de rugosité	23
7 Concepts et définitions concernant l'analyse de l'état de surface.....	24
7.1 Définition d'une surface	25
7.1.1 Définition abstraite mathématique.....	25
7.1.2 Modélisation stochastique	25
7.2 Définition de la profilométrie (2D et 3D) et correspondance avec le traitement du signal (1D et 2D)	25
7.3 Analyse tridimensionnelle	26
7.3.1 Méthodes de prétraitement (ou de redressement).....	26
7.3.1.1 Prétraitement par polynômes	27
7.3.1.2 Prétraitement par filtre gaussien	28
7.3.1.3 Prétraitement par B-spline	29
7.3.2 Paramètres de texture surfacique 3D	31
7.3.2.1 Paramètres d'amplitude.....	33
7.3.2.2 Paramètres hybrides	34
7.3.2.3 Paramètres d'isotropie	34
7.3.2.4 Paramètres fonctionnels	36
8 Maintenance du code dans le système MesRug.....	38
8.1 Ecriture et Intégration des nouvelles méthodes de redressement	38
8.2 Ecriture et intégration des nouveaux paramètres de rugosité	39
8.2.1 Paramètres de rugosité dépendant d'autres paramètres.....	41

9	Traitement statistique	42
9.1	Méthode de rééchantillonnage : Le Bootstrap	42
9.2	ANOVA : Test de Fisher	44
9.2.1	Principe du test de Fisher	44
	Références bibliographiques	47
CHAPITRE 2		
1	Contexte	50
2	Aspect historique	50
3	Analyse de Fourier	52
3.1	Transformée de Fourier	53
3.2	Transformation de Fourier à fenêtre glissante	53
4	Analyse par ondelette	54
4.1	Principe	54
4.2	Définitions	55
4.2.1	Ondelette mère et fonctions d'ondelette	55
4.2.2	Les principales caractéristiques d'une ondelette mère	56
4.3	Transformée en ondelettes	57
4.3.1	Transformation discrète	57
4.3.2	Propriétés des familles d'ondelette	62
4.3.3	Choix de l'ondelette d'analyse	63
5	Plan d'expériences sur le procédé d'usinage par abrasion	64
5.1	Mise en œuvre de l'opération de toilage	65
5.1.1	Conditions expérimentales	65
5.1.2	Mesures de rugosité	66
6	Problématique multi-échelle de l'abrasion	66
6.1	Étude du processus élémentaire	67
6.2	L'ondelette la plus pertinente pour caractériser le mécanisme élémentaire de l'abrasion	68
7	Analyse multi-échelle des paramètres de rugosité	71
8	Méthode d'analyse statistique	72
9	Résultats	73
9.1	Effet de la rigidité du galet	73
9.2	Influence du choix d'ondelettes	75
9.2.1	Indicateur de pertinence multi-échelle de l'influence de la forme des ondelettes	78

10	Discussion.....	78
11	Conclusion.....	79
	Références bibliographiques	80
CHAPITRE 3		
1	Contexte	84
2	Analyse multi-échelle par ondelettes continues	85
2.1	Principe et conditions d'existence des ondelettes.....	85
2.2	Familles d'ondelettes et ondelettes mère	86
2.3	Aspects mathématiques de la transformée en ondelettes continues	88
2.4	Transformée en ondelettes inverse	89
3	Algorithme de caractérisation multi-échelle par ondelette continue.....	90
4	Applications de l'analyse par ondelettes continues sur des surfaces abrasives	95
5	Analyse multi-échelle des paramètres de rugosité	100
6	Méthode d'analyse statistique	101
7	Résultat et discussion	102
7.1	Effet de la rigidité du galet	102
7.2	Effet de la taille du grain	106
8	Conclusion.....	112
	Références bibliographiques	113
CHAPITRE 4		
1	Contexte	115
2	Le paramètre de régularité.....	116
2.1	Définition mathématique	116
2.2	Exemples simulés	117
3	Résultats et Discussions	121
4	Conclusion et perspective.....	128
	Références bibliographiques	129
	CONCLUSION GENERALE.....	130

INTRODUCTION GENERALE

L'ensemble des travaux que nous présentons ici s'inscrit dans le cadre du projet «FOCRUG3D: Impacts fonctionnels des surfaces rugueuses tridimensionnelles». Ce projet est financé par la région Picardie et cofinancé par l'Union européenne. L'objectif principal de ce projet est de développer un logiciel de calcul des paramètres de rugosité 3D et d'analyse statistique de ces paramètres. Ce projet répond à l'interrogation suivante : « Dans le domaine de la caractérisation morphologique, il existe de nombreux paramètres d'état de surface 3D. Mais le concepteur, lorsqu'il veut écrire ses spécifications produits, ne sait pas réellement comment choisir le (ou les) paramètre (s) optimum relativement à une fonction attendue liée à la qualité de surface (résistance à l'usure, adhésion, frottement, usinabilité, biocompatibilité, brillance...) ». De plus, ce projet propose de lever les verrous technologiques posés par l'utilisation de la topographie de surface 3D :

- points non mesurables sur certaines technologies
- impact de la technologie de mesure sur le résultat
- mesure de l'état de surface non transportable (dimensions, incertitude de mesure,...)
- temps de mesure en 3D
- anisotropie de l'acquisition de mesure d'état de surface 3D
- représentativité de la zone de mesure

Une surface est composée de plusieurs échelles de longueurs d'ondes (voir Figure 1) : la « forme » pour les grandes échelles (les composantes basses fréquences), « l'ondulation » qui représente les échelles intermédiaires (les fréquences moyennes) et la « rugosité » qui représente les petites échelles (la fréquence élevée des composants). Les caractéristiques multi-échelles de rugosité sont liées à différents aspects des processus que la surface a subi, et influencent les performances fonctionnelles de la pièce usinée. Une caractérisation complète et efficace de ces fonctions multiples fournit donc un lien important entre la fabrication et la fonction. Actuellement, les interactions entre la morphologie de surface et les mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques constituent un sujet de recherche très étudié. L'objectif principal des études en morphologie des surfaces consiste à résumer l'information de manière optimale, autrement dit caractériser précisément les surfaces en fonctions des domaines et des besoins. Une première problématique consiste à se demander quel paramètre de rugosité est le plus pertinent pour caractériser la topographie en relation avec un phénomène physique ou une propriété du matériau.

Le problème essentiel est de définir des critères permettant de caractériser les surfaces à partir de la mesure et de l'analyse de la topographie 3D. Ces critères devraient :

- permettre de caractériser la topographie des surfaces, indépendamment du procédé de mesure, et d'expliquer certaines de leurs propriétés fonctionnelles ;
- conduire à la définition de paramètres significatifs permettant de contrôler la préparation des surfaces et l'obtention des propriétés fonctionnelles visées.

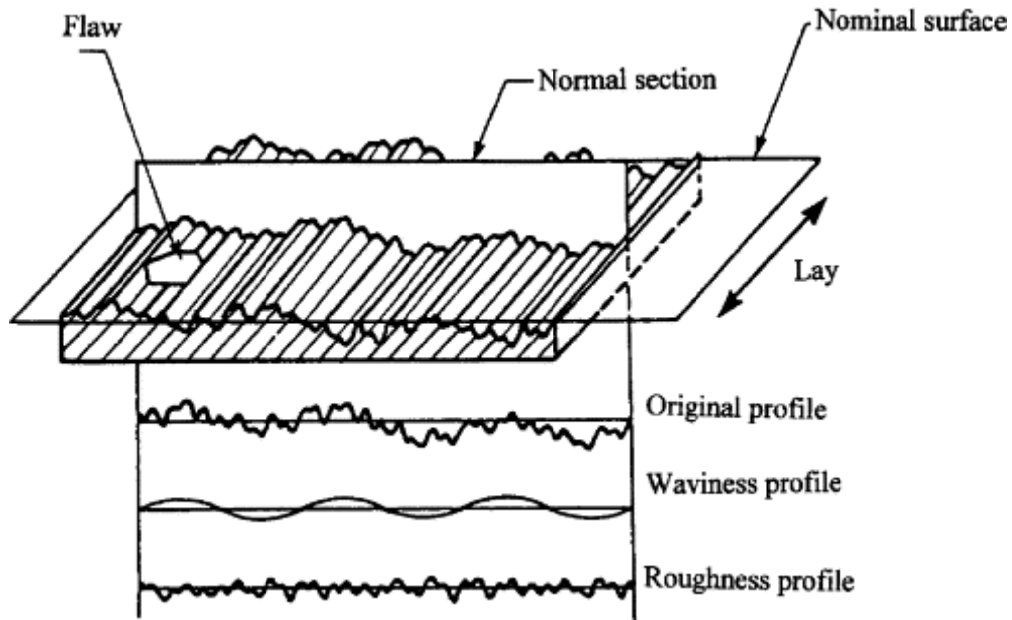


Figure 1 : L'ondulation et la rugosité dans une surface. (D'après [1])

Pour tester l'efficacité d'un paramètre d'état de surface, une mesure de pertinence doit être construite et appliquée à la globalité des paramètres d'état de surface. Cette mesure de pertinence ne peut pas être dissociée de la fonctionnalité de surface. Une méthodologie de traitement des paramètres 2D (profilométrie 2D), a été construite par Bounichane dans sa thèse [2]. Elle permet, à l'aide d'un système expert appelé « MesRug », de donner à l'utilisateur le ou (les) paramètres d'état de surface optimaux associés à une fonctionnalité recherchée.

Définir la rugosité en 3D correspond à un réel besoin, précise M. Millet dans [3]. De nombreux industriels y voient des ouvertures nouvelles, pour mieux comprendre le comportement des surfaces.

L'objectif de cette thèse est de prolonger l'application 2D vers une application 3D, en intégrant les paramètres de rugosité 3D et les méthodes de redressement 3D dans le système MesRug. Ce système proposera les mesures à effectuer (archivage des surfaces numérisées) en fonction des paramètres de fonctionnalité recherchés. Les calculs des paramètres 3D sont alors effectués à l'aide d'algorithmes adéquats (C++) s'appuyant sur une base de données résultant qu'il conviendra de constituer en fonction des fonctionnalités attendues. Les analyses multi-échelles sont développées pour déterminer les caractéristiques d'un ensemble d'éléments (échelle de la mesure, paramètre, filtre, ...) permettant de discriminer au mieux une propriété recherchée.

Avant de commencer la prolongation de l'application 2D vers une application 3D, il fallait finaliser la version 2D. C'est dans cette optique que le sujet des ondelettes 2D est abordé.

Le travail constituant cette thèse est développé dans quatre chapitres. Dans un premier chapitre, on décrira la philosophie ainsi que la méthodologie de la construction de l'architecture du système « MesRug ». Nous expliquerons la technologie utilisée pour la réalisation de ce système, la manière de l'utiliser et de l'enrichir par de nouvelles approches multi-échelles ainsi que par de nouveaux paramètres de rugosité. De plus, on présentera les définitions et les formules mathématiques de certains paramètres de rugosité tridimensionnels (3D) ainsi que les principes de plusieurs méthodes de redressement de la topographie de la surface mesurée. En fin de chapitre, on décrira la méthode statistique utilisée dans le traitement de nos résultats.

Dans le chapitre 2, nous traiterons le caractère multi-échelle des surfaces abrasives en analysant les profils correspondant avec les ondelettes discrètes 2D. Après un rappel développant les analyses de Fourier et leurs limites, et la théorie mathématique de la méthode des ondelettes, nous définirons le plan d'expériences utilisé dans le procédé d'usinage des pièces analysées. Par la suite, nous présenterons la problématique multi-échelle de l'abrasion. Pour finir, l'effet de l'ondelette, du procédé expérimental et de l'interaction entre l'ondelette et le procédé expérimental seront exposés.

Dans le chapitre 3, nous développerons la théorie de l'analyse en ondelettes continues. Dans la suite de ce chapitre nous présenterons l'analyse des surfaces abrasives, étudiées dans le chapitre 2, basée sur le traitement par les ondelettes continues 2D, et les résultats seront discutés.

Dans le chapitre 4, un nouveau paramètre de rugosité 3D sera proposé pour quantifier la régularité d'une surface indépendamment de l'amplitude et des unités de longueur de balayage. Nous définirons tout d'abord l'aspect mathématique de ce paramètre. Par la suite, l'efficacité de ce paramètre sera testée sur des surfaces périodiques bruitées avec différents degrés d'anisotropie.

Enfin nous serons en mesure de conclure et de réfléchir aux perspectives offertes par ce travail.

Le travail de cette thèse a été publié dans les articles suivants :

- Wavelet theory and belt finishing process, influence of wavelet shape on surface roughness parameter values – 13th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces – London, UK, 12-15 Avril, 2011. "IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 311 (2011) 012013", Z khawaja, G Guillemot, P -E Mazeran, M El Mansori AND M Bigerelle.
- 3D Parameter to Quantify the Anisotropy Measurement of Periodic Structures on Rough Surfaces – SCANNING VOL. 9999, 1–7 (2013), G. GUILLEMOT, M. BIGERELLE, AND Z. KHAWAJA.

- Relevance of Wavelet Shape Selection in a complex signal – Mechanical Systems and Signal Processing 41(2013)14–33, M. Bigerelle, G. Guillemot, Z. Khawaja, M. El Mansori AND J. Antoni.
- Relevance of wavelets shape selection – International Conference Surveillance 6 – Compiègne, France, 25-26 Octobre, 2011. Z. Khawaja, M. Bigerelle, G. Guillemot AND J. Antoni.
- Anisotropy measurement of periodic structures – International Conference on Surface Metrology – Annecy-Mont Blanc, France, 21-23 Mars, 2012, Z. Khawaja, G. Guillemot AND M. Bigerelle.
- Pertinence du choix de l'ondelette pour caractériser et modéliser les surfaces abrasées – 22èmes Journées Internationales et Francophones de Tribologie – Modélisation du contact et de l'usure – Albi, France. Proceedings of: conception fabrication et durabilité ISBN: 978-2-911256-80-6, p.: 151-157, Z. Khawaja, G. Guillemot, M. El Mansori AND M. Bigerelle.

Références bibliographiques

- [1] ASME B46.1, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), 1995.
- [2] B. Bounichane, Vue vers une Méthodologie d'Analyse des Etats de Surfaces en Science des Matériaux : de la Caractérisation à la Recherche de Paramètres Pertinents, Rapport de Doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, Décembre 2009.
- [3] M.L. Zani, La Mesure de Rugosité ? Quelques Normes... et Plusieurs Dizaines de Paramètres, Solutions « Mesures Mécaniques », Octobre 2003.

CHAPITRE 1

NOUVEAU SYSTEME D'ANALYSE DES ETATS DE SURFACE ET CARACTERISATION TRIDIMENSIONNELLE DE LA TOPOGRAPHIE DES SURFACES

L'évaluation de la rugosité de surface est très important pour de nombreux problèmes fondamentaux tels que le frottement, la déformation contacteur, la chaleur et la conduction électrique actuelle... Pour cette raison, la rugosité de surface a fait l'objet d'études expérimentales et théoriques pendant de nombreuses décennies. Les paramètres de rugosité de surface sont normalement classés en trois groupes en fonction de leurs fonctionnalités. Ces groupes sont définis comme des paramètres d'amplitude, des paramètres d'espacement, et des paramètres hybrides. Ce chapitre illustre les définitions et les formules mathématiques de certains de ces paramètres de rugosité tridimensionnels (3D) ainsi que les principes de plusieurs méthodes de redressement de la topographie de la surface mesurée. Cette collection des paramètres de rugosité de surface et de méthodes de redressement a été utilisée dans un nouveau système appelé « MesRug » développé par notre équipe. Après une brève description de la philosophie ainsi que de la méthodologie de la construction de l'architecture du système « MesRug » nous expliquons la technologie utilisée pour la réalisation de ce système, la manière de l'utiliser et de l'enrichir par de nouvelles approches multi-échelles ainsi que par de nouveaux paramètres de rugosité.

1 Contexte

Il est bien connu qu'une surface d'ingénierie est composée d'un grand nombre de longueurs d'échelle de rugosité qui sont superposées les unes aux autres. Les caractéristiques de rugosité multi-échelles sont liées à différents aspects des processus que la surface a subi, et influencent les performances fonctionnelles de la pièce usinée. Une caractérisation complète et efficace de ces fonctions multiples fournit donc un lien important entre la fabrication et la fonction. Actuellement, les interactions entre la morphologie de surface et les mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques font un sujet de recherche très étudié.

L'objectif principal des études en morphologie des surfaces consiste à résumer l'information de manière optimale, autrement dit caractériser précisément les surfaces en fonction des domaines et des besoins. Dans nos recherches, nous étudions notamment la signification physique, les méthodes numériques et les artefacts numériques du calcul d'un paramètre de Rugosité X. Le problème essentiel est d'extraire les paramètres les plus pertinents pour caractériser une surface et définir l'échelle la plus appropriée pour cette caractérisation. Dans cette optique, nous avons construit une méthodologie de traitement des paramètres tridimensionnels qui permet, à l'aide d'un système expert, de tester l'efficacité d'un paramètre de surface et donner le ou les paramètre(s) d'état de surface optimaux associés à une fonctionnalité recherchée.

Ce chapitre donne une brève présentation de la philosophie ainsi que de la méthodologie de construction de l'architecture de ce système appelé « MesRug » (en référence à Mesure de Rugosité). La technologie utilisée pour sa réalisation sera expliquée, en montrant la manière de l'utiliser et de l'enrichir par de nouvelles approches multi-échelles ainsi que de nouveaux paramètres de rugosité. En fin de chapitre, nous présentons quelques méthodes d'analyses multi-échelles tridimensionnelle (régression polynomiale, filtre gaussien, filtre double gaussien, Bspline...) intégrées dans MesRug, ainsi que les définitions normatives de certains paramètres, pour finir par la description de la méthode statistique utilisée (Bootstrap) pour déterminer la pertinence des paramètres de rugosité.

2 Outils de caractérisation statistique

Il existe plusieurs dizaines de paramètres pour qualifier l'état de surface d'une pièce, et en particulier sa rugosité. Il est donc d'un intérêt primordial de tester l'efficacité d'un paramètre d'état de surface, autrement dit extraire les paramètres les plus pertinents pour caractériser une surface et définir l'échelle la plus appropriée pour cette caractérisation. Cette pertinence ne peut pas être dissociée de la fonctionnalité de surface. Prenons un exemple de caractérisation de surface par mesure de rugosité pour expliquer ce dessein :

Analysons l'état de surface des « p » échantillons d'un matériau, qui ont subi différents mécanismes d'usure. Afin d'atteindre notre but, n mesures tridimensionnelles de rugosité sont effectuées sur chaque échantillon.

Habituellement, en utilisant les mesures faites, quelques paramètres sont retenus (par exemple S_a , S_q , S_t ,...) pour chercher la corrélation entre eux et les différents mécanismes d'usure. Par exemple, dans une catégorie professionnelle, un paramètre particulier de rugosité (le S_a ou le S_t) est souvent utilisé, les relations de ce paramètre avec le phénomène d'usure sont calculées pour déduire des caractéristiques tribologiques du matériau. Néanmoins, si la détermination de la surface en face du phénomène d'usure est mieux révélée par un autre paramètre, les conclusions de l'analyse doivent être variées. De même, dans la communauté scientifique, le paramètre de morphologie de surface qui possède une interprétation physique connue (le S_q d'une surface caractérise les phénomènes de brillance) est fréquemment retenu. Toutefois, si un autre paramètre de rugosité est manifesté expérimentalement en précisant mieux le phénomène physique, alors sa caractéristique discernée doit être prouvée. Un autre engouement se profile autour des paramètres fonctionnels (S_k , S_{pk} , S_{vk} ...). « Ces paramètres sont plus proches du phénomène physique mesuré que les traditionnels S_a , S_z ou autres, indique M. Berrouiguet [1]. Ils prennent réellement en compte le besoin final du fabricant ».

Pour justifier la pertinence de ces nouveaux paramètres, il faut la confronter aux paramètres d'état de surface déjà existants. « Tout dépend de l'application, souligne M. Berrouiguet [1]. En mesurant la rugosité d'un piston, on n'a pas les mêmes besoins qu'en mesurant la rugosité d'un vilebrequin. Dans un cas, on s'intéressera à la capacité de rétention d'huile de la surface, dans l'autre, au bruit de fond généré par le frottement des pièces. Les ingénieurs ne s'intéressent donc jamais aux mêmes paramètres. Alors, pour tester l'efficacité d'un paramètre d'état de surface vis-à-vis d'un phénomène physique, tous les paramètres de rugosité recensés dans les normes et la bibliographie sont calculés sur les $n \times p$ topographies tridimensionnelles obtenues. Le but est d'en déduire les paramètres les plus significatifs. Dans cette optique, une mesure de pertinence est construite pour être appliquée à tous ces paramètres. Cette approche consiste à créer une méthode statistique robuste de la mesure de l'efficacité qui induit un codage du système physique. Alors pour traiter les états de surfaces en analysant tous les paramètres de rugosité, un chiffre d'efficacité, permettant un classement de leur pertinence en fonction de leur indice d'efficacité, est attribué à chaque paramètre. Cette technique indique qu'un paramètre de rugosité X peut être très pertinent vis-à-vis de nombreux phénomènes physiques.

Cette démarche représente la partie la plus importante de notre approche, et elle n'a jamais été appliquée dans la discipline des états de surfaces. Aucun logiciel commercial ne permet une telle tâche et les personnes tentées d'appliquer cette technique devront créer leur propre méthode ainsi que leur propre application informatique. Afin de garantir une homogénéité d'interprétation des résultats, toute méthode devra respecter quelques règles de bases :

- Traiter la totalité des paramètres.
- Construire une statistique qui soit la plus fiable possible (robuste, convergente, et de faible variance).
- Vérifier l'homogénéité des données

- Créer un indice probabiliste : chaque paramètre sera affecté d'un indice probabiliste compris entre 0 et 1 qui permettra d'affirmer à tort que le paramètre est influent alors qu'il ne l'est pas.
- Classer les paramètres par ordre de caractère discriminant.
- Considérer chaque paramètre de rugosité comme une variable aléatoire.
- Regrouper les paramètres d'égale influence.
- Détecter les éventuelles corrélations entre les paramètres
- Si un nouveau paramètre est introduit, l'indice probabiliste affecté aux autres paramètres devra rester inchangé.

Pour appliquer cette approche, la construction de méthodes statistiques et la création d'outils informatiques adéquats est obligatoire. Dans ce but, nous avons construit le système MesRug qui calcule la totalité des paramètres de surface pour toutes les mesures effectuées, ainsi il nous permet de disposer d'un traitement statistique pour traiter les résultats et savoir quel paramètre est le plus pertinent pour caractériser la topographie en relation avec tel ou tel phénomène physique ou propriété du matériau. Plus d'informations sur les aspects informatiques de cette méthode peuvent être trouvées dans [2].

3 Présentation du système MesRug

Le système MesRug est à la fois un logiciel de traitement de fichiers de rugosité et un environnement d'analyse d'état de surface. Le développement de MesRug entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la topographie de surface dont le but est de déduire, selon la fonctionnalité d'une surface de matériau, les paramètres de rugosité qui la caractérise le mieux.

Dans cette optique, MesRug intègre non seulement les paramètres de rugosité recensés dans les normes mais également les méthodes de redressement permettant de filtrer la rugosité d'une surface et les méthodes statistiques détectant la pertinence d'un tel paramètre. MesRug est un logiciel « boîte à outils » qui permet à l'utilisateur d'intégrer des paramètres et des méthodes répondant à ses propres besoins.

Le traitement des fichiers de rugosité par MesRug débute avec le codage de l'information. Le nom du fichier est un identificateur vu que chacune de ces lettres représente une signification physique de la surface. MesRug utilise une table de décodage qui permet d'identifier la signification de ces lettres. Cette table permet d'assurer une simplification dans le traitement du problème. L'étape de l'encodage et le décodage de l'information initiale est une question délicate. Cette phase réalisée permet un gain de temps en traitement informatique évidemment prodigieux. Prenons un simple exemple pour expliquer cette approche. Analysant l'état de surface de quinze échantillons d'état de surface différents correspondant à deux matériaux, vingt mesures de rugosité sont effectuées sur chaque échantillon. Pour trouver les paramètres discriminant au mieux les différents états de surfaces des deux matériaux, le logiciel suit plusieurs étapes. D'abord, le nom du dossier, celui de la table de correspondances et les options de calculs de paramètres de rugosité sont précisés dans

MesRug. La totalité des 300 fichiers est décryptés par Mesrug, et tous les paramètres de rugosité recensés dans les normes sont calculés. De plus MesRug crée des fichiers textes pour d'éventuelles analyses ultérieures (spectre, fonction d'autocorrélation, ...). Le fichier des paramètres est codé pour être exploitable sous ExcelTM, StatisticaTM, et sous le langage SASTM (Statistical Analyses System). Ce dernier est utilisé pour faire les traitements statistiques, en introduisant le fichier des paramètres dans le langage SASTM. Ce choix de traitement permet aux utilisateurs d'utiliser des requêtes permettant le traitement des informations. Lorsqu'un utilisateur exprime une requête, elle est transmise à l'objet informationnel représentant la source d'information interrogée. Dans notre prototype, l'utilisateur dispose de toutes les routines de traitement statistique de langage SASTM ainsi que des outils d'analyses Bootstrap de recherche automatiques des paramètres significatifs.

La Figure 2 représente une illustration des différents liens de traitement de données dans l'architecture du logiciel MesRug, leur détails peut être trouvé dans [2].

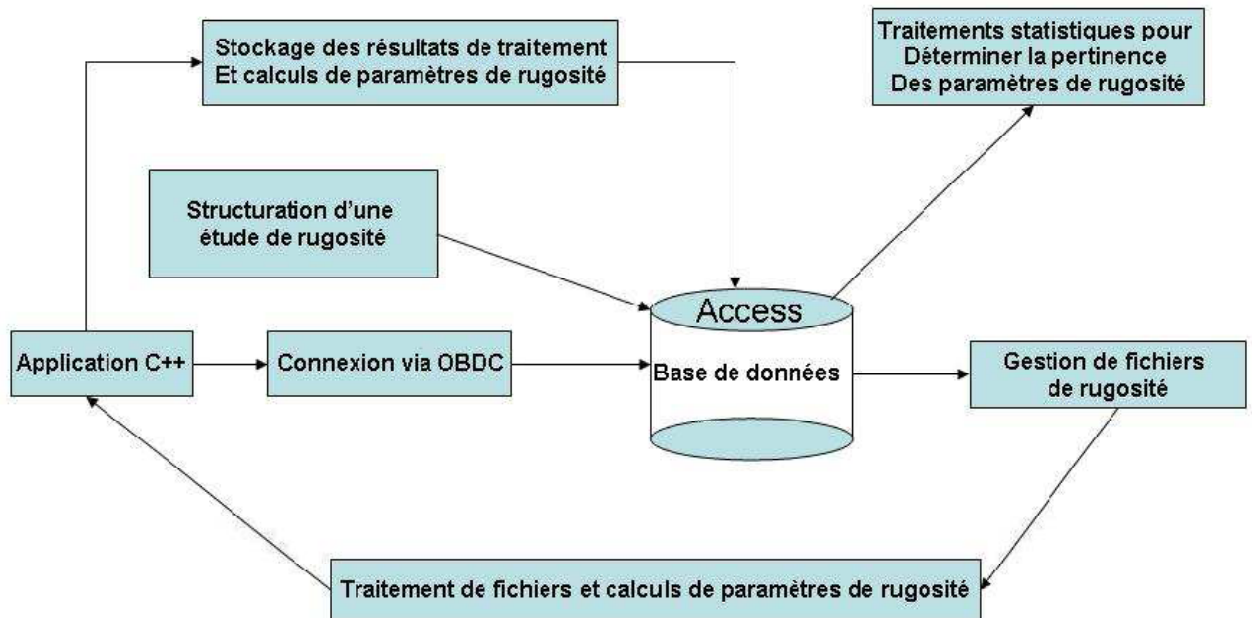


Figure 2 : Illustration des liens entre les différentes parties de traitement de données dans le logiciel « MesRug ». (D'après[2])

4 Format de stockage des données topographiques de surface

Les détails de ce paragraphe peuvent être trouvés par exemple dans [3], [4], et [5].

De nombreux formats normalisés existent déjà pour l'échange populaire de certains types de données tel que PCX pour les fichiers images, DXF pour les fichiers de dessin et ASCII pour les fichiers Texte. De même, le format SDF (Surface Data File) a été adopté pour permettre l'échange simple et direct de données topographiques de surface entre les différents

progiciels. Deux représentations de ce format sont disponibles : une représentation ASCII et une représentation Binaire. MesRug offre la possibilité de lire les deux représentations du format SDF.

Le format SDF est divisé en trois sections :

- L'entête
- L'espace des données
- L'espace additionnel

4.1 L'entête

L'entête contient des informations générales sur chaque mesure effectuée (Tableau 1). Cela inclue les informations concernant le système de mesure tel que le nombre de la version, ou des informations sur la topographie tel que le nombre de points par profile, le nombre de profiles, le pas d'échantillonnage...

Information	Nom du Champs	Type des champs	Longueur (BYTES)
Numéro de la version		Caractère non signé	8
ID du fabricant	ManufacID	Caractère non signé	10
Date et heure de creation	CreateDate	Caractère non signé	12
Date et heure de la derniere modification	ModDate	Caractère non signé	12
Nombre de points par Profile	Numpoints	Entier non signé	2
Nombre de Profiles	NumProfiles	Entier non signé	2
Pas en X	Xscale	Double	8
Pas en Y	Yscale	Double	8
Pas en Z	Zscale	Double	8
Resolution en Z	Zresolution	Double	8
Type de compression	Compression	Caractère non signé	1
Format des données	DataType	Caractère non signé	1
Contrôle des données	CheckType	Caractère non signé	1
		TOTAL	81

Tableau 1 : Description de l'entête montrant le type et la longueur des champs. (D'après [4]).

- ◆ Le numéro de la version : Un numéro de version de la spécification de fichier est indispensable afin que les modifications du format du fichier puissent être facilement mises en œuvre. La première chose que ce champ définit est le type de représentation du fichier de données i.e. ASCII ou Binaire à travers le premier caractère qui lui est associé (' a ' ou ' A ' pour ASCII ou ' b ' ou ' B ' pour binaire).
- ◆ L'identification du fabricant de l'instrument de mesure : Il fournit des informations sur l'instrument de mesure et/ou du software.
 - ◆ Date et heure de la première création : Il s'agit d'un champ de 12 caractères (DDMMYYYYHHMM) pour stocker la date et l'heure où la mesure a été achevée.

Les séparateur redondants ne sont pas stockées, mais clairement un rembourrage zéro des champs est requis (par exemple 0905 pour 9 Mai pas 95). Ainsi, 110720120315 est interprété comme le 11 Juillet 2012 à 03:15 am.

- ◆ Date et heure de la dernière modification : Ce champ est semblable au précédent mais définit la dernière date et l'heure auxquelles le fichier SDF a été modifié.
- ◆ Nombre de points par profil, M : Ce nombre ne doit pas dépasser 65535.
- ◆ Nombre de profils ou traces, N
- ◆ Le pas d'échantillonnage en X : Afin de maintenir la précision, les facteurs d'échelle sont mémorisés en tant que valeurs à virgule flottante à double précision. Les trois facteurs d'échelle ont pour objectif de fournir une échelle à l'unité standard de l'appareil. Ainsi, une valeur de X-échelle de 1.00E-6 représente un espacement d'échantillonnage de 1 μ m.
- ◆ Le pas d'échantillonnage en Y
- ◆ Le pas d'échantillonnage en Z
- ◆ La résolution en Z : Si la valeur de ce champ est inconnue, elle devrait être mise à un nombre négatif.
- ◆ Le type de compression : La valeur de ce champ est utilisée pour coder le type de la compression utilisé. (Voir Tableau 2).
- ◆ Le type des Données : Ce champ est utilisé pour coder le type des données à stocker. (Voir Tableau 3)
- ◆ Contrôle des données : Ce champ contient une valeur de contrôle utilisée pour maintenir l'intégrité des données. Les valeurs possibles sont données dans (Voir Tableau 4).

Compression Type Number	Compression Type	ASCII Compression Type
0	Non	Non
1	Longueur d'exécution limité	Longueur d'exécution limité

Tableau 2 : Liste des types de compression supportée. (D'après [4])

4.2 L'espace des données

L'espace des données du fichier contient l'information des hauteurs de la surface pour un nombre M de points, et un nombre N de profils. La hauteur réelle évaluée est obtenue en multipliant les valeurs codées par le pas d'échantillonnage en Z défini dans l'en-tête du fichier. Les données topographiques sont enregistrées en série. Les profils sont entreposés successivement dans l'ordre où ils ont été rassemblés.

Code du type de données	Abbréviation suggérée	Type de données	Taille (BYTES)	Valeur décimale Minimum	Valeur décimale Maximum
0	Caractère	Caractère non signé	1	0	255
1	Entier	Entier non signé	2	0	65535
2	Long entier	Long entier non signé	4	0	4294967295
3	Réel	Réel	4	-3.4E-38	3.4E+38
4	Caractère	Caractère signé	1	-128	127
5	Entier	Entier signé	2	-32768	32767
6	Long entier	Long entier signé	4	-2147483648	2147483647
7	Double	Double	8	-1.7E-308	1.7E+308

Tableau 3 : Les types de données possibles. (D'après [4])

4.3 L'espace additionnel

Cette partie du fichier contient toutes autres informations que le propriétaire du fichier croit utile et qui ne sont pas déjà entreposées dans l'entête (le nom de l'opérateur, la spécification de l'échantillon ...).

Checksum Code	Checksum Type	ASCII CheckSum Type
0	Non	Non
1	Entier	UIntTrace

Tableau 4 : Liste des types de contrôle supporté. (D'après [4])

5 Structure de traitement

L'algorithme de traitement utilisé est constitué de cinq étapes représentées dans la Figure 3. Ces principales étapes de traitement sont :

- La lecture de la description des méthodes de redressement et des paramètres de rugosité. Cette étape est importante car elle prédétermine le choix de l'utilisateur des différentes méthodes de prétraitements et de calcul des paramètres de rugosité.
- La lecture d'un fichier de la base de données. Access est la base de données utilisée dans MesRug. La Figure 4 représente la communication entre la base de données et la structure de traitement
- Le prétraitement dont le rôle est de préparer le relevé topographique de surface au traitement. Les opérations de prétraitement sont relatives au redressement du relevé, à l'élimination de sa forme, et enfin à la sélection des zones de traitement utiles (la rugosité). Cette étape permet de créer, à partir d'une et d'une seule image,

une ou plusieurs images. Le principe des méthodes de redressement 3D intégré dans MesRug est présenté dans la section «7.3.1».

- Le calcul de l'ensemble des paramètres de rugosité demandé par l'utilisateur, sur la ou le (s) différent (es) image (s) obtenue (s) par redressement. Les définitions et les formules mathématiques de certains paramètres de rugosité tridimensionnels (3D) seront détaillées dans la section «7.3.2».
- L'enregistrement des paramètres calculés dans la base de données. Les résultats de calcul sont stockés dans des tables dans la base de données Access. Une table est donc un ensemble de données, organisées en lignes et en colonnes. MesRug nous donne la possibilité de stocker dans une table n'importe quel type d'information (texte, chiffre, ...).

Figure 3 : Algorithme de traitement.

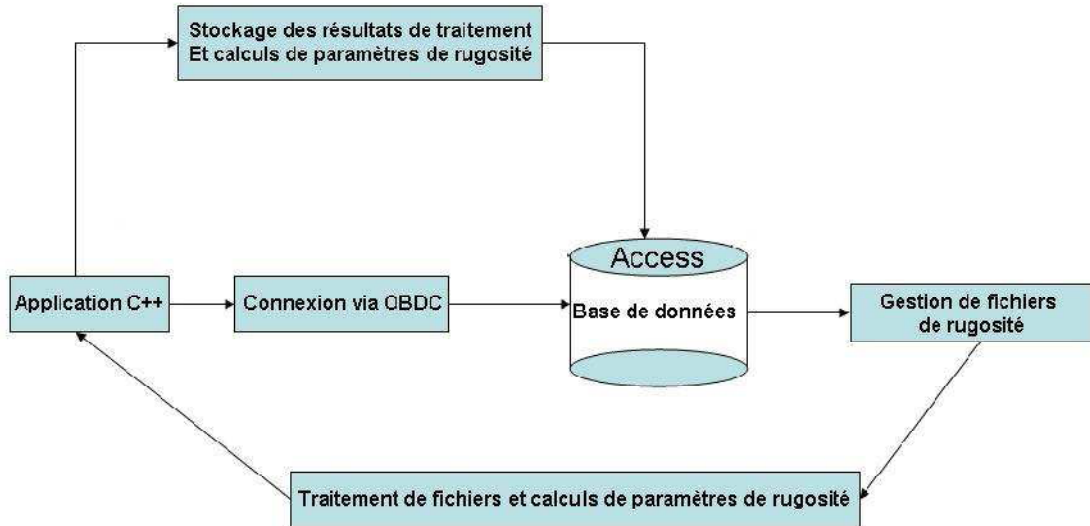


Figure 4 : Communication entre la base de données et la structure de traitement. (D'après[2])

6 Lecture du fichier des méthodes de redressement et des paramètres de rugosité

Ce fichier est nommé « Listing.txt », dans lequel l'utilisateur spécifie la méthode de redressement qu'il souhaite appliquer aux relevés topographiques de surface. Il propose à l'utilisateur la saisie des paramètres de la méthode à appliquer (comme la longueur d'onde de coupure « cut-off »). De plus, il renseigne les paramètres de rugosité à calculer. La Figure 5 présente un exemple pour le fichier « Listing.txt » pour un traitement 3D

Figure 5 : Présentation de fichier des méthodes de redressement et des paramètres de rugosité pour un traitement 3D

7 Concepts et définitions concernant l'analyse de l'état de surface

La description d'un état de surface fait intervenir des facteurs : géométrique, chimiques, physiques ou structuraux. On agit sur :

- la rugosité pour les facteurs géométriques,
- la mouillabilité,
- la dureté,
- les contraintes superficielles pour les facteurs physiques,
- et la nature des composés superficiels pour les facteurs chimiques.

La définition de l'état de surface est complexe car elle est dépendante de plusieurs domaines de la physique.

7.1 Définition d'une surface

7.1.1 Définition abstraite mathématique

Comme définit dans [6], la surface physique d'un matériau est la partie extérieure qui constitue la limite de l'espace qu'il occupe. C'est un mélange comprenant des zones avec des propriétés physiques et chimiques liées à l'histoire de leur préparation et à leur interaction avec l'environnement. D'un point de vue de la géométrie analytique, une surface peut être décrite sous forme explicite par l'ensemble des points de coordonnées x , y et z vérifiant une équation de la forme $F(x, y, z) = 0$. Cela permet de révéler points par points les différences d'écart entre la topographie mesurée et le plan moyen.

7.1.2 Modélisation stochastique

Puisque la mesure est une approximation de la réalité, et pour étudier l'état de surface, il faut prendre en compte les incertitudes et les erreurs liées à la mesure. Il convient d'estimer le résultat de mesure comme une variable aléatoire composée de la vraie valeur plus un bruit :

$$Z(X) = Z_{\text{réel}}(X) + B \quad (1)$$

Avec B est aléatoire de moyenne nulle.

7.2 Définition de la profilométrie (2D et 3D) et correspondance avec le traitement du signal (1D et 2D)

D'après [7], la profilométrie consiste à caractériser la géométrie d'une surface en ne s'intéressant qu'aux variations de la côté $Z(X, Y)$ localement normale à la surface moyenne en fonction des paramètres X et Y de position sur la surface, et ce, à différentes échelles.

Deux échelles peuvent être étudiées :

- L'échelle de l'intégralité de la pièce (échelle macroscopique) : examiner les écarts de la surface moyenne par rapport à une surface parfaite de forme simple (plan, sphère, cylindre ou cône par exemple). Dans ce type d'étude, la rugosité est déterminée en précisant une surface moyenne locale.
- L'échelle microscopique (quelques micromètres ou quelques dizaines de micromètres en X et en Y) : il est question de ce que l'on appelle la rugosité, que l'on n'étudiera généralement pas sur toute la surface, mais sur quelques échantillons intelligemment distribués.

Deux types de profilométrie peuvent être définis :

- La profilométrie 2D : Consiste à analyser un seul profil de la surface échantillon $Z(X)$. En mathématique, c'est une analyse en une dimension (1D) qui permet de représenter en tout point la hauteur par rapport à une ligne de référence.
- La profilométrie 3D : Consiste à analyser de nombreux profils parallèles $Z(X, Y)$. Elle correspond en mathématique ou en traitement des signaux, à une analyse 2D

(image 2D). Cette analyse permet de relever la topographie tridimensionnelle d'une surface.

7.3 Analyse tridimensionnelle

L'analyse des profils 2D a été largement utilisée en science et ingénierie durant plus d'un demi-siècle. Ces dernières années, il y a eu une augmentation des besoins en analyse de surface 3D. Des publications récentes [8], [9], [10] ont souligné l'importance de la topographie de la surface 3D dans les applications scientifiques et d'ingénierie. La norme ISO 25178 caractérise les états de surfaces en 3D. Elle définit de nouveaux paramètres et de nouvelles méthodes de calculs permettant de mieux appréhender les phénomènes liés à la microgéométrie des surfaces. Le Tableau 5 résume l'histoire de la naissance de cette norme.

	Groupe de travail	Résultats
1990-1993	Programme européen conduit par le professeur Stout de l'université de Birmingham	Publication du « livre bleu » Et Définition d'un premier ensemble de paramètres (les « 14 de Birmingham »)
1998-2001	Nouveau programme de recherche européen baptisé Surfstand ; (ensemble d'universitaires, de fabricants d'instruments de mesure, et d'industriels)	Publication du « livre vert » qui jettent les bases de la future norme
Janvier – Juillet 2002	Comité TC213	Voter la création d'un nouveau groupe de travail, le WG16, et lui assigner la tâche de développer la future norme.
2003-2005	WG16	ISO alloue le numéro 25178 à la norme, et lui donne ainsi un passeport officiel...

Tableau 5 : Travaux ayant conduit à la naissance de la norme 25178.

7.3.1 Méthodes de prétraitement (ou de redressement)

Les mesures, une fois acquises, fournissent des relevés topographiques qui servent à sélectionner les zones à analyser. Pour définir une caractérisation fine d'une topographie, il faut déterminer ses composantes de rugosité, d'ondulation et de forme. Expérimentalement, on relève une topographie totale que l'on redresse. On obtient alors une topographie totale à partir de laquelle on sépare rugosité et ondulation par redressement (voir Figure 6). Ce redressement peut être obtenu par de nombreuses méthodes entrant dans le cadre de l'approximation des surfaces : lissages polynomiaux par méthode des moindres carrés,

lissages sur la base des fonctions splines, filtrage numérique utilisant l'analyse spectrale, etc. MesRug propose plusieurs méthodes de redressement 2D (pour le traitement des profils) et 3D (pour le traitement des topographies). Par la suite nous présenterons les méthodes de redressement 3D développées et intégrées dans MesRug. Pour plus d'information sur les méthodes 2D existantes dans MesRug merci vous pouvez consulter [2].

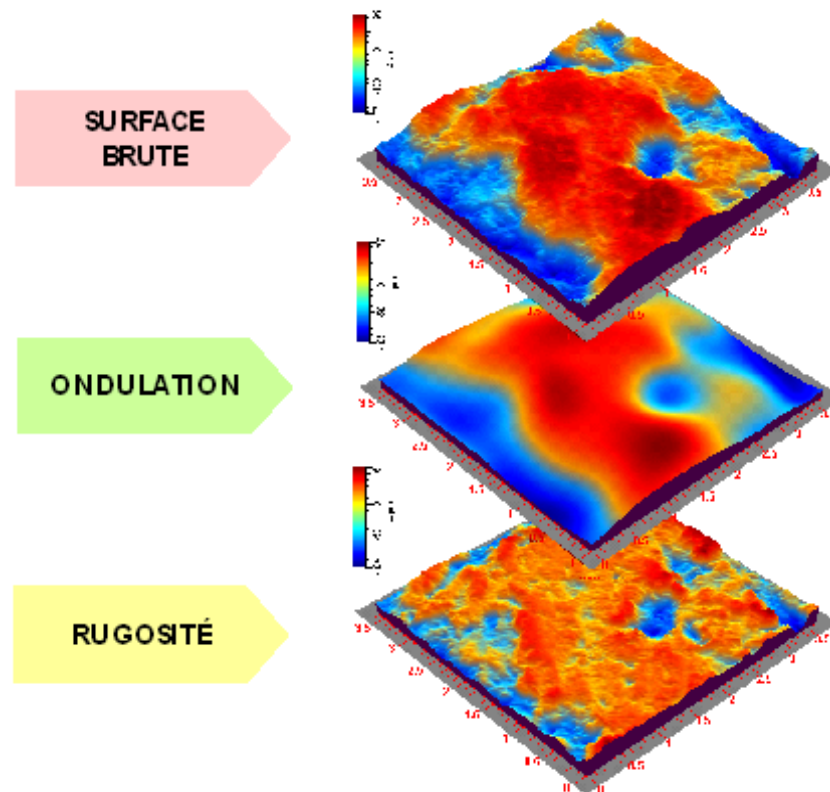


Figure 6 : Exemple de séparation

7.3.1.1 Prétraitement par polynômes

Le redressement de la surface nécessite la détermination d'une surface polynomiale moyenne de degrés n par la méthode des moindres carrés. Cette méthode permet de déterminer le plan des moindres carrés passant au mieux à travers les points expérimentaux.

La surface peut être rapprochée par une équation linéaire (un polynôme de degré 1). Soit $f(x, y) = a + bx + cy$, l'équation de ce plan, où a , b et c représente les paramètres de l'espérance. Pour déterminer les meilleures valeurs de ces paramètres, on cherche à ce que l'écart entre les valeurs des points mesurés et celles données par le plan « $f(x,y)$ » soit le plus petit possible et pour tous les points en même temps. Ainsi, cette méthode consiste à déterminer les valeurs de ces trois paramètres a , b et c en résolvant le système d'équations suivant :

$$\varepsilon^2 = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (Z(x_i, y_j) - f(x_i, y_j))^2 = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (Z(x_i, y_j) - (a + bx_i + cy_j))^2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial c} = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Z(x, y) = Z(x, y) - (a + bx + cy) \quad (4)$$

La surface peut être aussi approchée par un polynôme de degré n :

Soit $P_n(x) = a_n x_n + a_{n-1} x_{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$, permettant d'écrire $Y_j = P_n(x_j) + \varepsilon_j$.

Avec ε_j est le résidu. La régression polynomiale est une régression multilinéaire :

$$Y_j = a_n x_{n,j} + a_{n-1} x_{n-1,j} + \dots + a_1 x_{1,j} + a_0 + \varepsilon_j \quad (5)$$

Avec $x_{i,j} = x_{ij}$.

Le carré du résidu s'écrit :

$$\varepsilon^2 = (P_n(x) - Y)^2 \quad (6)$$

On cherche les valeurs (a_i) qui minimisent la somme des résidus (e) :

$$e = \sum_j \varepsilon_j^2 \quad (7)$$

7.3.1.2 Prétraitement par filtre gaussien

Des outils spécifiques de filtrage ont été développés afin de séparer les différentes composantes de la surface suivant une approche fréquentielle. Parmi ces outils, le filtre Gaussien qui est un filtre isotrope spécial avec des propriétés mathématiques bien précises. Le point clé de ce filtre est qu'il sépare l'ondulation et la rugosité sans distorsion ni déphasage du signal. Son effet sur le relevé topographique est assez similaire au filtre moyen, mais il réalise une moyenne pondérée des valeurs dans le voisinage, avec un poids important au centre du voisinage et faible à la périphérie (la pondération suit une forme de gaussienne, i.e. en cloche). Le filtre gaussien est un filtre passe-bas (seuls les défauts de grande longueur d'onde sont conservés) défini par la fonction de pondération suivante :

$$G(x, y) = \frac{1}{\pi \lambda_{xc} \lambda_{yc}} \exp \left(-\frac{\pi}{\beta} \left[\left(\frac{x}{\lambda_{xc}} \right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda_{yc}} \right)^2 \right] \right) \quad (8)$$

Les paramètres (λ_{xc} , λ_{yc}) sont les longueurs d'onde de coupure pour un rapport de transmission d'amplitudes de 50%, et $\beta = \ln(2/\Pi) = -0.4515$.

Le filtre gaussien est un filtre de convolution ($f(x,y) * g(x,y)$). L'opération du filtrage est effectuée dans l'espace métrique $f = Z(x,y)$. Etant donné que la transformée de Fourier du produit de convolution de deux fonctions n'est autre que le simple produit de leur transformée de Fourier. On peut donc utiliser le filtre gaussien suivant une représentation fréquentielle (voir Figure 7). Le filtrage intégré dans MesRug est donc une multiplication terme à terme $TF[f(x,y)].TF[g(x,y)]$, ce qui diminue le temps de calcul et donne un algorithme moins coûteux.

Le filtre gaussien peut être appliqué comme un filtre passe-haut (il met en évidence les défauts de petite longueur d'onde, par élimination des basses fréquences), ou bien un filtre

passer-bande (il sélectionne les défauts dont la longueur d'onde est comprise entre deux limites).

Figure 7 : Equivalence d'utilisation d'un filtre spatial ou fréquentiel.

7.3.1.3 Prétraitement par B-spline

La spline est une interpolation par morceaux. En mathématiques, une B-spline est une combinaison linéaire de splines positives à support compact minimal.

Introduisons d'abord la définition des fonctions splines : Considérons une surface de taille (T_x, T_y) , soit $Z = \{z_{a,b}\}$ l'intégrité des points de cette surface, avec $1 \leq a \leq T_x$ et $1 \leq b \leq T_y$. La spline consiste à diviser cette surface. Soit n et m les nombres de subdivisions respectivement dans les directions x et y . Il s'agit de subdiviser de manière régulière les deux intervalles $[x_1, x_{T_x}]$ dans la direction des x et $[y_1, y_{T_y}]$ dans la direction des y . Soit $x_1 = u_0 \leq u_1 \leq u_2 \leq u_3 \leq \dots \leq u_n \leq x_{T_x}$ une division de $[x_1, x_{T_x}]$ avec $T_x + 1$ nœuds distincts. Et $y_1 = v_0 \leq v_1 \leq v_2 \leq v_3 \leq \dots \leq v_m \leq y_{T_y}$ une division de $[y_1, y_{T_y}]$ avec $T_y + 1$ nœuds distincts. $\{ \}$ et $\{ \}$ représentent les vecteurs de nœuds de ces intervalles.

Soit $A_i(x)$ et $B_j(y)$ deux fonctions B-spline dans les deux directions orthogonales et $(1 \leq x \leq T_x, 1 \leq y \leq T_y)$, ayant comme support $[u_i, u_{i+d+1}]$ et $[v_j, v_{j+d'+1}]$. d et d' sont les degrés respectifs de ces deux fonctions dans les directions orthogonales et . Par cette méthode, nous obtenons une forme explicite polynomiale pour chaque subdivision. Les résultats obtenus avec les degrés d et d' égaux à 1, 2 et 3 sont :

- Pour $d = 1$
 - $A_{i-1}(x) = 1 - p$
 - $A_i(x) = p$

- Pour $d = 2$
 - $A_{i-2}(x) = q^2/2!$
 - $A_{i-1}(x) = (1 + 2pq)/2!$
 - $A_i(x) = p^2/2!$
- Pour $d = 3$
 - $A_{i-3}(x) = q^3/3!$
 - $A_{i-2}(x) = (3q(pq + 1) + 1)/3!$
 - $A_{i-1}(x) = (3p(pq + 1) + 1)/3!$
 - $A_i(x) = p^3/3!$

Avec $p = (x - u_i) / (T_x/n)$ et $q = 1 - p$.

- Pour $d' = 1$
 - $B_{j-1}(y) = 1 - k$
 - $B_j(y) = k$
- Pour $d' = 2$
 - $B_{j-2}(y) = h^2/2!$
 - $B_{j-1}(y) = (1 + 2kh)/2!$
 - $B_j(y) = k^2/2!$
- Pour $d' = 3$
 - $B_{j-3}(y) = h^3/3!$
 - $B_{j-2}(y) = (3h(kh + 1) + 1)/3!$
 - $B_{j-1}(y) = (3k(kh + 1) + 1)/3!$
 - $B_j(y) = k^3/3!$

Avec $k = (y - v_j) / (T_y/m)$ et $h = 1 - k$.

La méthode de B-spline est basée sur les fonctions spline et leurs performances en approximation et estimation des données discrètes. Elle consiste à fixer le nombre de points de nœuds n et m respectivement dans les deux directions x et y . Nous ajustons ensuite la surface approximante aux données. Cette méthode est réalisée par la résolution d'un système d'équations pour chercher les coefficients des splines, les altitudes des points de la surface forment la base de données de ce problème. Il s'agit d'une approche d'optimisation non linéaire qui consiste à minimiser l'erreur entre les données et la surface approximante $S(x,y)$ au sens des moindres carrées.

Nous partons donc de la fonction modèle suivante :

$$S(x, y) = \sum_{i=-d}^{n-1} \sum_{j=-d}^{m-1} \alpha_{i,j} A_i(x) B_j(y) \quad (9)$$

La méthode des moindres carrés appliquée à ce modèle de fonction consiste à minimiser la fonction $f = \sum_{a=1}^{T_x} \sum_{b=1}^{T_y} (S(x_{a,b}, y_{a,b}) - z_{a,b})^2$ par rapport aux $(n+1)*(m+1)$ variables.

Remplaçant $S(x_{a,b}, y_{a,b})$ par sa valeur :

$$f = \sum_{a=1}^{T_x} \sum_{b=1}^{T_y} \left(\sum_{i=-d}^{n-1} \sum_{j=-d}^{m-1} \alpha_{i,j} A_i(x_{a,b}) B_j(y_{a,b}) - z_{a,b} \right)^2 \quad (10)$$

On obtient une fonction scalaire composée de $(n-1)*(m-1)$ variables. Par différentiation de f par rapport aux $(n-1)*(m-1)$ points, minimiser f implique :

$$f = \sum_{a=1}^{T_x} \sum_{b=1}^{T_y} (\sum_{i=-d}^{n-1} \sum_{j=-d'}^{m-1} \alpha_{i,j} A_i(x_{a,b}) B_j(y_{a,b}) - z_{a,b}) A_k(x) B_r(y) = 0 \quad (11)$$

Avec $-d \leq k \leq n-1$ et $-d' \leq r \leq m-1$.

Cette équation conduit à un système de $(n+d)*(m+d')$ équations à $(n+d)*(m+d')$ inconnues qui s'écrit comme suit :

$$(A^t A) S (B^t B) = A^t Z A \quad (12)$$

Il faut résoudre deux systèmes :

$$\begin{cases} (A^t A) P = Q \\ \text{Et} \\ S (B^t B) = P \end{cases} \quad \text{Avec } P \text{ est l'inconnue } Q = B^t Z A \quad (13)$$

7.3.2 Paramètres de texture surfacique 3D

L'appellation des nouveaux paramètres surfaciques commence par la lettre majuscule S (ou V pour certains paramètres fonctionnels). Contrairement à ce qui existe en 2D, les préfixes des paramètres 3D ne reflèteront plus les distinctions entre les composantes de rugosité, d'ondulation ou de structure.

Les nouveaux paramètres de l'ISO 25178

	Paramètres 2D (normes ISO 4287, ISO 13565-1 et 2)	Paramètres surfaciques (norme ISO 25178)
Paramètres d'amplitude	Ra, Pa, Wa (Ecart moyen arithmétique du profil)	Sa (Rugosité moyenne arithmétique de la surface)
	Rq, Pq, Wq (Ecart moyen quadratique du profil)	Sq (Rugosité moyenne quadratique de la surface)
	Rsk, Psk, Wsk (Facteur d'asymétrie du profil)	Ssk (Facteur d'asymétrie de la surface)
	Rku, Pku, Wku (Facteur d'aplatissement du profil)	Sku (Facteur d'aplatissement de la surface)
	Rp, Pp, Wp (Hauteur maximale de saillie du profil)	Sp (Hauteur maximale des pics)
	Rv, Pv, Wv (Profondeur maximale de creux du profil)	Sv (Profondeur maximale des creux)
	Rt, Pt, Wt (Hauteur totale du profil)	St remplacé par Sz
	Rz (Hauteur maximale du profil)	Sz (Hauteur maximale de la surface, du plus haut point à la plus profonde vallée)
	Rc (Hauteur moyenne des éléments du profil)	Pas d'équivalent
	Rsm (Largeur moyenne des éléments du profil)	Pas d'équivalent
	Rdq (Pente moyenne du profil)	Sdq (Pente moyenne de la surface)
Paramètres de taux de portance	Rmr, Pmr, Wmr (Taux de longueur portante du profil)	Smr (Taux de surface portante)
	Rdc, Pdc, Wdc (Différence de hauteur de coupe du profil)	Sdc (Différence de hauteur de surface portante)
	Pas d'équivalent	Smc (Hauteur de taux de surface portante)
Paramètres d'isotropie	Pas d'équivalent	Str (Rapport d'aspect de la texture de surface)
	Pas d'équivalent	Sal (Longueur d'autocorrélation de la surface)
	Pas d'équivalent	Std (Direction de texture de la surface)
Paramètres fonctionnels	Rk, Rpk, Rvk	Sk, Spk, Svk
	Pas d'équivalent	Vmp, Vmc, Vvc, Vvv (Paramètres de volume)

Tableau 6 : Les nouveaux paramètres de l'ISO 25178. (D'après [11]).

La plupart des paramètres de texture surfacique 3D représente une extension évidente des paramètres normalisés dans le cas des profils 2D. Le Tableau 6 représente les nouveaux paramètres de l'ISO 25178. Ils sont regroupés en quatre catégories : les paramètres d'amplitude, les paramètres de taux de portance, les paramètres d'isotropie, et les paramètres fonctionnels. Dans la suite nous présentons quelques uns de chaque groupe.

7.3.2.1 Paramètres d'amplitude

Les propriétés d'amplitude d'une surface sont décrits par six paramètres, qui donnent des informations sur les propriétés statistiques moyennes, la forme de l'histogramme de distribution de hauteur et sur les propriétés extrêmes. Tous les paramètres sont basés sur deux dimensions standards qui sont étendues à trois dimensions.

- La rugosité moyenne arithmétique :

$$S_a = \frac{1}{M*N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |Z(X_i, Y_j)| \quad (14)$$

Où M est le nombre de points mesurés par profils et N le nombre de profils.

- La rugosité moyenne quadratique de la surface (Root mean square) :

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{M*N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (Z(X_i, Y_j))^2} \quad (15)$$

- Facteur d'asymétrie :

$$S_{sk} = \frac{1}{M*N*S_q^3} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (Z(X_i, Y_j))^3 \quad (16)$$

Ce paramètre décrit l'asymétrie de l'histogramme de distribution de hauteur. Une valeur de S_{sk} égale à zéro indique une distribution symétrique, tandis qu'une valeur non nulle, signifie que la distribution est asymétrique. Si $S_{sk} < 0$, il peut s'agir d'une dominance de pores et des rayures et si $S_{sk} > 0$, il peut indiquer une dominance des bosses ou des sommets.

- Facteur d'aplatissement :

$$S_{ku} = \frac{1}{M*N*S_q^4} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (Z(X_i, Y_j))^4 \quad (17)$$

Ce paramètre décrit la finesse de la topographie de surface. Une valeur élevée de ce coefficient traduit une forte stabilité de la surface avec seulement quelques sommets ou vallées.

- Hauteur maximale du plus haut point à la plus profonde vallée :

$$S_{10z} = \frac{\sum_{i=1}^5 |Z_{Pi}| + \sum_{i=1}^5 |Z_{Vi}|}{5} \quad (18)$$

Où Z_{Pi} et Z_{Vi} sont respectivement la hauteur des cinq sommets les plus hauts et la profondeur des cinq vallées les plus profondes.

- La hauteur maximale des pics « S_p » et la profondeur maximale des creux « S_v ».

7.3.2.2 Paramètres hybrides

Ces paramètres combinent les informations présentes sur les trois axes X, Y et Z de la surface. Ils reflètent les gradients des déclivités et leurs calculs sont basés sur les pentes locales des Z. Parmi ces paramètres on trouve :

- Gradient moyen quadratique :

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \left(\frac{Z(X_{i+1}, Y_{j+1}) - Z(X_i, Y_{j+1})}{\delta X} \right)^2 + \left(\frac{Z(X_{i+1}, Y_{j+1}) - Z(X_{i+1}, Y_j)}{\delta Y} \right)^2} \quad (19)$$

Où δ_X est le pas d'échantillonnage suivant l'axe des X et δ_Y est le pas d'échantillonnage suivant l'axe des Y.

Ce paramètre représente la valeur « RMS : Root Mean Square Gradient » de la pente superficielle dans la zone d'échantillonnage

- Aire développée :

$$S_{dr} = \frac{(\sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-2} A_{ij}) - (M-1)(N-1)\delta_X\delta_Y}{(M-1)(N-1)\delta_X\delta_Y} 100\% \quad (20)$$

Avec

$$A_{ij} = \frac{1}{4} \left(\sqrt{\delta_Y^2 + (Z(X_i, Y_j) - Z(X_i, Y_{j+1}))^2} + \sqrt{\delta_Y^2 + (Z(X_{i+1}, Y_j) - Z(X_{i+1}, Y_{j+1}))^2} \right) \cdot \left(\sqrt{\delta_Y^2 + (Z(X_i, Y_j) - Z(X_{i+1}, Y_j))^2} + \sqrt{\delta_Y^2 + (Z(X_i, Y_{j+1}) - Z(X_{i+1}, Y_{j+1}))^2} \right) \quad (21)$$

Ce paramètre exprime l'augmentation de la superficie interfacial par rapport au domaine de projection du plan XY. Pour une surface totalement plate, la superficie et le domaine du plan XY sont les mêmes et $S_{dr} = 0\%$.

7.3.2.3 Paramètres d'isotropie

Ces paramètres sont aussi appelés les paramètres spatiaux. Ils quantifient les informations latérales présentes sur les axes X et Y de la surface et décrivent les propriétés spatiales des surfaces. Ces paramètres sont basés sur l'analyse spectrale de la transformée de Fourier et de la fonction d'auto-corrélation. Ils sont particulièrement utiles pour distinguer les surfaces isotropes (qui présentent des caractéristiques identiques quelle que soit la direction de la mesure) des surfaces anisotropes (qui présentent un état de surface aléatoire) (voir Figure 8).

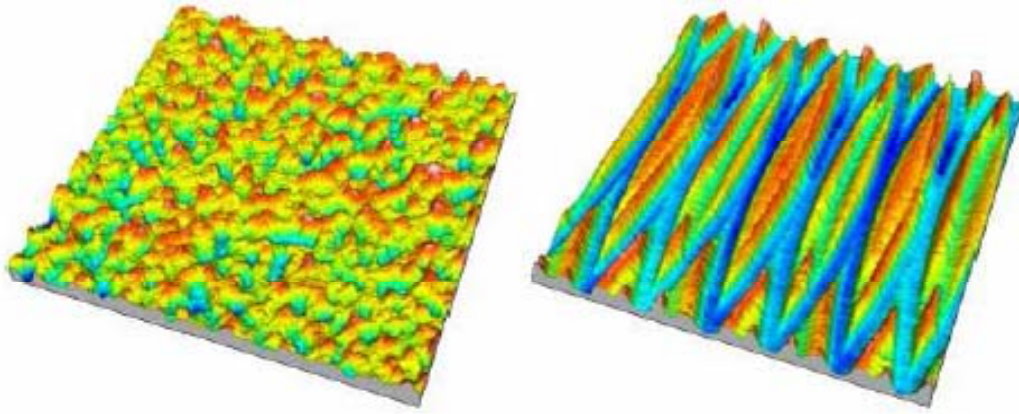


Figure 8 : Surface avec une texture isotrope (à gauche) ; surface avec une texture anisotrope (à droite). (D'après [12]).

- Longueur d'auto-corrélation S_{al} : il est d'abord nécessaire de définir la fonction d'auto-corrélation (ACF) comme la corrélation entre une surface et une même surface translatée par (t_x, t_y) , étant donnée par :

$$ACF(t_x, t_y) = \frac{\iint_A Z(X,Y)Z(X-t_x,Y-t_y) dx dy}{\iint_A Z(X,Y)Z(X,Y) dx dy} \quad (22)$$

La longueur d'auto-corrélation, S_{al} , est alors définie comme la distance horizontale de l'ACF (t_x, t_y) qui a la décrépitude la plus rapide à une valeur indiquée S , avec $0 \leq S < 1$:

$$S_{al} = \min_{t_x, t_y \in \mathbb{R}} \sqrt{t_x^2 + t_y^2} \quad \text{Avec } R = \{(t_x, t_y) : ACF(t_x, t_y) \leq S\} \quad (23)$$

Une valeur élevée de S_{al} dénote que la surface est dominée par de faibles composantes de fréquence spatiale, tandis qu'une valeur faible de S_{al} représente le cas contraire.

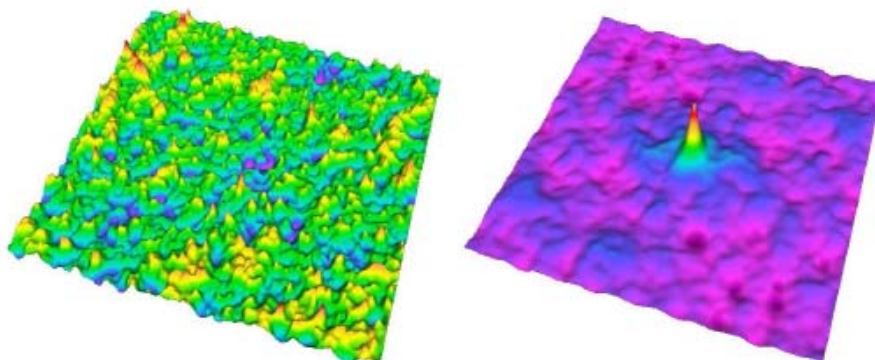


Figure 9 : La topographie d'une surface (à gauche) et son auto-corrélation (à droite). (D'après [12])

- Rapport d'aspect de la texture S_{tr} :

L'image obtenue par auto-corrélation comporte un pic central « accompagné dans certain cas de pics secondaires » (voir Figure 9). Le rapport entre les rayons minimum et maximum du lobe (voir Figure 10) que l'on obtient à partir du seuillage (par défaut $S = 0.2$) du pic central représente le paramètre S_{tr} :

$$\frac{\text{rayon maximum}}{\text{rayon minimum}} \quad (24)$$

En principe, S_{tr} a une valeur comprise entre 0 et 1. De plus grandes valeurs, par exemple $S_{tr} > 0.5$, indiquent une texture uniforme dans toutes les directions. Des valeurs plus petites, dites $S_{tr} < 0.3$, indique une structure directionnelle de plus en plus forte.

Figure 10 : Lobe centrale avec mesure de rayons. (D'après [12]).

7.3.2.4 Paramètres fonctionnels

Ces paramètres sont calculés à partir de la courbe d'Abbott obtenue par intégration de la distribution des hauteurs sur toute la surface. L'extraction de ces paramètres à partir de la courbe d'Abbott est représentée dans la Figure 11.

- La Hauteur des pics éliminés, S_{pk} , est la hauteur du triangle supérieur gauche.
- La profondeur du profil écrêté, S_k , est la différence de hauteur entre les points d'intersection de la ligne trouvée au carré moyen.
- La profondeur des vallées éliminées, S_{vk} , est la hauteur du triangle dessiné à 100%.

Figure 11 : Paramètres fonctionnels de la norme ISO 25178 calculés à partir de la courbe d'Abbott

Tous ces paramètres représentent une étape intermédiaire vers la définition de paramètres fonctionnels de volume, jugés plus pertinents. Comme les précédents, ces paramètres sont calculés sur la courbe d'Abbott « à partir de deux seuils de taux de portance fixés à 10% et 80% » (voir Figure 12).

- Les paramètres de volume de matière (V_{mp} et V_{mc} , pour les pics et le cœur).
- Les paramètres de volume de vide (V_{vc} et V_{vv}).

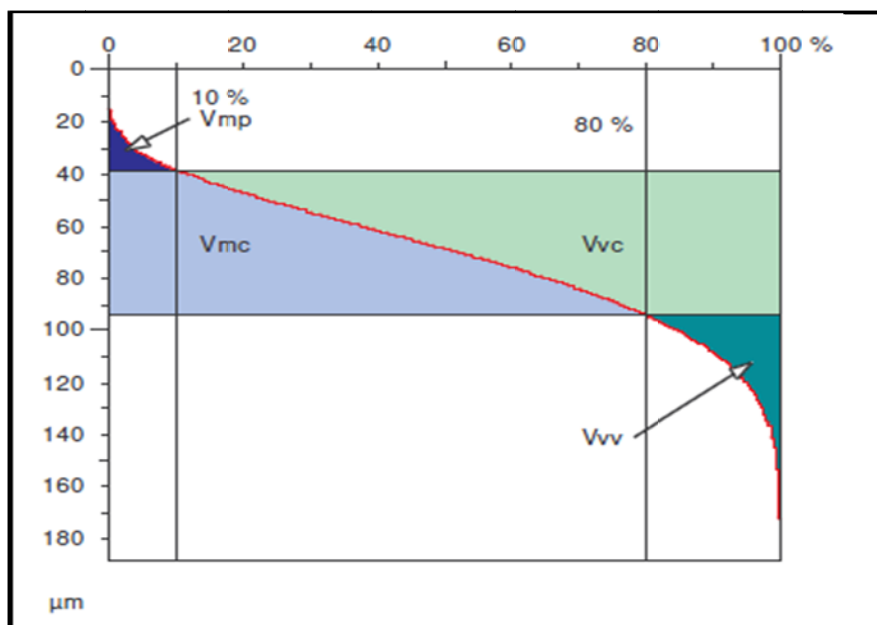


Figure 12 : représentation des paramètres de volume sur la courbe d'Abbott. (D'après [12]).

8 Maintenance du code dans le système MesRug

MesRug donne à l'utilisateur la possibilité d'intégrer des nouvelles méthodes de redressement et des nouveaux paramètres de rugosité.

8.1 Ecriture et Intégration des nouvelles méthodes de redressement

L'intégration d'une nouvelle méthode de redressement est sectionnée par l'écriture de deux fichiers : un fichier d'entête (header file) renfermant les déclarations liées à la méthode, se terminant par .h, et un fichier source contenant le corps de la méthode, se terminant généralement par .cpp.

Le fichier d'entête est nommé « Redressement_Mt.h », où Mt est le nom de la méthode à intégrer. La Figure 13 représente le contenu de ce fichier. Pour faire des nouvelles déclarations, on peut recopier ce fichier en faisant remplacer Mt par le nom de la méthode à intégrer et ND par 2D (s'il s'agit d'une méthode 2D) ou bien 3D (S'il s'agit d'une méthode 3D). Cela donne à l'utilisateur la possibilité d'ajouter de nouvelles méthodes et améliore la maintenance du code.

Figure 13 : Fichier Redressement_Mt.h

Une fois que le fichier d'entête est fait, le fichier source doit être créé, il est nommé « Redressement_Mt.cpp ». Il contient le code du programme de la nouvelle méthode de redressement. Les déclarations de nouvelles méthodes restent identiques, seule la partie du code définissant le nouvel algorithme de redressement sera changée. La Figure 14 donne une représentation du fichier redressement_Mt.cpp, où Mt est le nom de la méthode à ajouter et où ND sera remplacé par 2D (cas d'une méthode de redressement 2D) ou bien 3D (cas d'une méthode de redressement 3D).

Figure 14 : Fichier Redressement_Mt.cpp

8.2 Ecriture et intégration des nouveaux paramètres de rugosité

L'écriture et l'intégration d'un nouvel paramètre de rugosité consiste à créer deux fichiers : un fichier d'entête (header file) contenant les déclarations liées au paramètre, se terminant par .h, et un fichier source contenant le code du programme de ce paramètre, se terminant généralement par .cpp.

Le fichier d'entête est nommé « ParamRugosite_R.h », où R est le nom du paramètre à intégrer. La Figure 15 représente le fichier ParamRugosite_R.h. Pour faire des nouvelles déclarations, on peut recopier ce fichier en faisant remplacer R par le nom du paramètre à intégrer et ND par 2D (s'il s'agit d'un paramètre de rugosité 2D) ou bien 3D (S'il s'agit d'un paramètre de rugosité 3D). Cela donne à l'utilisateur la possibilité d'ajouter de nouveaux paramètres et améliore la maintenance du code.

Figure 15 : Fichier ParamRugosite_R.h

Après la création du fichier d'entête, on crée le fichier source qui est nommé « ParamRugosite_R.cpp ». Il contient le corps du programme du nouvel paramètre. Les déclarations de nouveau paramètre restent identiques, seule la partie du code définissant l'algorithme du nouveau paramètre de rugosité sera changée. La Figure 16 donne une représentation du contenu du fichier ParamRugosite_R.cpp, où R est le nom du paramètre à ajouter et ND sera remplacé par 2D (cas d'un paramètre de rugosité 2D) ou bien 3D (cas d'un paramètre de rugosité 3D).

Figure 16 : Fichier ParamRugosite_R.cpp

8.2.1 Paramètres de rugosité dépendant d'autres paramètres

Dans la pratique, deux cas de figure peuvent se présenter selon la requête de l'utilisateur :

- paramètres déjà demandés par l'utilisateur, ce qui implique que leurs valeurs sont déjà stockées dans la mémoire.
- paramètres non demandés, donc il faut calculer leurs valeurs en faisant appel à leurs procédures de calcul.

Dans le fichier « ParamRugosite_R.cpp » d'un paramètre de rugosité R dépendant d'un autre paramètre de rugosité R', on ajoute les lignes de codes suivants à l'endroit où faire appel au paramètre R' :

9 Traitement statistique

La statistique est « l'ensemble de techniques d'interprétation mathématique appliquées à des phénomènes pour lesquels une étude exhaustive est impossible à cause de leur grand nombre et de leur complexité ». Il s'agit ainsi de trouver le modèle mathématique qui représente un phénomène donné en estimant sous certaines hypothèses les paramètres dont il dépend. Le modèle est normalement vérifié en appliquant des tests sur ses paramètres.

Plusieurs méthodes d'estimation sont généralement utilisées, comme la méthode du maximum de vraisemblance, ou celle des moments généralisés ou encore les estimateurs des Moindres Carrés Ordinaires. Toutefois, ces méthodes peuvent donner des réponses incorrectes lorsque certaines hypothèses techniques ne sont pas respectées, comme l'hypothèse du nombre d'observations insuffisant, ou celui de la normalité non acceptable. Elles ne sont valables par conséquent que sur un champ d'application restreint.

Dans l'optique de chercher les paramètres de rugosité les plus pertinents, il faut utiliser une méthode statistique robuste. Etant donné qu'il s'agit d'un grand nombre de paramètres à tester, ceci ne permet pas d'utiliser une analyse statistique individuelle et de vérifier les hypothèses de l'inférence statistique de l'analyse de données. Pour ces raisons, l'analyse de la variance a été combinée avec la théorie du Bootstrap pour analyser les données en calculant le critère de Fisher.

9.1 Méthode de rééchantillonnage : Le Bootstrap

Le mot bootstrap provient de l'expression anglaise « to pull oneself up by one's bootstrap » (Efron, Tibshirani, [13]), qui signifie littéralement « se soulever en tirant sur les languettes de ses bottes ». La méthode de bootstrap, due à Efron [14], a été créée à la fin des années 70. C'est une méthode relativement récente de calcul intensif sur ordinateur. Le principe général consiste à rééchantillonner les données en faisant un grand nombre d'itérations qui résultent de l'application de la méthode de Monte-Carlo. C'est une méthode d'estimation non paramétrique qui poursuit les buts suivant :

- Améliorer la robustesse d'un modèle prédictif
- Renseigner sur la stabilité de ce modèle
- Fournir des indications sur une statistique autre que sa valeur (dispersion, distribution, intervalles de confiance) afin de connaître la précision des estimations réalisées.

Depuis l'article fondateur d'Efron, plusieurs ouvrages ont été destinés au Bootstrap; parmi les principales références, on trouve : Hall [15], Efron and Tibshirani [13], Shao et Tu [16] et Davison and Hinkley [17].

Rendue possible par la puissance de calcul des ordinateurs, l'idée de base du bootstrap consiste à extraire un nombre important (noté N) d'échantillons équivalents ayant la même taille que la série de données initiale, et à construire une statistique sur chaque échantillon. Ces échantillons sont obtenus en procédant à des tirages au hasard avec remise à partir des n

valeurs de la série initiale, ceux-ci ayant tous la même probabilité $1/n$ d'être choisis. Cette méthode est employée pour analyser le comportement de la série initiale. La Figure 17 explique le principe de bootstrap sur un groupe de valeurs expérimentales d'un paramètre de rugosité donné S_i . Alors, pour chaque paramètre de rugosité S_i , N échantillons de même taille n que l'échantillon initial sont simulés. Dans notre étude statistique, l'analyse de la variance a été combinée avec la théorie du Bootstrap pour calculer le critère de Fisher (F) de chacun des N échantillons obtenues, d'où un groupe de N valeurs de F_{ik} ($k \in [1, N]$) obtenu. Donc une valeur moyenne F_i peut être extraite ainsi qu'un intervalle de confiance de 95 %. L'intervalle de confiance obtenu est généralement de même amplitude que celui de la distribution réelle quand on la connaît. Statistiquement, un paramètre de rugosité S_i sera plus pertinent qu'un paramètre S_j quand $F_i > F_j$.

La particularité du Bootstrap est qu'elle s'applique quelle que soit la complexité de l'estimateur et sans nécessiter de considérations théoriques (probabilistes). Son principal intérêt est qu'elle permet de fournir une estimation sans biais du paramètre, évaluer la précision de cette estimation, construire un intervalle de confiance autour de cette estimation et en plus tester une hypothèse « nulle » (calcul d'une p-value).

Figure 17 : Principe du Bootstrap appliqué sur un paramètre de rugosité S calculé à partir des n mesures effectuées sur des p échantillons

9.2 ANOVA : Test de Fisher

Le test de Fisher est utilisé pour évaluer si les valeurs attendues d'une variable quantitative dans plusieurs groupes prédéfinis diffèrent l'un de l'autre. La loi de Fisher estime la variance selon deux approches [18] (voir Figure 18) :

- La variance intra-groupes qui demeure correcte que les moyennes des populations soient égales ou pas. Elle est basée sur la moyenne des estimations des écart-types des populations.
- La variance inter-groupes qui est sans biais si et seulement si l'hypothèse d'égalité des moyennes est vraie. Elle est basée sur la variance des moyennes des échantillons.

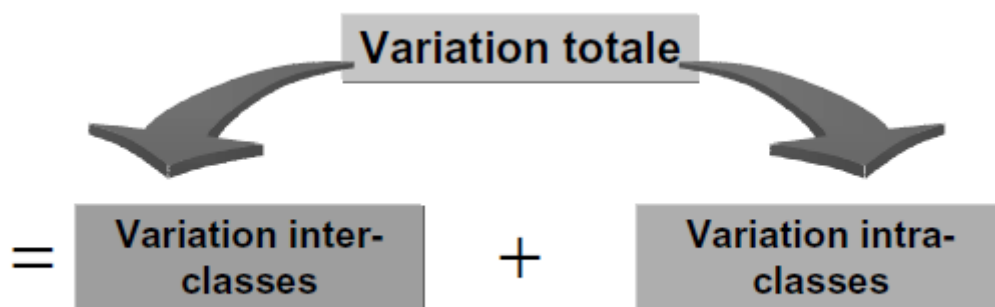


Figure 18 : Décomposition de la variance totale entre intra et inter groupe.

9.2.1 Principe du test de Fisher

Après avoir appliqué la méthode du Bootstrap « N fois » sur une base de données de taille « n », on obtient N nouveaux groupes de taille n (B_1, B_2, \dots, B_N). Le calcul du paramètre de Fisher « F » est divisé en quatre étapes :

1. Calculer la moyenne de chacun des N groupes ($\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_N$), ainsi que leur moyenne totale \bar{Y} .
2. Calculer la somme des carrés des écarts des inter-groupes (SCE_{inter}) ainsi que celle des intra-groupes (SCE_{intra}) selon les équations suivantes :

$$SCE_{inter} = \sum_i n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 / N - 1$$

$$SCE_{intra} = \sum_{i,j} n_i (Y_{i,j} - \bar{Y}_i)^2 / n - N$$

Où : i est le $i^{\text{ième}}$ groupe ($i = 1, \dots, N$), et j est le $j^{\text{ième}}$ éléments dans le $i^{\text{ième}}$ groupe ($j = 1, \dots, n$).

3. Calculer les CM_{inter} et CM_{intra} correspondant respectivement aux carrés moyens des inter-groupes et des intra-groupes, selon les équations suivantes :

$$CM_{inter} = SCE_{inter} / N - 1$$

$$CM_{intra} = SCE_{intra} / n - N$$

4. Calculer le paramètre de Fisher « F » :

$$F = CM_{inter}/CM_{intra}$$

La Figure 19 explique le principe du test de Fisher (**ANOVA** : **A**nalysis of **V**ariance), et montre les différentes étapes à suivre dans le calcul du F en utilisant N bases de données générées par la méthode de bootstrap appliquée sur une base de donnée initiale.

Figure 19 : Différentes étapes de calcul du rapport F

Références bibliographiques

- [1] M.L. Zani, La Mesure de Rugosité ? Quelques Normes... et Plusieurs Dizaines de Paramètres, Solutions « Mesures Mécaniques », Octobre 2003.
- [2] B. Bounichane, Vue vers une Méthodologie d'Analyse des Etats de Surfaces en Science des Matériaux : de la Caractérisation à la Recherche de Paramètres Pertinents, Rapport de Doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, Décembre 2009.
- [3] K.J. Stout, Development of Method for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions, ASME B46 Committee on Surface Texture, ISBN 1 8571 2023 2.
- [4] K. J. Stout, P. J. Sullivan, W. P. Dong, E. Mainsah, N. Lou, T. Mathia, H. Zahouani, The Development of Methods for The Characterisation of Roughness in Three Dimensions, Report EUR 15178 EN. EC Brussels, 1993
- [5] ISO 5436-2 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 2: Software measurement standards. International Organization for Standardization, 2001.
- [6] A. Benatmane, Développement de la Microscopie Interférométrique pour une Meilleure Analyse Morphologique des Couches Minces et Epaissees des Matériaux Semi-Conducteurs et Optiques, Thèse de Doctorats Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 11 décembre 2002
- [7] P. Bouchareine, Métrologie des Surfaces, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesure et Contrôle, article R1 390, Vol. RAB, 1999.
- [8] U.B. Abou El-Atta, Surface Roughness Assessment in Three-dimensional Machined Surfaces for Some Manufacturing Operations, M.Sc. Thesis, Industrial Production Engineering Department, University of Mansoura, Egypt, 1991.
- [9] T. Pancewicz, I. Mruk, Holographic Counting for Determination of Three-Dimensional Description of Surface Roughness, Wear 199 (1), 127-131, 1996.
- [10] B.G. Rosen, Representation of 3-Dimensional Surface Topography in CAD-Systems and Image Processing, Int. J. Mach. Tools Manuf. 33 (3), 307-320, 1993.
- [11] F. Blateyron, États de surface : la Norme ISO 25178 Qui Va Tout Changer, Solutions, Mesures Mécaniques, n°787, pages 44 à 47, Septembre 2006.
- [12] F. Blateyron, New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology. <http://www.qualitymag.com/ext/resources/QUAL/Home/Files/PDFs/New3DParameterandFiltrationTechniquesforSurfaceMetrology.pdf>
- [13] B. Efron, R. Tibshirani, An Introduction to the Bootstrap, New York: Chapman Hall, 1993.
- [14] B. Efron, Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife, Annals of Statistics, No. 7, pp1, 26, 1979.
- [15] P. Hall, The Bootstrap and Eggeworth Expansion, Springer Series in Statistics, New York: Springer Verlag, 1992.
- [16] J. Shao, D. Tu, The Jackknife and Bootstrap, New York: Springer-Verlag, 1995.

- [17] A.C. Davison, D.V. Hinkley, *Bootstrap Methods and Their Application*, Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [18] Loi de Fisher, Guy Cucumel 2001.

CHAPITRE 2

APPROCHE MULTI-ECHELLE DE CARACTERISATION ET MODELISATION DES SURFACES ABRASEES PAR ONDELETTES DISCRETES

Dans l'optique d'examiner précisément la rugosité d'une surface, après un procédé de finition ou d'abrasion, une analyse multi-échelle basée sur le traitement par ondelettes discrètes a été développée. Elle permet d'identifier l'échelle de mesure la plus pertinente et de relier la topographie des surfaces et leur performances tribologiques. Après un rappel développant les analyses de Fourier et leurs limites, la théorie mathématique de la méthode des ondelettes, l'effet de l'ondelette, du procédé expérimental et de l'interaction entre l'ondelette et le procédé expérimental seront exposés.

1 Contexte

Beaucoup de signaux sont présents dans la nature comme le son et la lumière. D'autres sont découverts ou créés par les scientifiques comme les profils scannés d'une surface mécanique. Chacun a ses propriétés « révélées » et ses propriétés « cachées ».

Un profil est composé d'un grand nombre d'irrégularités (des sommets et des vallées) en surimpression sur plusieurs ondulations. Ces irrégularités, désignent la rugosité d'une surface et représentent les petites échelles dans un profil.

Depuis de nombreuses années, les chercheurs ont utilisé et ont analysé les signaux pour les découvrir et bénéficier de leurs secrets : la fréquence identifie les notes dans des signaux musicaux et les couleurs de la lumière, la rugosité dans un profil explique les différents mécanismes qui ont eu lieu pendant le procédé de fabrication d'une surface, etc. Ainsi, l'analyse de signal a été développée il y a longtemps: avec l'analyse de Fourier d'abord et récemment en utilisant les ondelettes.

Pour aborder l'approche multi-échelle par ondelettes, il est d'abord essentiel de présenter l'aspect historique des ondelettes pour poser la problématique de la localisation spatiale des fréquences, d'exposer la transformée de Fourier, puis détailler le principe de la technique des ondelettes.

Dans ce chapitre, une analyse multi-échelle en utilisant la transformée en ondelettes discrètes est effectuée sur les profils mesurés pour trouver les relations entre le processus de finition et la rugosité de la surface. Le but est d'identifier le paramètre de rugosité le plus pertinent et la longueur caractéristique permettant d'évaluer l'influence des processus de finition, et de tester la pertinence de l'échelle de mesure. L'objectif de cette étude est de déterminer l'effet du choix de l'ondelette mère sur les résultats de cette analyse.

2 Aspect historique

Dans l'histoire de mathématiques, l'analyse par ondelettes montre beaucoup d'origines différentes [1]. Beaucoup de travaux ont été exécuté dans les années 1930. A l'époque les efforts séparés ne semblaient pas être les parties d'une théorie cohérente. Une grande ressource bibliographique existe sur les ondelettes [1], [2], [3].

La branche principale de mathématiques menant aux ondelettes a commencé par Joseph Fourier (1807) avec ses théories d'analyse de fréquence, souvent mentionné comme l'analyse de Fourier. Joseph Fourier a affirmé qu'une fonction arbitraire $f(x)$, continue ou avec des discontinuités, définies dans un intervalle fini par un graphique arbitrairement capricieux peut toujours être exprimée comme une somme de sinusoides:

$$a_0 + \sum_{K=1}^{\infty} (a_K \cos Kx + b_K \sin Kx) \quad (1)$$

Les Coefficients a_0 , a_K , et b_K sont calculés par les équations suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \quad a_K = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(Kx) dx, \quad b_K = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(Kx) dx$$

L'affirmation de Fourier a joué un rôle essentiel dans l'évolution des idées existantes sur les fonctions. Il a ouvert la porte à un nouvel univers fonctionnel.

Après 1807, en examinant la notation des fonctions, le problème de convergence de la série de Fourier et des systèmes orthogonaux, les mathématiciens ont progressivement été menés de leur notion précédente d'analyse de fréquence à la notion d'analyse d'échelles. C'est-à-dire analysant une fonction $f(x)$ en créant des structures mathématiques qui varient en échelle.

La première mention d'ondelettes est apparue dans une annexe de la thèse d'Alfred Haar (1909) [4]. Sa recherche sur les systèmes orthogonaux des fonctions a mené au développement d'un ensemble de fonctions de base rectangulaires. Plus tard, une famille entière d'ondelette, l'ondelette Haar, a été nommée sur la base de cet ensemble de fonctions. Une des propriétés de l'ondelette Haar est qu'elle a un support compact, ce qui signifie qu'elle est une fonction nulle en dehors d'un intervalle fini. L'ondelette de Haar présente la particularité de ne pas être continûment différentiable ce qui limite quelque peu ses applications.

Après la contribution de Haar aux ondelettes il fallait attendre Paul Levy, physicien des années 1930, pour que la recherche dans ce domaine évolue de nouveau. P. Levy a examiné le mouvement Brownien, un type de signal aléatoire [1], en utilisant la fonction de base « Haar ». Levy a trouvé la fonction de base « Haar » meilleure que les fonctions de base de Fourier pour étudier des détails subtils existant dans le mouvement Brownien.

D'autres chercheurs des années 1930, Little wood, Paley et Steinn, se sont appliqués à calculer l'énergie d'une fonction. Des résultats différents ont été obtenus selon que l'énergie était concentrée autour de quelques points ou distribuée sur un intervalle plus grand. Ces résultats semblaient indiquer que l'énergie ne pouvait pas être conservée. Par la suite, cependant, les chercheurs ont découvert une fonction pouvait varier dans l'échelle et conservait l'énergie en calculant l'énergie fonctionnelle. Leur travail a aidé David Marr, un neuroscientifique informaticien, à développer un algorithme efficace pour le traitement d'image numérique en utilisant des fonctions variant dans l'échelle (les ondelettes) au début des années 1980.

Bien que les chercheurs aient fait des avancées légères dans le domaine des ondelettes des années 1930 aux années 1970, les avancements majeurs proviennent des travaux de Jean Morlet, autour de l'année 1975. En fait, Morlet a été le premier chercheur à utiliser le terme d'"ondelette" pour décrire ses fonctions. Plus spécifiquement, elles ont été nommées "les ondelettes de pente constante."

Avant 1975, beaucoup de chercheurs ont réfléchi sur l'idée d'une analyse de Fourier à fenêtres glissantes (principalement le physicien Dennis Gabor) [5]. Cette idée a permis d'élaborer une fonction à deux variables, le temps et la fréquence. L'analyse de Fourier à fenêtres glissantes a permis de traiter le signal par morceaux (ou bien par fenêtres). Ces fenêtres ont aidé à faire la variable de temps discrète ou fixe qui permet une localisation de l'information du signal.

Morlet, a essayé l'analyse de Fourier à fenêtres glissantes dans une étude des sous-sols en prospection pétrolière en envoyant des impulsions dans le sol et analysant leurs échos. Ces échos pouvaient être analysés pour connaître l'épaisseur de la couche du pétrole. L'analyse de Fourier et l'analyse de Fourier à fenêtres glissantes ont été utilisées pour analyser ces échos; cependant, l'analyse de Fourier exige beaucoup du temps ce qui poussé Morlet à chercher une autre solution. Quand il a travaillé avec l'analyse de Fourier à fenêtres glissantes il a découvert que l'utilisation d'une fenêtre fixe était une mauvaise approche. Il a fait exactement l'opposé. Il a gardé la fréquence de la fonction (le nombre d'oscillations) constant et il a changé la fenêtre. Il a découvert que l'étirement de la fenêtre a tendu la fonction et le serrement de la fenêtre a compressé la fonction. En 1981, Morlet s'est associé avec le physicien théoricien Alex Grossman et ils ont défini les ondelettes dans le contexte de la physique quantique. Ils ont présenté leur analyse par ondelettes en 1984 dans un article qui donne une référence à la forme des éléments de base utilisés dans la décomposition. Yves Meyer et Stephane Mallat ont ensuite apporté une contribution majeure. En effet, c'est à la fin de leur recherche qu'est née l'Analyse Multirésolution par ondelettes. Cette idée d'analyse Multirésolution était un grand pas dans la recherche d'ondelettes. La fonction d'échelles d'ondelettes a été d'abord mentionnée ce qui a permis aux chercheurs et mathématiciens de construire leur propre familles d'ondelettes en utilisant ses critères. Autour de 1988, Ingrid Daubechies a utilisé l'idée d'analyse multirésolution pour créer sa propre famille d'ondelettes. Ces ondelettes ont été bien sûr nommées les Ondelettes Daubechies. La famille d'ondelette Daubechies satisfait un certain nombre de propriétés d'ondelette : le support compact, l'orthogonalité, la régularité et la continuité.

La révolution dans plusieurs champs de recherche appliqués et théoriques a considérablement marquée ces dernières années, au point que les ondelettes sont maintenant très à la mode et qu'on a parfois voulu en faire l'outil idéal ajusté à tous les sujets. Actuellement, les ondelettes sont utilisées dans de nombreuses disciplines telles que la synthèse du son [6], l'analyse de vibration et de mouvement [7], la compression d'image [8], les systèmes de communication [9] ou l'extraction de caractéristique [10] pour n'en citer que quelques-uns. On aperçoit l'utilisation des ondelettes dans le domaine de la topographie des surfaces. Les premières applications ont débuté en 1979 avec Raja [11]. Plusieurs applications ont suivi, principalement celles de Jiang [12] [13], de Lee [14], et celles de Josso [15].

3 Analyse de Fourier

Initialement conçue pour l'analyse mathématique des phénomènes physiques, l'analyse de Fourier qui représente une fonction comme une somme de sinus et des cosinus est devenue omniprésente pour la solution tant analytique que numérique d'équations différentielles et pour l'analyse et le traitement de signaux de communication.

Malgré son énorme réussite, cette technique a plusieurs imperfections. Ce paragraphe vise à exposer les limites de l'analyse de Fourier.

3.1 Transformée de Fourier

L'utilité de la transformée de Fourier est sa capacité à représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel. Le signal peut alors être analysé pour son contenu de fréquence. Les coefficients de Fourier de la fonction transformée représentent la contribution des fonctions sinus et cosinus à chaque fréquence ce qui mène à savoir le niveau énergétique de chacune des fréquences élémentaires. L'application primordiale de la transformée de Fourier est donc la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de « l'énergie » contenue dans le signal pour chacune des fréquences. Cependant la transformée de Fourier présente une approche générale du signal $S(x)$, les intégrations sont faites de moins l'infini à plus l'infini :

$$T^{\text{fourier}}S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x)e^{-j2\pi fx}dx \quad (2)$$

Les renseignements sur la localisation temporelle (ou spatiale pour les images et la topographie des surfaces) disparaissent dans l'espace de Fourier. En d'autres termes, si la composante de fréquence apparaît au point x_1 ou au point x_2 , elle aura le même effet sur l'intégration. C'est pourquoi la transformée de Fourier ne convient pas aux signaux non stationnaire. Une autre description est donc nécessaire, une transformation qui renseigne sur le contenu fréquentiel tout en gardant la localisation afin d'avoir une représentation temps/fréquence ou espace/échelle du signal.

3.2 Transformation de Fourier à fenêtre glissante

Pour un signal non périodique, la sommation des sinus et cosinus ne représente pas précisément le signal. La première solution qui vient naturellement à l'esprit est de segmenter le signal en le délimitant à l'aide des fonctions bornées dans le temps (ou dans l'espace) appelée « fonctions fenêtre ». Autrement dit, faire glisser une fenêtre tout au long du signal et calculer à chaque décalage la transformée de Fourier de ce signal tronqué afin d'analyser séparément son contenu de fréquence. On obtient ainsi une transformée de Fourier à fenêtre glissante, introduite par le physicien Denis Gabor en 1940 : sa fenêtre est une fonction gaussienne $g(x)$ [16]. L'expression mathématique de cette transformation est :

$$T^{\text{fglisse}}S(f, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x)g(x - a)e^{-j2\pi fx}dx \quad (3)$$

Cette transformée fait intervenir deux paramètres : la fréquence (f) et la position spatiale (ou temporelle) de la fenêtre sur l'axe des abscisses (a). Elle nous met en présence d'une résolution espace-fréquence ou temps-fréquence. Elle exprime ce qui se passe pour la fréquence (f) autour de la position (a). C'est donc une analyse spatiale locale.

La Figure 20 présente des bandes verticales dans le plan temps-fréquence (ou bien espace-fréquence), montrant pour une position donnée, le fenêtrage du signal calculé pour toutes les fréquences. Elle peut être considérée comme une succession de transformations de Fourier d'un segment du signal fenêtré. Un autre point de vue, fondé sur une interprétation banc de filtres d'un même processus, est montrée par les bandes horizontales de la Figure 20. À une fréquence f donnée, le signal est filtré à tout moment avec un filtre passe-bande ayant comme réponse impulsionnelle la fonction de fenêtre modulée à cette fréquence.

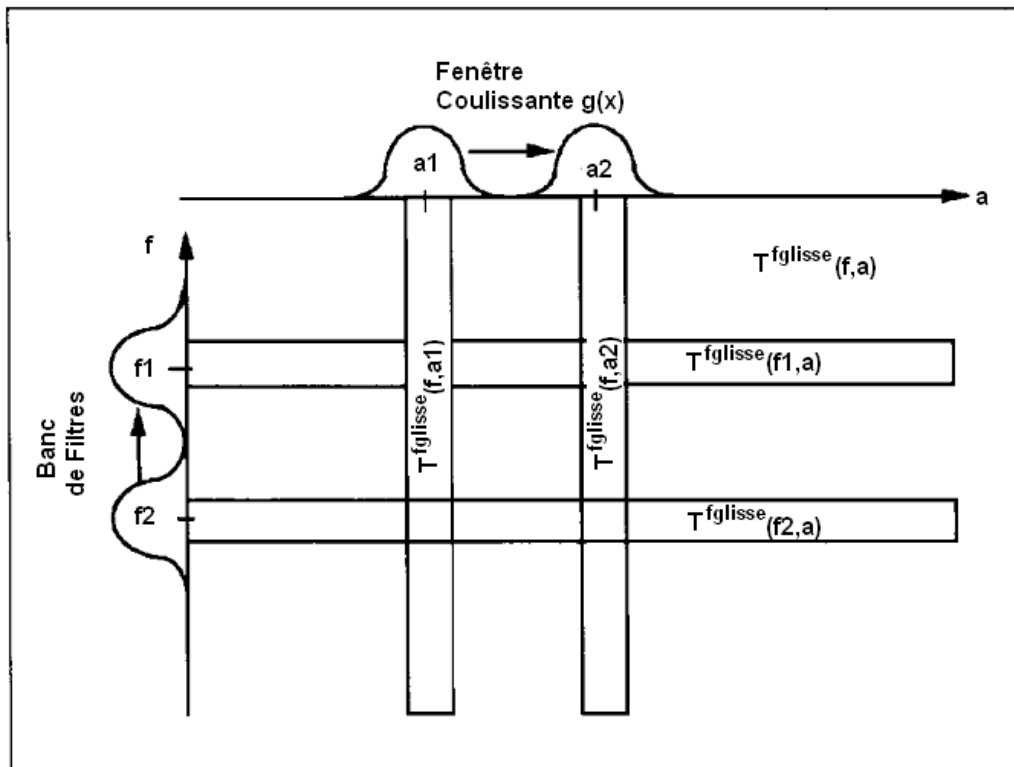


Figure 20 : Plan temps-fréquence (ou espace-fréquence) correspondant à la transformée de Fourier à fenêtre glissante. (D'après [17])

Cependant, l'inconvénient majeur de la méthode de Gabor est que la longueur de la fenêtre est fixée une fois pour toutes, ce qui donne une résolution uniforme en temps-fréquence [16] : une résolution temporelle (ou spatiale) faible est automatiquement liée à la localisation des informations de grandes longueurs d'onde (basses fréquences), la détection des composantes de petites longueurs d'onde (hautes fréquences) peut être faite avec une résolution temporelle (ou spatiale) supérieure. Ceci exclue l'utilisation d'une telle fenêtre pour une analyse multi-échelle des signaux de morphologie très variée, c'est-à-dire qui possèdent des échelles de temps différentes. Une autre méthode d'analyse est donc nécessaire, une transformation qui ne privilégie aucune échelle particulière, mais qui permet de varier la longueur de la fenêtre, pendant sa translation, en fonctions des caractéristiques du signal et de ce que l'on veut mettre en évidence. C'est précisément ce qui nous amène à la représentation de type ondelettes.

4 Analyse par ondelette

4.1 Principe

Contrairement à la transformée de Fourier, l'analyse par Ondelette est très importante dans l'analyse de signaux non-stationnaires. Par contraste avec la transformée de Gabor, qui utilise une fenêtre d'analyse simple dont la longueur est fixée une fois pour toutes, le principe de la transformée par Ondelette est basé sur l'utilisation d'une fenêtre automatiquement ajustable, des courtes fenêtres en hautes fréquences et de longues fenêtres en basses fréquences. La Figure 21 représente une fonction «fenêtre» (à gauche) et les diverses opérations qui peuvent

être effectuées sur cette fonction par la transformée de Fourier à fenêtre glissante (en haut) et par la transformée en ondelette (en bas).

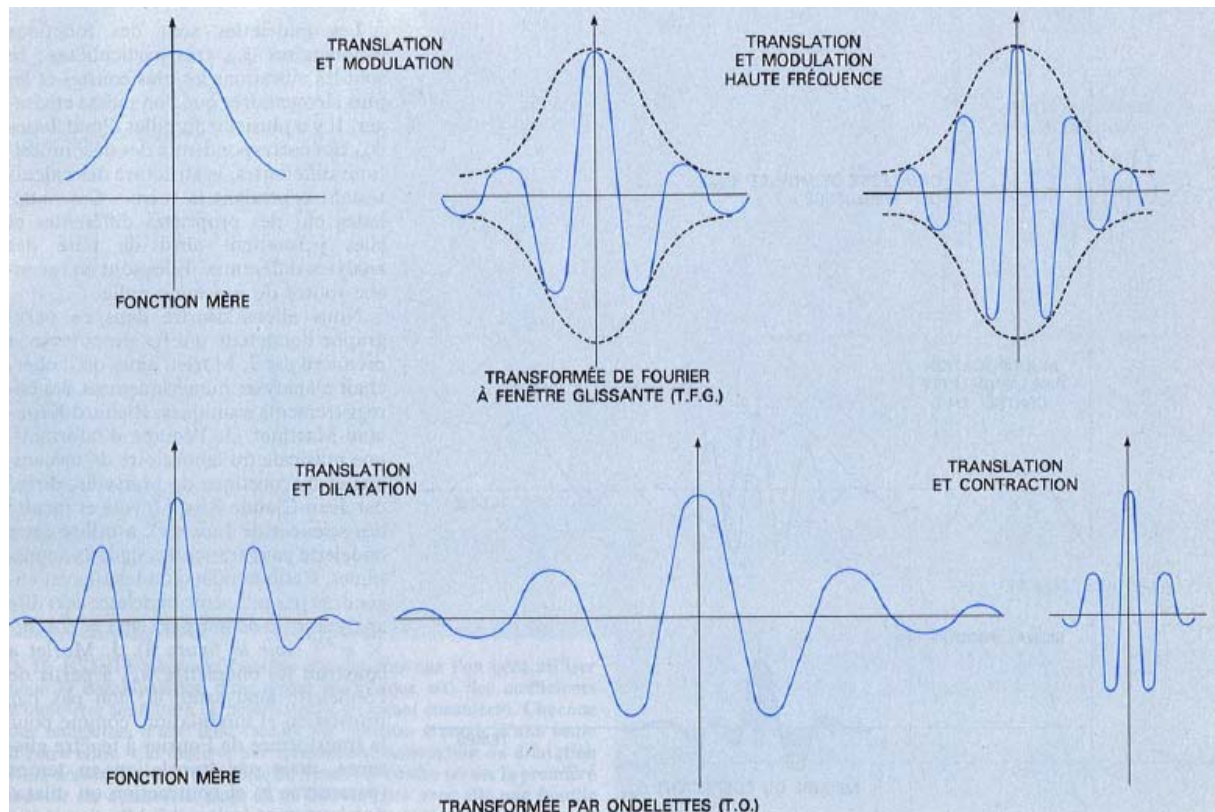


Figure 21 : Diverses opérations que l'on peut effectuer sur une fonction mère par transformée de Fourier à fenêtre glissante (en haut) et par transformée en ondelette (en bas) [18].

4.2 Définitions

4.2.1 Ondelette mère et fonctions d'ondelette

Le composant principal pour la transformée par ondelette est appelé la fonction d'ondelette $\psi(t)$. Elle est définie comme une fonction oscillante avec une moyenne nulle. Le paramètre (t) est mentionné comme la variable du temps ou de l'espace. Les ondelettes représentent un ensemble spécifique de fonctions de base. Elles sont particulièrement utiles dans la description des fonctions discontinues et non régulières que nous acquérons en traitant des objets physiques. Les fonctions de base appelées ondelettes filles sont toujours à la base de l'analyse d'ondelette. Elles sont obtenus d'une simple ondelette de prototype (appelée ondelette mère) par des dilatations et des contractions aussi bien que des translations (voir Figure 21). En introduisant les facteurs de translation b et d'échelle a on obtient l'ondelette fille ($\psi_{a,b}(t)$) :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

Le facteur $a^{-1/2}$ est utilisé pour une normalisation énergétique aux différentes échelles.

Il existe de nombreuses familles d'ondelettes $\psi_{a,b}$ qui correspondent à des décompositions différentes, néanmoins l'architecture de calcul reste la même. Chaque ondelette mère a ses propres caractéristiques et donne différents types de résolutions. Ces familles d'ondelettes oscillent à une fréquence égale à $1/a$ autour du point b . Plus a est petite, plus l'intervalle sur lequel ces ondelettes ne sont pas nulles se contracte autour du point b . Les ondelettes $\psi_{a,b}$ effectuent ainsi un «zooming» sur n'importe quel phénomène intéressant du signal qui a lieu à une échelle petite au voisinage du point considéré. On peut donc considérer $\psi_{a,b}$ comme un banc de filtres composé de filtres passe-bande avec des bandes passantes relativement constantes. Autrement dit, au lieu d'avoir une couverture uniforme (le cas de la transformée de Fourier à fenêtre glissante), les filtres sont régulièrement réparties dans l'échelle logarithmique (voir Figure 22). Cette capacité d'adaptation en fonction de l'échelle d'analyse est décrite par Torrèsani comme un microscope mathématique dont le grossissement est donné par $1/a$ [19].

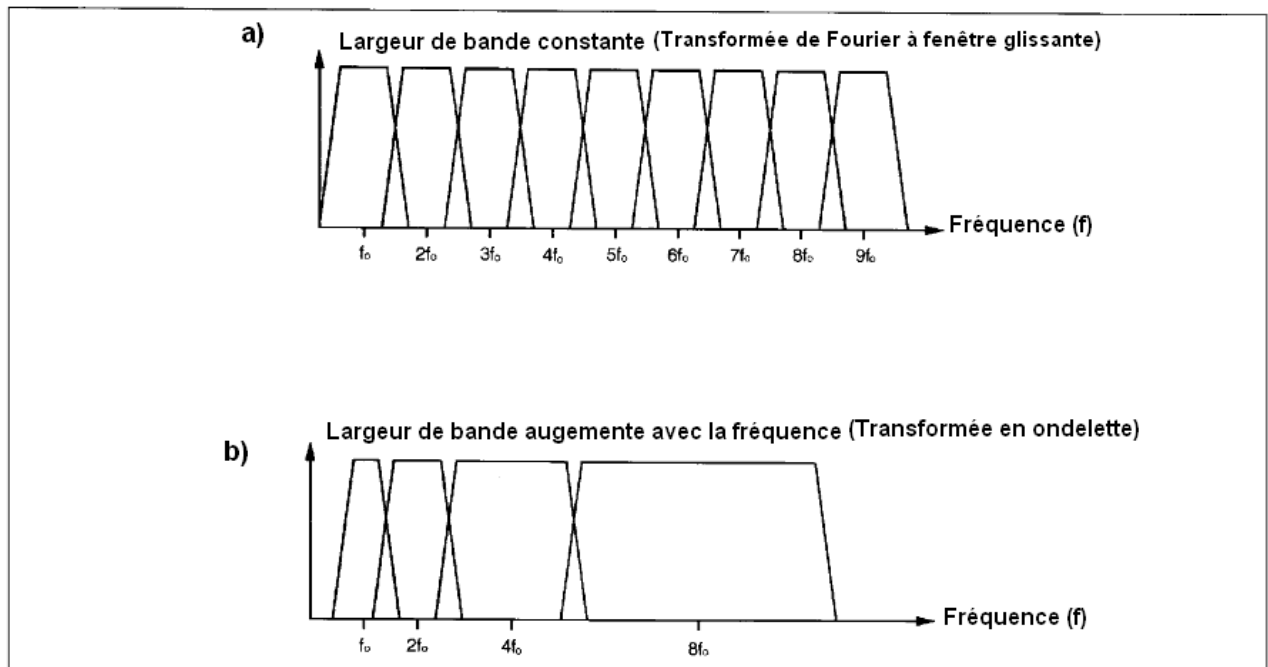


Figure 22 : Division du domaine fréquentiel. (a) pour la transformée de Fourier à fenêtre glissante (couverture uniforme), (b) pour la transformée en ondelettes (couverture logarithmique). (D'après [17]).

4.2.2 Les principales caractéristiques d'une ondelette mère

Une ondelette mère $\psi(t)$ est une forme d'onde oscillante d'une durée limitée qui satisfait les conditions suivantes [20] :

- Etre admissible :

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

- ψ est réelle, continue et fait partie de l'espace des fonctions intégrables sur \mathbb{R} ainsi que de l'espace des fonctions qui ont une énergie finie sur \mathbb{R} .

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2(t) dt < \infty \quad (5)$$

- La transformée de Fourier de l'ondelette appartient aussi à l'espace des fonctions intégrables et l'intégrale de ψ est nulle, ce qui implique que $\psi(t)$ a une valeur moyenne nulle (sa partie positive est égale à sa partie négative).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

Avoir une moyenne nulle implique que le spectre de l'ondelette est de type passe-bande.

4.3 Transformée en ondelettes

Une transformée en ondelettes est une fonction $S(a,b)$ qui associe aux paramètres a et b la valeur du coefficient $C_{a,b}$ de l'ondelette $\psi_{a,b}$. Il existe deux algorithmes de la transformée en ondelettes : la transformation discrète et la transformation continue. La distinction entre les différents types de transformée en ondelettes dépend de la façon dont les paramètres d'échelle et de translation sont discrétisés.

La transformation continue d'un signal $X(t)$ est définie par l'équation suivante :

$$S_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{i,j}^*(t) X(t) dt \quad (7)$$

Où i , et j sont des entiers et $S_{i,j}$ est le coefficient de l'ondelette fille $\psi_{i,j}$ calculé à l'échelle j et à la position i par dilatation et translation de l'ondelette mère ψ .

$$\psi_{i,j}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \psi\left(\frac{t-i}{j}\right) \quad (8)$$

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude de nos profils par la transformée en ondelettes discrètes, où le plan temps-fréquence est discrétisé en se basant sur un échantillonnage logarithmique. L'analyse de nos profils par la transformée en ondelettes continues est décrite dans le chapitre suivant.

4.3.1 Transformation discrète

La transformée en ondelette discrète (TOD) est un cas particulier de la transformée en ondelettes qui fournit une bonne localisation en temps et en fréquence. Dans le domaine discret, les paramètres d'échelle et de position sont discrétisés comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = a_0^j, a_0 > 1 \\ b = ib_0 a_0^j, b_0 > 0 \end{array} \right\} i, j \in \mathbb{Z}$$

Et les ondelettes d'analyse sont également discrétisées comme suit :

$$\psi_{i,j}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t}{a_0^j} - ib_0\right) \quad (9)$$

La TOD d'un signal $X(t)$ est défini par l'équation suivante :

$$S_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{i,j}^*(t)X(t) dt \quad (10)$$

Pour définir une analyse discrète, il reste à déterminer les valeurs de a_0 et b_0 . Meyer [21] a montré que pour les valeurs particulières $a_0 = 2$ et $b_0 = 1$, soit $a = 2^j$ et $b = i2^j$ les $\psi_{i,j}(t)$ forment une base orthonormée de $L^2(\mathbb{R})$. Alors la famille d'ondelettes s'écrit :

$$\psi_{i,j}(t) = 2^{-\frac{j}{2}}\psi(2^j t - i) \quad (11)$$

a_0 peut être définie comme un nombre rationnel, ce qui donne une transformée en ondelettes rationnelle. Mais ce type de transformées est principalement utilisé pour le débruitage des signaux. La relation (11) est la plus utilisée actuellement pour la transformation discrète et la technique est connue sous le nom de l'analyse dyadique. La Figure 23 représente l'échantillonnage de la grille dyadique. La TOD est calculée aux points $a = 2^j$ et $b = i2^j$. Les flèches dans la Figure 23 représentent la façon de descendre dans l'arbre pour savoir quel coefficient correspond à un temps donné (ou bien une position donnée) s'il n'y a pas de coefficients à la verticale du temps (ou position) considéré.

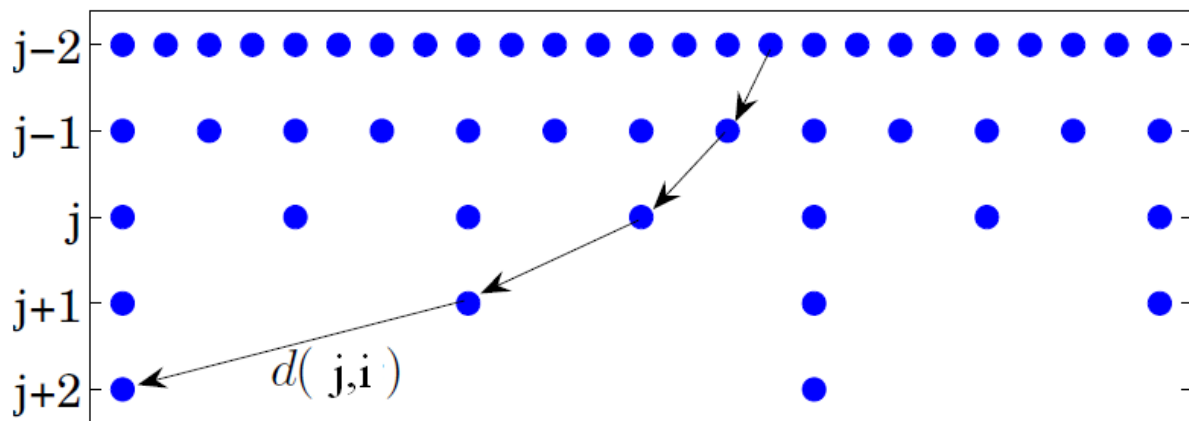


Figure 23 : Représentation de la grille dyadique. $d(i,j)$ est la détail de signal correspondant à l'échelle j et la position i . (D'après [22])

La transformation (TOD) fournit les détails du profil qui expriment la différence d'information entre deux niveaux de résolutions successives. La TOD s'appuie sur un algorithme de filtrage développé par Stéphane Mallat en 1989 [23]. Mallat a considéré l'analyse par ondelettes comme une décomposition du profil par une cascade de filtres [24], associant une paire de filtres à chaque niveau de résolution (voir Figure 24). Le profil est par la suite décomposé en approximation (A_j) correspondant aux basses fréquences et en détails (D_j) correspondant aux plus hautes d'entre elles. Ce processus est répété pour décomposer les approximations (voir Figure 25). Cet algorithme de décomposition est mathématiquement représenté comme suit :

$$\begin{aligned} A_j[K] &= \sum_{i=1}^n X[i] \times h_{0,j}[2K - i] \\ \text{ET} \\ D_j[K] &= \sum_{i=1}^n X[i] \times h_{1,j}[2K - i] \end{aligned} \quad (12)$$

Il utilise une paire de filtres :

$h_{0,j}$: filtre passe-bas qui projette l'approximation de l'échelle $j-1$ sur l'espace d'approximation de l'échelle j . On obtient donc l'approximation à l'échelle j .

$h_{1,j}$: filtre passe-haut qui projette l'approximation de l'échelle $j-1$ sur l'espace d'ondelette (détail) de l'échelle j . On obtient alors les coefficients en ondelettes de l'échelle j .

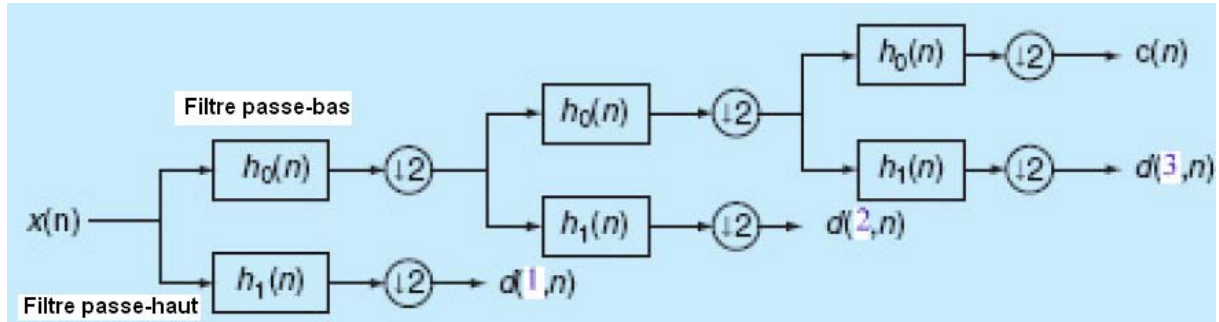


Figure 24 : Arbre de décomposition pyramidale représentant le fonctionnement de l'algorithme de Mallat. Le 2 avec une flèche vers le bas symbolise une décimation par deux, c'est-à-dire on retire un point sur deux (analyse dyadique). (D'après [25]).

A partir de tous les détails et la dernière approximation, on peut reconstruire le signal du départ. Cette reconstruction est un processus inverse à la décomposition. Le but ici est de séparer la chaîne principale des coefficients de la décomposition en ondelettes. Il existe un algorithme similaire basé sur la relation suivante :

$$A^{j-1} = A^j + D^j \quad (13)$$

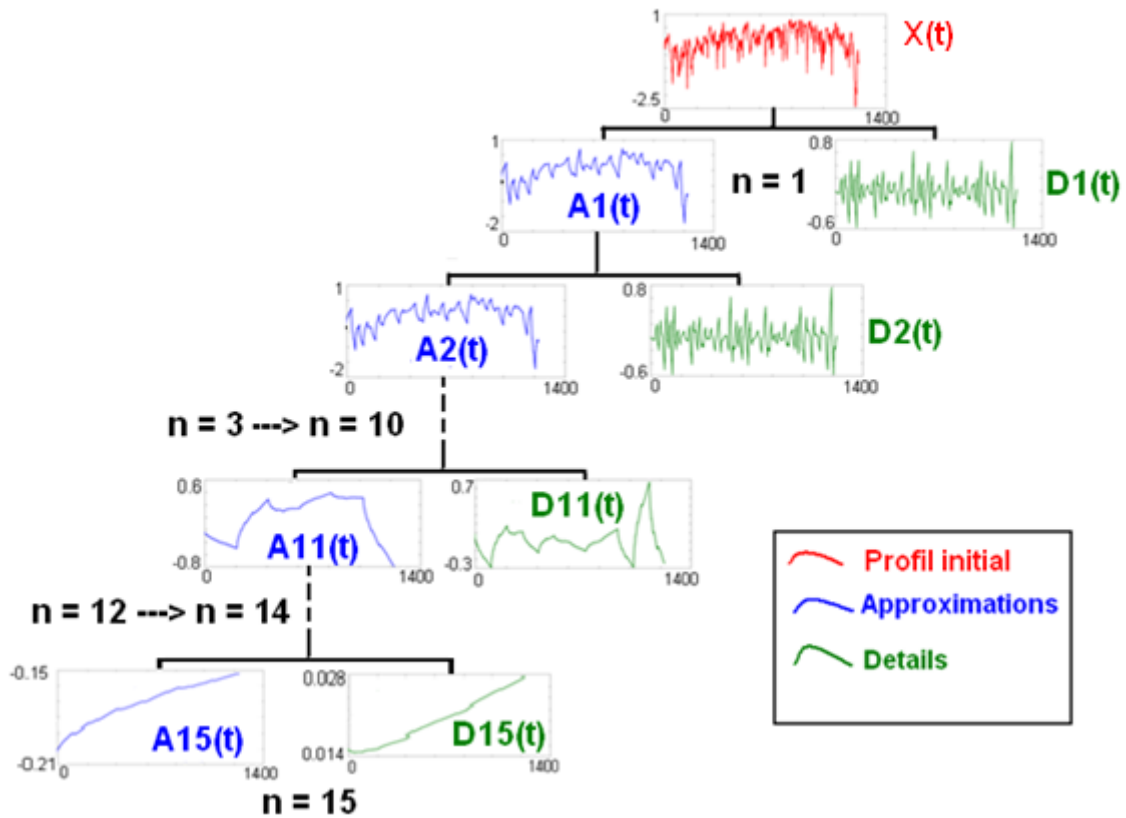


Figure 25 : Schéma de principe de l'analyse par ondelettes discrètes. $X(t)$ – un profil de rugosité d'une surface abrasive, $A_j(t)$ – approximation du signal dans la $i^{\text{ème}}$ itération, et $D_j(t)$ – Détail du signal dans la $i^{\text{ème}}$ itération.

Une fois de plus, deux filtres sont utilisés dans ce processus : un filtre passe-bas $h_{0,j}R$ et un filtre passe-haut $h_{1,j}R$. Ils sont facilement déduits de ceux introduits au cours de la phase de décomposition:

$$h_{0,j}R = \text{inverse}(h_{0,j})$$

Et

$$h_{1,j}R = \text{inverse}(h_{1,j}) \tag{14}$$

Avec $y = \text{inverse}(x)$ est définie par : $y(K) = x(-K)$, $K \in \mathbb{Z}$.

Le principe de l'algorithme de synthèse de Mallat est expliqué par la Figure 26.

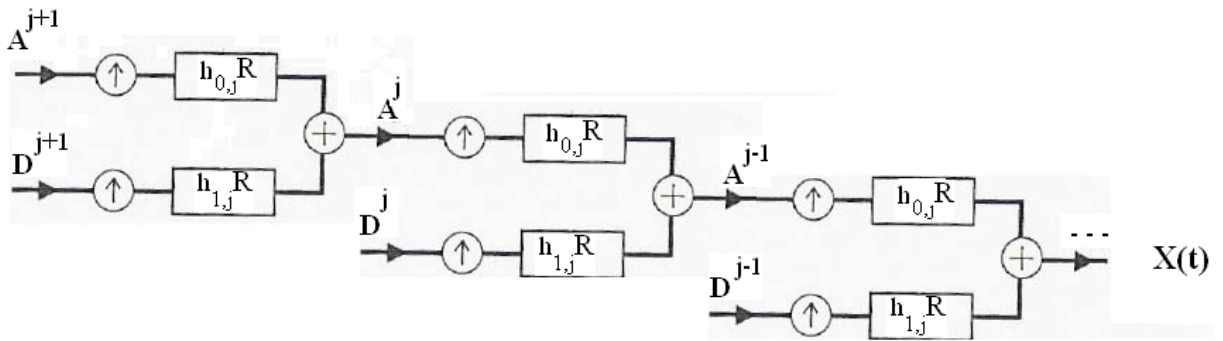


Figure 26 : Processus de reconstruction.

Les flèches vers le haut dans la Figure 26 symbolisent l'opération d'intercaler un zéro entre les échantillons d'une série. Autrement dit remplacer la suite A_K^j par une suite A_m^j qui coïncide avec A_K^j pour $m = 2K$ et qui s'annule pour les valeurs de m intermédiaires (et de même pour la suite D_K^j) :

$$\begin{aligned} A_K^j &= \{\blacksquare, \blacksquare, \blacksquare, \blacksquare, \blacksquare\} \\ A_m^j &= \{\blacksquare, 0, \blacksquare, 0, \blacksquare, 0, \blacksquare, 0, \blacksquare\} \end{aligned} \quad (15)$$

Cette opération s'appelle sur-échantillonnage. L'équation de reconstruction est comme suit :

$$A_{j-1}[K] = \sum_{i=1}^n A_K^j \times h_{0,j}[i - 2K] + \sum_{i=1}^n D_K^j \times h_{1,j}[i - 2K] \quad (16)$$

Cette équation représente une somme d'équations de filtrage.

Les algorithmes d'analyse et de synthèse de Mallat sont résumés par la Figure 27.

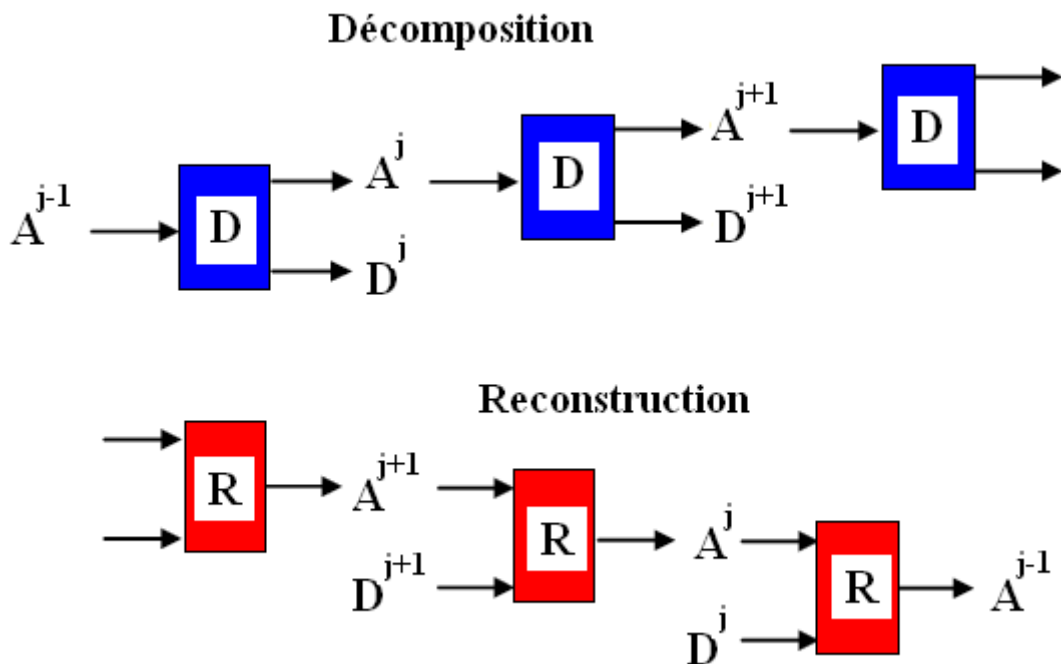


Figure 27 : représentation des différentes étapes de la TOD. En haut la décomposition du signal et en bas sa reconstruction

4.3.2 Propriétés des familles d'ondelette

Il existe plusieurs types et familles d'ondelettes dont les propriétés diffèrent selon les principaux critères suivants:

- Le support des fonctions $\psi(t)$.
- La symétrie.
- Le nombre de moments nuls de ψ .
- La régularité.
- L'existence de la fonction d'échelle φ associée à une analyse multirésolution, telle que la famille :

$$((\varphi(x - k))_{k \in \mathbb{Z}}) \cup (\psi_{j,k})_{j \geq 0, k \in \mathbb{Z}}$$

- L'orthogonalité ou la biorthogonalité de l'analyse qui en découle.

Le Tableau 7 présente la liste des ondelettes affichées dans ce chapitre avec les abréviations associées afin de faciliter la lecture.

Le Tableau 8 résume les différentes propriétés des familles d'ondelettes, en les regroupant selon les quatre propriétés principales: l'existence de filtres associés, l'orthogonalité ou la biorthogonalité, le soutien compact ou non compact, les ondelettes réelles ou complexes.

Les ondelettes avec des filtres sont associées à des analyses multi-résolutions orthogonales ou bi-orthogonale. Une transformation discrète et des calculs rapides en utilisant l'algorithme de Mallat sont alors possibles. Les ondelettes sans filtre, d'autre part, sont utiles pour la transformée en ondelettes continue.

Nom des familles d'ondelette	Abréviation
Haar wavelet	<i>haar</i>
Daubechies wavelets	<i>Db</i>
Symlets	<i>sym</i>
Coiflets	<i>coif</i>
Biorthogonal wavelets	<i>bior</i>
Meyer wavelet	<i>meyr</i>
Discrete approximation of the Meyer wavelet	<i>dmey</i>
Battle and Lemarié wavelets	<i>btlm</i>
Gaussian wavelets	<i>gaus</i>
Mexican hat	<i>mexh</i>
Morlet wavelet	<i>morl</i>
Complex Gaussian wavelets	<i>cgau</i>
Complex Shannon wavelets	<i>shan</i>
Complex B-spline frequency wavelets	<i>fbsp</i>
Complex Morlet wavelets	<i>cmor</i>

Tableau 7 : liste des ondelettes présentées. (D'après [26]).

4.3.3 Choix de l'ondelette d'analyse

Dans la pratique, il n'existe pas de critère unique pour choisir une ondelette mère. Les critères, pour choisir celle qui est la mieux adaptée au signal, dépendent fortement du processus physiques étudiés. Plusieurs auteurs signalent que c'est l'étape la plus importante dans l'analyse par ondelettes, car elle garantit une décomposition précise du signal original dans la résolution de différente fréquence. Dans de nombreux cas, les chercheurs fondent leurs décisions sur une évaluation visuelle du signal analysé.

Il existe plusieurs types d'ondelettes et plusieurs décompositions utilisant la transformée en ondelettes discrètes sont possibles. La plus réussie est celle utilisant une ondelette mère qui répond mieux à la forme du signal analysé ou bien à la forme de la signature recherchée [27], [28].

Dans cette étude, nous cherchons l'ondelette mère la plus adaptée qui peut être utilisée pour identifier les rayures figurant sur les surfaces abrasives. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons le plan d'expériences sur le procédé d'usinage par abrasion, par la suite la problématique multi-échelle de ces surfaces sera posée, pour finir par discuter leur résultats d'analyse par transformation discrète.

Ondelettes avec filtres			Ondelette sans filtres	
Avec un support compact		Sans un support compact	Réel	complexe
Orthogonal	Bi-orthogonal	Orthogonal	Gaus, mexh, morl	Cgau, shan, fbsp, cmor
dB, haar, sym, coif	Bior	Meyr, dmey, btIm		

Tableau 8 : principales propriétés des familles d'ondelettes. (D'après [26]).

5 Plan d'expériences sur le procédé d'usinage par abrasion

L'usinage de précision et la rectification de surfaces fonctionnelles de pièces mécaniques, c'est à dire l'obtention de pièces sans défaut sur le plan géométrique, et sans défaut de structure, nécessite un réel effort technico-économique. En conséquence, certaines opérations sont achevées par un procédé de superfinition tel que le toilage. Ce dernier se distingue des autres procédés de superfinition par l'utilisation d'un support à faible rigidité et d'un outil coupe automatiquement régénéré qui est la bande abrasive (voir Figure 28). De plus, cette technique est simple et économiquement intéressante.

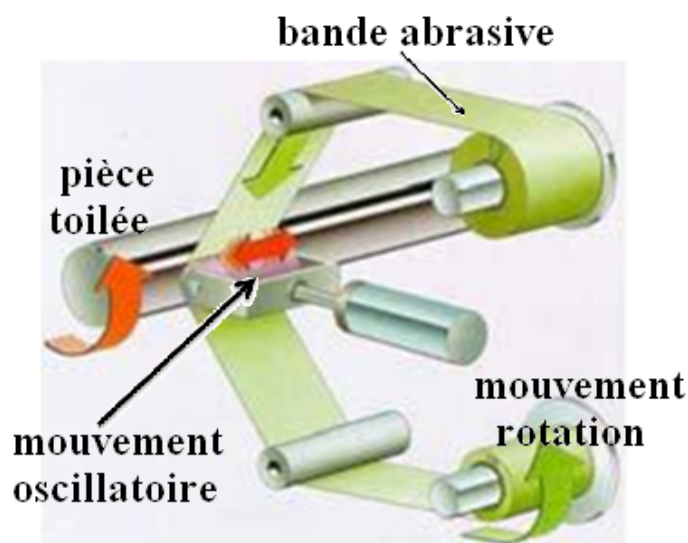


Figure 28 : Principe de toilage. (D'après [29]).

5.1 Mise en œuvre de l'opération de toilage

Ce procédé consiste à appliquer une bande abrasive, oscillante longitudinalement, de faible épaisseur sur une pièce usinée mise en rotation. Pour assurer la reproductibilité de la mesure sur le processus, cinq opérations de toilage sont réalisées pour chaque ensemble de conditions d'essais du plan d'expériences [30].

Des détails sur l'opération de toilage peuvent être trouvés par exemple dans [31].

5.1.1 Conditions expérimentales

L'influence des conditions du processus de finition sur la rugosité résultante est étudiée selon un plan d'expériences Tagushi. Tout d'abord, 16 échantillons ont été tournés et rectifiés, puis usinés avec lubrification (CUT MAX H05TM), huit paramètres ont été variés [32] : Dureté du galet de contact (polyuréthane), Taille moyenne du grain abrasif, Pression de contact, Vitesse de rotation de la broche, Avance de la bande, Temps d'usinage, Fréquence d'oscillation axiale, Amplitude d'oscillation axiale. Chaque échantillon est parachevé par l'opération de toilage en utilisant chacune des conditions décrites dans le Tableau 9.

Echantillon	Grain (µm)	Rigidité du galet	Pression de contact (bars)	Vitesse de rotation de la broche (t/mn)	Avance de la bande (mm/mn)	Fréquence d'oscillation axiale (HZ)	Temps d'usinage (s)
1	9	Forte	1	100	50	1.6	3
2	9	Forte	1	500	100	10	9
3	9	Forte	3	100	50	10	9
4	9	Forte	3	500	100	1.6	3
5	40	Forte	1	100	100	10	3
6	40	Forte	1	500	50	1.6	9
7	40	Forte	3	100	100	1.6	9
8	40	Forte	3	500	50	10	3
9	9	Faible	1	100	50	10	3
10	9	Faible	1	500	100	1.6	9
11	9	Faible	3	100	50	1.6	9
12	9	Faible	3	500	100	10	3
13	40	Faible	1	100	100	1.6	3
14	40	Faible	1	500	50	10	9
15	40	Faible	3	100	100	10	9
16	40	Faible	3	500	50	1.6	3

Tableau 9 : Description du plan d'expériences Tagushi [32]

Ce plan d'expériences est construit en considérant les interactions suivantes :

- La rigidité du galet de contact et la taille de grain
- La rigidité du galet de contact et la pression de contact

- La pression de contact et la taille de grain

5.1.2 Mesures de rugosité

Pour chaque échantillon, 30 profils de rugosité ont été mesurés à l'aide d'un profilomètre KLA-TENCOR™ P-10 avec un palpeur de rayon de courbure de 2 μm . La longueur d'évaluation et le pas d'échantillonnage sont respectivement de 8 mm et 0.1 μm , soit 80000 points de mesure par profil.

6 Problématique multi-échelle de l'abrasion

L'usure est le terme représentant l'enlèvement de matière à partir d'une surface en raison d'un mouvement mécanique et/ou d'un processus chimique [33]. Un des mécanismes les plus importants, en raison de sa fréquence d'utilisation, est l'usure par abrasion, qui signifie le détachement de la matière de surfaces dans un mouvement relatif, causé par des particules dures entre les surfaces opposées ou fixées à l'un d'eux.

Ce procédé peut être divisé en deux catégories selon la manière dont les grains sont appliqués sur la pièce à usiner : abrasion à deux corps et abrasion à trois corps. L'intérêt du concept à deux corps/ou trois corps (Figure 29) est de décrire si les particules abrasives sont liés (deux corps) ou libre de rouler ou glisser (trois corps). Ainsi, le terme « abrasion à trois corps » se réfère à l'usure causée par des particules abrasives libres et desserrées existantes, comme des éléments inter-faciaux entre un corps solide et un contre-corps, tandis que l'usure abrasive à deux corps est causée par des particules abrasives qui sont rigidement attachées (incorporées) dans le deuxième corps [35]. Les particules abrasives dans le mécanisme à deux corps sont capables de couper profondément dans la matière de la pièce à usiner, tandis que dans le cas d'abrasion à trois corps, les grains abrasifs peuvent passer une partie de leur temps à couper dans le matériau.

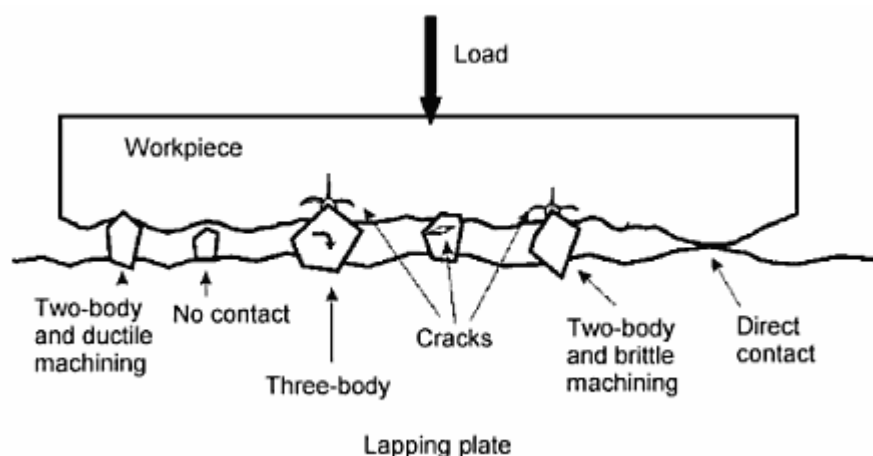


Figure 29 : schémat montrant deux et trois corps à l'abrasion. (D'après [34]).

Les trois opérations importantes de finition abrasive sont : toilage, rodage et polissage. Le toilage est un processus d'abrasion à deux corps parce que le grain est fixé au galet. Le rodage est principalement considéré comme un mécanisme d'abrasion à trois corps par le fait qu'il utilise des grains abrasifs libres pouvant rouler ou glisser entre la surface de la pièce usinée et le plateau de rodage, bien que certains grains incorporés dans la nappe conduisent à une abrasion à deux corps. D'autres processus de finition qui utilisent des grains abrasifs libres pourraient être une combinaison d'abrasion à deux et trois corps. C'est le cas du polissage où les grains sont temporairement fixés dans un tampon de polissage doux (le roulement des grains abrasifs fixes participe à l'enlèvement de la matière). En raison de la complexité du système, le polissage comprend des processus d'abrasion à deux et trois corps en même temps.

Même si les mécanismes d'abrasion à deux corps et à trois corps sont les mêmes, il y a des différences évidentes entre les deux méthodes. Dans l'abrasion à deux corps, les grains abrasifs sont contraints contre la surface abrasée et des pressions plus élevées peuvent être exercées par eux. Une autre différence est l'effet de la taille des particules sur le taux d'usure.

Dans l'abrasion à trois corps, la répartition des grains dans la zone de contact est soumise à une plus grande incertitude. Avec une grande quantité d'abrasif, la pression moyenne sur les grains est susceptible d'être plus faible que dans un procédé à deux corps. Les pressions exercées par une particule abrasive ont également tendance à dépendre de la taille des grains. Les pressions sont susceptibles d'être plus élevées avec des grains de grandes tailles. Cela affecte les profondeurs de rayures sur la surface de la pièce usinée. À basse pression et avec des particules de fines tailles, les rayures seront très faibles.

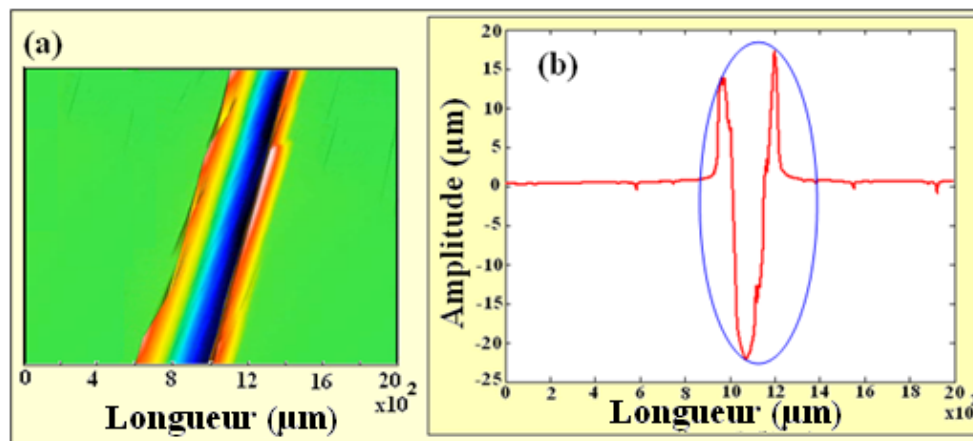


Figure 30 : a) Une surface avec une seule rayure. b) La forme «V» d'une rayure

6.1 Étude du processus élémentaire

Un test de rayure est appliqué sur une pièce de la même matière que les échantillons utilisés dans notre étude, pour modéliser physiquement les rayures produites par les grains de la bande abrasive. La Figure 30.a représente une rayure tridimensionnelle enregistrée par un profilomètre tactile 3D. Chaque rayure est identifiée par une forme en « V » dans le signal

obtenu par le profilomètre en parcourant une surface abrasée (voir Figure 30.b). L'amplitude de la rayure dépend de l'intensité de la force appliquée sur la surface (voir Figure 31). Par exemple, en appliquant une force de 200 Newton l'amplitude de la rayure est comprise entre -40 et +30 μm , alors que pour une force de 40 Newton l'amplitude est comprise entre -7 et +5 μm .

Dans une surface abrasée, nous trouvons de nombreuses rayures dans des directions différentes et avec des amplitudes différentes, ce qui entraîne plusieurs formes en "V" dans le signal obtenu (voir Figure 32). Cela explique que le choix de l'échelle la plus pertinente pour être utilisée dans les mesures de signaux de rugosité pour les surfaces abrasées est un problème difficile à résoudre.

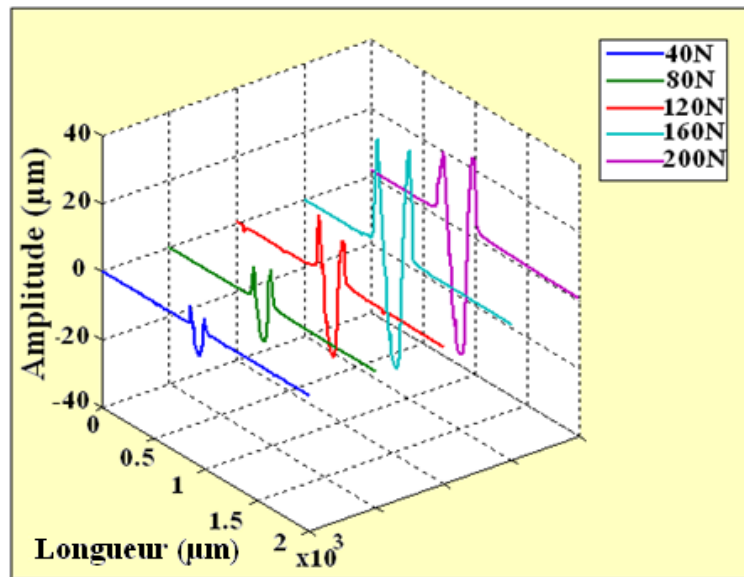


Figure 31 : Signaux de différentes rayures obtenues en appliquant différentes force. L'amplitude du signal augmente avec la valeur de force appliquée (en Newton).

6.2 L'ondelette la plus pertinente pour caractériser le mécanisme élémentaire de l'abrasion

La procédure d'analyse par ondelettes commence par le choix de l'ondelette mère. Dans la présente étude, huit différentes ondelettes sont considérées (Db_2, Db_5, Db_8, Db_10, coif_3, sym, meyr et bior).

Des analyses statistiques montrent que l'ondelette mère « coif_3 » est la plus adaptée pour identifier une rayure (faible amplitude des résidus entre les ondelettes et la topographie de la rayure) sur la surface abrasée parce que sa fonction de graduation correspond à la forme transitoire de la rayure (voir Figure 33). La Figure 34 montre les différentes ondelettes utilisées dans notre étude pour identifier la signature de la bande abrasive.

Figure 32 : Un Profil obtenu en mesurant une surface abrasée par un profilomètre tactile (D'après [36]).

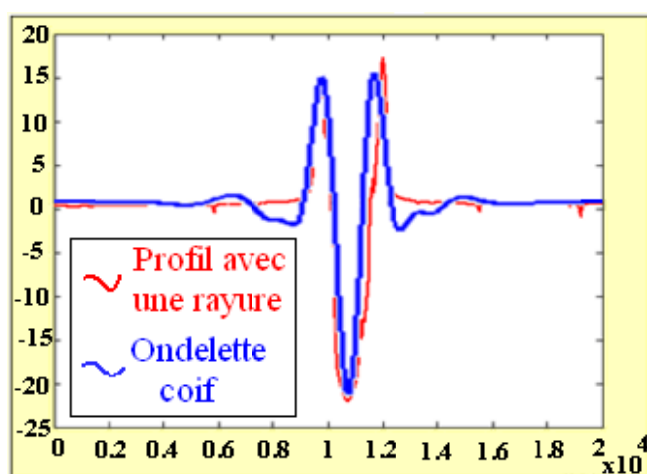


Figure 33 : L'ondelette coif_3 correspond à la forme de la rayure.

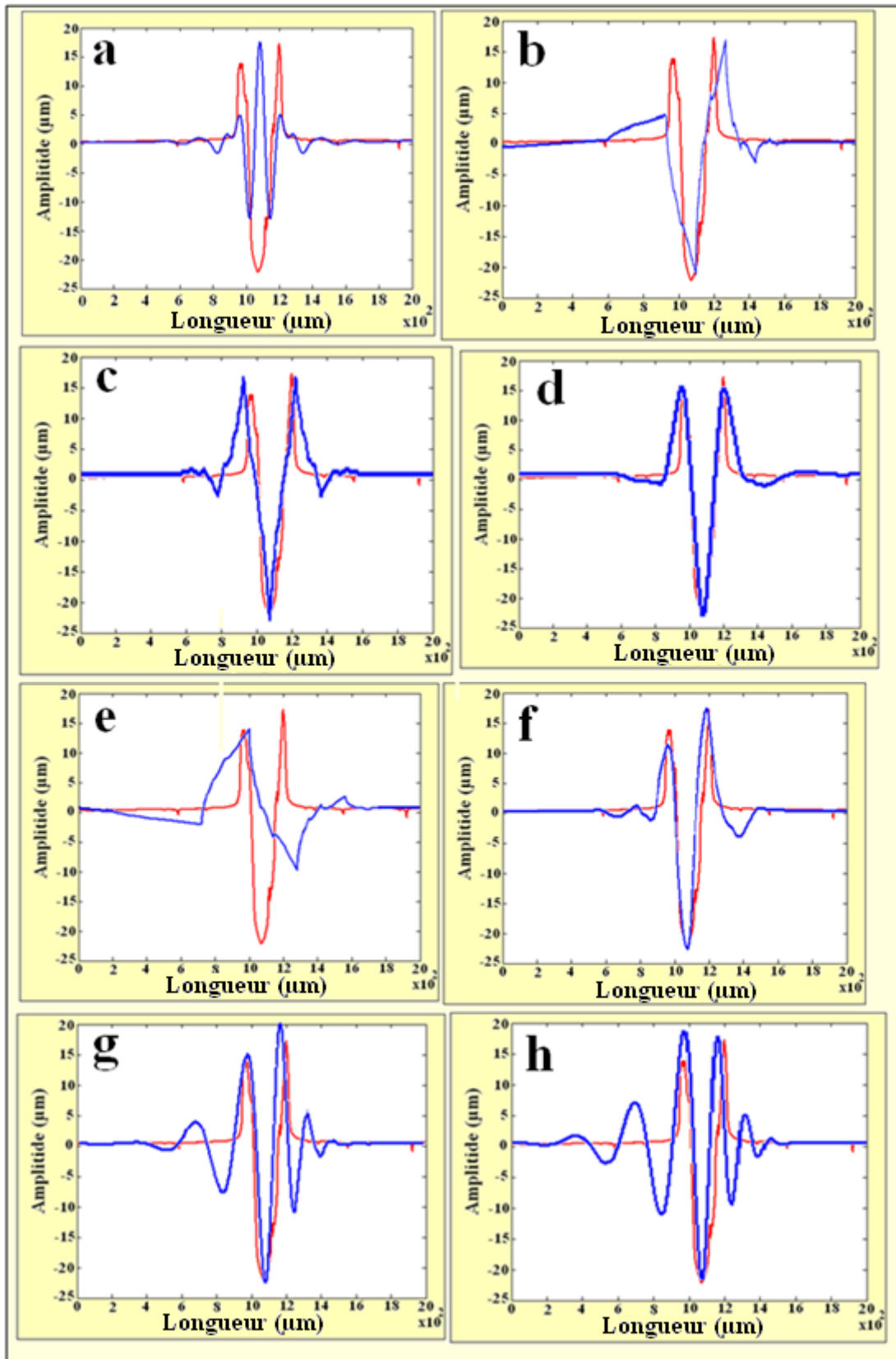


Figure 34 : Représentation du signal de rayure (en rouge) et les ondelettes utilisées (en bleues) :
 (a) meyr (b) sym (c) Bior (d) coif_3 (e) Db_2 (f) Db_5 (g) Db_8 (h) Db_10.

7 Analyse multi-échelle des paramètres de rugosité

En utilisant le concept de la transformée en ondelettes discrètes, chaque profil est analysé en détails et approximations avec les huit ondelettes retenues. Chaque profil est décomposé en $16 \cdot n$ profils, où n est le nombre total du niveau de décomposition (dans cette étude $n=17$). Ensuite, les différents paramètres de rugosités sont calculés sur chaque profil résultant de la décomposition obtenue en détails.

L'évolution du paramètre de rugosité R_q (paramètre de moyenne quadratique) par rapport à l'échelle de décomposition en ondelettes obtenue à partir des détails « D », est représentée par la Figure 35 suivant deux niveaux de rigidité du galet (forte et faible). Ce graphe montre que la différence entre les valeurs du paramètre de rugosité (R_q) à chaque niveau de rigidité de galet varie avec l'échelle.

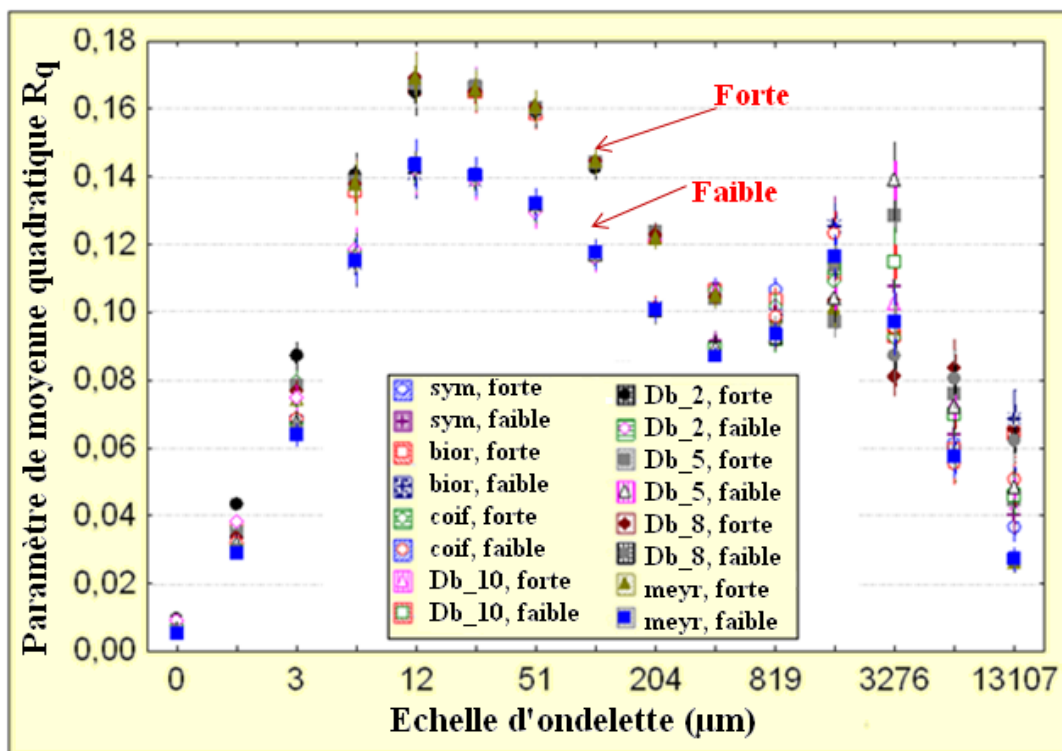


Figure 35 : Evolution du paramètre de rugosité R_q par rapport à l'échelle de la décomposition en ondelettes obtenue à partir de la décomposition en détails « D », en utilisant deux niveaux de rigidité du galet (forte et faible).

Sans introduire des concepts mathématiques, il peut être rapidement observé que:

- Le paramètre de rugosité R_q dépend de l'échelle.
- La valeur de ce paramètre diffère entre les deux niveaux de rigidité du galet.
- Le choix de la rugosité semble affecter légèrement cette valeur à toutes les échelles.
- Deux valeurs maximum de R_q sont localisées à deux échelles caractéristiques.

8 Méthode d'analyse statistique

L'objectif principal de cette étude est de déterminer si un paramètre de rugosité R calculé par une ondelette (W) et une décomposition (D) pris à une échelle ε distingue l'effet d'un paramètre de procédé donné (P) et, plus précisément, quelle échelle de la transformée d'ondelette sera la plus appropriée. Nous notons $R(W,D,\varepsilon)$ le paramètre de rugosité pris sous ces conditions. Avec $\varepsilon = 2^{*(n-j+1)}/0.1$, où j représente le niveau de décomposition et n est le nombre total du niveau de décomposition (dans cette étude $n=17$).

Il s'agit de déterminer l'influence des paramètres du procédé (P) sur les mesures effectuées; ou la pertinence d'une mesure pour mettre en évidence un ou plusieurs phénomènes physiques mis en jeu dans un procédé. Pour cela, les données mesurées ont été traitées par une analyse de la variance. Cette analyse est exécutée à différentes échelles ε et ainsi pour les familles d'ondelettes précédemment mentionnées et les différents détails obtenus. L'équation de R est définie comme suit [37] :

$$R(D, W, \varepsilon, K_1, K_2, \dots, K_p, n) = \alpha(D, W, \varepsilon) + \sum_{j=1}^p \alpha_{K_j}(D, W, \varepsilon) + \sum_{j=1}^p \sum_{l=j+1}^p \beta_{K_j, K_l} + \xi_{K_1, K_2, \dots, K_p, n}(D, W, \varepsilon) \quad (16)$$

Où $R(D, W, \varepsilon, K_1, K_2, \dots, K_p, n)$ est la valeur du paramètre de rugosité du $n^{\text{ième}}$ profil quand les paramètres du procédé P sont pris aux niveaux k_1, k_2, \dots, k_p , pour une longueur d'évaluation (ε). $\alpha_{K_j}(D, W, \varepsilon)$ est l'influence sur la valeur de paramètre de rugosité du $j^{\text{ième}}$ paramètre de processus au niveau K_j et $\beta_{K_j, K_l}(D, W, \varepsilon)$ est l'interaction entre le $j^{\text{ième}}$ et le $l^{\text{ième}}$ paramètre de procédé et $\xi_{K_1, K_2, \dots, K_p, n}(D, W, \varepsilon)$ est un bruit Gaussien avec une valeur nulle.

Pour chaque paramètre du procédé et leurs interactions, la variance entre les groupes de valeurs expérimentales et la variance à l'intérieur du groupe (correspondant aux erreurs de l'estimation du paramètre de rugosité dans chaque groupe) est calculée. La résultat notée $F(\varepsilon, W, D, p)$ représente l'effet du paramètre du procédé P sur la valeur du R calculée sur un profil à l'échelle ε avec une ondelette W et une décomposition D . Par exemple, considérant un paramètre du procédé utilisant une ondelette W et une décomposition D , une valeur de F plus grande à l'échelle ε_1 comparé à l'échelle ε_2 (c'est-à-dire $F(\varepsilon_1, W, D, p) > F(\varepsilon_2, W, D, p)$) implique une pertinence plus grande de l'échelle ε_1 pour décrire l'effet de ce paramètre du procédé. $F(\varepsilon, W, D, p)$ s'appelle le critère de Fisher (plus d'information sur le critère de Fisher peuvent être trouvées dans [38] et [39]).

Cependant, cette théorie statistique conventionnelle ne prend pas en considération le fait qu'une petite variation dans une série de profils identiques influe sur la valeur de l'indice de traitement. C'est pourquoi l'analyse de la variance a été combinée avec la théorie du Bootstrap (décrite dans le chapitre 1). Le but de cette méthode statistique récente est de produire un nombre important noté N ($N=100$), de groupes équivalents de données en procédant à des tirages avec remise à partir d'un groupe de valeurs expérimentales « identiques » d'un paramètre de rugosité donné R . Alors, pour chaque paramètre de rugosité R , un groupe de N valeurs de F_k ($k \in [1, N]$) est obtenu d'où une valeur moyenne F peut être extraite ainsi qu'un

intervalle de confiance de 95 %. Statistiquement, un paramètre de rugosité R_i sera plus pertinent qu'un paramètre R_j quand $F_i > F_j$.

9 Résultats

Le problème principal était de répondre aux questions suivantes:

- Comment choisir l'échelle la plus pertinente donnant la plus grande différence de rugosité entre les groupes d'échantillons usinés avec deux niveaux de rigidité de galet ?
- Quel paramètre quantifie mieux cette différence si elle est significative?
- Est-ce que cette différence dépend de la forme de l'ondelette utilisée dans la décomposition (le choix de l'ondelette)?

9.1 Effet de la rigidité du galet

L'évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher « $F(R_q, \varepsilon, W, D, p)$ ») du paramètre de rugosité R_q par rapport à l'échelle de décomposition en ondelettes obtenue à partir des détails (D) correspondant aux différentes ondelettes retenues, est représenté par la Figure 36.

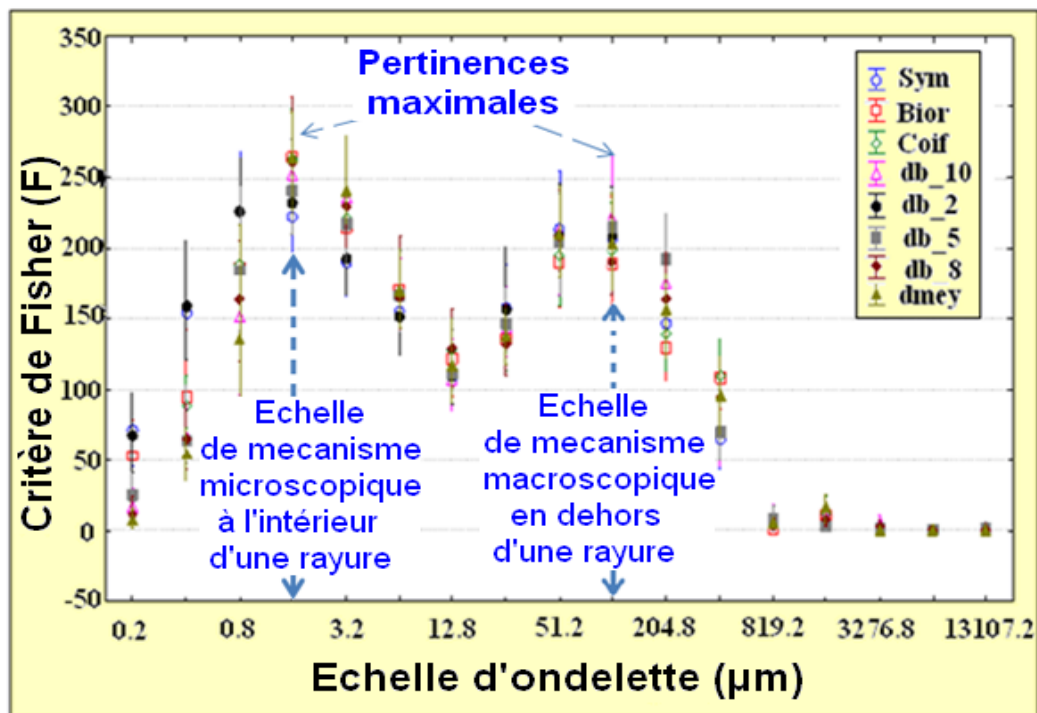


Figure 36 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") de R_q contre l'échelle de décomposition en ondelette, en utilisant deux niveaux de rigidité de galet.

On remarque que toutes les ondelettes utilisées détectent deux échelles de pertinence du mécanisme, une microscopique et l'autre macroscopique, avec la même intensité de pertinence. La Figure 36 montre que la rigidité du galet influence sur l'amplitude à différentes

échelles. Ces résultats peuvent être expliqués par la capacité du galet à transmettre la pression de contact à chaque grain de la bande abrasive. En effet, un galet à faible rigidité est beaucoup plus apte à être déformé par la pression de contact pour compenser les irrégularités des tailles de grain et de la topographie de surface. Dans ce cas, la répartition de la pression sur la surface du galet est plus uniforme ce qui induit une diminution de la pression maximale locale agissant sur les grains et par conséquent une faible pénétration dans la partie toilée, diminue l'amplitude de rugosité. La largeur moyenne des pics est inférieure à une longueur d'évaluation de la taille des grains. Globalement, le nombre de grains mis en jeu augmente induisant un profil plus aléatoire et une augmentation de la dimension fractale comme on le voit sur la Figure 37. Quand la dureté du galet augmente, la profondeur indentée augmente.

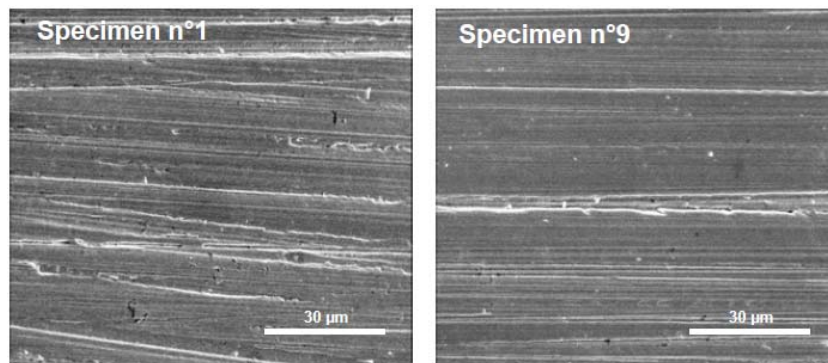


Figure 37 : SEM des échantillons usinés avec une rigidité de galet forte « galet dur » (à gauche) et avec une rigidité de galet faible « galet tendre » (à droite) observées à une échelle correspondant à la longueur d'évaluation de la dimension fractale. (D'après [32]).

A l'échelle microscopique, l'effet de la rigidité du galet sur la largeur moyenne des pics est différent. Le fond de stries générées par le passage de la bande est usiné dans le cas d'un galet tendre. En conséquence, la longueur d'onde moyenne est plus courte comme on le voit sur la Figure 38.

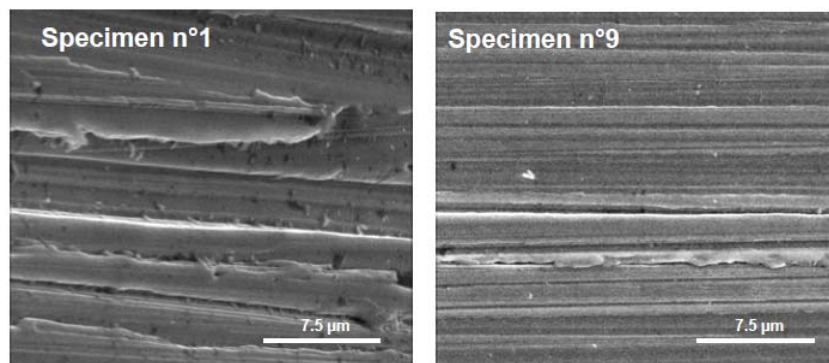


Figure 38 : SEM des échantillons usinés avec une rigidité de galet forte « galet dur » (à gauche) et avec une rigidité de galet faible « galet tendre » (à droite) observées à l'échelle microscopique. (D'après [32]).

9.2 Influence du choix d'ondelettes

Pour déterminer l'effet de l'ondelette, du processus expérimental et l'interaction entre le processus et les ondelettes, nous avons utilisé la relation suivante :

$$R_i(D, W, \varepsilon, e, n) = \alpha_0(D, i, \varepsilon) + \alpha_e(D, i, \varepsilon) + \alpha_W(D, i, \varepsilon) + \beta_{e,W}(D, i, \varepsilon) + \xi_{e,W,n}(D, i, \varepsilon) \quad (17)$$

$R_i(D, W, \varepsilon, e, n)$ est la valeur du paramètre de rugosité du $n^{\text{ième}}$ profil pour le $e^{\text{ième}}$ procédé expérimental, à l'échelle ε des détails D obtenus par la décomposition par ondelettes. $\alpha_e(D, i, \varepsilon)$ représente l'effet du $e^{\text{ième}}$ procédé expérimental sur le paramètre de rugosité., $\alpha_W(D, i, \varepsilon)$ exprime l'effet de l'ondelette indépendamment de l'effet expérimental du procédé, $\beta_{e,W}(D, i, \varepsilon)$ indique l'influence de l'interaction entre le $e^{\text{ième}}$ procédé expérimental et la forme de l'ondelette W , et $\xi_{e,W,n}(D, i, \varepsilon)$ est un bruit gaussien.

L'interprétation de la valeur du paramètre de rugosité obtenu en appliquant l'équation (17) est expliquée par la Figure 39.

Une interaction entre l'ondelette et le procédé expérimental peut être interprétée comme représenté dans la Figure 39.a. On remarque que la valeur du paramètre de rugosité ne varie pas avec les deux processus S_1 et S_2 en appliquant l'ondelette W_1 , ce qui implique que W_1 ne trouve pas de différence entre les deux processus S_1 et S_2 . Au contraire, en appliquant l'ondelette W_2 la valeur du paramètre de rugosité n'est pas la même pour les deux processus : W_2 détecte une différence entre les deux processus ce qui implique que l'ondelette W_2 voit les phénomènes physiques.

La Figure 39.b représente une interprétation lorsqu'il n'y a pas d'interaction entre l'ondelette et le procédé expérimental. Même s'il y a une différence entre la valeur du paramètre de rugosité obtenue par W_1 pour S_1 et celle obtenue pour S_2 , et une différence entre les valeurs obtenue en appliquant W_2 pour S_1 et S_2 (ce qui implique que W_1 et W_2 voit une différence entre S_1 et S_2), on remarque que les deux segments [ab] et [cd] sont parallèles alors les deux ondelettes W_1 et W_2 détecte la même différence entre les deux processus S_1 et S_2 ce qui implique que le choix de l'ondelette n'a pas d'influence.

La Figure 40 représente l'évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher « F ») pour le paramètre de rugosité R_q en fonction de l'échelle de l'ondelette pour les détails obtenues par décomposition. La courbe bleue représente l'effet expérimental, la rouge indique l'effet de l'ondelette et la verte représente l'interaction entre l'ondelette et l'effet expérimental.

Figure 39 : Schémas expliquant l'effet de l'ondelette, du processus et leur interaction sur la valeur de paramètre de rugosité. La figure (a) représente une interaction entre l'ondelette et le processus, alors que (b) représente les effets lorsqu'il ne s'agit pas d'une interaction.

Pour l'effet expérimental, on remarque que tous les paramètres du procédé ont un effet dans l'intervalle [0.2, 200 μm] indépendamment du choix de l'ondelette. La pertinence maximale est autour de la taille des grains ce qui implique que les paramètres du procédé jouent un rôle important à l'échelle élémentaire de l'abrasion.

L'effet de l'ondelette dépend de l'échelle. À petite échelle inférieure à 4 μm , la valeur du critère de Fisher (F) est supérieure à 1 indiquant un effet d'ondelette. Pour l'échelle inférieure à 1 μm , l'effet de l'ondelette est supérieur à l'effet des paramètres du procédé. A cette petite échelle, la reconstruction du signal est très robuste dans un sens statistique et la morphologie des ondelettes est bien quantifiée par les paramètres R_q . Le graphique de la pertinence de l'effet expérimental ne se trouve pas sur la même échelle spatiale que l'effet de la forme de l'ondelette. En conséquence, ces relations ne peuvent pas être liées à un biais possible dans notre méthodologie.

L'interaction entre l'effet expérimental et l'effet d'ondelette est très faible et peut être négligée, et donc pour toutes les échelles. Il s'agit d'un résultat important de notre étude: pour les paramètres R_q , l'effet expérimental est toujours le même quelle que soit la forme d'ondelette. Alors le choix de l'ondelette n'a pas d'influence sur l'effet expérimental.

Pour mettre en évidence et généraliser cette conclusion pour tous les paramètres de rugosité, un calcul de tous les paramètres de rugosité a été effectué en fonction de différents paramètres de processus et de leur interaction associée donnée par le plan expérimental, en appliquant les différentes familles d'ondelette retenues.

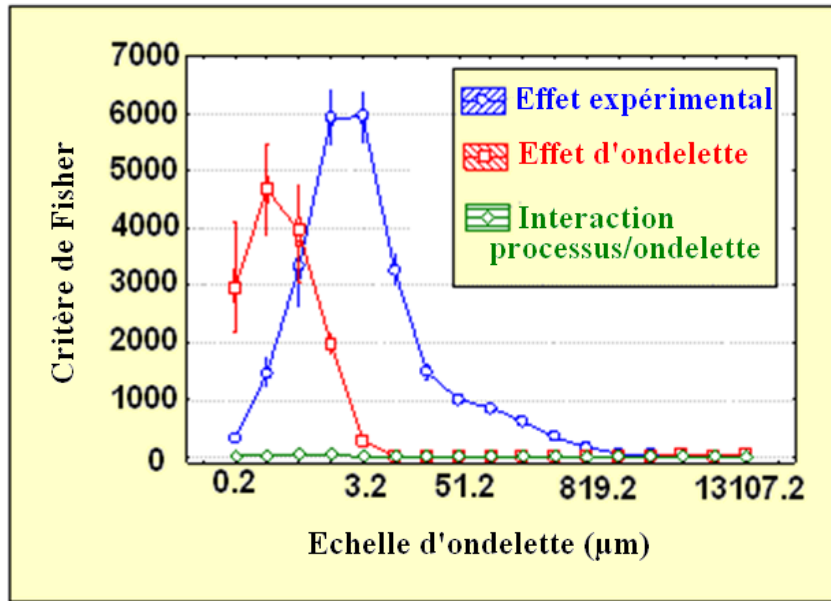


Figure 40 : La pertinence multi-échelle du paramètre de rugosité R_q .

Considérons comme exemple le paramètre R_a (écart moyen arithmétique du profil), la Figure 41 représente les différentes évolutions du critère de Fisher (F) de ce paramètre en fonction de l'échelle d'ondelette, pour les trois familles d'ondelette (sym, meyr, et coif_3) et des différents paramètres de procédés et leur interaction en fonction de l'échelle ε pour les détails obtenus par la décomposition en ondelette discrète. Ce graphique nous permet de visualiser la pertinence d'échelle et l'effet de tous les paramètres du procédé et de leurs interactions associées.

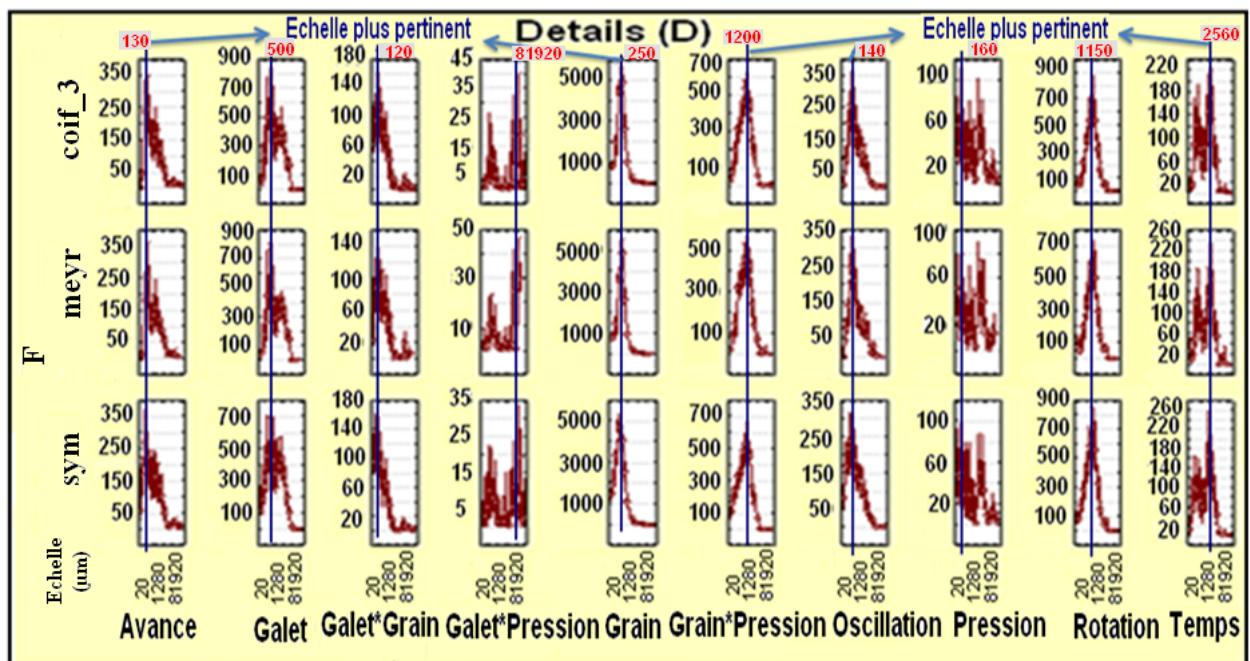


Figure 41 : Analyse statistique de la pertinence des ondelettes pour chaque condition du procédé.

On remarque que les courbes sont similaires pour les trois familles d'ondelette et ceci pour tous les paramètres du procédé et de leurs interactions associées. Les valeurs de F en fonction de l'échelle spatiale sont identiques. Pour résumer, le choix de l'ondelette n'influe pas sur la localisation de la pertinence. Par contre les échelles spatiales de pertinence dépendent des paramètres du procédé de fabrication. Par exemple l'influence de la vitesse de rotation se situe sur une échelle spatiale plus élevée que l'avance de la bande.

Des résultats similaires ont été obtenus pour tous les autres paramètres de rugosité, ce qui confirme notre conclusion : « le choix de l'ondelette n'influe pas sur la localisation de la pertinence et il n'a aucun effet sur les paramètres du procédé ».

9.2.1 Indicateur de pertinence multi-échelle de l'influence de la forme des ondelettes

Il a été montré que pour les paramètres de rugosité, l'effet des paramètres du procédé est toujours le même quelle que soit la forme d'ondelette pour tous les paramètres de rugosité. Cependant, une centaine de paramètres de rugosité sont calculées. Puis, un indicateur est construit pour quantifier l'effet des ondelettes et des tous les paramètres de procédé. On note $F_e(i,D,\varepsilon)$, $F_w(i,D,\varepsilon)$, et $F_{e,w}(i,D,\varepsilon)$ les critères de Fisher associés aux analyses de la variance pour représenter respectivement l'effet expérimental, l'effet d'ondelette et l'interaction entre les deux. Les indicateurs sont définis comme suit :

$$I_e(i, D, \varepsilon) = \log_{10} \frac{F_e(i,D,\varepsilon)}{F_{e,w}(i,D,\varepsilon)} \quad \text{ET} \quad I_w(i, D, \varepsilon) = \log_{10} \frac{F_w(i,D,\varepsilon)}{F_{e,w}(i,D,\varepsilon)} \quad (18)$$

$I_w(i,D,\varepsilon)$ représente l'effet du choix de l'ondelette. $I_e(i,D,\varepsilon)$ représente l'effet du plan expérimental. Si $I_e(i,D,\varepsilon) > 0$ alors l'effet du plan expérimental est supérieur à l'interaction (ondelette et plan expérimental) cela signifiant que la pertinence ne dépend pas du choix de l'ondelette. Le calcul des indicateurs I_e et I_w donne une valeur $I_w > I_e$. Ce qui signifie que l'effet du plan expérimental est plus élevé que l'effet du choix de l'ondelette. Une analyse montre que la valeur faible de I_e est due au fait que les paramètres de rugosité ne sont pas pertinents, puisque $F_e(i,D,\varepsilon) \approx F_{e,w}(i,D,\varepsilon)$.

10 Discussion

Nous avons montré que la pertinence ne dépend pas de la forme des ondelettes: cette affirmation ne signifie pas que le paramètre de rugosité pertinent est le même pour un profil donné pour toutes les ondelettes: la reconstruction du profil dépend de l'ondelette choisie, mais il n'existe pas une ondelette qui discrimine mieux la morphologie induite par le processus. Cependant l'analyse par ondelette est un outil puissant pour retrouver l'influence des paramètres du procédé. Il y a une ambiguïté: nous avons montré que la forme du processus élémentaire de l'abrasion est bien définie par l'ondelette `coif_3` ; toutefois, cette ondelette ne caractérise pas mieux l'effet des paramètres du procédé que les autres familles d'ondelettes. Pour expliquer ce résultat, il doit être précisé que ce signal est un signal très

complexe multi-échelle avec une forte variabilité. Même pour les rayures: le signal possède une variance élevée par rapport à une forme idéale. Cet écart est attribuable à une somme d'influence microscopique (l'hétérogénéité des matériaux, la friction sur l'interface, la variation de la charge, la limitation de la reconstruction de surface due au rayon de courbure et la forme imparfaite de la pointe profilomètre...). Toutes ces variations des structures présentent une haute variation sur la décomposition d'ondelette. Concernant la surface abrasée, le système tribologique est bien sûr plus complexe. Essentiellement, on peut voir l'abrasion comme une succession de rayures mais les procédés abrasifs tels l'abrasion à trois corps, l'usure de l'abrasif, les différentes tailles des grains... mènent à une haute variation de ce modèle élémentaire. Toutes ces interactions conduisent à ce que les surfaces abrasées possèdent une structure fractale. Le spectre présente alors une structure $1/f^\alpha$ avec une variance élevée du spectre de puissance pour une fréquence fixe. Cette variation implique qu'une ondelette à une échelle donnée ne peut pas caractériser précisément la réponse en fréquence du signal. Un résultat important est que le signal reconstruit avec une ondelette donnée à une échelle donnée peut être différent d'un signal obtenu avec une autre ondelette à la même échelle. Toutefois, cette différence ne dépend pas des conditions du procédé. En conséquence, pour les surfaces abrasées, le choix des ondelettes n'affectent pas la conclusion. Cette conclusion signifie que la pertinence du choix de l'ondelette ne peut être effectuée que par l'analyse de la capacité à quantifier la différence entre deux signaux différents, et non pas par la capacité à reproduire finement le signal d'origine.

11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré que la décomposition en ondelettes discrètes permet de quantifier et de localiser les échelles de l'abrasion des processus d'usinage pour tous les paramètres du processus. Cependant, la pertinence de caractériser les échelles appropriées d'abrasion ne dépend pas de la forme de l'ondelette, même si l'ondelette `coif_3` est approprié pour modéliser le processus élémentaire de l'abrasion (une rayure). La quantification de tous les effets est faite pour affecter à chaque paramètre de procédé l'indicateur pertinent du profil (le paramètre de rugosité). Nous avons également montré qu'il est nécessaire de faire des analyses multi-échelles plutôt qu'un type classique (analyses sur toute l'échelle de mesure) afin de quantifier les effets avec précision.

Cependant, les raisons de la non-influence de la forme d'ondelettes sur la quantification de l'abrasion sont encore en discussion. Une des raisons possible peut être due à une dispersion élevée du procédé de l'abrasion et de la complexité associée au profil qui ne peut pas être analysé par la forme élémentaire de l'ondelette. Pour valider cette hypothèse, il faut procéder à une simulation du procédé d'abrasion avec et sans bruit.

Références bibliographiques

- [1] Y. Meyer, Wavelets: Algorithms and Applications, Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 13-31, 101-105, Philadelphia, 1993.
- [2] I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF regional series in applied mathematics, SIAM, Philadelphia, 1992.
- [3] G. Kaiser, A Friendly Guide to Wavelets, Birkhauser, Boston, 1994.
- [4] A. Graps, An Introduction to Wavelets, IEEE computational science and engineering, Summer 1995, vol. 2, num 2, published by the IEEE Computer society.
<http://www.amara.com/IEEEwave/IEEEwavelet.html>
- [5] D. Gabor, Theory of Communication, J. IEE, Vol. 93, No. III, pp. 429-457, 1946.
- [6] : R. Kronland-Martinet, MJAGA. Analysis of Sound Patterns Through Wavelet Transforms, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol. 1(2): pp. 237-301, 1987.
- [7] : Ü. Lepik, Application of Wavelet Transform Techniques to Vibration Studies, Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math., 50, 3, 155-168, 2001.
- [8] : M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, P., and I. Daubechies, Image Coding Using Wavelet Transform, IEEE Transactions on Image Processing, 1, 2: 205-220, 1992.
- [9] : N. Namazi, and al., Synchronization and Detection of Binary Data in Free-Space Optical Communication Systems Using Haar Wavelet Transformation, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 45(1), 015001-1, 2006.
- [10] : D. Cvetkovic, E. D. Übeyli, and I. Cosic, Wavelet Transform Feature Extraction from Human PPG, ECG, and EEG Signal Responses to ELF PEMF Exposures: A Pilot Study, Science Direct Digital Signal Processing, 18, 861-874, 2008.
- [11] J. Raja, B. Muralikrishnan, Shengyu Fu, Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness, and Form, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 26, pp. 222-235, 2002.
- [12] X. Q. Jiang, L. Blunt, Morphological Assessment of in Vivo Wear of Orthopaedic Implants Using Multiscalar Wavelets, Wear, Vol. 250, pp. 217-221, 2001.
- [13] X. Q. Jiang, L. Blunt, K. J. Stout, Development of a Lifting Wavelet Representation for Surface Characterization, Proc. R. Soc. Lond. A, Vol. 456, pp. 2283-2313, 2001.
- [14] S.-H. Lee, H. Zahouani, R. Caterini, T.G. Mathia, Morphological Characterisation of Engineered Surfaces by Wavelet Transform, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, No. 5, pp. 581-589(9), 1998.
- [15] B. Jesso, D. R. Burton, M. J. Labor, Frequency Normalisation Wavelet Transform for Surface Analysis and Characterisation, Wear, Vol. 252, pp. 491-500, 2002.
- [16] J. C. Goswami, A. K. Chan, Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Wiley Interscience, ISBN 0-471-19748-3, 1999.

- [17] O. Rioul, M. Vetterli, Wavelets and signal processing, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 8, No. 4, pp. 14-38, 1991.
- [18] Y. Meyer, S. Jaffard, O. Rioul, L'Analyse par Ondelette, Pour la Science, French edition of Scientific American, 119: p. 28-35, 1987. <http://perso.telecom-paristech.fr/~rioul/publis/198709meyerjaffardrioul.pdf>
- [19] B. Torr sani, Analyse Continue par Ondelettes, Savoirs actuels, InterEditions/CNRS Edition, 1995.
- [20] P. Pillay, A. Bhattacharjee, Application of Wavelets to Model Short-Term Power System Disturbances", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp 2031 – 2037, Nov.1996.
- [21] Y. Meyer, Ondelettes et Opérations, Tome 1, Hermann, Editeurs des sciences et des arts, 1990
- [22] P. Loiseau, Ondelettes Complexes pour l'Analyse des Lois d'échelles, Rapport Master des Sciences de la Matière, Laboratoire de Physique ENS, Université Claude Bernard Lyon1, 2006
- [23] S. Mallat, A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 11, No. 7, 674 - 693, 1989
- [24] S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, Second edition, Elsevier, Orlando, 1999.
- [25] I.W. Selesnick, R.G. Baraniuk, N.G. Kingsbury, The Dual-Tree Complex Wavelet Transform; A coherent framework for multiscale signal and image processing, IEEE Signal Processing Magazine, pages 123–151, Nov. 2005.
- [26] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi, Wavelets and their Applications, ISTE Ltd, 2007.
- [27] A. Petropulu, Detection of Transients using Discrete Wavelet Transform, ICASSP-92: IEEE Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Processing, 2, 477-480, 1992.
- [28] : A. Abbate, J. Koay, J. Frankel, S.C. Schroeder, P. Das, Application of Wavelet Transform Signal Processor to Ultrasound, Proc. 1994 Ultrasonic Symposium, 94CH3468-6, 1147-1152, 1994.
- [29] A. Khellouki, H.Maiz, J. Rech, H. Zahouani, Application de la Méthode des Plans d'Expériences à la Caractérisation du Procédé de Toilage de Superfinition, Integrated Desing and Production – 4th International Conference, Casablanca, Maroc, Nov. 2005.
- [30] J. Rech, A. Moisan, Le Toilage : un Moyen d'Optimisation de l'Intégrité des Surfaces Usin es, Congrès Français de Mécanique, 16 me, Nice, France, Sept 2003.
- [31] E. Sura, Analyse Tribo-Energétique du Procédé de Toilage des Portées Cylindriques en Acier Traité et en Fonte   Graphite Sph roidal, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, N : 2007 ENAM 0043, 2007.
- [32] A. Van Gorp, M. Bigerelle, M. EL Mansori, P. Ghidossi, A. Iost, Effects of Working Parameters on the Surface Roughness in Belt Finishing Process: the Size-Scale

- Estimation Influence, *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol. 38, No 1/2010, 16-34.
- [33] A.C. Bozzi , J.D. De Mello, Wear Resistance and Mechanisms of WC-12% Co Thermal Sprayed Coatings in three-body abrasion, *Wear* 233-235, 575-587, 1999.
- [34] W. B. Rowe, L. D. Marinescu, H. Ohmori, B. Dimitrov, *Tribology of Abrasive Machining Processes*, Elsevier, Second edition, Nov. 2012.
- [35] R.I. Trezona, D.N. Allsopp, I.M. Hutchings, Transition between Two-Body and Three-Body Abrasive Wear: Influence of the Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test, *Wear*, 205-214, 1999.
- [36] M. Bigerelle, B. Hagege, M. El Mansori, Modelisation of Abrasion: Application on Superfinishing by Belt Grinding Process, *Tribology International* 41 11, 992-1001, 2008.
- [37] Ouvrage Collectif, *Aide-mémoire pratique des techniques statistiques*, CERESTA, Paris, 1994.
- [38] R.G. Lomax, *Statistical Concepts: A Second Course*, p. 10, ISBN 0-8058-5850-4, 2007.
- [39] S. Sawilowsky, Fermat, Schubert, Einstein, and Behrens-Fisher: The Probable Difference Between Two Means When $\sigma_1 \neq \sigma_2$, *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 1(2), 461–472, 2002.

CHAPITRE 3

ANALYSE MULTI-ECHELLE DES SURFACES ABRASEES PAR ONDELETTES CONTINUES

Dans ce chapitre, les profils de surfaces générées après les opérations de finition et d'abrasion ont été caractérisés par une analyse multi-échelle basée sur la transformée en ondelettes continue. Après un rappel développant la théorie mathématique de la méthode d'ondelette continue, l'algorithme de la transformée en ondelettes continue, son aptitude à réaliser une analyse multi-échelle en localisant les fréquences dans l'espace (ou le temps) sont présentés. Par la suite, l'effet de l'ondelette sur l'analyse des surfaces abrasives est testé en utilisant deux familles d'ondelette continue le « chapeau mexicain » et l'ondelette de Morlet.

1 Contexte

La forme de chaque profil de rugosité après le procédé de finition et d'abrasion dépend de la forme de la pointe de l'outil, des paramètres de coupe et des propriétés mécaniques du matériau de la pièce utilisée. Les profils de rugosité, dans de nombreux cas, sont partiellement ou totalement non-stationnaire [1] et, par conséquent, des techniques de traitement spéciales sont nécessaires pour analyser correctement ces profils et déterminer leurs paramètres. Cela est dû au fait que les profils de surfaces réelles contiennent de nombreuses caractéristiques non stationnaires telles que les dérives, les tendances et les changements brutaux, qui ne peuvent être détectés au moyen de l'analyse de Fourier classique.

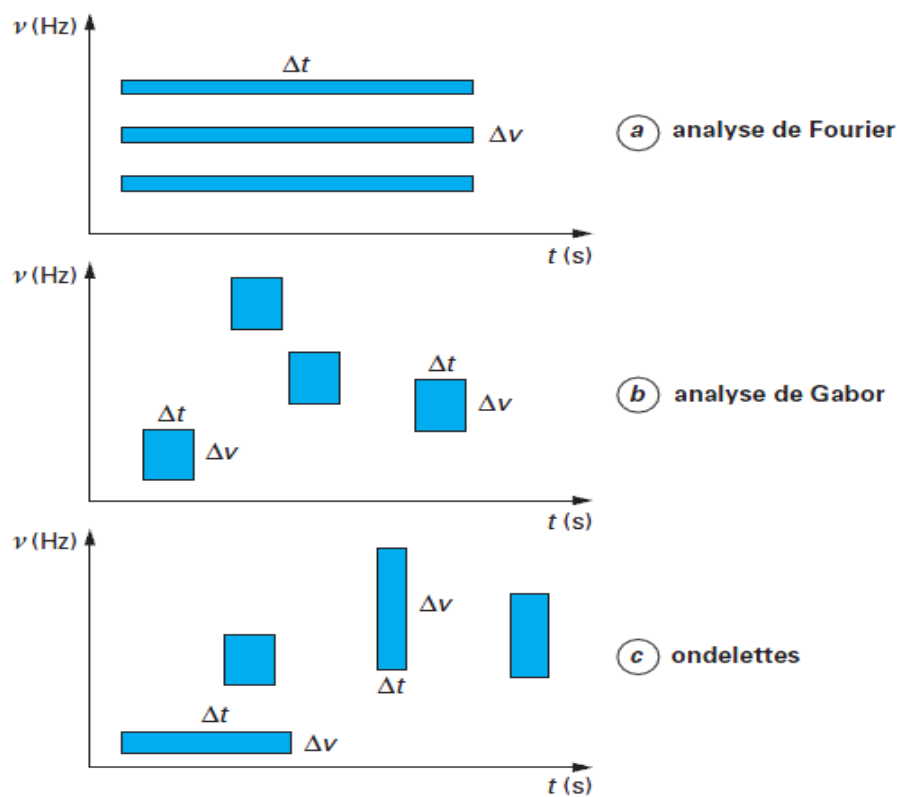


Figure 42 : comparaison entre les différentes décompositions (Fourier, Gabor et ondelettes). Pour l'analyse de Fourier, Δv est fixé à l'échantillonnage, est égal à la durée du signal (aucune localisation temporelle). Pour l'analyse de Gabor, les valeurs de Δt et Δv sont constantes, imposées par la taille de la fenêtre. Pour les ondelettes, ces valeurs évoluent suivant les fréquences en gardant Q constant. (D'après [2]).

Une des techniques possibles pour détecter ces caractéristiques est la transformée en ondelette. Nous avons vu dans le chapitre qui précède que la transformée en ondelette a été développée comme une alternative à la transformée de Fourier pour surmonter les problèmes de la résolution en fréquence. De plus, la transformée en ondelette est décrite d'une manière similaire à la transformée de Fourier à fenêtre glissante, mais au lieu d'utiliser des fonctions périodiques dans la transformation, la transformée en ondelette est basée sur l'utilisation

d'une fenêtre automatiquement ajustable (voir Figure 42), de courtes fenêtres en hautes fréquences et de longues fenêtres en basses fréquences. Les fonctions de base appelées ondelettes filles (ondelettes analysantes) sont toujours à la base de l'analyse d'ondelette. Elles sont obtenues à partir d'une simple ondelette de prototype (appelée ondelette mère) par des dilatations et des contractions aussi bien que des translations.

Dans ce chapitre, une analyse multi-échelle en utilisant la transformée en ondelettes continues (CWT, Continuous Wavelet Transform) est effectuée sur les profils mesurés pour trouver les relations entre le processus de finition et la rugosité de la surface. Le but est d'identifier le paramètre de rugosité le plus pertinent et la longueur caractéristique permettant d'évaluer l'influence des processus de finition, et de tester la pertinence de l'échelle de mesure. L'effet du choix de l'ondelette mère sur les résultats de cette analyse est testé sur deux types d'ondelettes : le « chapeau mexicain » et l'ondelette de Morlet.

2 Analyse multi-échelle par ondelettes continues

2.1 Principe et conditions d'existence des ondelettes

La transformée en ondelettes continue est une méthode d'analyse temps-fréquence qui diffère de la transformée de Fourier à fenêtre glissante (analyse de Gabor) par l'utilisation des fenêtres d'analyse de tailles variables, qui sont en relation avec l'échelle d'observation. Cette méthode permet une analyse multi-résolution des données de la surface et rend compte de l'évolution au cours du temps du contenu fréquentiel du profil. On examine ces données en utilisant une gamme très étendue d'échelles. En parcourant le profil des échelles grossières vers les échelles fines, les ondelettes effectuent un « zooming » sur n'importe quel phénomène intéressant du signal qui a lieu à une petite échelle au voisinage du point considéré. Pour une faible résolution, on utilise des ondelettes larges. Alors qu'une grande résolution est obtenue par un grand nombre de petites ondelettes qui permettent une analyse plus fine [3]. Cette capacité d'adaptation en fonction de l'échelle d'analyse est décrite par Chen comme un microscope optique, dont les grossissements des objectifs sont les ondelettes analysantes à différentes largeurs ou échelles [4]. Le grossissement du microscope augmente avec la compression des ondelettes analysantes, et révèle les plus petits détails.

La représentation temps-fréquence manifeste deux actions réciproques : l'analyse et la synthèse. Cette représentation met en jeu deux paramètres (a et b), où a est le paramètre de contraction ou de dilatation (a est lié à la fréquence), et b est le paramètre de translation (b est lié au temps). Les coefficients $C_{a,b}$ que l'on attribue à chaque ondelette analysante $\Psi_{a,b}$ pour décomposer le signal, contiennent des informations directes sur les propriétés temporelles et fréquentielles du signal étudié. La Figure 43 montre que le pavage du plan temps-échelle des coefficients $C_{a,b}$ n'est pas régulier comme celui du plan temps-fréquence dans le cas d'une analyse de Gabor. Ce type de pavage donne une précision en temps et en fréquence variable en fonction du paramètre a : une résolution temporelle plus importante pour les hautes fréquences que pour les basses fréquences et, inversement, une résolution fréquentielle plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes fréquences.

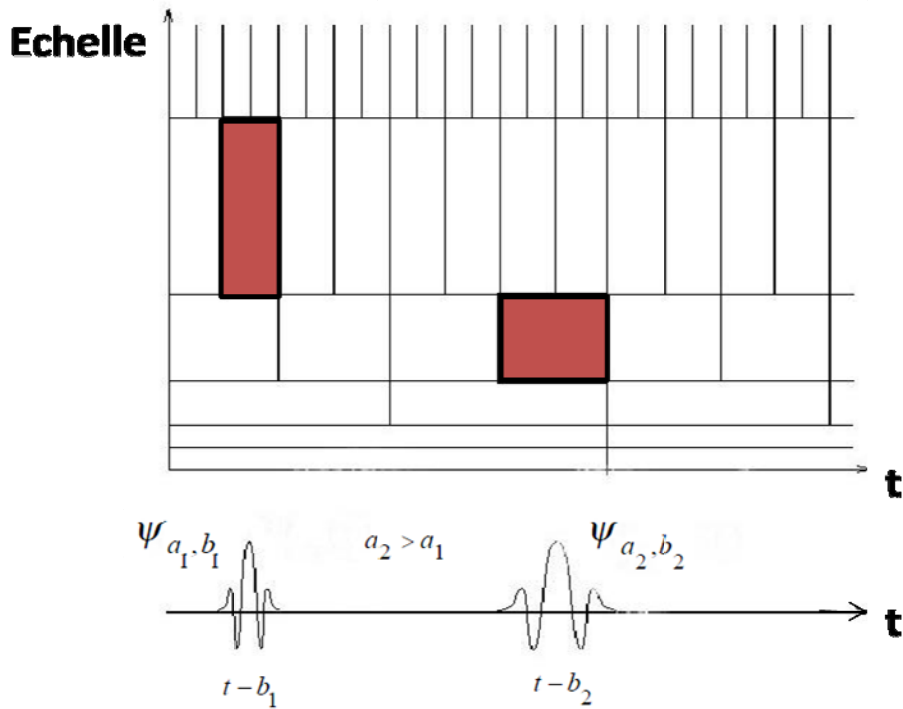


Figure 43 : Les deux opérations de base d'ondelettes : la traduction et la dilatation qui définissent un pavage dans le plan Temps-Echelle (ou Espace-Echelle).

L'ondelette analysante $\Psi_{a,b}$ doit être bien localisée dans le temps, de sorte que les coefficients $C_{a,b}$ dépendent seulement des valeurs que prend le signal dans l'intervalle de temps sur lequel la fonction $\Psi_{a,b}$ n'est pas négligeable [5].

La synthèse donne les protocoles permettant de reconstruire un signal à partir des coefficients $C_{a,b}$ fournis par la décomposition. D'après Meyer, une reconstruction est « robuste » si elle ne demande pas une précision extrême sur les valeurs des coefficients $C_{a,b}$. Nous montrons dans la suite de ce chapitre que la synthèse par ondelettes continues est considérablement robuste.

Pour parler d'une ondelette analysante, il faut en plus de cela que l'ondelette soit admissible, c'est-à-dire que la transformée de Fourier de l'ondelette soit nulle pour la fréquence nulle, ce qui implique que $\psi(t)$ a une valeur moyenne nulle, afin que la reconstruction du signal soit possible.

2.2 Familles d'ondelettes et ondelettes mère

Les ondelettes analysantes $\Psi_{a,b}$ sont des fonctions localisées en temps autour d'un paramètre b et oscillant à une fréquence égale à $1/a$. Ce qui assure une grande stabilité numérique dans la reconstruction et la manipulation. Ces fonctions forment une famille d'ondelettes, et elles sont générées par translation et dilatation d'une seule et même fonction, l'ondelette mère $\Psi(t)$, de moyenne nulle, selon l'équation suivante:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (25)$$

Avec $a > 0$ comme paramètre de contraction ou de dilatation, et b comme paramètre de translation. Pour une valeur de $a < 1$, l'ondelette est contractée. Elle s'adapte alors aux discontinuités du signal, l'analyse observe donc les composantes du signal qui oscillent rapidement (les hautes fréquences). Au contraire, pour une valeur de $a > 1$, l'ondelette est dilatée. L'analyse regarde les oscillations lentes (basses fréquences). Le facteur $\frac{1}{\sqrt{a}}$ assure une normalisation L^2 .

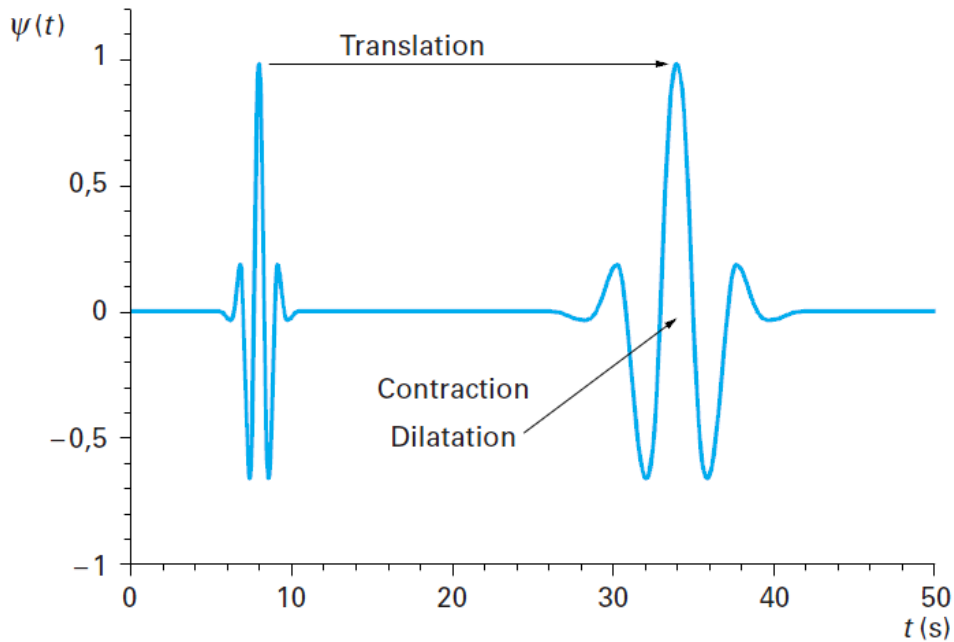


Figure 44 : Translation et changement de taille de l'ondelette mère $\Psi(t)$. (D'après [2]).

Par rapport à l'analyse de Gabor, le nombre d'oscillations est constant pour toutes les ondelettes analysantes. La Figure 44 représente la translation et le changement de taille de l'ondelette mère $\Psi(t)$. L'idée de base consiste donc à « jouer à l'accordéon » avec l'ondelette mère $\Psi(t)$ pour lui faire prendre toutes les tailles (et donc échelles) possibles, à chaque instant [5]. Une famille d'ondelettes « Ω », ayant la même énergie, engendrée à partir de l'ondelette mère est ainsi construite:

$$\Omega = \left\{ \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) , \quad a \in \mathbb{R}_+^* \text{ et } b \in \mathbb{R} \right\} \quad (26)$$

Dans le travail présent, nous utilisons deux familles d'ondelettes :

- L'ondelette de Morlet, il s'agit d'une gaussienne modulée par une exponentielle complexe. Cette ondelette et sa transformée de Fourier sont représentées dans la Figure 45.a. L'ondelette mère de Morlet est donnée par l'équation suivante :

$$\Psi(t) = \cos(5t) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (27)$$

L'ondelette de Morlet est une ondelette régulière, complexe et symétrique. Elle possède une décroissance exponentielle en temps et en distance qui lui assure une localisation optimale en temps et en fréquence. L'ondelette de Morlet ne vérifie pas la condition d'admissibilité. La TF d'une gaussienne modulée à une fréquence f_0 par une fonction oscillante est une gaussienne centrée sur f_0 dans l'espace des fréquences, et donc toujours strictement positive. Numériquement toutefois, on peut les considérer comme nulles en dessous d'une valeur minimale ou ajouter un terme correctif pour vérifier la condition d'admissibilité.

- Le « chapeau mexicain », c'est la dérivée seconde d'une gaussienne. Cette ondelette et sa transformée en Fourier sont représentées dans la Figure 45.b. L'ondelette mère « chapeau mexicain » est donnée par l'expression suivante :

$$\psi(t) = (2 - t^2)e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (28)$$

Le « chapeau mexicain » est une ondelette radiale et symétrique qui admet de bonnes propriétés de localisation à la fois dans le domaine spatial et dans le domaine fréquentiel, elle vérifie bien les conditions d'admissibilité et possède un comportement filtre passe-bande.

2.3 Aspects mathématiques de la transformée en ondelettes continues

Une transformée en ondelettes est dite continue lorsque les paramètres de dilatations (a) et les paramètres de translations (b) peuvent prendre n'importe quelle valeur de l'ensemble des réels R (les paramètres (a) doivent être strictement positifs).

Une transformée en ondelettes accorde aux paramètres a et b la valeur du coefficient $C_{a,b}$ de l'ondelette $\Psi_{a,b}$. Elle est décrite par l'expression suivante :

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (29)$$

Où le symbole $\Psi^*(.)$ désigne la conjugaison complexe de l'ondelette mère $\Psi(t)$.

Mathématiquement, le coefficient $C_{a,b}$ est défini comme le produit scalaire du signal $S(t)$ et de la fonction analysante $\Psi_{a,b}(t)$. Le paramètre (a) détermine les résolutions temporelles et fréquentielles de l'ondelette analysante $\Psi_{a,b}^*(t)$.

Lorsque le signal oscille à la même fréquence que l'ondelette, leur produit scalaire, représentant leur « corrélation », devient maximal ; la valeur du coefficient $C_{a,b}$ est élevée. Au contraire, si les deux échelles sont différentes, on calcule le produit d'une fonction de moyenne nulle par une fonction presque constante, la valeur du coefficient $C_{a,b}$ est donc voisine de zéro [6]. L'ensemble des coefficients $C_{a,b}$ correspondants aux différents couples(a,b) forment les coefficients en ondelettes du signal $S(t)$ corrélatif à la famille d'ondelettes considérée. Chaque coefficient $C_{a,b}$ est proportionnel à l'énergie du signal $S(t)$ et mesure ses oscillations autour du point (b) et à l'échelle (a) [7].

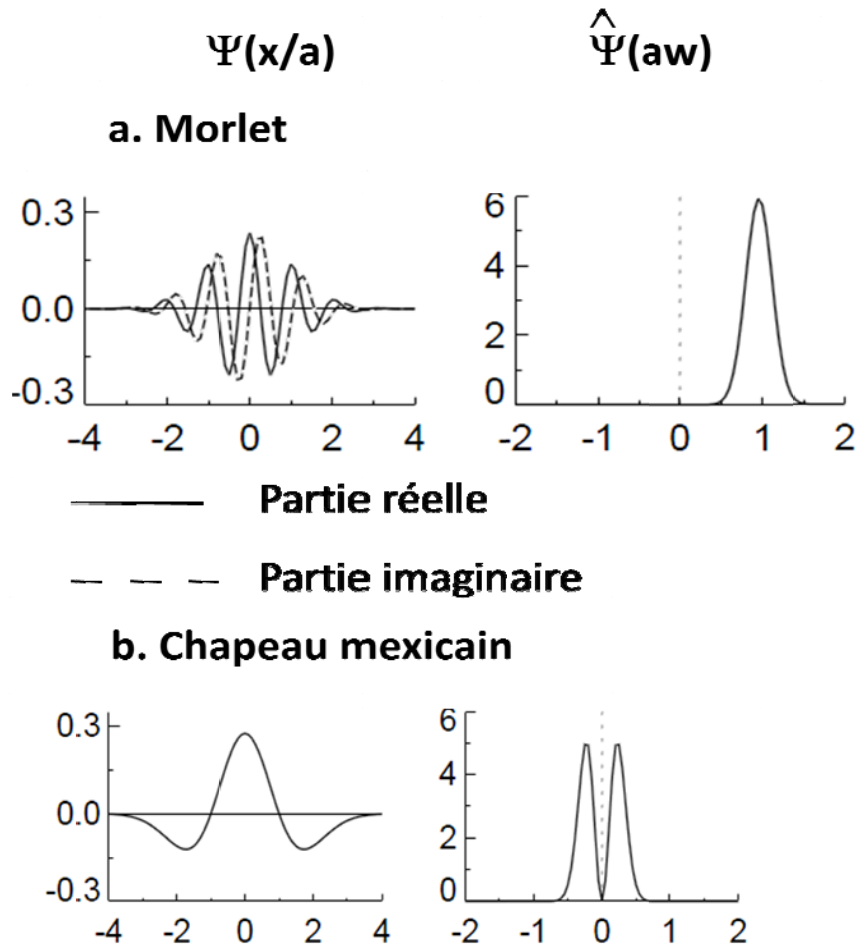


Figure 45 : Les courbes sur la gauche donnent la partie réelle (courbe continue) et la partie imaginaire (en pointillés) pour les ondelettes dans le domaine temporel. Les courbes sur la droite donnent les ondelettes correspondant dans le domaine fréquentiel (la transformée de Fourier de ces ondelettes). (a) pour l'ondelette de Morlet et (b) pour le « chapeau mexicain ».

2.4 Transformée en ondelettes inverse

Sous réserve de vérifier la condition d'admissibilité, la transformée en ondelettes continue est inversible. Cette transformée est un filtre passe-bande avec une fonction de réponse connue (l'ondelette mère), il est possible de reconstituer le signal original, après décomposition, tout en conservant l'énergie en utilisant soit la dé-convolution, soit le filtre inverse [8].

L'analyse est effectuée par le calcul de produits scalaires, et la synthèse consiste à additionner toutes les projections orthogonales du signal sur les ondelettes suivant l'équation suivante :

$$S = \int \dots \int \dots \quad (30)$$

Où $\hat{\psi}_{a,b}$ est nommée la famille d'ondelettes duale et C_{Ψ} est une constante qui dépend seulement de l'ondelette mère $\Psi(t)$.

Bien sûr, $\hat{\psi}_{a,b}(t)$ ne sont pas orthogonales, car elles sont très redondantes (elles sont définies pour faire varier continuellement les paramètres a et b). Mais, l'équation de reconstruction est applicable à chaque fois où l'ondelette mère $\Psi(t)$ est d'énergie finie et de bande passante bornée (ce qui implique qu'elle oscille dans le temps comme une onde courte, d'où le nom « ondelettes »). Plus précisément, si $\Psi(t)$ est supposée suffisamment régulière, alors la condition de reconstruction est :

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (31)$$

Cette Condition indique que l'ondelette mère doit être de moyenne nulle.

3 Algorithme de caractérisation multi-échelle par ondelette continue

La transformée en ondelettes continue consiste à calculer la convolution du signal par l'ondelette mise à l'échelle. Elle utilise des échelles aléatoires ainsi que des ondelettes arbitraires. Les ondelettes analysantes ne sont pas orthogonales et les données obtenues par CWT sont fortement corrélées. Cette transformée peut être aussi utilisée pour analyser les profils discrets dans l'espace, avec la limitation que les translations des plus petites ondelettes analysantes soient égales au pas d'échantillonnage des données.

La caractérisation multi-échelle de surface en utilisant la transformée en ondelettes continues se compose de trois opérations [9] :

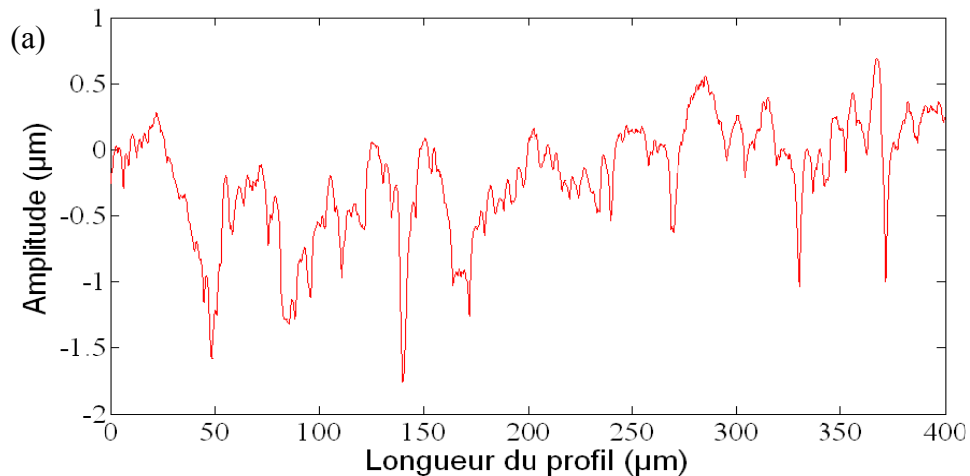
- Analyse du profil en appliquant la transformée en ondelettes continues pour déterminer les coefficients d'ondelettes $C_{a,b}$. Les différentes étapes de calcul de l'analyse par ondelettes sont représentées dans la Figure 46. Ensuite, l'algorithme de calcul des coefficients $C_{a,b}$ est montrée dans la Figure 47. Cet algorithme peut être basé sur une convolution directe ou par une convolution réalisée par une multiplication dans l'espace de Fourier (aussi appelée transformée en ondelettes rapide).
- Application de la transformée en ondelettes continues inverse. La Figure 48 représente l'algorithme de calcul de la transformée inverse en ondelettes continues. Plus de détails sur l'algorithme de la transformée en ondelettes continues inverse peuvent être trouvés dans [10], [11], [12], et [13].
- Calcul des différents paramètres de rugosité à chaque échelle d'analyse.

Figure 46 : Les différentes étapes de calcul de la transformée en ondelette continue

Figure 47 : Algorithme de calcul de la transformée en ondelettes continues

Figure 48 : Algorithme de calcul de la transformée inverse en ondelettes continues

En appliquant cette procédure, on obtient une décomposition multi-échelle du profil de la surface étudiée. La Figure 49 élabore un exemple de décomposition multi-échelle d'un profil mesuré sur une surface abrasive. Cette décomposition est obtenue en appliquant la transformée en ondelette continue directe du profil en utilisant le chapeau mexicain, puis sa transformée inverse. En regroupant les échelles en bandes, on peut décomposer le profil en trois domaines : la « forme » pour les grandes échelles (les composantes basses fréquences), « l'ondulation » qui représente les échelles intermédiaires (les fréquences moyennes) et la « rugosité » qui représente les petites échelles (la fréquence élevée des composants).



(b)

Figure 49 : Décomposition multi-échelle d'un profil d'une surface abrasive : (a) signal topographique, (b) plan de reconstruction montrant les échelles caractéristiques des composantes de la surface abrasive en utilisant le chapeau mexicain comme ondelette mère

4 Applications de l'analyse par ondelettes continues sur des surfaces abrasives

Nous avons appliqué la transformée en ondelettes continues sur les surfaces abrasives décrites dans le paragraphe 5 du chapitre 2.

Les Figure 50, Figure 51, et Figure 52 représentent respectivement un profil initial (X), enregistré à partir du premier échantillon, et ses profils reconstruits (Xrec) par les deux ondelettes : chapeau mexicain (Xrec_mexh) et l'ondelette de Morlet (Xrec_morl). La reconstruction du profil en utilisant la transformée en ondelettes inverse est très précise et l'erreur relative est presque négligeable. La similitude entre le profil initial et les profils reconstruits a été testée en calculant le facteur suivant :

$$S = \frac{[(X - \text{moyen}(X)) \times (Xrec - \text{moyen}(Xrec))]}{(Xrec - \text{moyen}(Xrec))^2} \quad (32)$$

$$S = \left\{ \begin{array}{ll} 1.00007711 & \text{pour Xrec_mexh} \\ 0.99711038 & \text{pour Xrec_morl} \end{array} \right\} \text{ à partir du 1}^{\text{ier}} \text{ échantillon}$$

Le Tableau 10 représente les valeurs de quelques paramètres de rugosité calculées à partir de X, Xrec_mexh et Xrec_morl. On remarque que l'erreur absolue est presque négligeable, ce qui confirme la précision de cette reconstruction.

Les Figure 53, Figure 54, et Figure 55 donnent un autre exemple sur un profil initial (X), enregistré à partir du quinzième échantillon, et ses profils reconstruits (Xrec) par les deux ondelettes : chapeau mexicain (Xrec_mexh) et l'ondelette de Morlet (Xrec_morl).

$$S = \left\{ \begin{array}{ll} 0.99999385 & \text{pour Xrec_mexh} \\ 1.00002842 & \text{pour Xrec_morl} \end{array} \right\} \text{ à partir du 15}^{\text{ième}} \text{ échantillon}$$

Les valeurs de « S » confirment la régularité de la reconstruction en utilisant la transformée en ondelettes inverse.

Le Tableau 11 représente les valeurs de quelques paramètres de rugosité calculés à partir de X du 15^{ième} échantillon, et ses profils reconstruits Xrec_mexh et Xrec_morl. L'erreur absolue est toujours négligeable, ce qui met en évidence la précision de cette reconstruction.

Figure 50 : Profil initiale, Profil mesuré sur le premier échantillon.

*Figure 51 : Profil du 1^{ère} échantillon reconstruit en utilisant l'ondelette « chapeau mexicain »
(Mexican Hat).*

Figure 52 : Profil du 1^{ière} échantillon reconstruit par l'ondelette « morlet ».

	Ra	Rq	Sk	Rt	Rz	Rp	Rv
Profil initial mesuré sur l'échantillon n°1	0.3021	0.3970	-1.1420	3.6897	3.0487	0.7604	-2.2883
Profil reconstruit par l'ondelette « chapeau mexicain »	0.3021	0.3969	-1.1414	3.6794	3.0425	0.7597	-2.2827
Erreur absolue	0.0	0.0002	0.0005	0.002	0.002	0.0009	0.002
Profil reconstruit par l'ondelette « Morlet »	0.3030	0.3979	-1.1380	3.7060	3.0566	0.7681	-2.2884
Erreur absolue	0.002	0.0002	0.003	0.004	0.002	0.01	0.0004

Tableau 10 : les valeurs de quelques paramètres de rugosité calculés à partir : d'un profil initial mesuré sur l'échantillon n°1, et de ces deux profils reconstruit par les deux ondelettes « chapeau mexicain » et « morlet ».

Figure 53 : Profil initial, profil mesuré sur le 15^{ième} échantillon.

Figure 54 : Profil du 15^{ième} échantillon reconstruit par l'ondelette « chapeau mexicain » (Mexicain Hat).

Figure 55 : Profil du 15^{ième} échantillon reconstruit par l'ondelette « morlet ».

	Ra	Rq	Sk	Rt	Rz	Rp	Rv
Profil initial mesuré sur l'échantillon n°15	0.6403	0.8140	-0.0612	6.3980	4.9343	2.3772	-2.5571
Profil reconstruit par l'ondelette « chapeau mexicain »	0.6403	0.8140	-0.0612	6.3879	4.9278	2.3768	-2.5509
Erreur absolue	0.0	0.0	0.0	0.001	0.001	0.0001	0.002
Profil reconstruit par l'ondelette « Morlet »	0.6383	0.8134	-0.0503	6.3974	4.9518	2.3813	-2.5704
Erreur absolue	0.003	0.0007	0.1	0.00009	0.003	0.001	0.005

Tableau 11 : les valeurs de quelques paramètres de rugosité calculés à partir : d'un profil initial mesuré sur l'échantillon n°15, et de ces deux profils reconstruits par les deux ondelettes « chapeau mexicain » et « morlet ».

5 Analyse multi-échelle des paramètres de rugosité

En utilisant le concept de la transformée en ondelettes continues, chaque profil est analysé avec les deux ondelettes retenues. Chaque profil est décomposé en $16 \cdot n$ profils, où n est le nombre total du niveau de décomposition (dans cette étude : $n=34$ pour la décomposition avec le chapeau mexicain, et $n = 29$ en utilisant l'ondelette de Morlet). Ensuite, les différents paramètres de rugosités sont calculés sur chaque profil résultant de la décomposition obtenue.

L'évolution du paramètre de rugosité R_q (paramètre de moyenne quadratique) par rapport à l'échelle de la décomposition en ondelettes et suivant deux niveaux de rigidité du galet (forte et faible), est représentée par la Figure 56 pour l'analyse par le chapeau mexicain et la Figure 57 pour l'analyse par l'ondelette de Morlet. Ces graphes montrent que la différence entre les valeurs du paramètre de rugosité (R_q) à chaque niveau de rigidité de galet varie avec l'échelle.

Figure 56 : Evolution du paramètre de rugosité R_q par rapport à l'échelle de la décomposition en ondelettes obtenue par l'analyse des profils correspondant à deux niveaux de rigidité du galet (forte et faible), en utilisant le « chapeau mexicain » comme ondelette mère.

D'après ces graphiques, on peut remarquer que :

- Le paramètre de rugosité R_q dépend de l'échelle.
- La valeur de ce paramètre diffère entre les deux niveaux de rigidité du galet.
- Deux valeurs maximales de R_q sont localisées par les deux ondelettes à deux échelles caractéristiques.

Figure 57 : Evolution du paramètre de rugosité R_q par rapport à l'échelle de la décomposition en ondelettes obtenue par l'analyse des profils correspondant à deux niveaux de rigidité du galet (forte et faible), en utilisant l'ondelette de Morlet.

6 Méthode d'analyse statistique

L'objectif principal de cette étude est de déterminer si un paramètre de rugosité R , calculé par une ondelette (W) pris à une échelle ε , distingue l'effet d'un paramètre de procédé donné (P) et, plus précisément, quelle échelle de la transformée en ondelettes sera la plus appropriée. Nous notons $R(W, \varepsilon)$ le paramètre de rugosité pris sous ces conditions. Avec $\varepsilon = S_0 \cdot (2^{j/2})$, j représente le niveau de décomposition et $S_0 = x \cdot dt$, où dt est le pas d'échantillonnage du profil initial, $x = 0.7$ dans le cas d'analyse par le chapeau mexicain et $x = 3.6$ dans le cas d'analyse par l'ondelette de Morlet.

Il s'agit de déterminer l'influence des paramètres du procédé (P) sur les mesures effectuées; ou la pertinence d'une mesure pour mettre en évidence un ou plusieurs phénomènes physiques mis en jeu dans un procédé. Pour cela, les données mesurées ont été traitées par une analyse de la variance. Cette analyse est exécutée à différentes échelles ε et ainsi pour les familles d'ondelettes précédemment mentionnées. L'équation de R est définie comme suit [37] :

(16)

Où $R(W, \varepsilon, K_1, K_2, \dots, K_p, n)$ est la valeur du paramètre de rugosité du $n^{\text{ième}}$ profil quand les paramètres du procédé P sont pris aux niveaux k_1, k_2, \dots, k_p , pour une longueur d'évaluation (ε). $\alpha_{Kj}(W, \varepsilon)$ est l'influence sur la valeur de paramètre de rugosité du $j^{\text{ième}}$ paramètre de processus

au niveau K_j et $\beta_{K_j, K_i}(W, \varepsilon)$ est l'interaction entre le $j^{\text{ième}}$ et le $i^{\text{ième}}$ paramètre de procédé et $\xi_{K_1, K_2, \dots, K_p, n}(W, \varepsilon)$ est un bruit Gaussien avec une valeur nulle.

Pour chaque paramètre du procédé et leurs interactions, la variance entre les groupes de valeurs expérimentales et la variance à l'intérieur du groupe (correspondant aux erreurs de l'estimation du paramètre de rugosité dans chaque groupe) est calculée. Le résultat donne le critère de Fisher et il est notée $F(\varepsilon, W, p)$. Plus d'information sur le critère de Fisher peuvent être trouvées dans [38] et [39]. $F(\varepsilon, W, p)$ représente l'effet du paramètre du procédé P sur la valeur du R calculée sur un profil à l'échelle ε et avec une ondelette W . Par exemple, considérant un paramètre du procédé utilisant une ondelette W , une valeur de F plus grande à l'échelle ε_1 comparée à l'échelle ε_2 (c'est-à-dire $F(\varepsilon_1, W, p) > F(\varepsilon_2, W, p)$) implique une pertinence plus grande de l'échelle ε_1 pour décrire l'effet de ce paramètre du procédé.

Cependant, cette théorie statistique conventionnelle ne prend pas en considération le fait qu'une petite variation dans une série de profils identiques influe sur la valeur de l'indice de traitement. C'est pourquoi l'analyse de la variance a été combinée avec la théorie du Bootstrap (décrite dans le chapitre 1). Le but de cette méthode statistique récente est de produire un nombre important noté N (dans cette étude $N=500$) de groupes équivalents de données en procédant à des tirages avec remise à partir d'un groupe de valeurs expérimentales « identiques » d'un paramètre de rugosité donné R . Alors, pour chaque paramètre de rugosité R , un groupe de N valeurs de F_k ($k \in [1, N]$) est obtenu d'où une valeur moyenne F peut être extraite ainsi qu'un intervalle de confiance de 95 %. Statistiquement, un paramètre de rugosité R_i sera plus pertinent qu'un paramètre R_j quand $F_i > F_j$.

7 Résultat et discussion

Le problème principal était de répondre aux questions suivantes:

- Comment choisir l'échelle la plus pertinente donnant la plus grande différence de rugosité entre :
 - 1) les groupes d'échantillons usinés avec deux niveaux de rigidité de galet.
 - 2) les groupes d'échantillons usinés avec deux tailles du grain.
- Quel paramètre quantifie mieux cette différence si elle est significative?
- Est-ce que cette différence dépend de la forme de l'ondelette utilisée dans la décomposition (le choix de l'ondelette)?

7.1 Effet de la rigidité du galet

Les Figure 58 et Figure 59 représentent l'évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_a (écart moyen arithmétique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes pour deux niveaux de rigidité de galet (forte et faible), les ondelettes mères utilisées dans l'analyse sont respectivement le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet.

D'après ces graphes, on remarque que les deux ondelettes utilisées (le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet) arrivent à localiser deux échelles de pertinence du mécanisme, une microscopique et l'autre macroscopique.

Les Figure 60 et Figure 61 représentent l'évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_q (paramètre de moyenne quadratique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes, pour deux niveaux de rigidité de galet (forte et faible), les ondelettes mères utilisées dans l'analyse sont respectivement le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet.

Dans ces graphes, on s'aperçoit que les deux ondelettes (le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet) arrive à détecter les deux échelles de pertinence microscopique et macroscopique de mécanisme pour le paramètre R_q . Ces graphes montrent la détection facile de l'échelle macroscopique de mécanisme avec une intensité importante, alors que l'échelle microscopique a été détectée avec une intensité beaucoup plus faible.

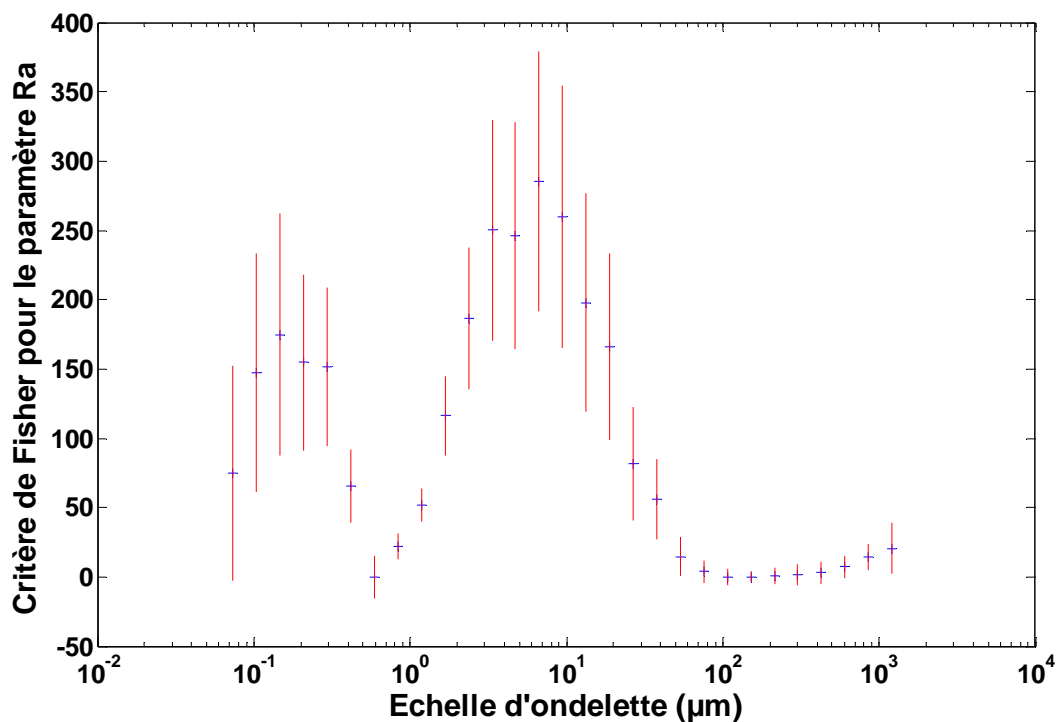


Figure 58 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_a (écart moyen arithmétique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec l'ondelette chapeau mexicain), en utilisant deux niveaux de rigidité de galet (forte et faible).

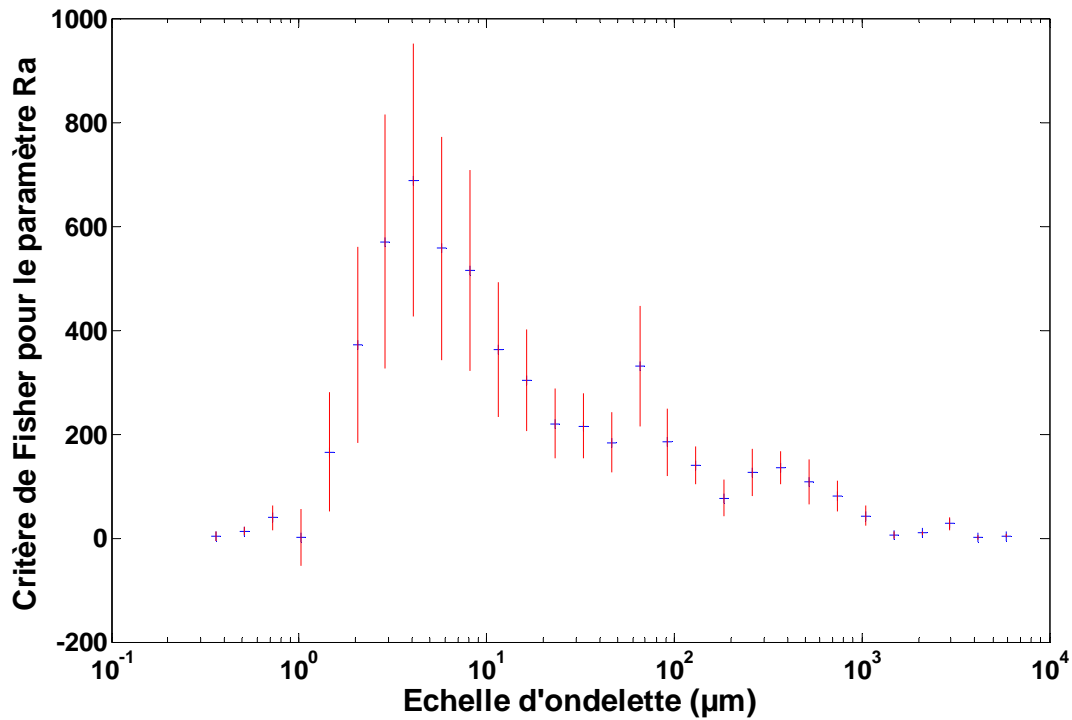


Figure 59 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_a (écart moyen arithmétique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec l'ondelette de **Morlet**), en utilisant deux niveaux de rigidité de galet (forte et faible).

Les Figure 58, Figure 59, Figure 60, et Figure 61 montre des résultats qui amènent à une conclusion similaire à celle trouvée en utilisant les ondelettes discrètes. Une valeur du critère de Fisher qui est supérieure à un pour plusieurs échelles signifie que la rigidité du galet influe sur l'amplitude de la rugosité à ces échelles. Cette influence est due à la transmission de la pression de contact du galet aux grains de la bande abrasive. En effet, un galet à faible rigidité est beaucoup plus apte à être déformé par la pression de contact pour compenser les irrégularités des tailles de grain et de la topographie des surfaces. Dans ce cas, la répartition de la pression sur la surface du galet est plus uniforme ce qui induit une diminution de la pression maximale locale agissant sur les grains et par conséquent une faible pénétration dans la partie toilée, diminuant l'amplitude de rugosité. La largeur moyenne des pics est inférieure à une longueur d'évaluation de la taille des grains. Globalement, le nombre de grains mis en jeu augmente induisant un profil plus aléatoire et une augmentation de la dimension fractale comme on le voit sur la Figure 62. Quand la dureté du galet augmente, la profondeur indentée augmente.

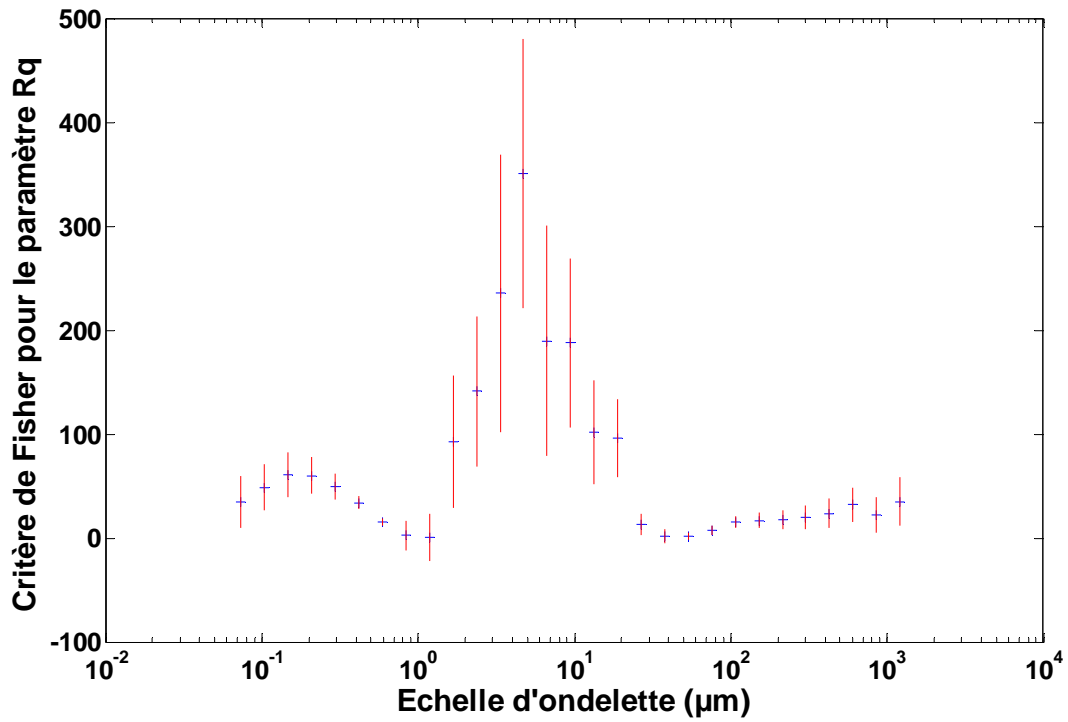


Figure 60 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_q (moyenne quadratique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec l'ondelette **chapeau mexicain**), en utilisant deux niveaux de rigidité de galet (forte et faible).

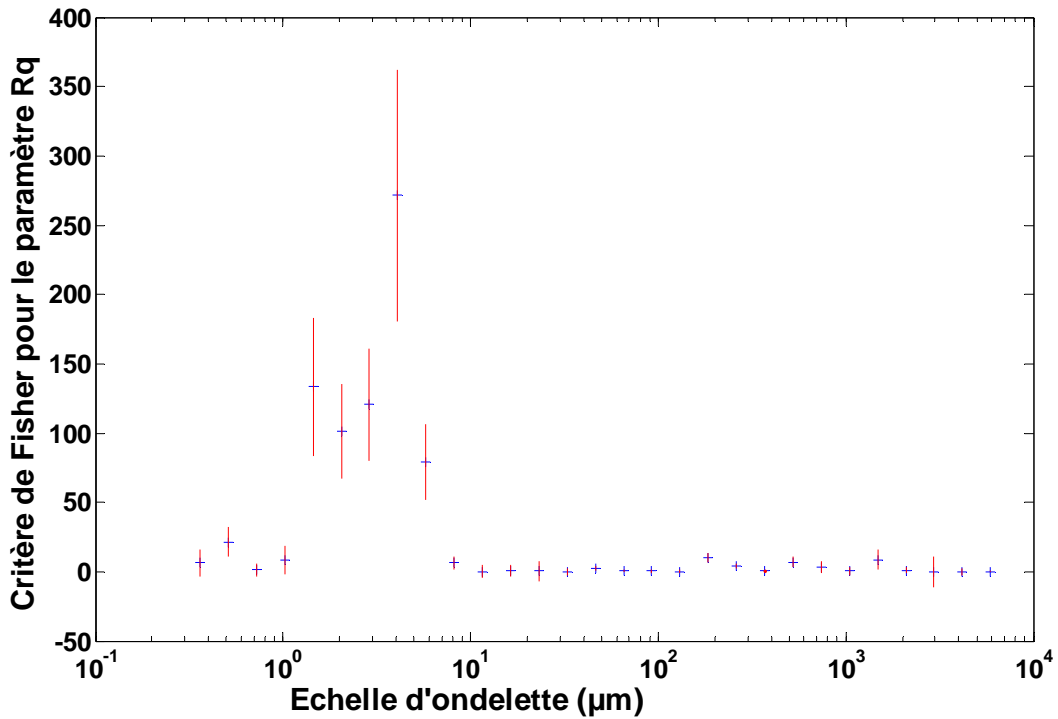


Figure 61 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_q (moyenne quadratique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec l'ondelette de Morlet), en utilisant deux niveaux de rigidité de galet (forte et faible).

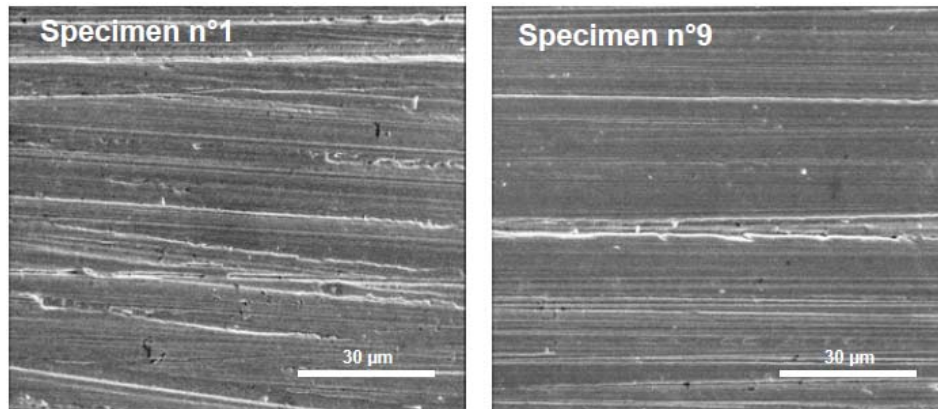


Figure 62 : SEM des échantillons usinés avec une rigidité de galet forte « galet dur » (à gauche) et avec une rigidité de galet faible « galet tendre » (à droite) observées à une échelle correspondant à la longueur d'évaluation de la dimension fractale. (D'après [17])

A l'échelle microscopique, l'effet de la rigidité du galet sur la largeur moyenne des pics est différent. Le fond de stries générées par le passage de la bande est usiné dans le cas d'un galet tendre. En conséquence, la longueur d'onde moyenne est plus courte comme on le voit sur la Figure 63.

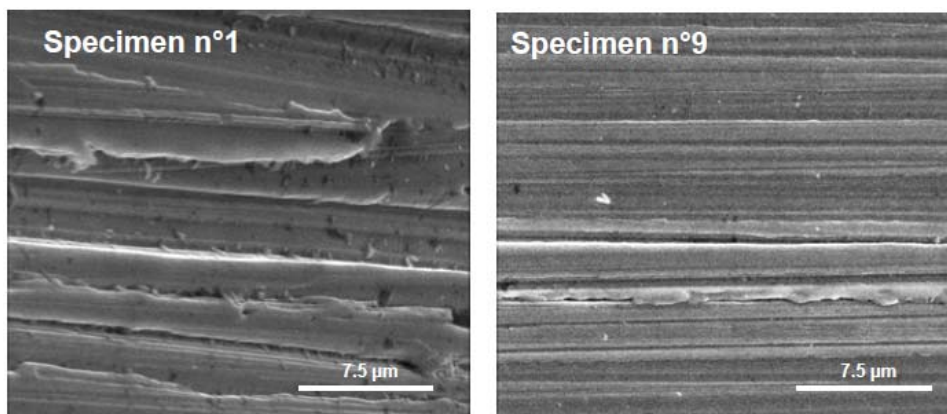


Figure 63 : SEM des échantillons usinés avec une rigidité de galet forte « galet dur » (à gauche) et avec une rigidité de galet faible « galet tendre » (à droite) observées à l'échelle microscopique. (D'après[17]).

7.2 Effet de la taille du grain

La méthode développée dans la section précédente est maintenant utilisée pour étudier l'effet de la taille du grain.

Les Figure 64 et Figure 65 représentent l'évolution du paramètre de rugosité R_a par rapport à l'échelle de la décomposition en ondelettes obtenue par l'analyse des profils correspondant à deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$), en utilisant respectivement le « chapeau mexicain » et « l'ondelette de Morlet » comme ondelette mère.

A partir de ces deux graphs, on observe que la rugosité arithmétique (la valeur de R_a) augmente avec l'augmentation de la taille du grain jusqu'à une échelle d'environ $800\mu\text{m}$. De plus, on peut remarquer que les deux ondelettes (le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet) localisent une valeur maximale pour le paramètre R_a à une échelle caractéristique du mécanisme.

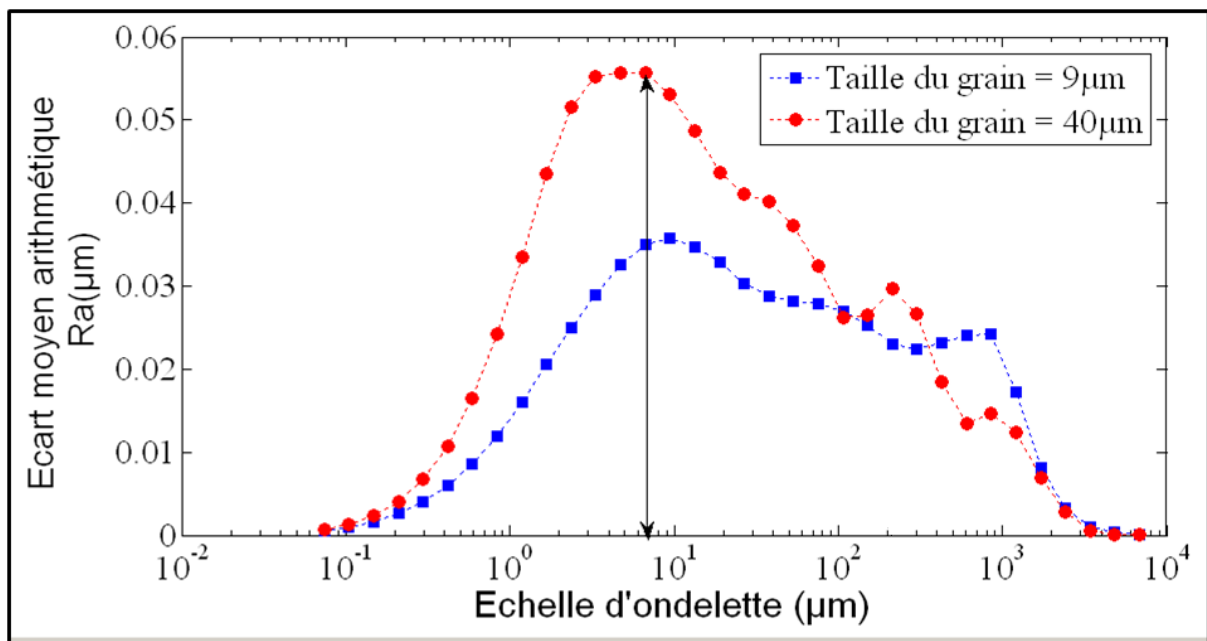


Figure 64 : Evolution du paramètre de rugosité R_a par rapport à l'échelle de la décomposition en ondelettes obtenue par l'analyse des profils correspondant à deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$), en utilisant le « **chapeau mexicain** » comme ondelette mère.

Figure 65 : Evolution du paramètre de rugosité R_a par rapport à l'échelle de la décomposition en ondelettes obtenue par l'analyse des profils correspondant à deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$), en utilisant l'ondelette de Morlet comme ondelette mère.

Les Figure 66 et Figure 67 représentent l'évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher « F ») du paramètre R_a (écart moyen arithmétique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes pour deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$), en utilisant respectivement le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet comme ondelette mère.

On remarque que le chapeau mexicain détecte une pertinence à une échelle microscopique du mécanisme, alors que l'ondelette de Morlet localise une échelle macroscopique pertinente.

Les Figure 68 et Figure 69 représentent l'évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher « F ») du paramètre S_m (moyenne des largeurs des éléments du profil) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes pour deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$), en utilisant respectivement le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet comme ondelette mère. D'après ces graphes, on remarque que le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet localisent une échelle microscopique pertinente du mécanisme, alors qu'elle n'arrive pas à localiser l'échelle macroscopique.

A une échelle macroscopique détectée, les deux tailles de rayures peuvent être observées et les pics ont une largeur moyenne plus élevée pour les pièces usinées avec une taille de grain égale à $40\mu\text{m}$. Sous cette échelle, les pics des profils extraits des surfaces usinées avec une taille du grain égale à $40\mu\text{m}$ sont de plus en plus filtrés par l'ajustement local. En conséquence, dans la zone microscopique de pertinence, les aspérités de la pièce usinée avec une taille du grain égale à $9\mu\text{m}$ sont préservées, alors que les profils de la pièce usinée avec

une taille du grain égale à $40\mu\text{m}$ montrent des micro-rayures dans les rainures (voir Figure 70). Avec une taille du grain égale à $9\mu\text{m}$, les largeurs moyennes des pics sont beaucoup plus élevées que les valeurs enregistrées avec une taille du grain égale à $40\mu\text{m}$ (voir Figure 71). Ce résultat est confirmé par microscopie électronique à balayage de la Figure 70.

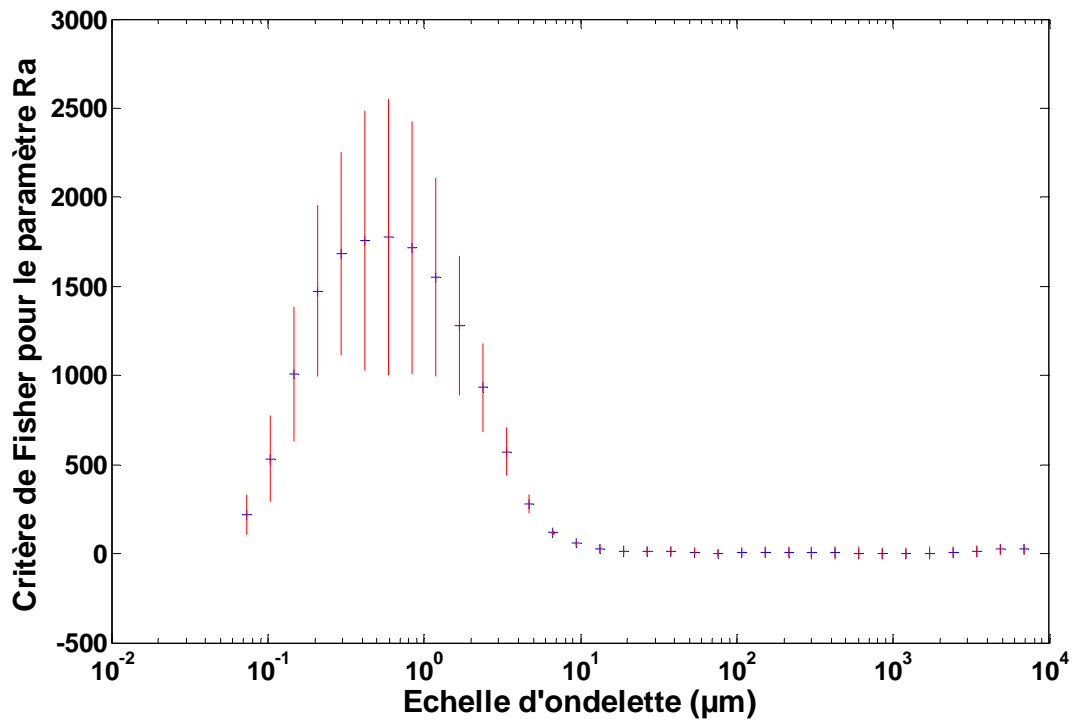


Figure 66 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_a (écart moyen arithmétique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec **le chapeau mexicain**), en utilisant deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$).

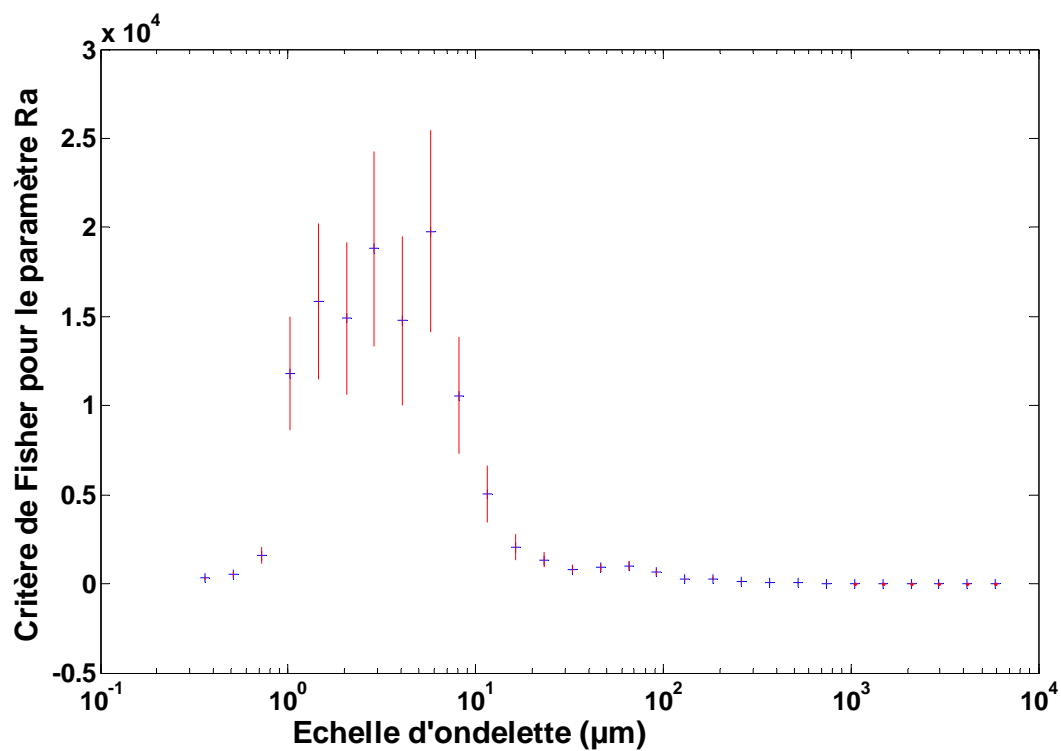


Figure 67 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre R_a (écart moyen arithmétique) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec l'ondelette de Morlet), en utilisant deux tailles du grain (9μm et 40μm).

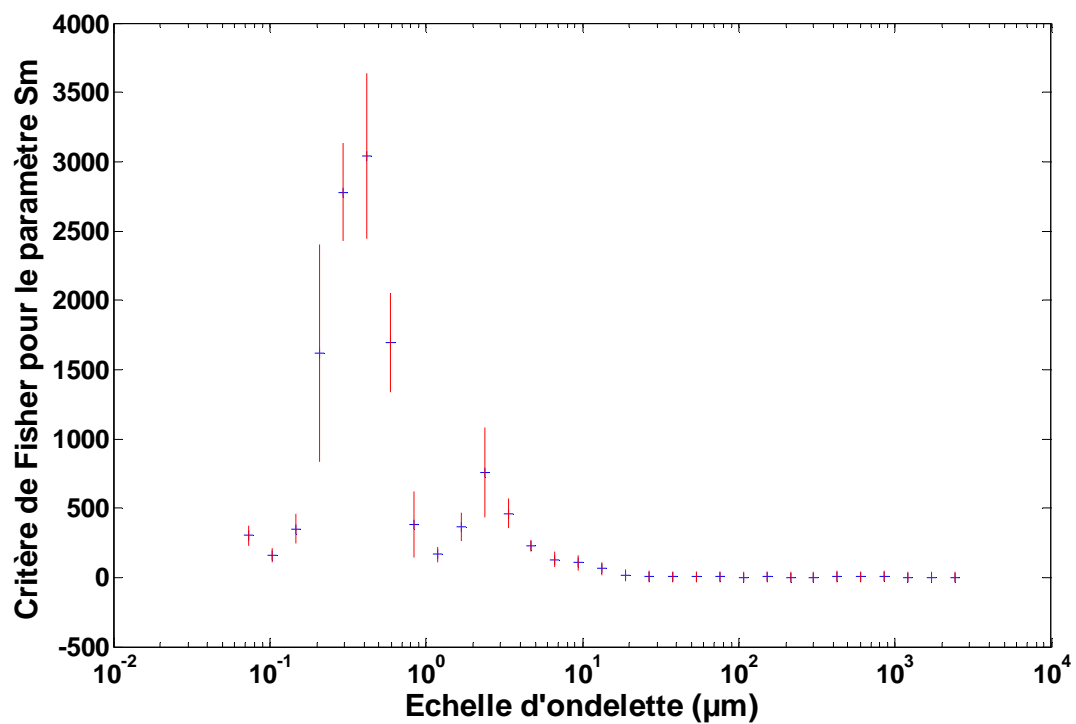


Figure 68 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre S_m (moyenne des largeurs des éléments du profil) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec le **chapeau mexicain**), en utilisant deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$).

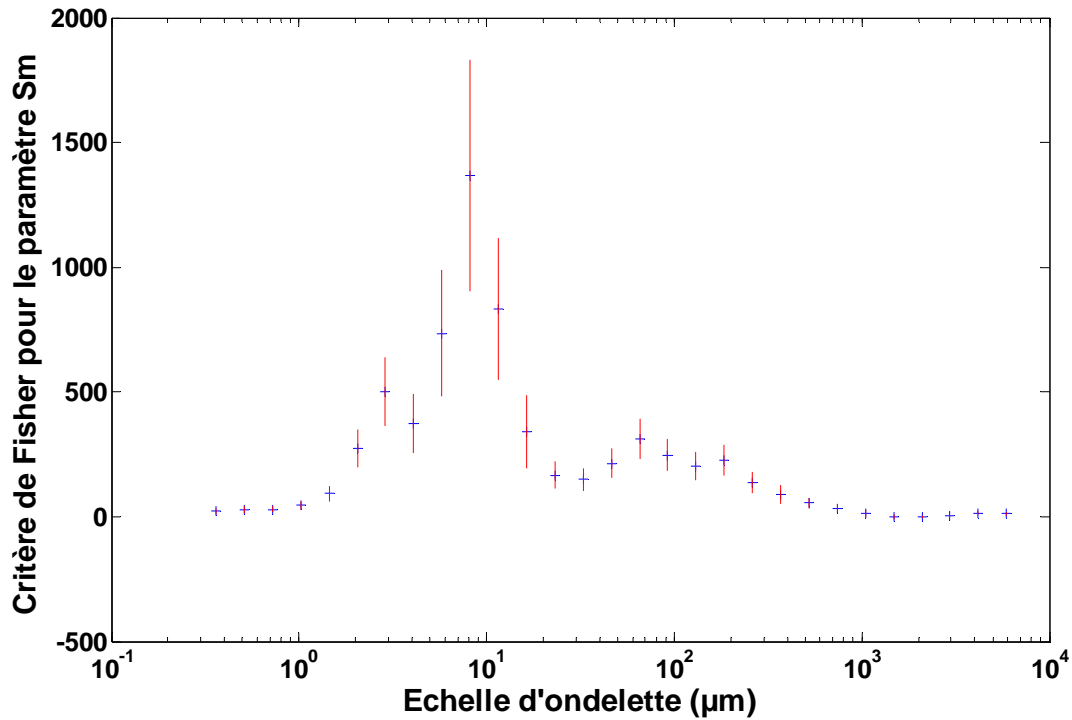


Figure 69 : Évolution de la fonction de pertinence (critère de Fisher "F") du paramètre S_m (moyenne des largeurs des éléments du profil) en fonction de l'échelle de décomposition en ondelettes (avec **l'ondelette de Morlet**), en utilisant deux tailles du grain ($9\mu\text{m}$ et $40\mu\text{m}$).

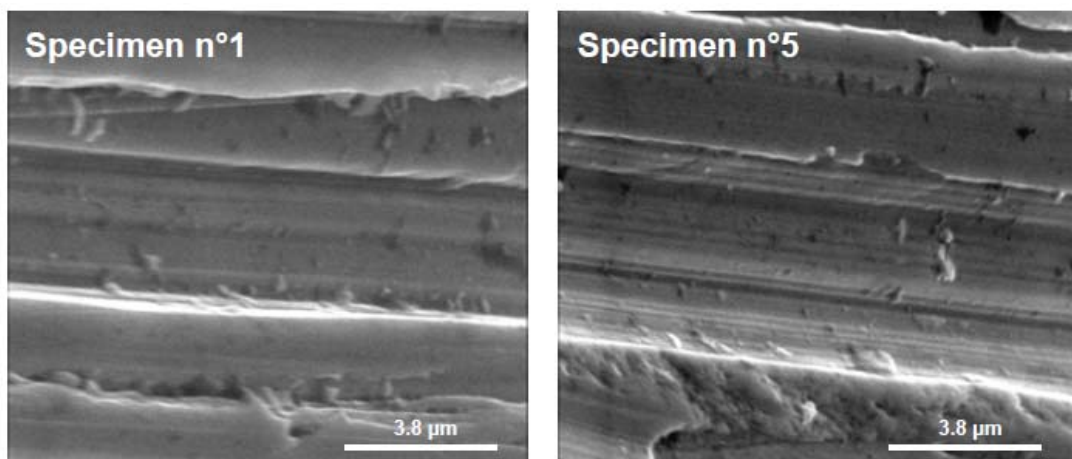


Figure 70 : SEM des effets de taille grain ($9\mu\text{m}$ sur la gauche et sur la droite $40\mu\text{m}$) sur la rugosité à l'échelle microscopique. (D'après[17]).

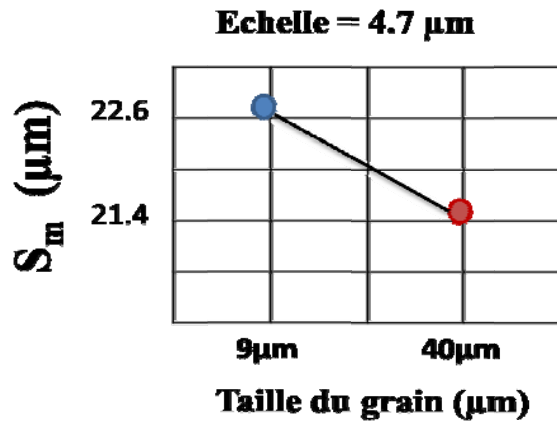


Figure 71 : Exemple pour les valeurs du paramètre S_m à l'échelle 4.7 μm et pour deux tailles de grains différentes (9 μm et 40 μm).

8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré que la décomposition en ondelettes continues permet de quantifier et de localiser les échelles de l'abrasion des processus d'usinage sur deux groupes d'échantillons, le premier est usiné avec deux niveaux de rigidité du galet (forte et faible) et le deuxième est usinée en faisant varier deux tailles du grain (9 μm et 40 μm).

Pour le premier groupe, on a trouvé que les deux ondelettes mis en jeu (le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet) ont réussi à détecter les échelles microscopique et macroscopique de pertinence d'abrasion.

Pour le deuxième groupe d'échantillons, pour le paramètre de rugosité R_a le chapeau mexicain a détecté l'échelle microscopique alors que l'échelle macroscopique a été détectée par l'ondelette de Morlet. En cherchant les échelles de pertinence pour le paramètre de rugosité S_m les deux ondelettes ont réussi à détecter une échelle microscopique pertinente pour le mécanisme de l'abrasion.

Nous avons également montré qu'il est nécessaire de faire des analyses multi-échelles plutôt qu'un type classique (analyses sur toute l'échelle de mesure) afin de quantifier les effets avec précision.

En comparant ces résultats à ceux obtenues par les ondelettes discrètes, on remarque que les ondelettes continue et les ondelettes discrète arrivent à bien localiser les échelles de pertinence de l'abrasion des processus d'usinage pour tous les paramètres du processus (il suffit d'utiliser une seule ondelette). Ce qui nous amène à la même conclusion du chapitre précédent que la forme de l'ondelette ne joue pas un rôle dans la détection de l'échelle pertinente du mécanisme de l'abrasion.

Références bibliographiques

- [1] B. Josso, D. Burton, M. Lalor, Frequency Normalized Wavelet Transform for Surface Roughness Analysis and Characterization, *Wear*, 252, 491-500, 2002.
- [2] J. Martinez, P. Gajan, A. Strzelecki, Analyse Temps_Fréquence, *Ondelettes, Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales*, AF 4 510.
- [3] H. Zahouani, S-H. Lee, R. Vargiolu, The Multi-Scale Mathematical Microscopy of Surface Roughness, *Tribology Series*, Vol. 36, p. 379-390, 1999.
- [4] X. Chen, J. Raja, S. Simanapalli, Multi-scale Analysis of Engineering Surface, *International journal of machine tools & manufacture*, Vol.35, No.2, p. 231-238, 1995.
- [5] Y. Meyer, S. Jaffard, O. Rioul, L'Analyse par Ondelette, *Pour la Science*, French edition of *Scientific American*, 119: p. 28-35, 1987. <http://perso.telecom-paristech.fr/~rioul/publis/198709meyerjaffardrioul.pdf>
- [6] J.M. Combes, A. Grossmann, P. Tchamitchian, *Wavelets: Time Frequency Methods and Phase Space*, Springer-Verlag, 1989.
- [7] G. Kaiser, *A Friendly Guide to Wavelets*, Boston: Birkhäuser, 1994.
- [8] M. Farge, Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 24, 395–457, 1992.
- [9] H. Zahouani, S. Mezghani, R. Vargiolu, M. Dursapt, Multi-scale Study of Abrasion Signature by 2D Wavelet Decomposition, *Proceedings of the World Tribology Congress (WTC-III)*, Washington, USA, p. 839-840, Septembre 2005.
- [10] C. Torrence, G.P. Compo, A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61–78, 1998.
- [11] W. Sun, Convergence of Morlet's Reconstruction Formula, preprint, 2010.
- [12] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, San Diego, CA: Academic Press, 1998.
- [13] M. Farge, Wavelet Transforms and Their Application to Turbulence, *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, 24, 395–457, 1992.
- [14] Ouvrage Collectif, *Aide-mémoire pratique des techniques statistiques*, CERESTA, Paris, 1994
- [15] R.G. Lomax, *Statistical Concepts: A Second Course*, p. 10, ISBN 0-8058-5850-4, 2007.
- [16] S. Sawilowsky, Fermat, Schubert, Einstein, and Behrens-Fisher: The Probable Difference Between Two Means When $\sigma_1 \neq \sigma_2$, *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 1(2), 461–472, 2002.
- [17] A. Van Gorp, M. Bigerelle, M. EL Mansori, P. Ghidossi, A. Iost, Effects of Working Parameters on the Surface Roughness in Belt Finishing Process: the Size-Scale Estimation Influence, *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol. 38, No 1/2010, 16-34.

CHAPITRE 4

MESURE DE L'ANISOTROPIE DES STRUCTURES PERIODIQUES

Dans ce chapitre, un nouveau paramètre de rugosité 3D est proposé pour quantifier la régularité d'une surface indépendamment de l'amplitude et des unités de longueur de balayage. L'efficacité de ce paramètre est testée sur des surfaces périodiques bruitées avec différents degrés d'anisotropie. La valeur de ce paramètre est comprise entre zéro (bruit parfait) et 100% (surface sinusoïdale parfaite). Il nous a permis de détecter les directions d'anisotropie de régularité pour une surface donnée.

1 Contexte

La rugosité de surface se réfère à l'évolution de la surface par rapport à la surface moyenne. La norme DIN4760 définit les ordres de déviation [1]. Benardos & al. décrivent ces ordres de déviation. Ils indiquent que:

- Les premier et second ordres de déviation se rapportent respectivement à la forme, c'est à dire la planéité, la circularité, etc., et à l'ondulation. Elles sont dues aux erreurs de machines-outils, la déformation de la pièce, les configurations erronées, le serrage, la vibration et l'inhomogénéité matérielle de la pièce.
- Les troisième et quatrième ordres de déviation se réfèrent aux rainures périodiques et à des fissures et dilapidation qui sont liées à la forme et l'état des bords de la coupe, de la formation de copeaux et de la cinématique du processus.
- Les cinquième et sixième ordres de déviation se réfèrent à la structure matérielle de la pièce qui est liée à des mécanismes physico-chimiques qui agissent sur les grains et l'échelle de treillis (glissement, diffusion, oxydation, contrainte résiduelle, etc.)

De nombreux paramètres liés aux procédés d'usinage ou/et aux propriétés des pièces influencent la rugosité de la surface. La Figure 72 représente un schéma non exhaustif de ces paramètres. Par conséquent, les études de la topographie de la surface des éléments manufacturés sont développées avec deux objectifs principaux: l'effet des paramètres d'usinage et les néfastes conséquences dans les propriétés de la pièce usinées [3], [4].

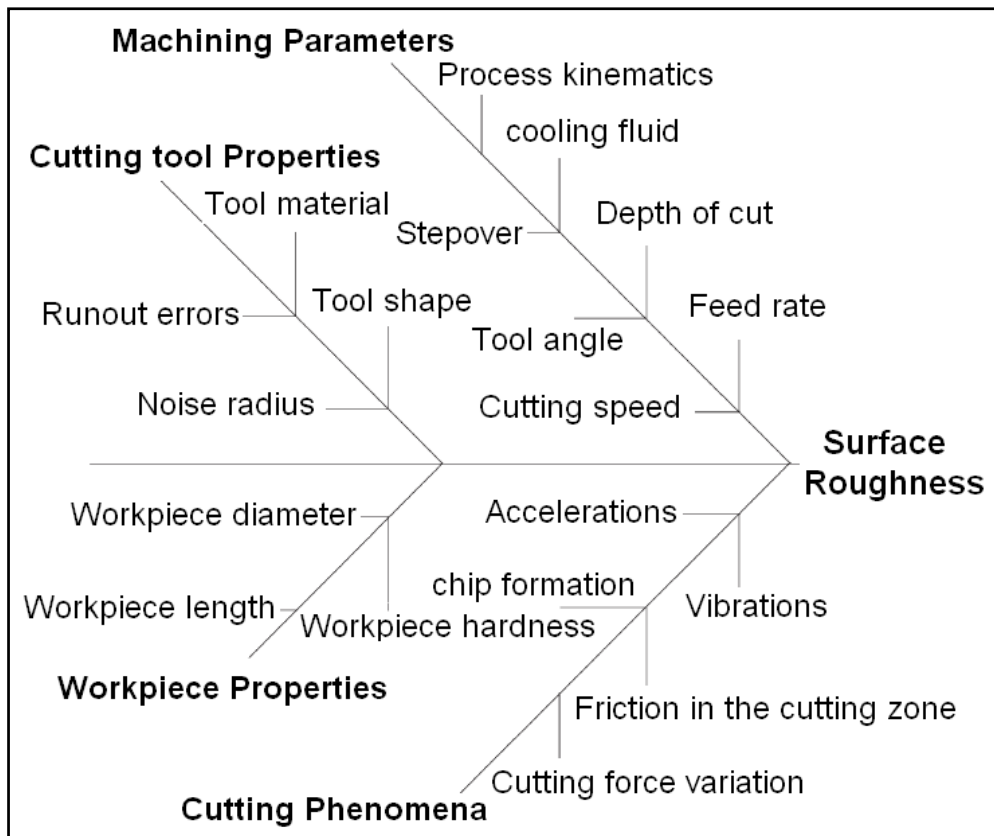


Figure 72 : Schéma représentant les paramètres influençant la rugosité de surface. (D'après [2])

Différents Paramètres de rugosité ont été créés pour qualifier une surface usinée. Les plus fréquemment utilisés sont : la hauteur moyenne arithmétique de la surface (S_a), la hauteur de moyenne quadratique de la surface (S_q), la hauteur maximale de la surface (S_z). Ces paramètres ne révèlent pas la complexité de la surface [5]. Néanmoins, il est possible, en intégrant un nouveau paramètre de rugosité d'échelle invariant, de quantifier l'organisation des surfaces. Ce paramètre est appelé « paramètre de régularité » et il est utilisé pour identifier l'influence des différents processus sur la topographie d'une surface usinée.

Parmi ses différentes applications, le paramètre de régularité peut être utilisé:

- Pour déterminer le sens de structures périodiques formées par les rayonnements laser pulsés [6], [7], [8] sur la surface de pièces solides. Cette identification qualifie le succès du processus, puisque les structures apparaissent seulement dans une certaine gamme de durée d'impulsion et de puissance, selon une longueur d'ondes de radiation et des conditions superficielles matérielles [9].
- Pour examiner la reproductibilité des méthodes d'usinage de surfaces telles que le processus de finition [10]. Ceci est réalisé en comparant les valeurs de ce paramètre résultant de l'application des mêmes conditions de procédé sur plusieurs échantillons.
- Pour identifier la régularité de la surface produite par usinage abrasif, comme le grain de précision de surface, le rainurage abrasif et le rodage [11], [12].
- ...

2 Le paramètre de régularité

2.1 Définition mathématique

L'analyse de Fourier est une méthode de traitement du signal bien connue. Elle est largement utilisée dans la résolution de problèmes d'ingénierie. Toutefois, dans certaines applications telles que la caractérisation de la rugosité de surface, cette méthode n'est pas forcément la plus appropriée. Par conséquent, pour étudier la régularité d'une surface, un paramètre de régularité est défini. Il est supposé que ce paramètre a une valeur limite supérieure égale à 100% pour les surfaces parfaitement périodiques et une valeur limite inférieure égale à 0% pour les surfaces aléatoires non corrélées.

Pour calculer ce paramètre, les étapes suivantes sont appliquées:

Premièrement, une fonction d'auto-corrélation normalisée (ACF) est définie pour trouver les entiers X et Y, de telle sorte que:

$$ACF(X, Y) = \frac{1}{S_q^2(n-X)(m-Y)} \sum_{i=1}^{n-X} \sum_{j=1}^{m-Y} Z_{i,j} Z_{i+X,j+Y} \quad (1)$$

Où:

$Z_{i,j}$ sont des fonctions discrètes équidistantes dans n et m points.

S_q est la hauteur de moyenne quadratique de la surface (root mean square paramètre).

Deuxièmement, une longueur d'auto-corrélation $L(\theta, \lambda)$ et une valeur de seuil fixe de la fonction d'auto-corrélation (λ) sont définies en coordonnées polaires (r, θ) de telle sorte que $ACF(R, \theta) > \lambda$. λ est aussi appelée la longueur de décalage inverse et est pris égal à 0,1 dans cette étude.

Puis, une intégrale de corrélation $j(\theta, \lambda)$ est introduite :

$$j(\theta, \lambda) = \int_{R=0}^{R=L(\theta, \lambda)} ACF(R, \theta) dR \quad (2)$$

Troisièmement, les séries $i_k(\theta, \lambda)$ des intégrales sont définies :

$$i_k(\theta, \lambda) = \int_{R=KL(\theta, \lambda)}^{R=(K+1)L(\theta, \lambda)} |ACF(R, \theta)| dR \quad (3)$$

Avec $1 \leq K \leq K_{\max}$. Cette séquence représente une succession d'harmonies de l'ordre de la puissance de la surface. Enfin, le vecteur de régularité est défini comme suit:

$$\text{régularité}(\theta) = 100 \sum_{K=1}^{K_{\max}} \frac{i_K(\theta)}{K_{\max} j(\theta)} \quad (4)$$

La valeur de ce paramètre est comprise entre 0 (surfaces aléatoires non corrélées) et 100 (parfaites surfaces périodiques sans bruit). Sa qualité la plus importante est d'être mathématiquement indépendante du paramètre d'amplitude.

La moyenne scalaire du paramètre de régularité est définie comme la moyenne des éléments du vecteur de régularité et notée $\text{régularité}(\lambda)$.

2.2 Exemples simulés

Pour tester la pertinence de l'ordre de mesure du paramètre de régularité définie, un grand nombre de formes de surface a été créé. Chaque surface contient 1000 x 1000 points. Ces formes sont regroupées en quatre ensembles:

- Le premier groupe de formes de surface est une distribution de bruit blanc ayant une valeur moyenne nulle, et un écart-type fixe. Ce groupe est nommé « surfaces de bruit blanc ».
- La deuxième série a la forme des bosses réparties de façon homogène, et sera nommé surfaces sinusoïdales isotropes (voir Figure 73). Elle est obtenue en multipliant ensemble deux fonctions trigonométriques. Dans ces surfaces, la forme sinusoïdale parfaite est clairement identifiée dans les deux directions X et Y.
- Le troisième ensemble a la forme des cylindres concentriques ouverts, et sera nommé surfaces polaires (voir Figure 74.a). Elle est obtenue par balayage d'un signal sinusoïdal d'amplitude autour de l'axe (axe Z).
- Le quatrième est composé des surfaces sinusoïdales anisotropes qui permettent de tester les directions d'anisotropie (voir Figure 75.a). Il sera nommé surfaces

sinusoïdales et est obtenu en multipliant ensemble deux fonctions trigonométriques et en incorporant un facteur d'anisotropie (α) tel que représenté dans l'équation 5.

$$Z(X, Y) = \sin(2 * \pi * X) * \cos\left(\frac{1.5 * \pi * Y}{1.5^\alpha}\right) + NB * BL \quad (5)$$

Où NB représente le niveau de bruit et BL est une distribution de bruit blanc ayant une valeur nulle moyenne.

La valeur du facteur α varie entre 1 (surface sinus isotrope) et 16 (surface sinus avec un grand degré d'anisotropie).

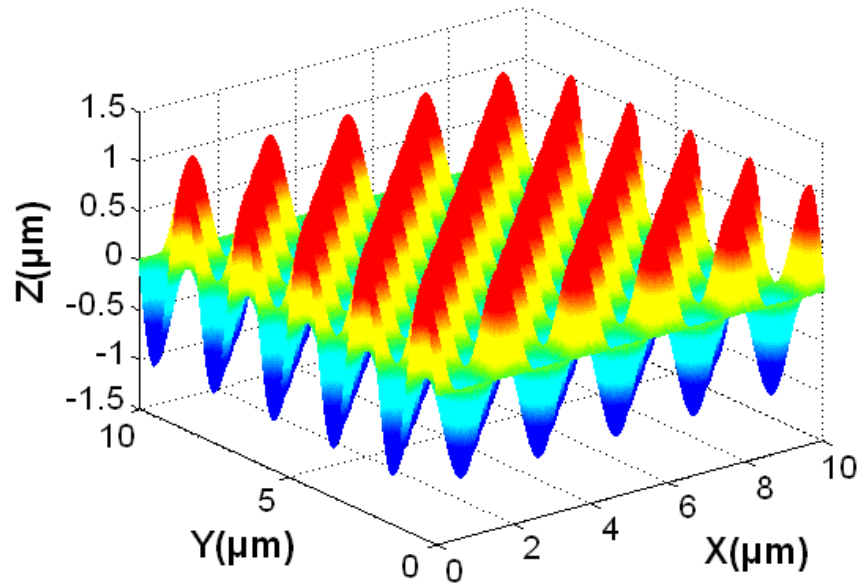


Figure 73 : Forme sinusoidale isotrope

Un bruit blanc gaussien, stationnaire et non corrélé est ajouté à ces surfaces. Pour un ensemble donné, différents niveaux de bruit sont attribués. Les Figure 74 et Figure 75 montrent respectivement l'effet du bruit gaussien ajouté sur les surfaces polaires et sinus.

Au niveau zéro de bruit, la forme de la surface est bien décrit (voir Figure 73.a et Figure 74.a). Les surfaces sinus et polaires sont faciles à distinguer. Avec l'augmentation du niveau de bruit, l'amplitude de la surface augmente et sa forme est de plus en plus déformée.

À un niveau de bruit égal à 0.9, la forme de la surface est à peine reconnaissable (voir Figure 74.c et Figure 75.c). Elle continuera à se déformer jusqu'à ce qu'elle obtienne la forme d'un bruit blanc. Cette observation est obtenue à un niveau de bruit égal à 1.8 et présenté dans les Figure 74.e et Figure 75.e. A ce niveau, les surfaces de forme sinusoidale et polaires ont des formes de bruit blanc et elles ne peuvent pas être distinguées.

En plus du bruit blanc gaussien ajouté, les surfaces sinusoidales sont générées en incorporant un facteur d'anisotropie (α). Pour $\alpha = 1$, la surface obtenue a une forme sinusoidale isotrope (voir Figure 73).

Le nombre de bosses des surfaces sinusoïdales diminue quand on augmente le facteur d'anisotropie. En effet, la longueur d'onde de ces surfaces dans les directions X et Y augmente lorsque la valeur de ce facteur augmente. Par exemple, une surface sinusoïdale dont le facteur d'anisotropie est égal à 2 (représenté dans la Figure 76.a) a une longueur d'onde plus courte que celle dont le facteur d'anisotropie est égal à 6 (représenté dans la Figure 76.b). La Figure 76 représente des surfaces sinusoïdales sans bruit avec des facteurs d'anisotropie différents.

Figure 74 :L'effet du bruit ajouté sur les surfaces polaires. (a) niveau de bruit = 0, (b) niveau de bruit = 0,2, (c) niveau de bruit = 0,5, (d) niveau de bruit = 0,9, et (e) niveau de bruit = 1,8.

La première série de surfaces générées est constituée de 21 surfaces bruits blancs gaussiens ayant des niveaux de bruit différents.

L'ensemble des surfaces polaires est obtenue en suivant les trois étapes suivantes:

- 30 bruits blancs aléatoires et gaussiens, ayant une valeur moyenne nulle, sont générés.
- Chacun des 30 bruits blancs gaussiens est multiplié par 20 différents niveaux de bruit.
- Les 30x20 formes de bruit sont ajoutées à une surface polaire de forme nominale.

Pour l'ensemble contenant des surfaces sinusoïdales, le même processus est utilisé à une exception près. En fait, les 30 formes de bruit X 20 sont ajoutés à 16 surfaces nominales de forme sinusoïdale au lieu d'une seule. Ces 16 surfaces nominales ont chacune une valeur propre facteur d'anisotropie.

Figure 75 : L'effet du bruit ajouté sur les surfaces sinusoidales. (a) niveau de bruit = 0, (b) niveau de bruit = 0,2, (c) niveau de bruit = 0,5, (d) niveau de bruit = 0,9, et (e) niveau de bruit = 1,8.

Figure 76 : Surfaces sinusoidales ayant des facteurs d'anisotropie différents: (a) $\alpha = 2$, (b) $\alpha = 6$ et (c) $\alpha = 14$.

3 Résultats et Discussions

Dans cette étude, les paramètres de régularité des ~ 10000 surfaces simulées ont été calculés. Les résultats correspondant à une valeur de longueur de décalage inverse $\lambda = 0.1$, sont représentés dans les graphiques suivants.

La Figure 77 illustre l'évolution du paramètre de régularité moyen par rapport aux différents niveaux de bruit pour les surfaces générées par le bruit blanc. La valeur de ce paramètre est généralement inférieure à 0.1156%. Ceci prouve que les surfaces de bruit blanc n'ont pas de direction d'anisotropie spécifique, ce qui signifie que les surfaces de bruit gaussien ont une forme isotrope. Les valeurs de régularité sont près du zéro, qui indique qu'une surface bruyante pure possède une régularité nulle.

L'évolution du paramètre de régularité moyen des surfaces de forme sinusoidale aux différents niveaux de bruit et des valeurs différentes du facteur d'anisotropie est représentée dans la Figure 78. Sa valeur maximale est d'environ 75%. Cette valeur élevée indique la périodicité de ces surfaces. En ajoutant du bruit blanc gaussien, cette valeur maximale est

stable jusqu'à un certain niveau critique de bruit où une déformation remarquable de la forme de la surface est détectée. A partir de ce niveau critique, la valeur moyenne du paramètre de régularité diminue rapidement et tend vers une valeur de 0.1% qui représente la régularité d'une surface parfaite bruyante.

La valeur du niveau de bruit critique à laquelle le paramètre de régularité commence à diminuer, dépend du facteur d'anisotropie incorporé. Pour un facteur d'anisotropie inférieure ou égale à 6, la valeur du niveau de bruit critique est égale à 0.9. Au-dessus de cette valeur, le niveau de bruit critique diminue avec l'augmentation du facteur d'anisotropie.

Ce résultat était attendu. En fait, le bruit est normalement un signal de haute fréquence. La diminution du facteur d'anisotropie donne une forme de surface ayant un nombre croissant de bosses. Il peut être comparé à une augmentation de la fréquence d'un signal. D'autre part, l'augmentation de ce facteur est similaire à une diminution de la fréquence d'un signal. Ainsi tant que le niveau de bruit n'a pas une valeur considérable son effet n'apparaît pas dans les signaux à haute fréquence. Tandis que pour les signaux de basse fréquence du bruit un niveau bas est facilement détecté.

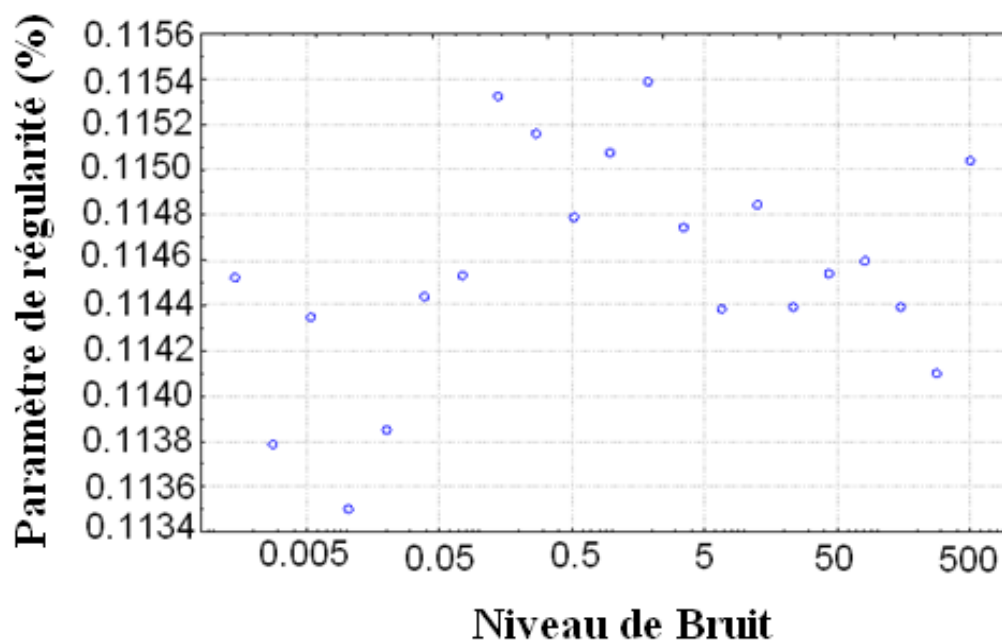


Figure 77 : Evolution du paramètre de régularité ($\lambda = 0,1$) par rapport au niveau de bruit pour les surfaces générées par le bruit blanc.

La Figure 79 illustre l'évolution du paramètre de régularité par rapport aux différents niveaux de bruit générés pour les surfaces polaires. La valeur maximale de ce paramètre est proche de 10%. Elle est due à la forte anisotropie de ces surfaces. Par addition d'un bruit blanc gaussien, la valeur du paramètre de régularité reste stable jusqu'à un niveau de bruit égal à 0.5. A partir de ce niveau, elle diminue rapidement pour atteindre une valeur d'environ 0.1% à

un niveau de bruit égal à 50. Cette baisse rapide est due au choix de la longueur du décalage inverse qui est égal à 0.1 dans la présente étude (pour plus des détails voir [13]).

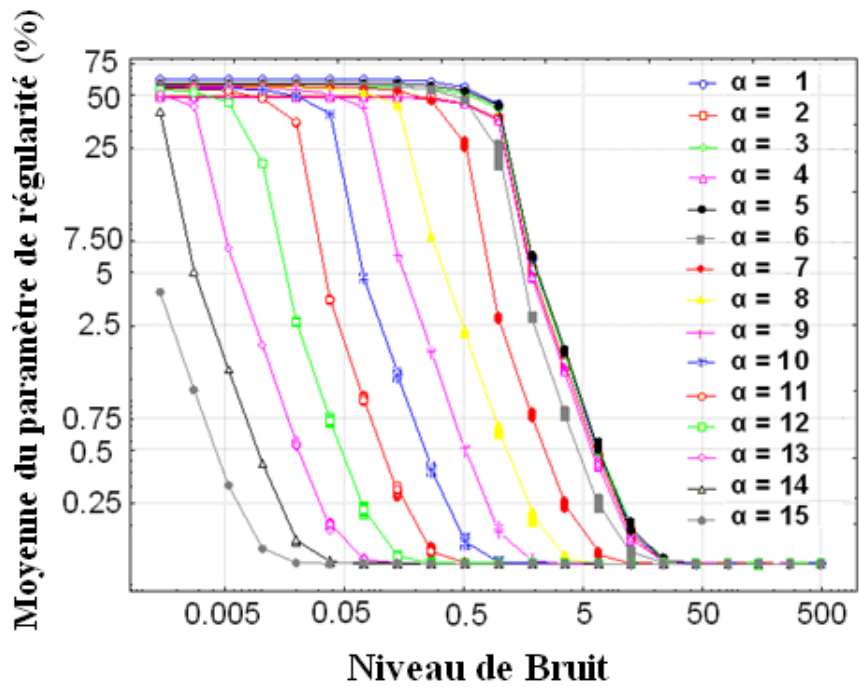


Figure 78 : L'évolution de la moyenne du paramètre de régularité ($\lambda = 0,1$) par rapport au niveau de bruit pour les surfaces sinusoïdales générées associées aux différents facteurs d'anisotropie (α).

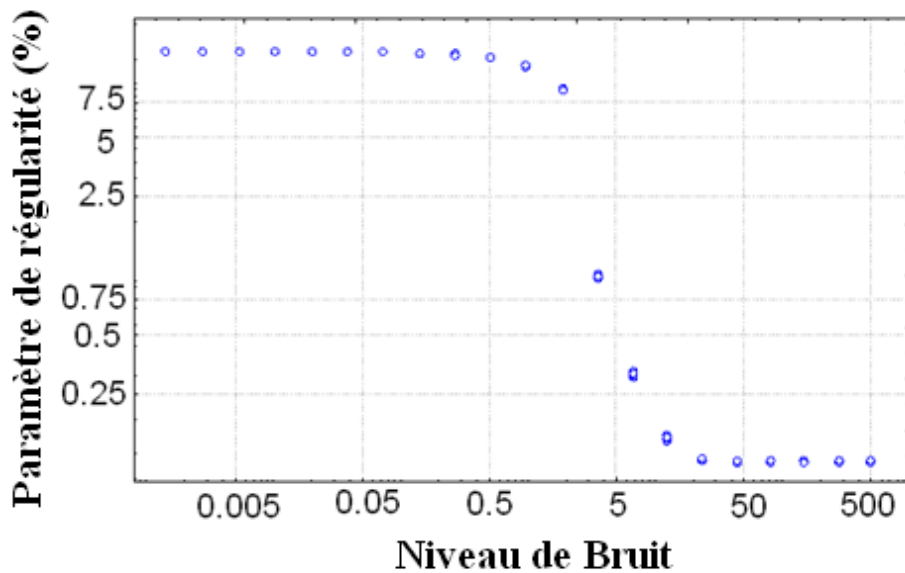


Figure 79 : Evolution du paramètre de régularité ($\lambda = 0,1$) par rapport au niveau de bruit pour les surfaces polaires générées.

Afin d'évaluer la direction de l'anisotropie, les coordonnées polaires sont utilisées. Pour chaque surface, 91 paramètres de régularité sont calculés en faisant varier l'angle θ entre 0° et 90° (voir Figure 80). Ces valeurs calculées sont utilisées pour tracer la courbe représentant le composant du paramètre de régularité $Y_r(\theta)$ en fonction du composant $X_r(\theta)$ de la surface correspondante.

$X_r(\theta)$ est la projection du vecteur de régularité sur l'axe des X, donnée par:

$$X_r(\theta) = \text{Regularité}(\theta) * \cos(\theta) \quad (6)$$

Et $Y_r(\theta)$ est la projection du vecteur de régularité sur l'axe des Y, donnée par:

$$Y_r(\theta) = \text{Regularité}(\theta) * \sin(\theta) \quad (7)$$

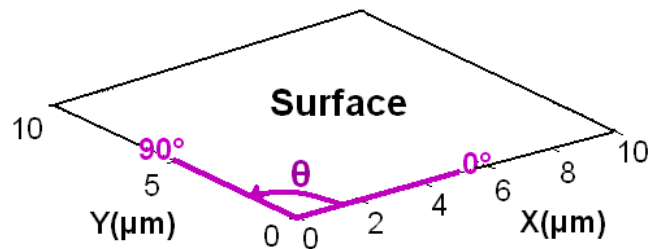


Figure 80 : Représentation de l'angle polaire θ de la surface.

La Figure 81 représente les courbes de direction d'anisotropie des surfaces de forme de bruit blanc. Les courbes ont la forme d'un quart de cercle de rayon à peu près égal à 0.11, indépendamment du niveau de bruit induit à la surface. Ils prouvent que les surfaces de bruit blanc n'ont pas de direction d'anisotropie spécifique. Ce résultat confirme l'analyse précédente donnée pour la Figure 77 et résumée par l'idée que les surfaces de bruit blanc n'ont pas une forme isotrope.

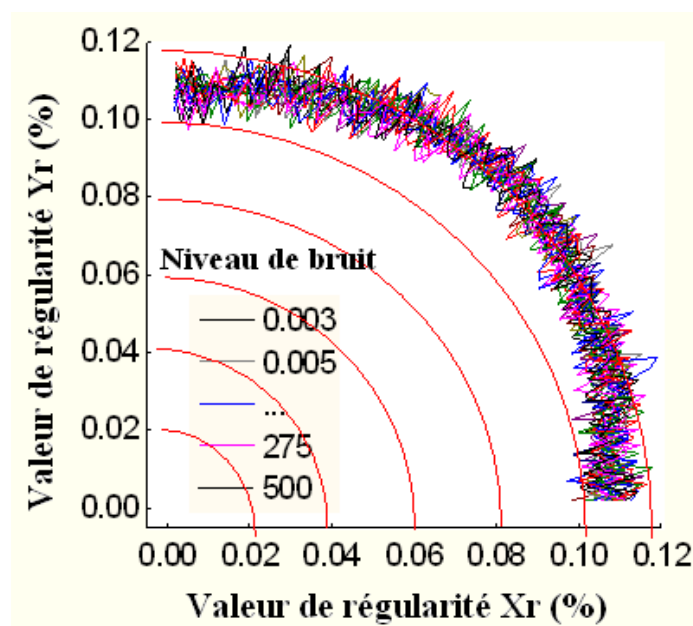


Figure 81 : Courbes de direction d'anisotropie de l'ensemble des surfaces de bruit blanc.

La Figure 82 représente les courbes de direction d'anisotropie qui appartiennent à l'ensemble des surfaces sinusoïdales isotropes. Dans ces surfaces, la forme sinusoïdale parfaite est clairement identifiée dans les deux directions X et Y (voir Figure 75). Cette forme est détectée dans la Figure 82 par le paramètre de régularité qui a une valeur de 95% dans les deux directions. En outre, plusieurs caractéristiques sont remarquées:

- Ces courbes sont symétriques par rapport à l'axe de 45°.
- Une valeur élevée de régularité est obtenue à 45°. Sur cet axe, le signal 2D est parfaitement périodique et la régularité des surfaces augmentent.
- L'ordre diminue avec la diminution du bruit, gardant la forme des courbes dans toutes les directions. La méthode est alors robuste et la régularité de la surface diminue.
- La surface isotrope de forme sinusoïdale tend vers une forme de surface de bruit blanc à un niveau de bruit très élevé.

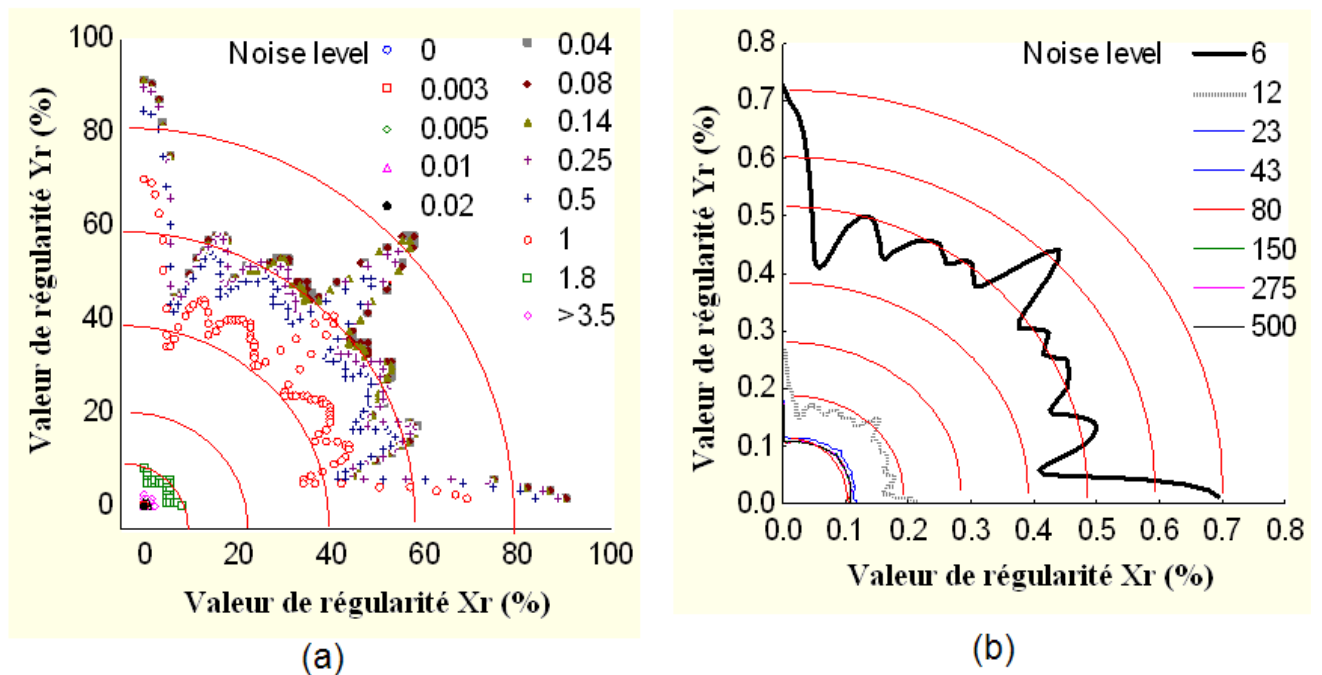


Figure 82 : (a) Les courbes de direction d'anisotropie pour l'ensemble des surfaces sinusoïdales isotropes. (b) Courbes de direction d'anisotropie pour l'ensemble des surfaces sinusoïdales orthotropes avec un zoom à l'origine.

La Figure 83 illustre les courbes de direction d'anisotropie pour l'ensemble des surfaces de formes polaires. Elle montre que ces surfaces n'ont pas un sens précis d'isotropie, puisque la valeur maximale du paramètre de régularité, obtenue avec un faible niveau de bruit, est faible pour considérer que la surface a une direction distincte de périodicité. Toutefois, la valeur de

régularité se situe entre 10% et 16% quelle que soit la direction. Cela signifie que les surfaces sont un peu isotropes. Elle montre également que l'augmentation du niveau de bruit diminue la valeur du paramètre de régularité. Permettant ainsi à la courbe une forme de quart de cercle c'est à dire la surface polaire aura la forme d'une surface de bruit blanc.

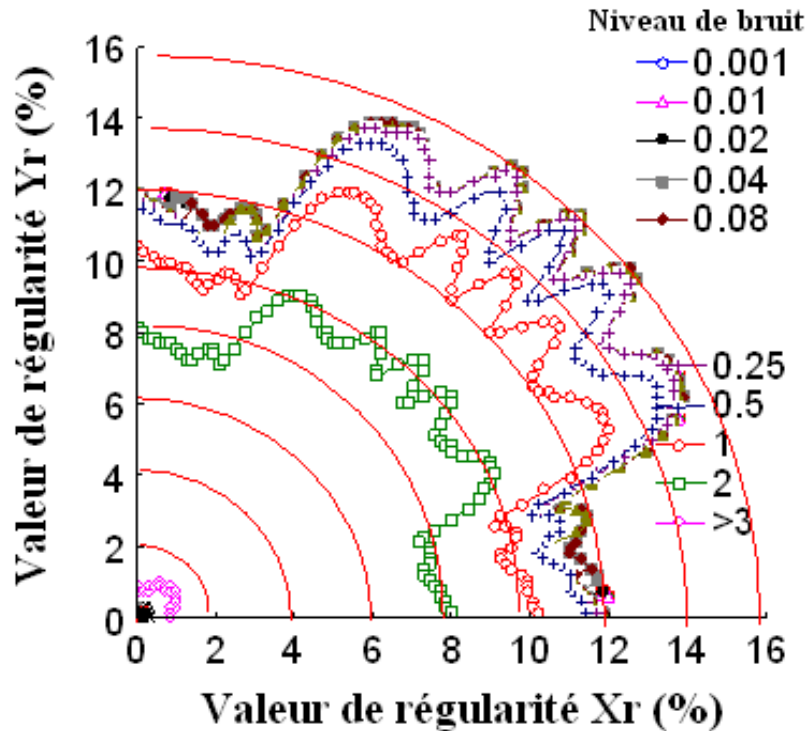
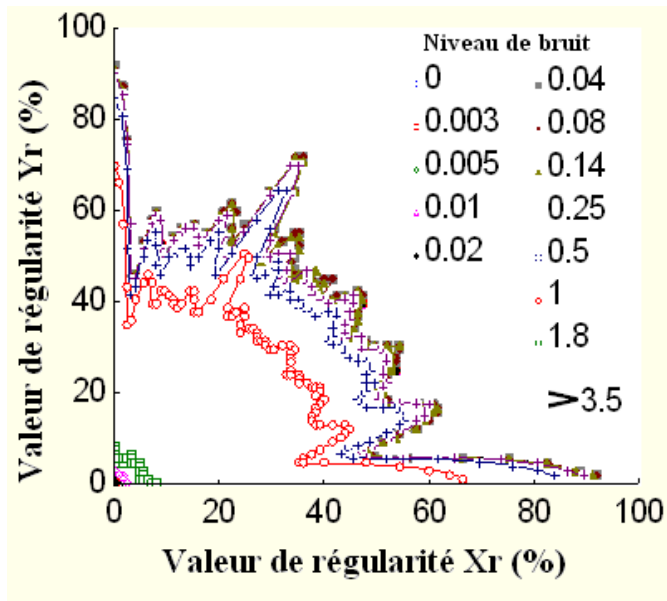


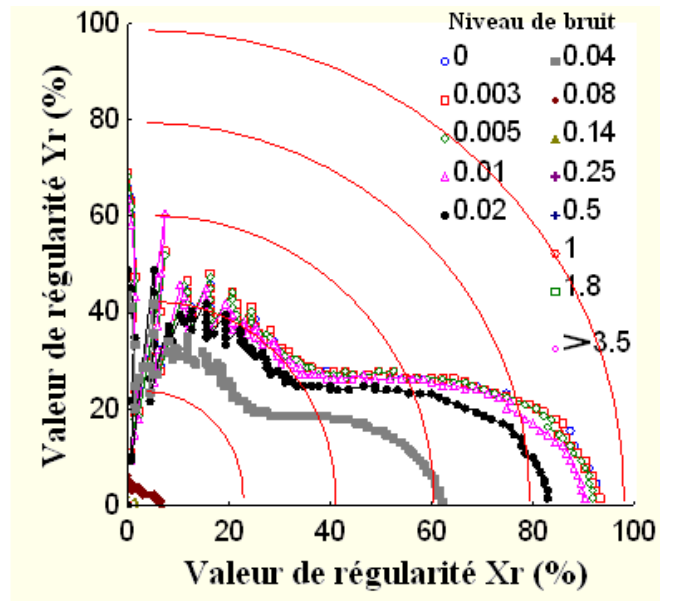
Figure 83 : Courbes de direction d'anisotropie pour l'ensemble des surfaces polaires.

Figure 84.a et Figure 84.b donnent les courbes de direction d'anisotropie de l'ensemble des surfaces de formes sinusoïdales générées par différents facteurs d'anisotropie. Ces deux figures montrent que la valeur supérieure du paramètre de régularité est toujours obtenue dans la direction de l'axe X_r , c'est-à-dire l'axe au long duquel une sinusoïde est obtenue quel que soit le facteur d'anisotropie et le niveau de bruit. Cependant on remarque que la valeur du paramètre de régularité diminue avec l'augmentation de facteur d'anisotropie. Il est dû au fait que l'augmentation du facteur d'anisotropie diminue la ressemblance entre la surface générée et la surface isotrope de forme sinusoïdale. Cette diminution est clairement illustrée dans la Figure 85.

La même conclusion concernant la tendance de la surface de forme sinusoïdale à devenir une surface de forme de bruit blanc est observée dans ces figures.



(a) Facteur d'anisotropie = 2



(b) Facteur d'anisotropie = 9

Figure 84 : Les courbes de direction d'anisotropie de l'ensemble des surfaces sinusoïdales avec facteur d'anisotropie : (a) $\alpha = 1$, et (b) $\alpha = 9$.

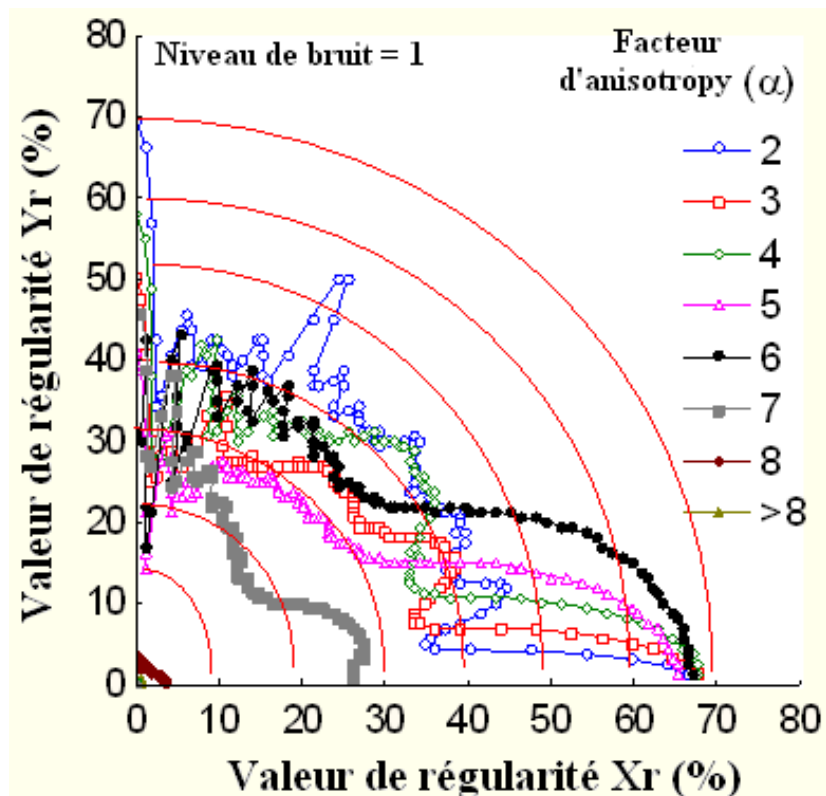


Figure 85 : Courbes de direction d'anisotropie des surfaces sinusoïdales ayant même niveau de bruit égale à 1, mais des facteurs d'anisotropie différents.

4 Conclusion et perspective

Un paramètre sans dimension est défini et testé, afin de caractériser la régularité de la topographie de surface. Il a été montré que l'isotropie de la rugosité de surface a été identifiée à l'aide de ce paramètre. Le paramètre de régularité peut donc être qualifié comme un «indice d'isotropie» et peut être utilisé pour quantifier l'influence des différents processus sur la topographie de la surface.

La direction d'anisotropie est bien identifiée par le paramètre de régularité. Il s'agit d'une information importante qui pourrait être utilisée pour mesurer la rugosité du profil plus régulier.

Malgré les bons résultats obtenus dans la présente étude, d'autres travaux expérimentaux sont encore à faire pour valider la formule du paramètre de régularité.

Références bibliographiques

- [1] DIN4760, Form deviations, Concepts, Classification system, Deutes Institut Fuer Normung, 1982.
- [2] P.G. Benardos, G.C. Vasniakos, Predicting Surface Roughness in Machining: a review, International journal of machine tools and manufacture, Vol. 43, 833-844, 2003.
- [3] K. Venkateh, M.S. Bobji, S.K. Gargi, Genesis of Workpiece Roughness Generated in Surface Grinding and Polishing of Metals, Wear, Vol. 225-229, 251-226, 1999.
- [4] K. Venkateh, M.S. Bobji, S.K. Gargi, Power Spectra of Roughness Caused by Grinding of Metals, J. Mater Res., Vol. 14, 319-322, 1999.
- [5] B. Bhusan, Principles and Applications of Tribology, New York: Widely, 1999.
- [6] J.F. Young, J.E. Sipe, H.M Van Driel, Regimes of Laser-Induced Periodic Surface Structure on Germanium: Radiation Remnants and Surface Plasmons, Optics letters, Vol.8, 431-433, 1983.
- [7] A.J. Pedraza, J.D. Fowlkes, Y.F. Guan, Surface Nanostructuring of Silicon, Applied Physics A: Materials Science and Processing, Vol. 77, 277-284.
- [8] H.Y. Zheng, T.T. Tan, W. Zhou, Studies of KrF Laser-Induced Long Periodic Structures on Polyimide, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 47, 180-185, 2009.
- [9] Yu. Syvenkyy and al., Laser-Induced Formation of Periodical Structures on the AIIBVI Semiconductors Surfaces, Optical materials, Vol. 30, 380-383, 2007.
- [10] M. Barletta, A New Technology in Surface Finishing: Fluidized Bed Machining (FBM) of Aluminium Alloys, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 173, 157-165, 2006.
- [11] Y. Ohbuchi, T. Matsuo, Chipping in High-Precising Solt Grinding of Mn-Zn Ferrite, Annals of the CIRP, Vol. 44, 273-277, 1995.
- [12] S. Chardrasekar, M.C. Shaw, B. Bhushan, Morphology of Ground and Lapped Surfaces of Ferrite and Metals, Trans. ASME. J. Eng. Ind., 109, 83-86, 1987.
- [13] G. Guillemot, M. Bigerelle, J. Antoni, K. Anselme, How to Characterize the Regularity of Surface Topographies, Journal of physics: conference series, 311, 2011.

CONCLUSION GENERALE

Le travail de cette thèse était divisé en trois parties :

Dans la première partie, nous avons défini et construit l'environnement logiciel du côté 3D du système « MesRug ». Dans le chapitre 1, nous avons expliqué la technologie utilisée pour sa réalisation, en montrant la manière de l'utiliser et de l'enrichir par de nouvelles approches multi-échelles ainsi que de nouveaux paramètres de rugosité. En fin de ce chapitre, nous avons présenté quelques méthodes d'analyses multi-échelles tridimensionnelle (régression polynomiale, filtre gaussien, Bspline...) intégrées dans MesRug, ainsi que les définitions normatives de certains paramètres, pour finir par la description de la méthode statistique utilisée (Bootstrap) pour déterminer la pertinence des paramètres de rugosité.

Nous avons donc implémenté trois bibliothèques informatiques enveloppant les tâches suivantes :

- Décodage-encodage normalisé des fichiers de mesures (extension SDF).
- Calcul des paramètres d'état de surface (paramètre 3D)
- Redressement multi-échelle 3D

La deuxième partie a été consacrée à l'analyse multi-échelle par les ondelettes (2D). Nous avons testé la pertinence des ondelettes en cherchant les échelles les plus pertinents des surfaces abrasives. Cette analyse est présentée dans le chapitre 2 pour les ondelettes discrètes et dans le chapitre 3 pour les ondelettes continues.

Dans le chapitre 2, nous avons montré que la pertinence ne dépend pas de la forme des ondelettes pour l'analyse discrète: cette affirmation ne signifie pas que le paramètre de rugosité pertinent est le même pour un profil donné pour tous les ondelettes discrètes: la reconstruction du profil dépend de l'ondelette discrète choisie, mais il n'existe pas une ondelette discrète qui discrimine mieux la morphologie induite par le processus.

Dans le chapitre 3, nous avons montré que la décomposition en ondelettes continues permet de quantifier et de localiser les échelles de l'abrasion des processus d'usinage sur deux groupes d'échantillons, le premier est usiné avec deux niveaux de rigidité du galet (forte et faible) et le deuxième est usinée en faisant varier deux tailles du grain (9 μ m et 40 μ m). Nous avons montré que le chapeau mexicain est l'ondelette continue pertinente pour tester l'effet de la rigidité du galet alors que les deux ondelettes continues utilisées (chapeau mexicain, et l'ondelette de Morlet) sont complémentaires pour l'analyse des échantillons usinées avec deux tailles du grain.

Dans cette partie, nous avons montré que l'analyse par ondelette est un outils puissants pour retrouver l'influence des paramètres du procédé. De plus, l'analyse par les ondelettes discrètes précise mieux les échelles de pertinence d'abrasion (il suffit d'utiliser une seule ondelette).

Le travail présenté dans la deuxième partie de cette thèse a fait l'objet d'une recherche dans le domaine de caractérisation multi-échelle par les ondelettes 2D, alors il s'agit d'une étude multi-échelle de caractérisation bidimensionnelle de la rugosité des surfaces. Cette application peut être complétée par une analyse multi-échelle tridimensionnelle en utilisant les ondelettes 3D afin de caractériser l'aspect multi-échelle tridimensionnelle de la rugosité des surfaces.

Dans la troisième partie, nous avons défini et testé un paramètre sans dimension, afin de caractériser la régularité de la topographie de surface. Nous avons montré que l'isotropie de la rugosité de surface a été identifiée par ce paramètre. De plus nous avons identifié la direction d'anisotropie du paramètre de régularité. Il s'agit d'une information importante qui pourrait être utilisée pour mesurer la rugosité du profil plus régulier.

Malgré les résultats obtenus par l'étude présentée dans la troisième partie, d'autres travaux expérimentaux sont encore à faire pour valider la formule du paramètre de régularité.

Au niveau du système Mesrug, il reste à implémenter les paramètres liés à la segmentation. Ces paramètres sont extraits à partir d'une segmentation de la surface en motifs (bassins versants et collines). Pour appliquer cette méthode de segmentation, il faut utiliser la méthode de « la ligne de partage des eaux » (Wolf pruning).