



Développement et mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse multi-échelle du procédé de rodage en production de série

Leila Sabri

► To cite this version:

Leila Sabri. Développement et mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse multi-échelle du procédé de rodage en production de série. Génie mécanique [physics.class-ph]. Arts et Métiers ParisTech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0022 . pastel-00526528

HAL Id: pastel-00526528

<https://pastel.hal.science/pastel-00526528>

Submitted on 14 Oct 2010

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.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech **T H È S E**

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Spécialité “ Procédés de fabrication ”

présentée et soutenue publiquement par

Leila SABRI

le 08 juillet 2010

**Développement et mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse
multi-échelle du procédé de rodage en production de série**

Directeur de thèse : **Mohamed EL MANSORI**

Co-encadrement de la thèse : **Sabeur MEZGHANI et Hassan ZAHOUANI**

Jury

M. Pierre MONTMITONNET, Directeur de recherche CNRS, CEMEF- UMR 7635, Ecole des Mines ParisTech

M. Liam BLUNT, Professeur, Ultra-Precision Engineering Centre, University of Huddersfield, UK

M. Laurent DUBAR, Professeur, LAMIH- UMR 8530, Université de Valenciennes

M. Stephane DEBLAISE, Directeur adjoint Gamme Technique Amériques, Renault

M. Mohamed EL MANSORI, Professeur, LMPF- EA 4106, Arts et Métiers ParisTech Centre de Châlons en Champagne

M. Marc FRABOLOT, Responsable de l'équipe Innovation et Equipes Transverses, Renault

M. Pierre GILBERT, Responsable du Service Métiers Amont Process, Renault

M. Sabeur MEZGHANI, Maître de Conférences, LMPF- EA 4106, Arts et Métiers ParisTech Centre de Châlons en Champagne

M. Hassan ZAHOUANI, Professeur, LTDS- UMR 5513, Ecole Centrale de Lyon

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

**T
H
È
S
E**

Remerciements

La réalisation de cette thèse fut une occasion merveilleuse de rencontrer et d'échanger avec de nombreuses personnes. Je reconnais que chacune a apporté une contribution positive à sa finalisation.

Je tiens à remercier en premier lieu le professeur Mohamed El Mansori, mon directeur de thèse et mon mentor pour la finesse de ses attitudes aussi bien sur le plan humain que scientifique. Il m'a permis de poursuivre mon travail de recherche dans un esprit scientifique rigoureux. De lui, j'ai toujours reçu non seulement les encouragements dont le doctorant a tant besoin, mais aussi les précieux conseils pratiques qui ont permis de faire aboutir ce travail. Je lui témoigne toute ma gratitude.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à Mr. Saber Mezghani, mon co-directeur de thèse, pour sa disponibilité incessante, sa patience et son soutien. Mes remerciements à Mr. Hassan Zahouani, mon co-directeur de thèse pour sa rigueur scientifique et ses conseils avisés.

Je voudrais également exprimer mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse. Un merci à Mr. le professeur Pierre Montmitonnet, Directeur de recherche CNRS au CEMEF, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse, et à MM. les Professeurs Liam Blunt, Ultra-Precision Engineering Centre, Université de Huddersfield, et Laurent Dubar, LAMIH, Université de Valenciennes, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit. Leurs remarques lors de la lecture de mon rapport et nos échanges m'ont permis d'apporter des améliorations à la qualité de ce dernier et de définir de nouvelles perspectives au sujet.

Ma gratitude se tourne, particulièrement, vers mon entreprise d'accueil Renault qui a mis à ma disposition tous les moyens me permettant de mener à bien ma thèse. Je remercie Mr. Stéphane Deblaise, Directeur adjoint Gamme Technique Amériques, Renault, pour avoir initié mon sujet de thèse et m'avoir soutenue depuis le Brésil. Merci à Mr. Pierre Gilbert, Responsable du Service Métiers Amont Process, Renault,

pour ses conseils et sa disponibilité pour discuter des applications industrielles de ce travail de recherche. Un merci aussi à Mr. Marc Frabolot, Responsable de l'équipe Innovation et Equipes Transverses, Renault, pour son soutien et ses qualités humaines. Je dois particulièrement beaucoup à Eric Isambard, Spécialiste du rodage, Renault, qu'on appelle « le king du rodage », pour m'avoir ouvert les portes du monde de rodage et m'avoir continuellement assisté durant ces trois dernières années. Ses conseils méticuleux m'ont été de grande aide et m'ont permis de découvrir les mystères des machines de rodage et les utiliser comme il se le devait dans ma démarche expérimentale. Je lui exprime toute ma reconnaissance.

Je remercie également l'ensemble des collègues de Renault et du personnel du laboratoire LMPF qui ont toujours été présents et à la rescousse dans toutes les difficultés rencontrées durant cette thèse.

J'ai appris durant ces trois dernières années « qu'une thèse est surtout une question de résilience, de résistance et de survivance ». Personnellement, je n'aurais pas résisté à cette expérience si je n'avais pas eu la chance de pouvoir compter sur la main tendue et prête à me relever de mon entourage. Je pense alors à tous mes amis et les membres de ma famille pour lesquels j'exprime toute ma reconnaissance. Ils m'ont été d'un grand soutien et m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final. Merci Wiame pour ton affection maintes fois renouvelée et Karima pour avoir eu le don de me rebooster (parfois durement) dans les périodes difficiles. Merci mes cousins Allal, Ouidade, Rachida, Mohamed et Noura pour votre hospitalité chaleureuse et votre compréhension. Merci mes sœurs Sofia et Kawtar pour votre grand amour. Un grand merci à mes parents pour leur présence et leurs encouragements. Ils sont pour moi les piliers fondateurs de ce que je suis et ce que je fais.

Enfin, je remercie mon cher fiancé Mehdi pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme permanent. Merci d'avoir été là, de m'avoir supporté et de m'avoir toujours encouragée.

Table des matières

Introduction générale.....	1
 Chapitre 1 : Etude bibliographique	5
1. Introduction.....	5
2. Le procédé de rodage	5
2.1. Technologies de rodage	6
2.1.1. Rodage plateau.....	6
2.1.2. Rodage hélico-glissant	7
2.1.3. Rodage avec texturation laser	7
2.1.4. Rodage avec fausse culasse	8
2.1.5. Performances comparées des variantes du rodage industriel.....	8
2.2. Mécanismes physiques activés en rodage.....	10
2.3. Influence des variables process en rodage.....	14
2.3.1. Variables liées à la machine.....	15
2.3.2. Variables liées à l'outil	19
2.3.3. Variables liées à la pierre abrasive.....	19
2.3.4. Variables liées au matériau rodé	23
3. Contrôle de la qualité des surfaces rodées	24
3.1. Spécification fonctionnelle requise.....	24
3.2. Contrôle industriel appliqué en production.....	28
3.2.1. Contrôle de la topographie.....	26
3.2.2. Contrôle industriel de l'aspect de surface en production.....	28
3.2.3. Limites du contrôle industriel	29
3.3. Quelles méthodes alternatives de caractérisation des surfaces rodées ?.....	29
3.3.1. Méthode statistique	30
3.3.2. Méthodes de décomposition Pics/Vallées (PV).....	31
3.3.3. La décomposition multi-échelle.....	33
3.3.4. Comment caractériser l'aspect de surface rodée ?.....	33
4. Conclusion	35

Chapitre 2 : Banc de rodage instrumenté et protocole expérimental développé	37
1. Introduction	37
2. Banc de rodage à l'échelle 1	37
3. Instrumentation intégrée	42
3.1. Détermination de la puissance de rodage « P_{rodage} »	42
3.2. Mesure des efforts de coupe	43
4. Méthodologie expérimentale	45
4.1. Pierres de rodage	45
4.2. Pièces d'essais	45
4.3. Cycles de rodage	47
4.4. Procédure expérimentale	49
5. Métrologie des surfaces rodées	49
5.1. Mesure des diamètres	49
5.2. Mesure des écarts de forme	50
5.3. Mesure de l'état de surface	50
5.3.1. Mesurage tactile 2D	50
5.3.2. Mesurage optique 3D	52
5.4. Mesure de l'aspect de surface	54
6. Conclusion	55
 Chapitre 3 : caractérisation multi-échelle des surfaces rodées	 56
1. Introduction	56
2. Analyse multi-échelle par ondelettes continues	57
2.1. Principe	57
2.2. Conditions d'existence des ondelettes	58
2.3. Famille d'ondelettes	58
2.4. Transformée en ondelettes	60
2.5. Transformée en ondelettes inverse	60
3. Algorithme de caractérisation multi-échelle par ondelettes continues	61
3.1. Spectre multi-échelle d'état de surface	62
3.2. Etude de la taille optimale des surfaces échantillons	63
4. Etude de l'influence du choix de la fonction ondelette	65
4.1. Les différentes familles d'ondelettes testées	66

4.2. Effet du choix de l'ondelette « Mère »	68
4.3. Sensibilité du choix de l'ondelette à l'amplitude de rugosité	72
5. Caractérisation objective de l'aspect de surface	74
5.1. Angle de rodage " θ "	74
5.1.1. La méthode de la DSP.....	75
5.1.2. La méthode de la transformée de Radon.....	76
5.2. Densité des stries " D_s "	76
5.3. Coefficient de striation " R_s "	77
5.4. Taux des stries résiduels " m_{turn} "	77
6. Conclusion	79

Chapitre 4 : Etude de l'intervention des variables process par distorsion des macros et micro-topologies spécifiques au rodage : concept de signature process multi-échelle80

1. Introduction.....	80
2. Analyse multi-échelle de l'effet des différentes étapes de rodage.....	81
2.1. Concept de signature process multi-échelle (CSPM)	81
2.2. Identification de la signature multi-échelle de chaque étape du rodage plateau.....	82
3. Intervention des paramètres process en rodage de finition.....	85
3.1. Influence de la taille de grain des pierres en carbure de silicium vitrifié	86
3.1.1. sur les performances du process en rodage finition	86
3.1.2. sur la qualité de la surface.....	87
3.2. Processus physiques induits par le facteur de granulométrie.....	91
3.3. Application du CSPM à la conception du process de rodage	95
3.4. Influence des variables cinématiques sur les performances de rodage.....	96
3.4.1. Impact de la vitesse d'expansion	96
3.4.2. Influence de la vitesse de coupe.....	100
4. Conclusion	105

Chapitre 5 : Etude d'applications Process/Produit comprises et concertées par analyse multi-échelle et qualification fonctionnelle.....107

1. Introduction.....	107
2. Etude du procédé de rodage diamant	108
2.1. Le rodage avec des pierres en diamant métallique	108

2.1.1. Etude des performances du process	109
2.1.2. Etude de la qualité des surfaces produites	112
2.2. Le rodage avec de nouvelles structures de pierres à base de grains diamant	115
2.2.1. Etude des performances du process	116
2.2.2. Identification des mécanismes physiques activés	118
2.2.3. Etude de la qualité des surfaces produites	121
3. Etude du besoin fonctionnel des surfaces des fûts dans le tribosystème SPF	124
3.1. Description du modèle de contact hydrodynamique SPF	125
3.2. Procédure numérique de résolution	127
3.2. Processus de génération des surfaces simulées.....	128
3.3. Effet de l'aspect de surface sur le frottement dans le système SPF	129
3.3.1. Effet de l'angle de rodage	129
3.3.2. Effet de la densité des stries.....	130
3.3.3. Effet du coefficient de striation.....	131
4. Conclusion.....	131
Conclusion Générale et perspectives.....	133
Annexe 1 : Production scientifique	136
Annexe 2 : Enveloppes Soleau déposées.....	138
Annexe 3 : Etude de cas industriels.....	145
Références bibliographiques	149

Liste des figures

1. (a) Photo d'une opération de rodage manuel. (b) Machine de rodage mécanisée de type GEHRING.....	6
2. Exemple de profil généré par rodage Plateau	7
3. Les trois mécanismes élémentaires d'usure abrasive (a) labourage, (b) coupe et (c) fragmentation.....	10
4. Transition du mode labourage à celui de la coupe.....	11
5. Schéma du dispositif expérimental utilisé par Lee et al. pour l'étude des mécanismes physiques activés pendant le rodage.	12
6. Définition des domaines des mécanismes physiques en fonction du degré de pénétration	16
7. Dispositif de simulation du rodage externe	17
8. Schéma de représentation de la cinématique du procédé de rodage.....	18
9. Modèle visco-élastique de l'action d'un outil en rodage profond	19
10. Surface de fût de carter (a) Vue 2D (b) Vue 3D	25
11. Paramètres de la norme ISO 13565 définis à partir de la courbe de portance.....	27
12. Les paramètres CNOMO définis à partir de la courbe de portance.....	27
13. Les différents types de qualité de fûts de carter cylindre définis par le constructeur automobile Renault : (a) Type 1 ; (b) Type 2 ; (c) Type 3 ; (d) Type 4.....	29
14. Courbe d'Abbott linéarisée de la surface de fût de carter à l'étape finition et à l'étape plateau	32
15. Définition des zones fonctionnelles PMH (Point Mort Haut), PM(Point Milieu) et PMB(Point Mort Bas).....	33
16. Modélisation texturale de surface rodée	34
17. Principe schématique de la transformée de Radon	35
18. Vue d'ensemble du banc de rodage à l'échelle 1	38
19. Illustration des composantes principales d'une unité de rodage.....	38
20. Représentation schématique de l'outil de rodage à (a) simple expansion et à (b) double expansion.	40
21. Illustration des pierres et de leurs supports pour un outil de rodage	40
22. Croquis du système d'entraînement hydraulique.....	41
23. Schéma du dispositif d'expansion (a) mécanique, (b) hydraulique.....	42

24. Courbe typique de l'évolution de la puissance consommée pendant une opération de rodage.....	43
25. Représentation schématique des composantes des efforts de coupe relatifs au procédé de rodage.....	43
26. Localisation du capteur d'effort au niveau du moteur d'expansion.	44
27. Localisation du capteur de mesure de la pression hydraulique d'expansion.....	45
28. Représentation schématique des carters à quatre cylindres.	46
29. Deux exemples d'aspect au grossissement 100 des distributions des graphites au sein de la fonte GL04 utilisée.....	47
30. Illustration d'un cycle typique des phases de Rodage Ebauche (RE) ou Finition (RF).48	
31. Illustration d'un cycle typique de la phase de Rodage Plateau (RP).	48
32. Appareil de mesure des diamètres (SUBITO)	49
33. Dispositif de mesure des écarts de forme.	51
34. Illustration de la machine Surfscan pour la profilométrie tactile.....	51
35. Schématisation des trois niveaux de mesures PMH, PM et PMB.	52
36. Interféromètre optique en lumière blanche.	53
37. Comparaison entre les paramètres d'état de surface obtenus par une mesure3D directe de la surface rodée et celle issue d'une réplique.....	54
38. Le plan Espace-Echelles de la transformée en ondelettes.	57
39. Génération d'une famille de l'ondelette chapeau mexicain et sa transformée de fourrier à différentes échelles.....	59
40. Division du domaine fréquentiel pour la Transformée par Ondelette (TO) (couverture logarithmique).....	60
41. Décomposition multi-échelle d'un profil d'une surface rodée : (a) signal topographique, (b) plan de reconstruction montrant les échelles caractéristiques des composantes de la surface rodée.....	62
42. (a) Profil d'une surface rodée et (b) son spectre S _{Ma} associé.....	63
43. Spectres des moyennes des coefficients d'ondelettes de surfaces de fûts de carters cylindre de différentes qualités d'aspect.....	64
44. Différentes familles d'ondelettes (a) Chapeau Mexicain (2ème dérivée d'une gaussienne), (b) 8ème dérivée d'une gaussienne (DOG8), (c) Morlet et (d) Meyer	67
45. Décomposition d'un profil topographique d'une surface rodée par différentes familles d'ondelettes : (a) Profil topographique d'une surface rodée, plan de reconstruction	

obtenue avec l'ondelette (b) Morlet, (c) Chapeau Mexicain, (d) DOG8, (e) Meyer et (f) Paul d'ordre 2 (Paul2).....	69
46. Spectres SMA obtenus par différentes fonctions d'ondelette analysante.....	70
47. (a) Profil topographique d'une surface rodée, (b) Exemple d'un motif sélectionné représentatif d'une surface rodée.....	70
48. Signal $t^{(x)}$ composé de deux motifs à deux échelles et positions différentes.....	71
49. Comparaison des performances de localisation spatiale et fréquentielle avec différentes fonctions d'ondelettes : (a) Chapeau mexicain, (b) Meyer, (c) Morlet, (d) dérivée première d'une gaussienne, (e) dérivée 4ème d'une gaussienne, (f) dérivée 8ème d'une gaussienne	72
50. Signal composé par le motif élémentaire à deux positions et échelles différentes ($x=20$ et $x=40$) et incluant du bruit additionnel.....	73
51. Comparaison des performances de localisation spatiale et fréquentielle avec différentes fonctions d'ondelettes : (a) Meyer, (b) dérivée 8ème d'une gaussienne, (c) Morlet.....	73
52. (a) Surface de fût de carter cylindre, (b) sa DSP et (c) sa rose d'anisotropie.....	75
53. DSP d'une surface de chemise moteur : Définition des domaines A et $A_{\perp}$	78
54. Calcul du paramètre m_{turn} pour une surface de fût de carter : au niveau du point mort haut (a), au niveau du point milieu (b).....	78
55. Signature multi-échelle des trois étapes de rodage (a) Ebauche, (b) Finition et (c) Plateau	83
56. Evolution du taux d'enlèvement de matière en fonction de la taille des grains abrasifs (paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).....	86
57. Variations de l'usure des pierres abrasives en fonction de la taille des grains SiC pour trois vitesses d'expansion $1,5\mu\text{m/s}$, $4\mu\text{m/s}$ et $8\mu\text{m/s}$ (paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).....	87
58. Evolution de l'écart géométrique de cylindricité en fonction de la taille des grains abrasifs. (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).....	88
59. Evolution de la cylindricité en fonction du taux d'enlèvement de matière.....	88
60. Les variations des paramètres fonctionnels de rugosité C_r , C_f et C_l avec la taille des grains SiC. (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).	89

61. Evolution des spectres multi-échelles de rugosité SMA en fonction de la taille des grains. (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).....	90
62. Observation de l'aspect de surface rodées avec différentes tailles de grains de SiC (a)110 μm , (b)180 μm et (c)240 μm . (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	90
63. Variations de la densité des stries D_s en fonction de la taille des grains SiC (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	91
64. Evolution de l'énergie spécifique avec la taille des grains SiC. (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).....	92
65. Structures des pierres abrasives pour deux granulométries 110 μm et 380 μm dont les caractéristiques avant (à gauche) et après rodage (à droite) s'apparentent à celles des meules de rectification. (a1 et a2) structure hétérogène et poreuse à faible granulométrie favorisant le recouvrement par les micro-copeaux de rodage, (b1 et b2) structure plus ouverte à forte granulométrie dont les volumes inter-granulaires seront des sites de logement des micro-copeaux de rodage.	93
66. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps de rodage pour trois tailles de grains 60 μm ; 110 μm et 180 μm . (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).....	94
67. Spectre multi-échelle de rugosité d'une surface ébauchée.....	95
68. Taux d'enlèvement de matière en fonction de la vitesse d'expansion pour deux tailles de grains 110 μm et 145 μm . (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	96
69. Evolution de l'énergie spécifique en fonction de la vitesse d'expansion en rodage finition avec les tailles de grains 145 μm et 110 μm (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	97
70. Evolution de l'usure des pierres en fonction de la vitesse d'expansion en rodage finition avec les tailles de grains 145 μm et 110 μm (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	98
71. Variations de la cylindricité en fonction de la vitesse d'expansion pour deux tailles de grains 110 μm et 145 μm . (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	98
72. Influence de la vitesse d'expansion sur les paramètres de rugosité C_r , C_f et C_l (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	99
73. Spectres multi-échelle de rugosité à différentes vitesses d'expansion pour deux tailles de grains (a) 110 μm et (b) 145 μm . (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$	100

74. Évolution de la densité des surfaces rodées D_s en fonction de la vitesse d'expansion	100
75. Taux d'enlèvement de matière en fonction de la vitesse de coupe (Paramètres process : taille de grains $d=110\text{ }\mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	101
76. Usure des pierres abrasives SiC en fonction de la vitesse de coupe (Paramètres process : taille de grains $d=110\text{ }\mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	101
77. Variation de l'énergie spécifique en fonction de la vitesse de coupe (Paramètres process : taille de grains $d=110\text{ }\mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	102
78. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de coupe (Paramètres process : taille de grains $d=110\text{ }\mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	103
79. Les variations de la cylindricité (C) avec la vitesse de coupe (Paramètres process : taille de grains $d=110\text{ }\mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	103
80. Les variations des paramètres d'état de surface C_r, C_f et C_l avec la vitesse de coupe (Paramètres process : taille de grains $d=110\text{ }\mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	104
81. Les spectres multi-échelles de rugosité S_{Ma} en fonction de la vitesse de coupe sur les intervalles d'échelles (a) $[0,1000\text{ }\mu\text{m}]$ et (b) $[0,200\text{ }\mu\text{m}]$ (Paramètres process : taille de grains $d=110\text{ }\mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	105
82. Images microscopiques aux grossissements x200 et x1000 des pierres en diamant métalliques après la phase de mise au rond.	109
83. Evolution du taux d'enlèvement de matière avec la vitesse d'expansion pour deux tailles de grains en Diamant à $76\text{ }\mu\text{m}$ et $91\text{ }\mu\text{m}$. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	110
84. Structure des pierres abrasives en diamant métallique (a) au départ, après rodage avec vitesse d'expansion (b) $4\text{ }\mu\text{m/s}$, (c) $6\text{ }\mu\text{m/s}$, (d) $8\text{ }\mu\text{m/s}$ et (e) $10\text{ }\mu\text{m/s}$. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	111
85. Exemples d'images microscopiques de comparaison entre la forme des arêtes de coupe après la phase de rodage finition avec (a) des grains diamant et (b) des grains carbure de silicium (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\text{ }\mu\text{m/s}$)	112
86. Variations de la cylindricité C en fonction de la vitesse d'expansion pour les pierres en diamant D91 et D76 (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	112
87. Variations des paramètres fonctionnels de rugosité en fonction de la taille des grains diamant et la vitesse d'expansion. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	113

88. Spectre multi-échelle de rugosité du diamant métallique D91 à différentes vitesses d'expansion (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$).....	114
89. Densités des stries de surfaces rodées avec du diamant métallique à différentes vitesses d'expansion (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)	114
90. Morphologie structurale des différentes pierres à base de diamant : (a) diamant métallique, (b) diamant vitrifié et (c) diamant résinoïde	116
91. Taux d'enlèvement de matière en fonction du type de liant agglomérant les grains de diamant. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$).....	117
92. Comparaison de l'usure des pierres abrasives avec Diamant vitrifié et Carbure de Silicium vitrifié (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)	117
93. Evolution de l'indice de rodage H en fonction du nombre de cylindres rodés pour différentes structures de pierres en diamant (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)	118
94. Variation de l'énergie spécifique en fonction du type de liant appliqué aux grains diamant $107\mu\text{m}$ (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)	119
95. Morphologies des pierres de rodage (a) Dia-M (a), (b) Dia-V et (c) Dia-R (c) à deux grossissements (1) x200 et (2) x500 (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)	120
96. Modes d'usure des pierres abrasives	120
97. Variations de la cylindricité avec différents types de liant à grains diamants (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$).....	121
98. Les variations des paramètres d'état de surface en fonction du type de liant agglomérant les grains diamant (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)	122
99. Spectres multi-échelles de rugosité pour les pierres à grains diamants et à liants vitrifié, résinoïde et métallique. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)	123
100. Variation du paramètre Ds de densité des stries en fonction du type de liant (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)... ..	123
101. Schématisation du modèle de contact entre une surface rugueuse R et une surface plane P pour la simulation du contact SPF.	125
102. Description du contact SPF.....	127
103. Illustration des surfaces simulées.....	128

104. Différentes surfaces simulées avec des angles de rodage à (a) 20°, (b) 50°, (c) 120° et (d) 160°.....	129
105. Impact de l'angle de rodage sur le coefficient de frottement.....	130
106. Effet de la densité des stries Ds sur le coefficient de frottement.....	130
107. (a) stries balancées (surface conforme) (b) stries non balancées (surface non conforme).....	131
108. Evolution du coefficient de frottement avec le coefficient de striation Rs.....	131

Liste des tableaux

1. Comparaison entre les performances de différentes technologies de rodage industriel.....	9
2. Caractéristiques des pierres de rodage industriel.....	46
3. Composition chimique de la fonte grise GL08.....	46
4. Relation entre précision de mesure et taille de surface cible en fonction de la résolution de mesurage optique. Essais effectués avec un interféromètre optique VEECO NT.....	63
5. Erreur de reconstruction générée par différentes fonctions d'ondelette analysante.....	68
6. Conditions opératoires des différentes étapes du processus de rodage plateau.....	83
7. Caractéristiques géométriques et topographiques des fûts de carter cylindre après la phase de rodage ébauche.....	85

Introduction générale

L'industrie automobile est confrontée aujourd'hui à une demande atone mais qui reste exigeante en termes de performances et de coût économique dans un contexte de concurrence accrue et d'exigences environnementales de plus en plus strictes. Les constructeurs automobiles ont, alors, engagé une course à des innovations importantes en procédés de fabrication et en conception produit pouvant offrir une meilleure efficacité industrielle.

Le downsizing est aujourd'hui l'un des principaux défis à relever pour répondre à ces exigences. L'introduction de l'injection directe, des technologies de suralimentation ou encore le turbo ont permis de réduire les cylindrées des moteurs et les consommations de carburant tout en gardant (voire en augmentant) la puissance du moteur. Toutefois, ce type de moteur « downsizés » se heurte à un verrou technologique lié à la mise en œuvre de trous d'injecteurs encore plus fins supportant une pression plus élevée. Cela nécessiterait obligatoirement un carburant exempt de toute impureté, ce qui est loin d'être le cas actuellement. De plus, ces technologies nécessiteraient des investissements de développement et de mise en production assez élevés.

Un autre axe de développement est donc proposé pour déployer de nouvelles technologies de finition répondant à des tolérances géométriques et des états de surfaces des pièces du moteur encore plus strictes. Un intérêt particulier est accordé aux processus de fabrication et de finition des fûts de carter cylindre pour leur rôle déterministe dans la définition de la qualité fonctionnelle du moteur. Il a, en effet, été montré que c'est le compartiment Segment-Piston-Fût (SPF) qui représente la plus grande part de pertes par frottement (environ 40%) [1]. La texture finale de la surface du fût intervient dans la prévention de l'usure, du grippage et conditionne fortement les propriétés de frottement et de lubrification de la zone de contact segment/fût [1]. Toutefois, la typologie de ces surfaces reste tributaire d'un consensus industriel définissant des textures classiques des fûts de carter-cylindre. Elles consistent à définir des stries croisées à 50° par rapport aux génératrices avec des largeurs moyennes de 40 μm pour la rétention de l'huile et des plateaux de striation très fine ayant des rugosités arithmétiques « R_a » de 0.1 à 0.3 μm pour assurer un meilleur glissement. Ces surfaces sont générées par la technologie de rodage à l'abrasif qui consiste à presser un outil de rodage avec

des pierres abrasives contre le cylindre tout en réalisant deux mouvements de rotation et d'oscillations simultanés. Les conditions cinématiques d'expansion des pierres abrasives, de rotation et d'oscillation de l'outil ainsi que la granulométrie et le type de grains définissent les différentes étapes et types de rodage, c'est-à-dire le process de rodage.

En règle générale, les surfaces finies sont parachevées par succession des trois étapes suivantes :

- **Rodage Ebauche** avec des abrasifs diamants de granulométrie élevée pour corriger la forme et définir la striation initiale ;
- **Rodage Finition** avec des abrasifs diamants ou carbure de silicium de granulométrie plus fine afin d'enlever les crêtes hautes et atteindre la rugosité recherchée ;
- **Rodage Plateau** avec des abrasifs encore plus fins pour écrêter les pics de la surface et obtenir une texture de surface similaire à celle résultante d'un rodage moteur.

L'enchaînement de ces trois étapes et la complexité du contact de la pierre de rodage avec la surface finie-due aux interactions entre les différentes variables process, le matériau utilisé et le type de pierre- ne permettent pas de bien maîtriser la qualité de la surface résultante. Celle-ci est, par ailleurs, contrôlée par des expertises ex-situ de :

- la topographie de la surface avec la définition de critères d'état de surface via la courbe de portance ;
- l'aspect de surface avec une investigation visuelle de la surface réalisée par « un expert métier » jugeant ainsi de son acceptabilité et sa conformité au besoin fonctionnel.

La difficulté inhérente à cette caractérisation de la surface relève de l'absence d'une méthodologie assez sensible aux différentes distorsions texturales résultant du process. De plus, l'appréciation subjective de l'aspect de la surface ainsi que la multitude des paramètres process compliquent la détermination de relations directes entre les variables process et les critères fonctionnels. En effet, chaque spécification du produit est déterminée par un savoir-faire technologique et une multitude d'essais expérimentaux qui définissent d'une façon empirique la combinaison des paramètres process à mettre en place.

Le présent travail se propose de traiter le triplet Process/Métrie/Produit dans le cas du rodage des carters cylindre en fonte grise à graphite lamellaire. Il s'agit de conduire une recherche capable de faire apparaître les mécanismes physiques caractéristiques de la technologie de rodage en harmonie avec les conditions opératoires et le besoin fonctionnel décliné en tolérances géométriques de forme, d'aspect et d'état de surface. Les composantes texturales de la surface doivent être déployées sous forme de paramètres objectifs sensibles

aux différentes irrégularités de la surface en allant des échelles microscopiques (critères microgéométriques d'état de surface) aux échelles macroscopiques (aspect de la surface). Ces critères doivent, au final, permettre de définir des corrélations entre le besoin fonctionnel et la capacité du process.

Le contenu du présent manuscrit s'articule de la façon suivante :

- Un chapitre de synthèse bibliographique subdivisé en deux parties. Une première qui relate les différents travaux scientifiques relatifs au procédé de rodage comme étant un procédé de finition par abrasion. Et une seconde qui expose les différentes approches métrologiques de caractérisation des surfaces finies en général et rodées en particulier ;
- Le deuxième chapitre expose la démarche expérimentale mise en place pour l'étude du procédé de rodage avec une métrologie adaptée et une instrumentation intégrée permettant l'analyse des phénomènes physiques régissant ce procédé ;
- Le troisième chapitre décrit la méthodologie de caractérisation des surfaces rodées développée. Cette méthodologie est basée sur une approche multi-échelle qui permet de s'affranchir des limitations des méthodes industrielles et de décrire les modifications des composantes texturales de la surface résultant du rodage. Elle est associée à une caractérisation objective de l'aspect de la surface par la définition de nouveaux critères de quantification de la structure de la surface rodée ;
- Le quatrième chapitre est consacré à l'application de cette méthodologie pour une mesure quantitative de la signature multi-échelle du process de rodage et de sa variation avec les paramètres du procédé afin d'identifier leur influence. L'étude et la compréhension des processus physiques qui prennent naissance dans le contact dynamique pierre abrasive/surface, en harmonie avec la topologie et l'aspect de la surface, permettent de définir les relations exactes d'enchaînement causes/conséquences de l'intervention de chaque variable procédé ;
- Le cinquième chapitre expose deux applications de la méthodologie de l'analyse multi-échelle développée dans la conception process/produit. La première application concerne l'analyse de la productivité et l'efficacité du process avec le rodage diamant et l'introduction de nouvelles structures de pierres abrasives à grains diamants et liants modifiés. La seconde application démontre la sensibilité des nouveaux critères d'aspect de la surface à la fonctionnalité du produit en utilisant un modèle de contact du tribosystème Segment/Piston/Fût.

La possibilité d'extension de cette nouvelle approche d'analyse de process à d'autres procédés de finition par abrasion sera discutée et les perspectives d'études qui nous semblent essentielles pour la suite seront enfin énoncées.

Chapitre 1

Etude bibliographique

1. Introduction

On se propose dans ce chapitre de faire un état de l'art des travaux scientifiques qui se sont intéressés à la problématique du sujet. La première partie sera consacrée à la définition du procédé de rodage avec ses différentes variantes tout en le reliant à la théorie de l'abrasion. L'intervention des paramètres d'influence majeure dans l'obtention du fini de surface sera discutée. On consacrera la deuxième partie, par la suite, à la définition des caractéristiques des surfaces rodées. Elle comportera également une analyse critique des différentes méthodes étudiées dans la littérature pour caractériser ces surfaces avec leurs points forts et leurs limitations.

2. Le procédé de rodage

Le procédé de rodage est une technologie d'enlèvement de matière par abrasion. Gehring est l'un des premiers industriels à automatiser le rodage sur machine-outil en 1926 (figure 1). Le procédé a été ensuite vulgarisé avec l'introduction de la commande numérique dans les années 50 et le développement de différentes variantes d'outils abrasifs [2].

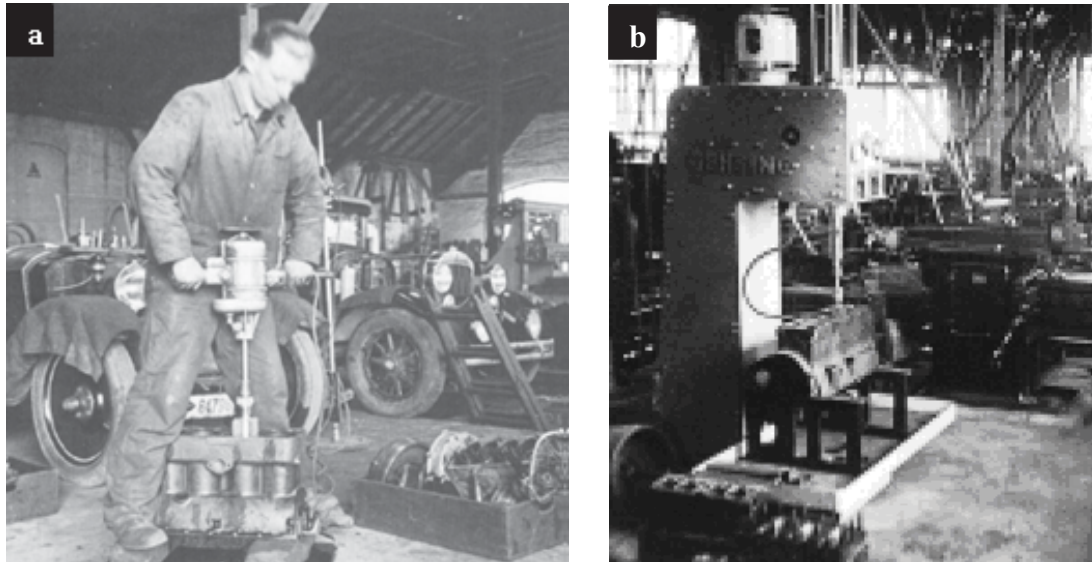


Figure 1. (a) Photo d'une opération de rodage manuel. (b) Machine de rodage mécanisée de type Gehring.

La cinématique du procédé de rodage intérieur résulte de trois mouvements de pierres prismatiques montées flottantes sur un support (un outil de rodage) afin d'assurer leur auto-centrage dans l'alésage. Elles sont animées d'un mouvement hélicoïdal (résultant d'une rotation et d'une translation combinées) et d'une expansion radiale.

La combinaison de ces trois mouvements par frottement et abrasion permet d'obtenir une texture anisotrope de surface caractérisée par des stries croisées avec un angle de striation " θ " appelé « angle de rodage » [3]. L'intensité et l'enchaînement de cette cinématique permet de distinguer différentes variantes du rodage utilisées selon la typologie de la surface industrielle recherchée. Les plus utilisées d'entre elles sont présentées dans le paragraphe suivant.

2.1. Technologies de rodage

Les différentes technologies de rodage développées ont pour objectif de satisfaire des exigences de qualité des surfaces rodées de typologie de plus en plus fine. Voici ci-après une présentation des principales variantes du rodage utilisées en industrie.

2.1.1. Rodage plateau

Le rodage plateau est l'une des variantes de rodage la plus utilisée dans l'industrie automobile [2,3]. Il est défini, aujourd'hui, comme étant le rodage conventionnel. La surface finie est obtenue à la suite d'une troisième étape succédant le rodage ébauche et finition afin de réduire les pics et la profondeur des vallées de la surface. La figure 2 montre un profil de

surface obtenue en rodage plateau. Ce procédé permet de générer des surfaces similaires à celles obtenues lors du rodage moteur. Ce qui a pour conséquence de réduire le temps de rodage moteur [4,5] et de diminuer l'usure pendant cette période [6,7]. Les surfaces recherchées par ce procédé sont caractérisées par un angle de rodage allant de 30° à 60° afin d'optimiser la consommation d'huile et de réduire les frottements dans la chambre Segment-Piston-fût (SPF) [8].

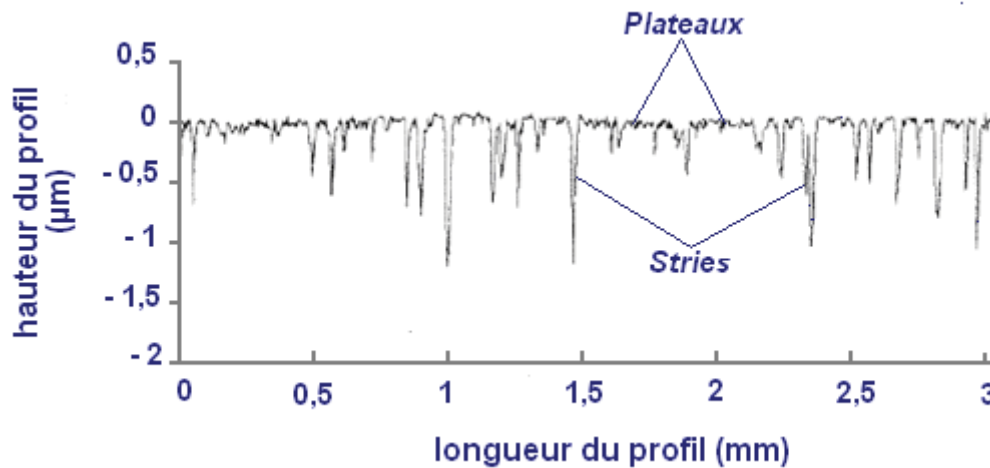


Figure 2. Exemple de profil généré par rodage Plateau

2.1.2. Rodage hélico-glissant

Cette méthode de rodage a été inventée par Wolf Nagel en 1997 [9]. Elle fait intervenir une vitesse axiale prépondérante permettant ainsi d'obtenir des stries de rodage suivant un angle de l'ordre de 135° avec une faible rugosité. Ce procédé commence à intéresser de plus en plus les scientifiques et les industriels [10,11]. D'après Weigmann et al., des tests moteurs ont montré que ce type de rodage permet en effet de réduire la consommation d'huile des moteurs de 40% à 70% par rapport à un rodage conventionnel [12].

2.1.3. Rodage avec texturation laser

Ce procédé a été développé par Gehring [13]. Il consiste à créer des éléments texturaux sur la surface rodée. Ces éléments, générés par un faisceau laser, sont caractérisés par une densité, une forme et une distribution spécifique. Ils permettent alors d'avoir une surface plus fine avec des poches de rétention d'huile permettant d'élargir l'intervalle du régime de fonctionnement hydrodynamique du moteur. Des essais basés sur des tests moteurs ont révélé une réduction de 30% à 60% de la consommation d'huile par rapport à un rodage plateau

[11, 14]. Outre le contrôle de la forme des stries profondes de rétention d'huile, les effets thermiques du laser contribuent à l'amélioration des propriétés mécaniques de la surface après rodage. Différents travaux ont porté sur l'optimisation de la texturation laser générée en travaillant sur la forme, la distribution ou l'orientation des structures. La structuration des surfaces demeure toutefois empirique. Par exemple, la longueur de la cavité peut varier de 1 à 3 mm ou encore la limitation de la texturation aux zones du Point Mort Haut (PMH) et au Point Mort Bas (PMB) de la course du Segment-Piston- Fût. L'intérêt majeur de la texturation laser des surfaces rodées réside dans le contrôle de la régularité de structuration des surfaces avec une distribution spécifique des cavités intérieures [14]. Bien que ce procédé ait donné des résultats satisfaisants au niveau de la consommation d'huile, les faisceaux laser induisent des bavures pouvant dégrader le contact segment-fût. D'un point de vue industriel, cette solution reste toutefois onéreuse et n'est utilisée que par peu de constructeurs sur des applications de moteurs à hautes performances.

2.1.4. Rodage avec fausse culasse

En plus de l'obtention d'une rugosité spécifique, le process de rodage corrige également les erreurs de forme engendrées par les opérations précédentes. La sévèrisation des intervalles de tolérance de cylindricité et de circularité ainsi que l'introduction d'autres matériaux tels que l'Aluminium ont nécessité la prise en compte des contraintes imposées sur le carter après son assemblage. Le rodage assisté avec fausse culasse vient alors reproduire le même environnement de contrainte. Il consiste à monter des plaques de déformation sur la face supérieure du carter avec un couple prédéfini afin de réaliser une correction des déformations engendrées après assemblage de la culasse et le carter [15].

2.1.5. Performances comparées des variantes de rodage industriel

Le rodage plateau reste la technologie la plus utilisée aujourd'hui par la plupart des constructeurs. Les autres procédés ont été mis en place sans pour autant définir des raisons rigoureuses de choix de l'un par rapport à l'autre. Il s'agit souvent de compromis entre un savoir-faire technologique et des contraintes industrielles pilotées par un coût économique. On donne à ce sujet le tableau 1 qui reproduit des résultats obtenus (chez différents constructeurs) sur les performances ordinaires de finition pour différentes technologies de rodage industriel. La première colonne énumère les procédés de finition par rodage couramment utilisés. La deuxième colonne regroupe l'enchaînement des opérations relatif à chaque procédé de rodage. La troisième qualifie les états de surface atteints par leurs degrés de fini (rugosité) et leur

degré de surface portante représentée par le paramètre fonctionnel d'état de surface « R_k ». La quatrième colonne donne qualitativement une indication sur les performances technico-économiques de chaque procédé de rodage selon les deux variables « coût » et « fiabilité ». Ce tableau appelle les commentaires que voici :

- le traitement laser après rodage augmente le rapport coût/fiabilité (c'est-à-dire une efficacité technico-économique décroissante) dans des proportions significatives sans pour autant améliorer notablement ni le degré du fini, ni la proportion de surface portante ;
- pour les trois gammes d'usinage triple qui terminent la surface avec l'appoint d'abrasifs sans traitement postérieur, il y a constance dans l'efficacité technico-économique avec variation concomitante de l'état de surface et, semble-t-il de son anisotropie texturale (rugosité et aspect).

<i>Procédé de finition</i>	<i>Chaînage process</i>	<i>Texture de la surface (état et aspect de surface)</i>				<i>Performances technico-économiques</i>	
		<i>Angle de rodage (°)</i>	<i>Rugosité (μm)</i>	<i>R_z (μm)</i>	<i>Capacité de charge portante (R_k (μm))</i>	<i>Coût</i>	<i>fiabilité</i>
<i>Rodage plateau (plateau honing)</i>	<i>Ebauche Finition plateau</i>	50	$R_{pk} = 0.4$ $R_{vk} = 2$	7	1.5	++	+++
<i>Rodage glissant (slide honing)</i>	<i>Ebauche Finition Finition</i>	40-60	$R_{pk} = 0.8$ $R_{vk} = 1.03$	2.8	0.33	++	+++
<i>Rodage hélico-glissant (helical slide honing)</i>	<i>Ebauche Finition Finition</i>	130-150	$R_{pk} = 0.1$ $R_{vk} = 1.8$	2.9	0.5	++	+++
<i>Texturation laser (laser honing)</i>	<i>Ebauche Finition Texturation Laser</i>	45	$R_{pk} = 0.99$ $R_{vk} = 1.05$	4.99	1.42	+++	+

Tableau 1. Comparaison entre les performances de différentes technologies de rodage industriel.

De ceci découle que la conception d'un processus de fabrication par rodage n'est pas une opération rationnelle. Elle requiert à priori la conjugaison de deux composantes essentielles :

- une forte connaissance du savoir-faire métiers par les ingénieurs de fabrication ;
- une compréhension approfondie des phénomènes physiques par les ingénieurs de conception des technologies de finition à l'abrasif.

L'ennui est que les connaissances scientifiques actuelles sur la production de surfaces fonctionnelles par des procédés de finition à l'abrasif sont en nombre relativement restreint [16]. Par contre, la littérature scientifique est source d'un grand nombre de travaux sur l'abrasion à deux ou trois corps [16,17]. Examinons dans la bibliographie les conséquences de ces deux constats.

2.2. Mécanismes physiques activés en rodage

Un procédé de finition à l'abrasif est considéré comme un mécanisme complexe durant lequel un abrasif à dureté élevée raye une surface antagoniste d'un matériau moins dur, engendrant une modification plastique de la surface [18,19]. Le grain abrasif possède plusieurs arêtes et faces de coupe de géométries et de dimensions différentes induisant ainsi différents modes de sollicitations de la surface que sont [20-21] :

- *Mode d'abrasion I de type Labourage* (figure 3.a) : Il se caractérise par l'apparition d'un bourrelet en tête de sillon. Aucun débris ne se détache lors du processus et la trace rémanente est définie comme un sillon plastique ;
- *Mode d'abrasion II de type Coupe* (figure 3.b) : Il se définit par la formation d'un micro-copeau. La surface plane devant la pointe est d'abord déformée pour ensuite former un micro copeau. Ce procédé est similaire à un usinage avec outil coupant à angle d'attaque négatif. Le mode de coupe est régulièrement représenté en abrasion comme une dégénérescence du mode de labourage ;
- *Mode d'abrasion III de type Fragmentation* (figure 3.c) : Il se caractérise par l'apparition de fissures sous forme d'écaillage en arrière de la pointe. Ce mode est lié à la nature du matériau abrasé (fragile).

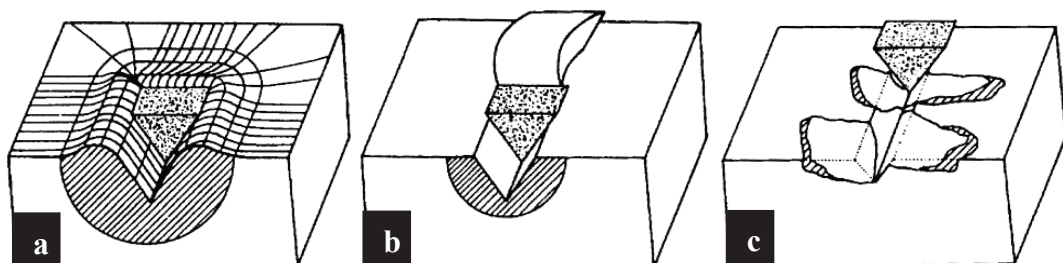


Figure 3. Les trois mécanismes élémentaires d'usure abrasive (a) labourage, (b) coupe et (c) fragmentation [20]

Ces modes élémentaires sont souvent couplés Les seuils de transition d'un mode à un autre sont difficiles à quantifier du fait de leurs dépendances aux paramètres géométriques, cinématiques, rhéologiques et tribologiques du contact (figure 4).

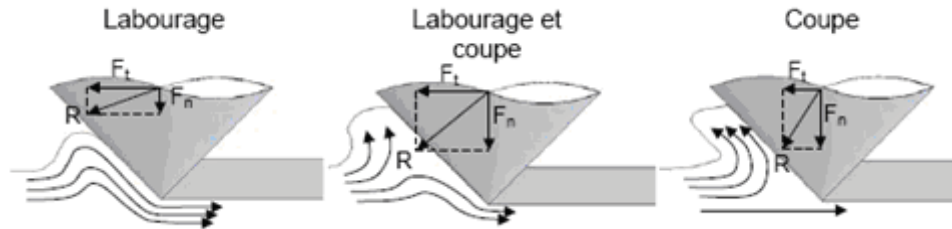


Figure 4. Transition du mode labourage à celui de la coupe [22]

L'étude des mécanismes physiques du contact abrasif/pièce a été abordée en littérature par deux approches différentes : la première dite approche « locale » ou « mono-grain » et la deuxième dite approche « globale » ou « multi-grains ». L'approche « mono-grain » présente l'inconvénient de ne pas tenir en considération la distribution et les interactions entre les grains abrasifs.

Une première étude des mécanismes physiques activés pendant le rodage a été basée sur une approche de modélisation mono-grain avec une représentation sphérique des grains [22, 24].

Salje et al. ont, dans ce sens, essayé d'établir une comparaison entre les procédés de rodage, de rectification et de polissage par une approche mono-grain [23]. Ils ont montré que le procédé de rodage peut être assimilé à un procédé de rectification à faibles vitesses de coupe. Par ailleurs, contrairement à la rectification, les grains sont actifs pendant toute la durée du procédé (le quotient entre temps de coupe par grain et la durée du procédé tend vers 1 pour le rodage alors qu'il est inférieur à 0.01 pour la rectification et variant de 0.1 à 0.5 pour la rectification plane ou le polissage). En plus, en assumant qu'un seul grain est actif par surface unitaire, la force normale par grain au cours de l'opération de rodage est estimée entre 0.8N à 10N.

Lee et Malkin exploitent quant à eux une approche globale. Cette approche a été appliquée aux deux procédés de finition par rodage et par superfinition [25,26]. Dans le cas du rodage, une machine instrumentée a été utilisée afin de mesurer la puissance du moteur de rotation, la pression d'expansion des pierres et le déplacement vertical de la broche. Les forces et les vitesses associées sont schématisées dans la figure 5.

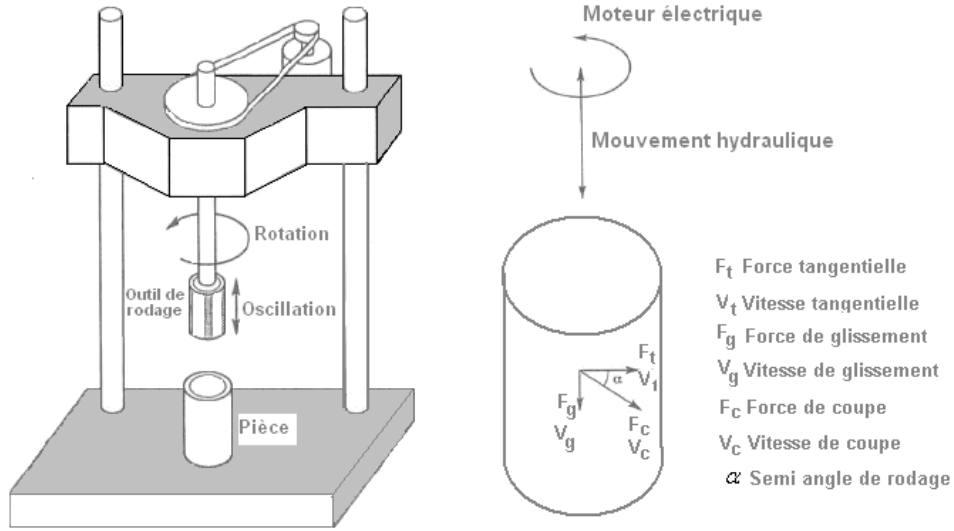


Figure 5. Schéma du dispositif expérimental utilisé par Lee et al. pour l'étude des mécanismes physiques activés pendant le rodage.

Lee et Malkin [25] supposent que, lors du rodage, les forces de frottement se superposent à celles de coupe pour en constituer l'effort global d'abrasion mesuré. Il est clair que la composante « labourage » ou force de déformation ainsi que les forces d'adhésion sont ici négligées. On convient alors que les composantes d'effort de rodage peuvent être calculées ainsi :

$$F_t = F_{t_c} + F_{t_g} \quad (1)$$

$$F_n = F_{n_c} + F_{n_g} \quad (2)$$

Où

F_{t_c} est la composante tangentielle due à l'action de coupe ;

F_{t_g} est la composante tangentielle due à l'action de frottement par glissement ;

F_{n_c} est la composante normale due à l'action de coupe ;

F_{n_g} est la composante normale due à l'action de frottement par glissement.

En définissant le ratio des efforts de coupe et celui des efforts de friction par glissement et en établissant une relation entre la résultante de l'effort normal et le taux d'enlèvement de matière, la relation entre l'énergie spécifique de rodage avec le taux d'enlèvement de matière peut s'écrire de la façon suivante :

$$E_{spc} = A + \frac{B}{Q_w} \quad (3)$$

Les constantes A et B dépendent des ratios des efforts et de la vitesse de coupe. Leur définition ainsi que la prise en compte de la décomposition de l'énergie spécifique de coupe en énergie spécifique de formation de copeau et énergie spécifique de labourage ont permis de définir les régimes de rodage en fonction du taux d'enlèvement de matière.

Suivant la valeur du paramètre taux d'enlèvement de matière, on distingue deux régimes bornés par les énergies spécifiques mises en jeu à la suite du rodage :

Régime 1 : $E_{spc} = E_{spc\text{copeau}} + E_{splabourage} = 26 J / mm^3 = \text{constante}$ (4)

Avec $Q_w < 22 mm^3 / s$

L'énergie spécifique est indépendante de la quantité de matière enlevée, tant que $Q_w < Q_w^l$.

Dans ce cas, le mécanisme de coupe prédomine l'action abrasive en rodage et suggère que le pouvoir de coupe des grains abrasifs est pratiquement constant et contenu dans les interfaces grain/pièce sans usure granulaire sensible.

Régime 2 : c'est le cas opposé :

$$E_{spc} = E_{spc\text{copeau}} + E_{splabourage} = 13 + \frac{332}{Q_w} (J / mm^3) \quad (5)$$

Avec : $Q_w > Q_w^l = 22 mm^3 / s$.

L'énergie spécifique de rodage est inversement proportionnelle au taux de matière enlevée. Comme $Q_w > Q_w^l$, et en outre l'énergie de formation de copeau est constante ($13 J / mm^3$), l'effet d'usure des grains abrasifs se fait plutôt sentir dans ce cas où le mécanisme de labourage prédomine avec un faible pouvoir d'indentation des grains abrasifs (profondeur de pénétration critique ou profondeur de coupe limite).

Quelles que soient les conditions aux limites du process, on peut considérer que cette approche fournit une identification directe des mécanismes d'activation abrasive (coupe ou labourage). Malheureusement, elle correspond à des expérimentations onéreuses dont la corrélation entre les mécanismes identifiés et la mesure classique de surface (c'est-à-dire l'impact du process sur le produit) est très difficile, voire impossible.

Ueda et al. [27] se sont intéressés aux mécanismes physiques régissant le procédé de rodage dans une approche fondée sur la mécanique de coupe conventionnelle. La pierre abrasive est assimilée à une longue arête tranchante de coupe et orthogonale à la direction principale de rodage. De même, l'interface de contact résultante est assimilée à une surface géométrique invariable, avec une épaisseur effective de coupe (a) constante (c'est-à-dire : profondeur de

coupe). Cette épaisseur efficace, déterminée pour certaines caractéristiques de pierre dans des conditions cinématiques données du process, est de la forme :

$$a = K \frac{d(\delta r_w)}{dt} \quad (6)$$

Avec "K" constante dépendante de la technologie de rodage et δr_w la variation instantanée du rayon de la pièce qui varie selon les propriétés du matériau et le pouvoir de coupe de l'abrasif. Des expérimentations sur du rodage externe de la fonte ductile (HB 150) montrent une corrélation entre ce paramètre et les mécanismes d'usure des pierres. En effet, les arêtes de coupe des grains ont tendance à se fracturer plus qu'à s'émousser lorsque le paramètre "a" augmente. Néanmoins, même en reliant ce paramètre à l'énergie spécifique, il n'a pas été possible de détecter des tendances claires de la variation des mécanismes physiques en fonction de la charge normale appliquée. Cette approche souffre par ailleurs de plusieurs limitations :

- l'outil de rodage est vu comme s'il se composait d'un seul grain abrasif, la géométrie étant définie par analogie à celle d'un outil de coupe conventionnelle ;
- les modes d'interactions inter-granulaires étant totalement découplés avec une consommation nulle de l'interface pierre abrasive/ pièce (absence d'usure) tout au long de l'opération de rodage ;
- l'épaisseur effective de coupe est un paramètre ad hoc, dans un modèle très éloigné de la structure des pierres de rodage telle qu'on le décrit maintenant ;
- l'hypothèse d'un équilibre local à l'interface pierre abrasive/pièce est-elle réaliste au cours d'un processus de rodage ?

Tous ces travaux cités sur l'étude des phénomènes abrasifs dans le cas du rodage sont basés sur des essais expérimentaux variant à chaque fois une seule variable process. La complexité et les interactions entre les variables du process n'ont pas été prises en compte. Essayons, alors, d'extraire de la littérature une hiérarchisation des variables d'influence majeure dans le rodage.

2.3. Influence des variables process en rodage

Les variables du procédé de rodage peuvent être classifiées ainsi [28, 29] :

1- Variables machine : pression de contact, vitesse de coupe, temps de rodage ;

2- *Variables outil* (support des pierres) : rigidité, stabilité ;

3- *Variables pierre* : taille des grains, concentration, type de grains, type de liant ;

4- *Variables pièce* : dureté, rugosité, forme.

Il est évident que cette répartition des paramètres n'est qu'une photographie simplifiée du process. Le rodage implique, en effet, des interactions assez complexes entre les variables process. D'ailleurs, le savoir-faire des constructeurs automobile pour le rodage est basé sur des cartes process définies à partir de séries d'essais répertoriées pour différentes applications fonctionnelles. Chang et al. ont tenté de déterminer les interactions entre les paramètres d'influence dans les procédés de finition en faisant intervenir une large gamme de combinaisons de vitesse d'oscillation et de pression de contact avec une vitesse de rotation constante [30]. Ils ont ensuite synthétisé leurs résultats sous forme de carte process reliant la pression de contact à l'oscillation des pierres. Cette carte définit quatre zones comme suit :

- *zone I* définissant un domaine de coupe effective de la pierre. Elle est caractérisée par un taux d'enlèvement de matière élevé, une rugosité importante mais une faible énergie spécifique consommée ;
- *zone II* correspondant à une zone de labourage donnant lieu à un faible taux d'enlèvement de matière, une faible rugosité au prix d'une énergie spécifique élevée ;
- *zone III* dite de transition où les performances du process sont aléatoires ;
- *zone IV* identifiée comme une zone critique où l'on assiste à une augmentation des effets thermiques associés à des énergies spécifiques plus élevées à cause de la prédominance du phénomène de frottement.

D'autres approches expérimentales ont été mises en place pour identifier ces interactions localisées à l'interface outil abrasif/pièce en liaison avec les variables process au cours du parachèvement du fini de surface. On exposera ici les plus pertinentes d'entre elles.

2.3.1. Variables liées à la machine

Les paramètres machine définissent essentiellement la cinématique du procédé et les conditions de contact pierre/pièce. On distingue principalement la pression de contact, la vitesse de coupe et la lubrification.

a) Pression de contact

De façon générale, la pression de contact est l'un des paramètres les plus décisifs qui commande les mécanismes d'usure par abrasion. En mécanique des contacts, l'influence de la

pression de contact a été étudiée par Greenwood et Williamson pour définir la limite entre le comportement élastique et le comportement plastique du contact [31]. Les zones de ces contacts sont conditionnées par un indice " Y " dépendant du matériau et de l'état de surface en fonction de la pression normalisée de contact " P " (égale au rapport entre la pression apparente de frottement et la dureté H). L'indice " Y " de plasticité est obtenu par la formule suivante :

$$Y = \frac{E^*}{H} \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^{0.5} \quad (7)$$

" σ " est l'écart type de la distribution des hauteurs du profil composé des deux surfaces en contact, " β " est le rayon de courbure moyen des aspérités du profil composé, " E^* " le module de Young équivalent et " H " la dureté du corps le moins dur. Cette dépendance n'est autre qu'une transcription de la loi d'Archard. Ainsi, si l'indice Y est inférieur à 0,6, le contact est de type élastique alors que pour " Y " supérieur à 1, le contact est de type plastique.

La pression normale conditionnera par ailleurs le pouvoir d'indentation du grain abrasif et définira par la suite les mécanismes d'abrasion activés [32]. La figure 6 illustre les différents mécanismes activés en fonction du degré d'indentation et la contrainte adimensionnelle de cisaillement " f_k ", i.e le rapport de la contrainte de cisaillement du matériau usiné sur la contrainte de cisaillement de la particule abrasive. Le degré de pénétration " D_g " est défini dans cette étude comme étant le rapport entre la profondeur et la largeur de pénétration de l'indenteur sphérique. Cette figure montre que le mécanisme de coupe activé dépend des propriétés du matériau et de l'abrasif [33].

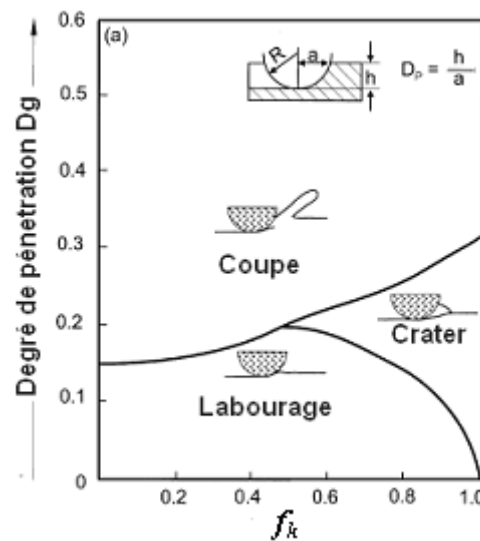


Figure 6. Définition des domaines des mécanismes physiques en fonction du degré de pénétration [33].

Saljé et al. ont également développé un dispositif représenté sur la figure 7 qui consiste à presser à l'aide d'un système hydraulique une pierre de rodage sur la pièce à usiner. Cet essai instrumenté a permis de comparer l'utilisation des systèmes hydrauliques et des systèmes mécaniques pour générer les mouvements de rodage. L'utilisation des systèmes hydrauliques engendre des frottements supplémentaires alors que les systèmes mécaniques ne permettent pas d'avoir la pression locale sans avoir recours à un capteur supplémentaire. La complexité de cette cinématique rend la reproduction des mêmes conditions opératoires difficile. Il a par ailleurs été démontré que la pression de contact entre la pièce et la pierre abrasive dépendra de la course, de la vitesse de rotation, de la rigidité de l'outil ainsi que du matériau usiné [29]. La difficulté relevée par ce travail se manifeste dans la détermination du nombre de grains actifs et la quantification des différents changements que subit la surface réelle de contact entre les grains actifs et la surface usinée.

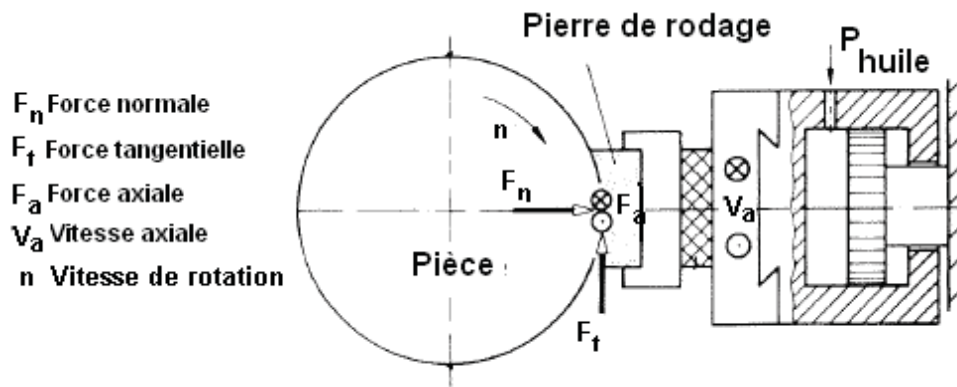


Figure 7. Dispositif de simulation du rodage externe

Ainsi, la majorité des travaux traitant l'impact de la pression d'expansion s'est intéressé à l'impact de la variation de ce paramètre sur l'état de surface rodée. L'étude réalisée par Balasubramanian et al. en est un exemple [32]. Il a abordé l'impact direct de la pression appliquée sur le paramètre de rugosité de surface " R_t " (hauteur maximal du profil de rugosité). De plus, leurs essais expérimentaux ont montré qu'avec des pierres en diamant, l'augmentation de la pression de contact réduit la présence des irrégularités et des dentelles dans la texture.

Nous pouvons également continuer à énumérer les études traitant la charge appliquée en abrasion d'une manière générale mais elles seront toujours limitées à des conditions opératoires particulières ne pouvant être extrapolées facilement aux différents contacts pierre abrasive/pièce lors du rodage. Ce constat confirme, à fortiori, la nécessité de développer une approche d'analyse comme résumé du système global à chaque instant " t ".

b) Vitesse de coupe

La vitesse de coupe en rodage « V_c » est définie par la résultante de la vitesse de rotation « V_r » et la vitesse axiale de l'outil « V_a » (figure 8). Elle est déterminée par l'équation suivante :

$$V_c = \sqrt{V_r^2 + V_a^2} \quad (8)$$

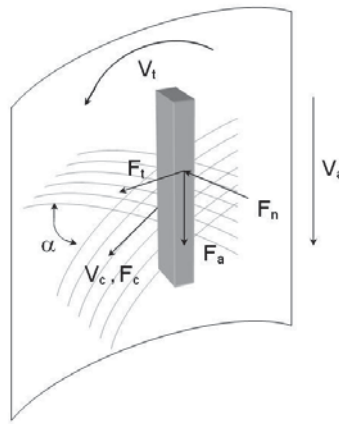


Figure 8. Schéma de représentation de la cinématique du procédé de rodage.

Son impact a été étudié par Sasaki et al. en se basant sur un dispositif test de rodage extérieur avec des pierres en Carbure de Silicium appliqué à des cylindres en fonte grise [34]. Il en est ressorti que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une réduction de la rugosité et à une amélioration du volume d'enlèvement de matière. L'usure des pierres abrasives est également réduite en augmentant la vitesse de coupe. Ces résultats d'impact sont limités à des vitesses inférieures à une vitesse de coupe critique de 40 m/min. L'existence de cette vitesse de coupe critique a été corroborée par les essais de Balasubramanian réalisés dans d'autres conditions process avec des pierres en diamant métallique. Indépendamment des conditions d'essais, ces travaux montrent la présence d'une vitesse de coupe critique pour laquelle les performances de productivité du process (usure de l'outil et taux d'enlèvement de matière) ainsi que la qualité de la texture de la surface générée changent.

c) Liquide d'arrosage

Le liquide de coupe conventionnel utilisé en rodage est l'huile minérale. Celle-ci est utilisée pour ses propriétés notamment en termes de viscosité afin d'assurer une évacuation rapide des copeaux. Cette caractéristique est d'autant plus importante pour le rodage avec des pierres en

Carbure de Silicium à liant vitrifié où les grains se régénèrent aléatoirement et où la structure est poreuse. Toutefois, avec une utilisation grandissante de centres d'usinage et de diamant métallique pour le rodage, un intérêt particulier a été accordé aux liquides de coupe synthétiques [35].

2.3.2. Variables liées à l'outil

L'outil de rodage intérieur des cylindres est constitué d'un support, d'un rodoir et d'un abrasif incrusté dans le rodoir. La forme du rodoir utilisé dépend de la surface à roder : disques plans pour les surfaces planes, bagues pour les arbres, cylindres pour les alésages.

Gouskov et al. ont tenté de modéliser le comportement des rodoirs avec un modèle dynamique pour des applications de rodage profond [36,37]. L'outil de rodage a été modélisé par trois pierres régies par des lois de contact visco-élastiques (figure 9). Ce modèle a été appliqué pour l'analyse de l'effet de la disposition et de la rigidité des pierres sur la forme du cylindre rodé et les vibrations engendrées dans le cas de rodage profond. Il en ressort que l'augmentation de la rigidité de l'outil améliore la forme du cylindre rodé à partir d'un nombre de cycles de course critique. Toutefois, cette augmentation de la rigidité induit des vibrations et un taux d'enlèvement de matière irrégulier agissant sur le fini de surface. Cette modélisation simpliste de rodage profond peut être exploitée pour le rodage interne des fûts de carter en considérant la rigidité de l'outil constante et en négligeant la composante vibratoire.

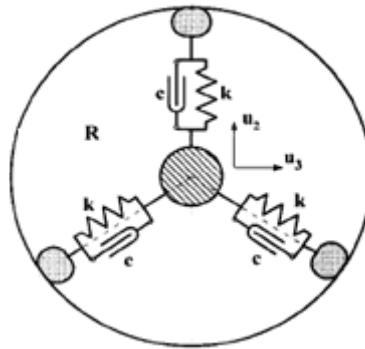


Figure 9. Modèle visco-élastique de l'action d'un outil en rodage profond [36].

2.3.3. Variables liées à la pierre abrasive

Le type de la pierre abrasive joue un rôle décisif pendant la finition avec le process de rodage. Plusieurs aspects de l'abrasif sont pris en compte depuis la phase de sa préparation jusqu'à son usure complète. Dans le process de rodage industriel, la première étape emploie un abrasif avec des tailles de grains plus grandes. Des éraflures profondes sont alors produites le long de la surface du fût de carter. Les pics sont ensuite enlevés par les étapes de rodage suivantes en

utilisant des abrasifs successivement plus fins. Le profil final de la surface obtenu contient, alors, des vallées profondes, correspondant au rodage de finition, et des plateaux lisses obtenus à la fin du processus. Cette variation successive de tailles de grains sous-entend l'activation de mécanismes de coupe différents notamment avec l'effet de taille couplé à la charge appliquée sur la pierre. La complexité de ce contact est au cœur de la problématique du rodage.

Nous commencerons par définir des généralités sur ces abrasifs. Ceux-ci sont différenciés par :

- 1- *Leurs propriétés mécaniques* : notamment la dureté et la résistance à la fracture. Cette dernière favorise l'usure de l'abrasif et dégrade son aptitude de coupe si elle est trop élevée. A l'inverse, si sa résistance à la fracture est insuffisante, le grain se fragmente puis se décolle de la pierre.
- 2- *Leur stabilité physico-chimique* : l'abrasif doit conserver sa stabilité chimique et ses propriétés physiques dans des zones où la température peut atteindre 700 à 800°C.
- 3- *Leur forme* : certains abrasifs sont susceptibles de présenter des plans de fracture qui engendrent des arêtes plus ou moins vives selon l'application voulue. Notons, à ce point, qu'une étude réalisée par Marinescu a distingué deux types d'équations de trajectoires différentes en rodage avec un grain diamant sphéroïdal et un grain en diamant en forme de pyramide [38].
- 4- *Leurs dimensions* : l'abrasif est utilisé sous forme de grains dont la grosseur est définie suivant des normes. Les plus employées sont les normes Mesh (société américaine) et FEPA (Federation of European Producers of Abrasives) pour les abrasifs conventionnels agglomérés (Carbure de silicium) et les superabrasifs agglomérés (diamant).

Les abrasifs utilisés en rodage sont des abrasifs agglomérés constitués d'un mélange de grains abrasifs et d'un liant dans lequel sont maintenus les grains. Les types de grains et le liant ainsi que leurs interactions jouent un rôle déterminant dans l'obtention du fini de surface.

a) Type de grain

L'industrie des abrasifs est essentiellement basée sur les abrasifs conventionnels et sur les superabrasifs. Le choix des uns par rapport aux autres dépend fortement de l'application, des propriétés de l'abrasif et de son coût économique.

La granulométrie est une caractéristique particulièrement importante car elle est directement liée au taux d'indentation et conditionnera par la suite le mécanisme de coupe. Les études qui

s'y sont intéressées ont relevé l'existence d'une taille de grain critique de l'abrasif [38-40]. Lorsque la taille des grains est plus grande que cette taille critique, l'usure du matériau est indépendante de la taille de grain alors qu'une forte usure commence à être observée pour les plus petites tailles de grains. Cet effet de taille critique peut être attribué à l'encrassement des pores du liant entre les petites tailles de grains par des débris. Ce qui réduit le nombre de grains en contact avec la surface et la quantité de matière enlevée. Le mécanisme de fragmentation des grains d'une passe à l'autre est également un phénomène qui conditionnera le résultat de la finition abrasive. La probabilité de fissuration dépend de la structure du grain, du nombre et de la répartition des défauts de la surface. Le nombre de défauts augmente avec le volume du grain. Aussi observe-t-on d'autant mieux le phénomène de fragmentation qu'il concerne les grains de diamètre élevé. Il se traduit par une fissuration importante entraînant des changements de forme plus prononcés : les faces deviennent abruptes et les angles disparaissent. Ce changement de forme de l'abrasif rend la modélisation du process assez difficile. Une modélisation a, par ailleurs, été proposée par Gahlin et Jacobson pour prédire l'usure abrasive via une variation du rayon du bout du grain conique et la considération d'une distribution gaussienne des grains [41]. Par conséquent, le taux d'usure diminue progressivement et permet alors de définir une équation d'évolution de la masse de la matière enlevée comme suit [39] :

$$M_n = M_\infty (1 - e^{-\beta n}) \quad (9)$$

Avec M_n et M_∞ la masse de matière enlevée respectivement après n passes et lorsque le taux d'usure tend vers zéro, β est un coefficient de détérioration.

L'effet de la granulométrie a également été étudié en rapport direct avec la rugosité de la surface obtenue. Les essais expérimentaux réalisés par Malkin et al. ont montré que l'augmentation de la taille de grain conduit à une augmentation de la rugosité de surface et à une usure plus rapide des pierres [25]. Le carbure de silicium étant moins résistant à la fracture, les articles traitant le rodage tendent vers l'utilisation du diamant pour ses propriétés d'usure et sa dureté ainsi que pour répondre aux exigences économiques des industriels [42-45]. En effet, le diamant se présente sous forme de cristaux friables noyés dans une matrice métallique. Les grains s'usent jusqu'à déchaussement et remplacement par de nouveaux grains.

D'un point de vue industriel, la question du choix de l'abrasif approprié est constamment posée. Une claire tendance vers l'utilisation du diamant métallique a été remarquée dans les dernières décennies pour ses propriétés de durée de vie élevée. En moyenne de production,

une pierre en diamant métallique produit 12000 fûts contre 800 fûts avec le Carbure de Silicium. Toutefois, l'usure des pierres ne semble pas être l'argument décisif de choix du diamant métallique car une contrainte supplémentaire de qualité vient s'ajouter à ce choix. Par exemple, l'industriel Renault proscrit l'utilisation du diamant car il ne répond aux exigences des spécifications de cotation de l'aspect de la surface. Des dentelles et des manteaux de tôle, connus sous le nom de « *Blechmental* » viennent se loger sur les côtés des stries [46]. Ces irrégularités viennent également obstruer les croisements de stries et rendent ces surfaces non-conformes. L'utilisation du diamant a toutefois posé une question de génération de phénomènes thermiques pouvant altérer le cylindre. Cette question n'a souvent pas été une préoccupation primordiale du fait des faibles énergies d'entrée et d'un débit d'écoulement de lubrifiant assez élevé. Yamamoto et Ueda ont estimé cette température à 90°C mais celle-ci pourrait être la température locale de contact et non la distribution globale de la température à la surface du cylindre [27]. Lin et Shen ont abordé le sujet avec des séries d'expérimentations de rodage avec du diamant métallique en relation avec les différents paramètres process. Ils ont montré que les températures ne dépassent pas 30°C par des mesures de thermocouples imprégnés à différents niveaux du cylindre [47]. Les résultats de ces tests montrent que le paramètre de la température est à prendre en compte lorsqu'il s'agit du rodage avec du diamant métallique à grandes vitesses d'expansion et grandes vitesses de coupe.

b) Type de liant

L'impact du type de liant n'apparaît pas de façon directe dans la bibliographie sur le rodage. Deux types de pierres sont toutefois utilisés en rodage : le carbure de Silicium noyé dans un liant vitrifié et le diamant aggloméré dans un liant métallique. Des travaux destinés à l'étude de la rectification se sont, par ailleurs, intéressés à l'effet du liant sur les performances du process [48, 49]. Ce sont des études basées sur des observations au MEB des meules après rectification montrant l'intérêt d'un liant vitrifié dans la création de pores pour une meilleure accommodation des copeaux. Un liant métallique permet d'avoir une coupe plus régulière et une meilleure durée de vie de la meule. Une application rodage a été faite par Sasaki pour étudier l'impact de la dureté du liant sur les performances du process [34]. Il a montré que la rugosité, l'enlèvement de matière et l'usure des pierres diminuent en augmentant la dureté du liant. En d'autres termes, il existe un compromis entre la performance de coupe et la qualité du fini ainsi que l'usure des pierres en ce qui concerne la définition du liant.

L'utilisation de liants « plus durs » (un liant métallique bronze dans le cas du rodage), nécessite par ailleurs une première phase, dite de dressage, pour libérer les grains de leurs logements. Cette étape est particulièrement importante car elle définit le taux de clivage c'est-à-dire la fracture des particules de grains. La puissance de coupe dépendra de la friabilité des grains ainsi que des conditions de dressage. Le dressage est tout simplement pour un rodoir en diamant ce qu'est l'affûtage pour un outil de coupe classique (tournage ou fraisage), c'est à dire une opération destinée à améliorer la coupe, la forme et la dimension de l'outil. Il permettra l'évacuation des copeaux logés dans les pores de la pierre et l'avivage des angles de coupe des grains.

La littérature est encore riche en travaux abordant l'impact de l'effet de l'abrasif sur les performances des procédés de finition en général sans pour autant conclure d'une approche claire de choix d'un abrasif par rapport à un autre, notamment dans le rodage. Cette difficulté est administrée par le caractère stochastique des pierres et la variation des énergies de cohésion entre la matrice du liant et les grains abrasifs. Le choix étant empirique, il est, en résumé, basé sur les consensus suivants :

- les abrasifs doivent avoir une granulométrie qui permet l'action de coupe ;
- les abrasifs doivent supporter la pression nécessaire à l'enlèvement de matière ;
- le liant doit être assez dur pour maintenir le grain mais pas très dur pour ne pas rayer le matériau et retarder la coupe. Il doit aussi assurer la création de poches pour les micro-copeaux ;
- La granulométrie usuelle varie entre 32 et 150 microns. Une taille grosse de grains permet d'enlever rapidement la matière mais produit des surfaces assez rugueuses.

2.3.4. Variables liées au matériau rodé

Les matériaux usinés par rodage sont essentiellement à base de fonte. Avec le développement des nouveaux moteurs en Aluminium, les cylindres restent sous forme de chemise en fonte imprégnée dans le bloc moteur. Ce choix est attribué aux propriétés rhéologiques et mécaniques de la fonte adaptées aux conditions de fonctionnement de la chambre de combustion. Il existe diverses variantes de fonte dont on distingue la fonte grise (CI), la fonte à graphite compacte (CGI) et la fonte ductile (SGI). Ces différentes fontes sont différenciées par la forme des particules de graphite : la fonte grise présente des graphites lamellaires distribués de façon aléatoire alors que la fonte ductile contient des graphites sphéroïdales et la fonte CGI comprend des graphites vermiculaires. La fonte CGI montre, en particulier, une meilleure conductivité thermique et une meilleur castabilité. Toutefois, cette fonte reste plus

difficile à usiner à grandes vitesses par rapport à la fonte grise [50]. Tous les articles abordant le rodage ont travaillé sur la fonte grise.

Le choix du matériau approprié ainsi que les conditions opératoires adéquates restent pour tous les articles scientifiques étudiés des résultats de constats expérimentaux. Ils sont basés sur des dispositifs expérimentaux limitant les paramètres process d'entrée avec une investigation des paramètres de sortie par le biais de la surface générée. Ce verrou est dû à la complexité de la cinématique et le caractère aléatoire des pierres qui implique des relations d'interférences entre les différents paramètres.

Un point de divergence supplémentaire entre ces différentes approches d'analyse du procédé de rodage est le moyen d'évaluation de la surface rodée. On essayera dans le chapitre suivant de détailler les différentes méthodes utilisées pour caractériser la texture des surfaces rodées afin de pouvoir juger de la méthode adéquate sensible aux différents changements inhérents au rodage.

3. Contrôle de la qualité des surfaces rodées

La formulation des changements intervenus dans la surface lors du procédé de rodage est une étape inéluctable dans l'identification et l'optimisation du procédé du fait qu'elle est un résultat d'empreinte du procédé de fabrication. Un quelconque changement dans les variables process et des erreurs de machine devraient être visibles sur la texture de la surface afin de préserver les performances fonctionnelles d'étanchéité, de frottement et de lubrification du système Segment-Piston-Fût (SPF).

Pour répondre à cette double problématique de caractérisation de la surface en relation avec le process et le produit, la morphologie de la surface sera discutée afin de dégager la signature du procédé de génération des surfaces, d'analyser les performances fonctionnelles auxquelles elles renvoient et d'évaluer la qualité de la pièce manufacturée.

3.1. Spécification fonctionnelle requise

Le contrôle de la surface obtenue par rodage nécessite, au préalable, la détermination des caractéristiques et le choix des limites (appelées aussi tolérances) de conformité de la surface. Il faut que ces limites soient connues par l'expert qui effectuera le contrôle. Toutefois, il n'existe pas une spécification précise de la texture de la surface obtenue par le process de rodage plateau. Les paramètres et les méthodes de contrôle de qualité utilisés ainsi que les

tolérances choisies varient d'un constructeur automobile à un autre selon le cahier de charge imposé, le matériau usiné ou encore les conditions opératoires du process (rodage hélico-glissant, rodage plateau...).

Dans un système piston/fût, une typologie particulière de surface est élaborée. Elle est composée des éléments suivants (figure 10) :

- des stries croisées considérées comme des vallées de réserve d'huile ;
- des plateaux de glissement possédant de légères irrégularités. Ils ont pour fonction de s'user au contact des segments et d'user les segments afin que les formes respectives s'adaptent afin d'assurer l'étanchéité.

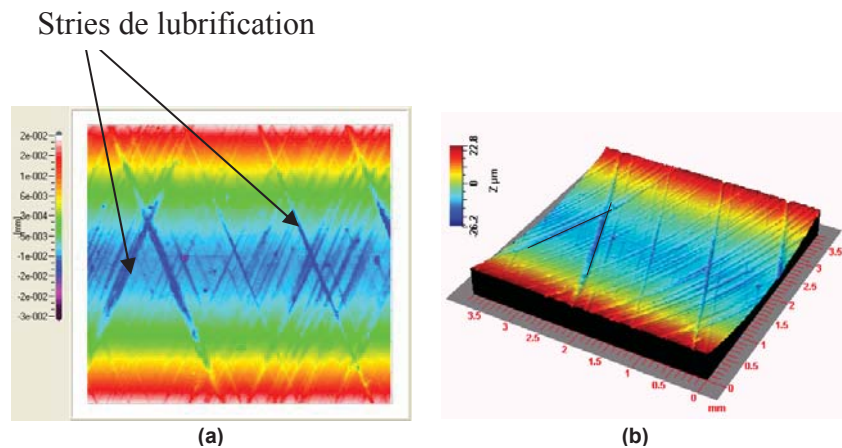


Figure 10. Surface de fût de carter cylindre (a) Vue 2D (b) Vue 3D.

Quelques études se sont intéressées à la détermination de l'importance de ces caractéristiques dans la fonctionnalité des surfaces des fûts de carter cylindre et ce, dans l'environnement du système tribologique Segment-Piston-Fût (SPF) de carter. Ces études sont basées sur des tests sur banc moteur ou des simulations numériques du contact SPF via la résolution de l'équation de Reynolds [51-54]. La synthèse de ces travaux montre que :

- le frottement diminue en réduisant la rugosité de la surface rodée. Par ailleurs, une surface très fine ne possède pas la capacité de rétention d'huile et ne résistera pas au débris d'usure. Le contact métal-métal (régime de lubrification limite) sera prédominant et pourrait conduire au grippage du moteur ;
- la striation de la surface augmente l'effet hydrodynamique sur les segments grâce aux pores de rétention d'huile formées notamment au croisement des stries.

De surcroît, l'angle de rodage joue un rôle prépondérant sur les performances en frottement et en lubrification. Il a été démontré expérimentalement que la consommation d'huile diminue

avec l'accroissement de l'angle de rodage. Par ailleurs, le frottement est optimal pour des angles de rodage allant de 30° à 60° .

3.2. Contrôle industriel appliqué en production

Le contrôle de la qualité des surfaces de fût de carter en ligne de production se base sur la caractérisation des deux éléments décrits ci-dessus, à savoir : la topographie et l'aspect :

- 1- la topographie de la surface en termes de répartition des pics, des vallées, des défauts d'ondulation, de rugosité, de profondeur de striation, etc ;
- 2- l'aspect de surface lié à la morphologie spatiale de la surface tel que l'angle de rodage, la densité des stries, leur distribution, leur typologie de stries (stries résiduelles, stries de lubrification, stries plateau, stries parasites), interruption de stries, trous, irrégularités, etc.

3.2.1. Contrôle de la topographie

La méthode la plus commune, qui est utilisée en ligne de production pour la caractérisation de la topographie des surfaces rodées, est basée sur l'analyse de la courbe de portance des profils topographiques. La courbe de portance décrit la variation du taux de longueur portante en fonction de la profondeur du profil. Le taux de longueur portante est défini comme étant le rapport entre la somme des longueurs portantes du profil de rugosité et la longueur d'évaluation.

Il existe, par ailleurs, une panoplie de paramètres extraits à partir de la courbe de portance. Conformément à la norme ISO 13565-2 [55], la surface est divisée en trois parties (figure 11) que sont :

- ① *la zone de rodage* caractérisée par le paramètre " R_{pk} " : où les pics les plus saillants vont être usés et disparaître pendant les premières heures de fonctionnement. L'absence de ce critère limitera d'autant le temps de rodage d'un moteur ;
- ② *la zone de fonctionnement* appelée aussi le noyau de rugosité est caractérisée par le paramètre " R_k ". Elle représente la quantité de matière disponible à l'usure. Plus cette quantité est disponible, plus un moteur fonctionnera longtemps ;
- ③ *la zone de lubrification* qui représente la profondeur réduite des creux caractérisée par le paramètre " R_{vk} " qui détermine les creux disponibles et toujours utiles pour retenir un lubrifiant. L'absence ou la disparition des creux entraînera le grippage du moteur.

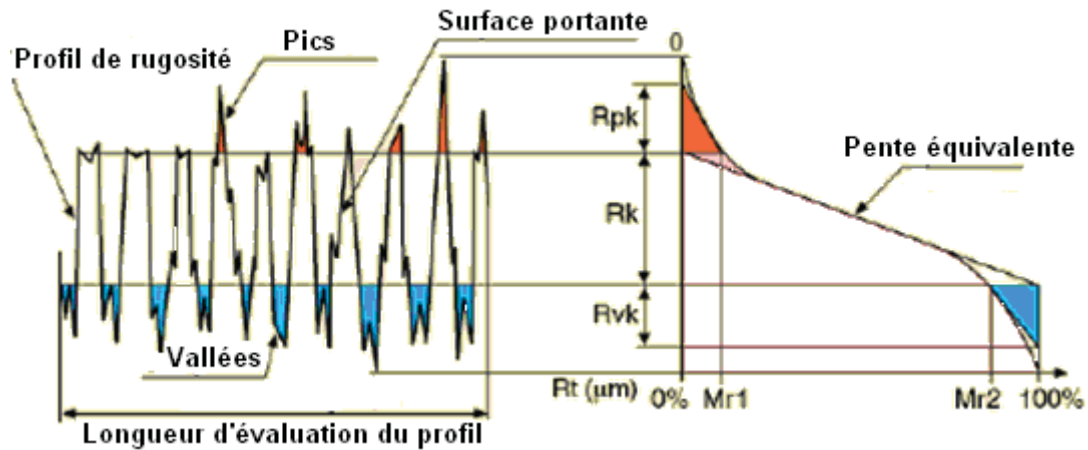


Figure 11. Paramètres de la norme ISO 13565 définis à partir de la courbe de portance.

Les paramètres R_{pk} , R_k et R_{vk} présentent l'inconvénient d'être corrélés entre eux. En effet, une simple réduction des pics de la surface implique une modification de la pente de la droite utilisée pour leur détermination. Pour cela, d'autres paramètres sont aussi utilisés par certains constructeurs automobiles. Ces paramètres sont définis dans la norme CNOMO [56] comme suit (figure 12):

- Cr : critère de rodage défini entre les taux de portance à 1% et 45% ;
- Cf : critère de fonctionnement défini entre les taux de portance à 15% et 75 % ;
- Cl : critère de lubrification défini entre les taux de portance à 45% et 99 %.

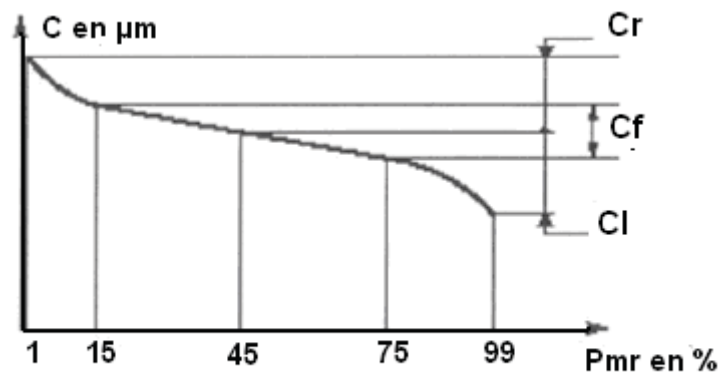


Figure 12. Les paramètres CNOMO définis à partir de la courbe de portance

A ce niveau, nous pouvons énumérer plusieurs références tentant de relier ces paramètres soit à la fonctionnalité de la surface soit au procédé de fabrication [23-29, 51-53]. Le point commun entre ces différents travaux est qu'ils se basent tous sur des séries d'essais sans pour autant construire une méthodologie d'analyse non empirique.

3.2.2. Contrôle industriel de l'aspect de surface en production

Les grandeurs issues des mesures de rugosité sont insuffisantes pour décrire la texture de la surface rodée et rendre compte de l'interaction avec le procédé de rodage. L'expert apporte, par un examen visuel approfondi, un complément de qualification de l'aspect de la surface en liaison avec son utilisation future. Cet examen quoique qualitatif, il représente souvent une synthèse de paramètres difficilement quantifiables par d'autres moyens.

L'expert examine le cylindre à plusieurs échelles. Tout d'abord à l'œil nu, il apprécie le marquage des stries de la surface, puis il réalise un négatif de la surface à l'aide d'un fax film et le visualise au MEB à deux grossissements différents ($\times 100$ et $\times 200$) pour qualifier l'aspect des stries. Un jugement sur la qualité de l'aspect est rendu en le comparant à des photos MEB de références classées en quatre types numérotés de un à quatre. Ces quatre classes sont définies comme suit :

- Type1 (Q1): Stries bien croisées et bien marquées ;
- Type2 (Q2): Stries croisées et marquées avec présence de languettes de tailles inférieures à celles des stries de lubrification ;
- Type3 (Q3): Stries croisées et peu marquées avec recouvrement partiel des stries de lubrification par des languettes ;
- Type4 (Q4): Stries peu marquées recouvertes de languettes et de manteaux de tôle.

Il est important de noter que la définition de ces critères est subjective. La figure 13 montre une image microscopique du fax film de surface appartenant à chacune de ces classes. Les aspects de surfaces correspondants aux types 1 et 2 sont jugés « acceptables » alors que ceux correspondants aux types 3 et 4 sont jugés « non conformes ».

L'expert apprécie donc la qualité de l'aspect par une analyse tridimensionnelle et à différentes échelles ce qui démontre l'intérêt de développer une méthodologie objective qui exploite des outils d'analyse multi-échelle de la qualité des surfaces rodées. Pour ce faire, nous allons d'abord définir les limites du contrôle industriel utilisé. Ces dernières conduiront à la définition de différentes méthodes introduites par les spécialistes métrologues dont la plus pertinente nous a semblé être l'approche multi-échelle.

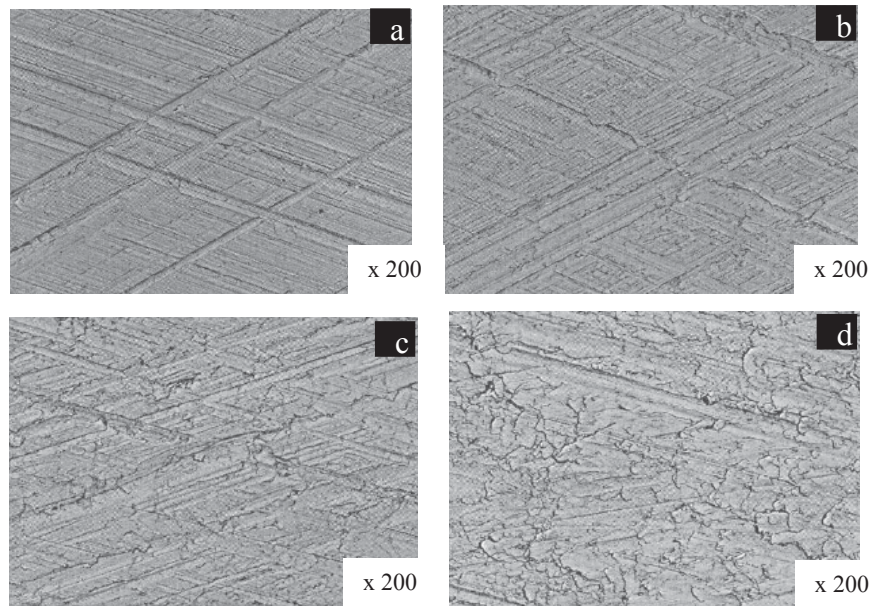


Figure 13. Les différents types de qualité de surface de fûts de carter cylindre définis par le constructeur automobile Renault : (a) Type 1 ; (b) Type 2 ; (c) Type 3 ; (d) Type 4.

3.2.3. Limites du contrôle industriel

La procédure de contrôle définie ci-dessus présente diverses limites que ce soit au niveau de la caractérisation de la topographie de la surface rodée ou au niveau de l'appréciation de son aspect. En effet, la méthode de contrôle d'aspect présente l'inconvénient d'être lourde à réaliser, elle demande donc une main d'œuvre qualifiée voire expérimentée. En plus l'appréciation de l'aspect de surface dépend essentiellement de la faculté de l'opérateur à donner le bon jugement ce qui rend le contrôle subjectif.

Par ailleurs, les paramètres d'état de surface ne sont pas corrélés aux variables du procédé puisqu'ils ne tiennent pas compte du caractère multi-échelle de la surface issue d'un process multi-étapes où chacune des étapes y laisse sa propre empreinte. Il est donc nécessaire de définir de nouveaux paramètres de caractérisation de la texture des surfaces rodées qui peuvent être reliés aux variables process par une relation bijective afin de rendre le contrôle plus facile mais surtout objectif.

3.3. Quelles méthodes alternatives de caractérisation des surfaces rodées ?

De façon générale, afin de représenter un signal, il est nécessaire de spécifier :

- la distribution des hauteurs ;
- et les relations spatiales entre les points de la surface (morphologie spatiale).

A partir de la définition de ces deux principaux éléments, plusieurs méthodes ont été développées.

3.3.1. Méthode statistique

Une approche pour décrire la forme et les échelles contenues dans une distribution donnée implique la spécification des moments centraux de cette distribution définie par l'équation suivante :

$$m_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N y_i^n \quad (10)$$

Où m_n est le moment central d'ordre n défini pour un profil mesuré sur N points régulièrement espacés.

Les paramètres statistiques de rugosité les plus utilisés pour décrire la distribution des hauteurs d'un profil topographique sont les suivants :

- L'écart-type de la rugosité : $R_q = m_2^{1/2}$ (remplacé souvent par le paramètre R_a moyenne arithmétique des hauteurs) ;
- Le coefficient d'asymétrie (Skewness) : $R_{sk} = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}$
- Le coefficient d'aplatissement (Kurtosis) : $R_{Ku} = \frac{m_4}{m_2^2}$

Ces paramètres sont définis dans la norme de mesure d'état de surface ISO 4287 [57]. Pour une distribution gaussienne, $R_{sk} = 0$ et $R_{Ku} = 3$. Les surfaces obtenues par rodage plateaux présentent une distribution de hauteur non-gaussienne ($R_{sk} < 0$ et $R_{Ku} > 3$).

L'examen de 40 profils de surfaces de fûts de moteur Jaguar mesurés par Stout et al. aux différentes étapes du procédé de finition par rodage (alésage, différentes étapes du rodage finition, rodage plateau) montre que ces différents paramètres s'entremêlent et présentent de faibles variations [58]. Ils ne sont également pas corrélés aux conditions du procédé. Associée à ces paramètres, la fonction d'auto-corrélation permet de décrire les relations spatiales entre les points du profil. Stout et al. appliquent cette fonction pour contrôler la profondeur de coupe et d'enlèvement de matière après finition de surfaces tournées ou alésées [59]. Sauf qu'elle trouve ses limites pour décrire les modifications de la morphologie spatiale des surfaces générées par une combinaison d'opérations de finition.

3.3.2. Méthodes de décomposition Pics/Vallées (PV)

Les méthodes pics/vallées tentent de modéliser la surface obtenue par rodage en seulement deux parties au lieu des trois parties adoptées par la norme ISO 13565-2 et CNOMO. La première composante représente les plateaux de la surface et la deuxième les vallées.

Une première approche consiste simplement à caractériser respectivement la zone plateau et la zone des vallées par les paramètres adimensionnés $\frac{R_{pk}}{R_k}$ et $\frac{R_{vk}}{R_k}$. La limite de ces deux paramètres est leur sensibilité aux artefacts de mesures telles que la présence de pics ou de vallées isolées.

Une seconde méthode pour la réalisation de cette décomposition est basée sur la linéarisation de la courbe de portance. Cette linéarisation est obtenue en déterminant la courbe de probabilité de la distribution cumulative des taux de portance de la surface analysée. Cette courbe de probabilité représente mathématiquement une fonction du taux de portance $f(Tp)$ à chaque altitude de la surface. $f(Tp)$ est donnée par l'équation suivante :

$$f(Tp) = \sqrt{2} \operatorname{Inv}\{\operatorname{erf}(2Tp - 1)\} \quad (11)$$

Avec « *erf* » est la fonction erreur.

La figure 14 illustre cette linéarisation pour une surface finie par rodage plateau. Elle montre que l'étape plateau introduit une nouvelle pente sur la courbe d'Abbott (courbe de portance) linéarisée. Cette dernière peut être approximée par deux droites. Le point d'intersection de ces deux droites d'approximation donne alors le taux de portance permettant de séparer les éléments plateaux (pics) des vallées de la surface (stries de lubrification). Les pentes des deux droites notées respectivement par les paramètres " R_{vq} " (zone 1 de la figure 14) et " R_{pq} " (zone 2 de la figure 14) représentent respectivement les valeurs " R_q " de la composante « vallée » et les valeurs " R_q " de la composante « Plateau » [60].

Malburg et al. montrent que les surfaces générées en deux étapes de finition par rodage peuvent être caractérisées correctement en se basant sur cette représentation [61]. La figure 14 illustre les courbes d'Abbott linéarisées de surfaces rodées à l'étape finition et plateau. Elle montre bien que la première pente est due à l'étape finition du procédé de rodage et que la deuxième pente est générée après l'étape plateau. Ceci traduit l'hypothèse souvent considérée lors de la modélisation de l'usure au cours de l'étape de rodage plateau stipulant que le rodage plateau réduit les pics de la surface par écrêtage. La texture des stries est, par conséquent, générée durant l'opération de rodage finition. La maîtrise de cette étape est ainsi primordiale pour l'optimisation du procédé de rodage plateau.

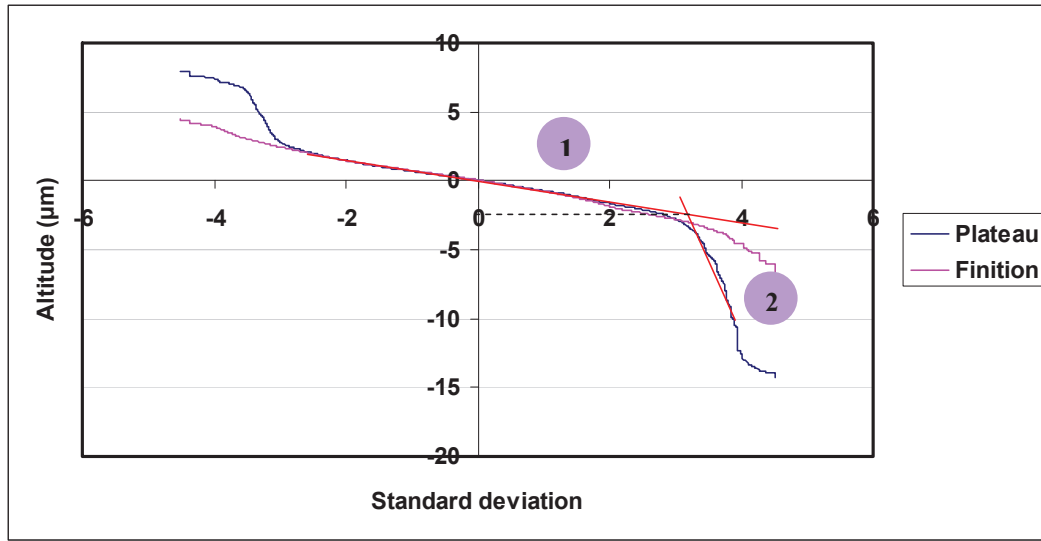


Figure 14. Courbe d'Abbott linéarisée de la surface de fût de carter à l'étape finition et à l'étape plateau.

Des études statistiques ont montré que les paramètres R_{pq} et R_{vq} issus de cette représentation sont moins sensibles que les paramètres R_{pk} et R_{vk} à la présence d'artefacts, tels que les pics isolés et le bruit haute fréquence.

Une troisième méthode de décomposition PV a été développée par Decencièrre et al. [62]. Elle est basée sur la morphologie mathématique et consiste à appliquer un filtre séquentiel de taille " n " pour l'obtention d'une surface de référence " R ". Les éléments de la surface initiale qui sont au dessus de la surface de référence " R " sont considérés comme des rugosités plateaux " P ", et ceux d'en dessous sont considérés comme vallées (stries) notées " V ". Ainsi, le processus peut être automatisé pour la structuration de chaque point M en le considérant comme une somme des fonctions R , P et V appliquées à ce point :

$$S(M) = R(M) + V(M) + P(M) \quad (12)$$

De plus, des mesures du paramètre " Sa " (moyenne arithmétique surfacique) sont ensuite faites sur les composants plateaux au point mort haut (PMH) et au point milieu (PM). Les résultats obtenus montrent que l'usure est accentuée au PMH (figure 15). Ceci est du à la différence des régimes de lubrification dans ces deux zones : hydrodynamique en milieu de course PM et mixte au PMH.

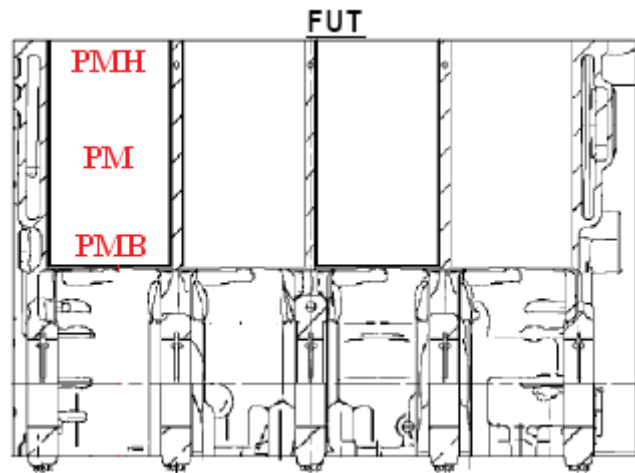


Figure 15. Définition des zones fonctionnelles PMH (Point Mort Haut), PM (Point Milieu) et PMB (Point Mort Bas)

3.3.3. La décomposition multi-échelle

Il est clair que les méthodes décrites ci-dessus se basent sur l'information spatiale du signal ou de l'image topographique de la surface rodée mais ne tiennent pas compte de sa répartition fréquentielle. La transformation de Fourier, par exemple, est un outil souvent utilisé pour avoir une description fréquentielle complémentaire de la description spatiale. Toutefois, cette transformation décrit la répartition des composantes fréquentielles du signal sans préciser la localisation de leur apparition. Les renseignements fréquentiels ainsi obtenus le sont au détriment de la description spatiale explicite du signal. Cette méthode ne convient donc pas, notamment pour des signaux non stationnaires tels que les signaux topographiques. Elle est aussi insuffisante pour mettre en évidence les caractéristiques évolutives du signal au cours des opérations successives de finition. Une représentation à la fois spatiale et fréquentielle nécessaire pour mieux visualiser le contenu interactif d'un signal. Une approche utilisant cette représentation pour la caractérisation des surfaces est proposé par Lee et al. [63]. Cette approche exploite la transformée par ondelettes continues. Elle permet de quantifier la qualité du fini des surfaces sur toutes les échelles du signal topographique depuis les échelles de rugosité jusqu'à l'ondulation. Cette approche a été utilisée par Zahouani et al. [64] pour identifier et extraire la signature relative à la rectification.

3.3.4. Comment caractériser l'aspect de surface rodée ?

La cotation industrielle de l'aspect des surfaces est fixée par un expert suite à un examen visuel des fax-film. Ce processus est subjectif, onéreux et imprécis.

La caractérisation de l'aspect textural d'une surface nécessite une vue tridimensionnelle de celle-ci. En effet, la majorité des défauts d'aspect sont des défauts locaux et ne peuvent pas être entièrement caractérisés - notamment en densité et en répartition - par des mesures bidimensionnelles. Depuis quelques années, l'évolution des moyens de calcul vers des moyens plus puissants et plus rapides ainsi que le développement de techniques d'analyse d'images plus avancées, permet d'envisager actuellement le contrôle de l'aspect de surface par l'acquisition d'images 3D. A ce titre, plusieurs méthodologies ont été développées afin d'extraire des paramètres objectifs et quantitatifs des différentes caractéristiques d'aspect des textures de surfaces obtenues par rodage.

L'aspect de surface rodée se traduit alors par deux composantes distinctes :

- la première est textuelle qui précise la texture des stries en termes de profondeur (stries résiduelles, stries de lubrification ou stries de portance), de disposition (distribution et croisement des stries quantifié par l'angle de rodage) et de densité surfacique ;
- la seconde est générique qui décrit les défauts texturaux tels que les porosités, les fissures, les facettes, manteaux de tôles, etc. [65].

Beyerer a développé un modèle permettant de séparer ces deux composantes de l'aspect et ainsi de détecter les principaux défauts texturaux [66]. La surface rodée est modélisée par la superposition aléatoire de lignes de stries (figure 16) et justifiée par la nature stochastique des grains abrasifs. La surface est donc représentée par la formule suivante :

$$t(x) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} g_v(x^T e_v - d_v) \quad (13)$$

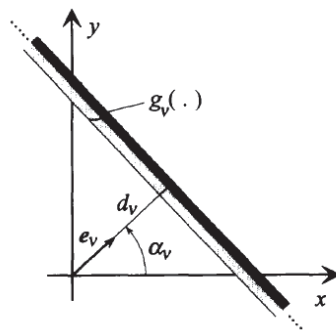


Figure 16. Modélisation texturale de surface rodée [66]

La composante texturale de la surface réelle peut ainsi être déterminée en appliquant la transformée de Radon. Cette transformée est décrite par l'expression suivante :

$$TR(\rho, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(\rho - x \cos \alpha - y \sin \alpha) dx dy \quad (14)$$

Chaque ligne représentant une strie de la surface sur une image $f(x, y)$ correspond à un point de forte intensité dans la transformée de Radon. Ce point se situe alors aux coordonnées (ρ^*, α^*) et la ligne de l'image $f(x, y)$ coïncide avec la ligne d'intégration définie par (ρ, α) (figure 17).

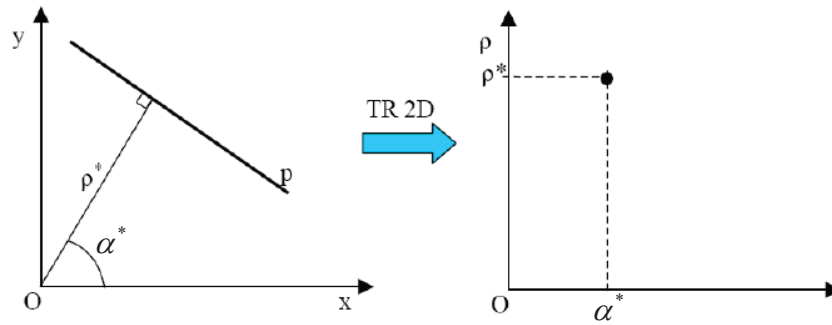


Figure 17. Principe schématique de la transformée de Radon

Les défauts texturaux (composante générique d'aspect) peuvent être identifiés par la suite en déterminant l'écart entre la surface réelle et la texture modélisée. Notons ici que la transformée de Fourier est aussi utilisée pour l'étude de l'aspect des stries des surfaces rodées. Elle permet de fournir des informations sur l'anisotropie de la surface par une évaluation des directions des stries et permet également de détecter la présence de stries résiduelles. Mais, on ne retrouve pas des relations causes-conséquences directes et quantifiables établies entre les paramètres d'aspect de surface (à l'exclusion de l'angle de rodage) et les variables du procédé de rodage d'une part et les performances fonctionnelles de la surface d'autre part.

4. Conclusion

En conclusion de cette revue bibliographique, il ressort que :

✓ *au niveau du procédé de rodage*, il existe différentes gammes de production par rodage mais aucun des travaux recensés n'informe sur les processus physiques pilotant l'action d'enlèvement de matière par l'opération de rodage. Les études qui traitent le rodage sont basées sur des essais expérimentaux très simplificateurs du process et qui transcrivent uniquement des variations de la qualité de la surface en fonction des paramètres process. La définition des gammes est alors empirique et les interférences fortes complexes entre les différentes variables ne sont pas découplées. Nous pouvons néanmoins, déceler une influence majeure de l'outil de rodage, du chargement des pierres et de la vitesse de coupe.

✓ *au niveau de la caractérisation des surfaces*, nous avons montré qu'il existe différents paramètres de caractérisation des surfaces mais ils ne tiennent pas compte de deux principales caractéristiques des surfaces rodées que sont :

- caractère de surface multi-échelle car issue d'un process multi-étapes où chacune des étapes y laisse sa propre empreinte ;
- et caractère anisotrope défini par deux directions distinctes de striation.

L'approche multi-échelle par ondelettes semble être prometteuse car elle fait office d'un filtre multi-résolution qui s'adapte aux différentes échelles de la surface. Toutefois, il existe peu d'études qui ont approfondi cette approche dans son application pour le procédé de rodage. Aussi, le choix de la fonction prototype d'ondelette à utiliser reste encore non élucidé.

Enfin, la caractérisation de l'aspect de la surface reste un point d'analyse indispensable pour la fonctionnalité de la surface mais demeure subjective et tributaire d'une caractérisation qualitative et visuelle.

Nous allons dans ce qui suit essayer de lever ces verrous tant au niveau process qu'au niveau métrologique.

Chapitre 2

Banc de rodage instrumenté et protocole expérimental développé

1. Introduction

Ce chapitre présente la démarche expérimentale mise en place pour l'étude du procédé de rodage. Elle exploite des moyens mis en œuvre pour la réalisation des essais de rodage avec l'instrumentation associée pour le contrôle des mesures physiques in situ. Celle-ci est prolongée par des expertises de retour d'essais sur les surfaces produites aux échelles micro (rugosité) et macro (forme).

2. Banc de rodage à l'échelle 1

Afin de se rapprocher au mieux des conditions opératoires du rodage industrielle, une machine de production des fûts de carter cylindre, de type NAGEL référencée VS 8-60 SV NC, a été utilisée (cf. figure 18).

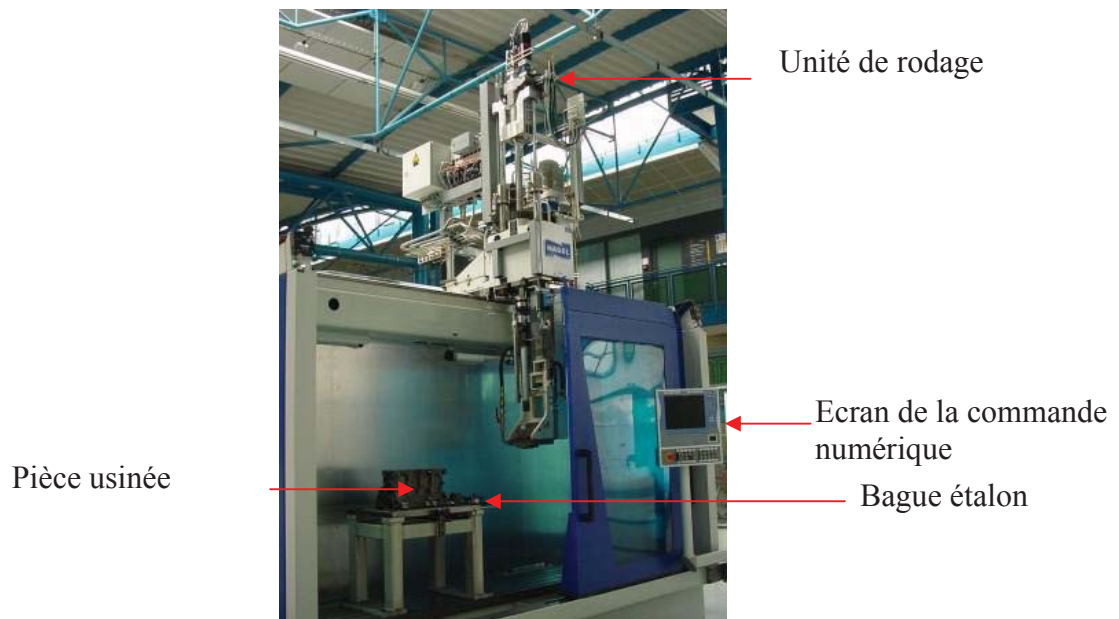


Figure 18. Vue d'ensemble du banc de rodage à l'échelle 1

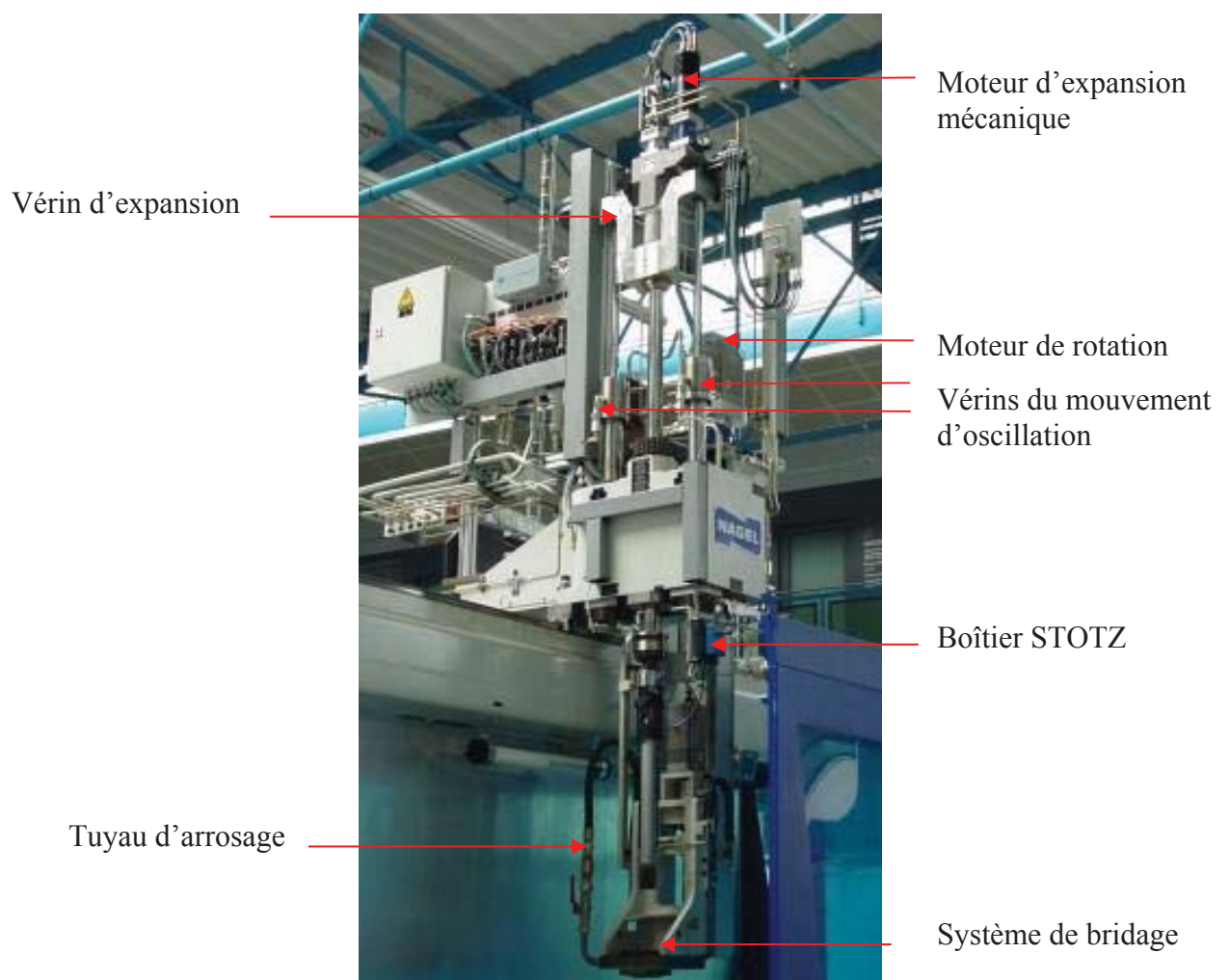


Figure 19. Illustration des composantes principales d'une unité de rodage

Elle est composée des éléments suivants (cf. figure 19) :

- Un système de bridage électromécanique pour maintenir la pièce de manière stable durant toute l'opération de rodage. Il est composé d'une table de posage à trois appuis et d'un bloc de serrage relié à la broche et positionné sur la partie supérieure de la pièce.
- Une broche d'usinage de longueur 600mm qui pilote l'outil de rodage par une liaison à double cardans. Ceci permet une meilleure flexibilité dans le mouvement de l'outil et un meilleur centrage dans le cylindre.
- Un système d'arrosage du fluide de coupe équipé d'un dispositif de filtration composé de trois filtres à cartouche successifs. Il permet ainsi d'éliminer les particules en suspension et supérieures à 5 μm . Le fluide de coupe est dirigé par des buses d'arrosage sous pression au centre de la broche. La température du liquide de coupe est contrôlée par un thermocouple.
- Un outil de rodage appelé rodoir et composé de six pierres abrasives. Chaque rodoir est constitué de quatre composantes fonctionnelles :
 - *le corps* qui sert à guider les poussoirs et les supports de pierre ;
 - *les poussoirs* qui assurent l'expansion progressive des supports. Le rodoir peut être muni d'un seul ou de deux poussoirs. L'utilisation de deux poussoirs permet la modification de la vitesse d'expansion au cours de l'opération de rodage, on parle alors d'un rodoir à double expansion ;
 - *les supports d'abrasifs* qui sont démontables et maintenus par des ressorts de rappel ;
 - *les abrasifs*, de dimensions : 6x6x70mm, qui sont montés sur des porte-pierre comme illustré dans les figures 20 et 21.

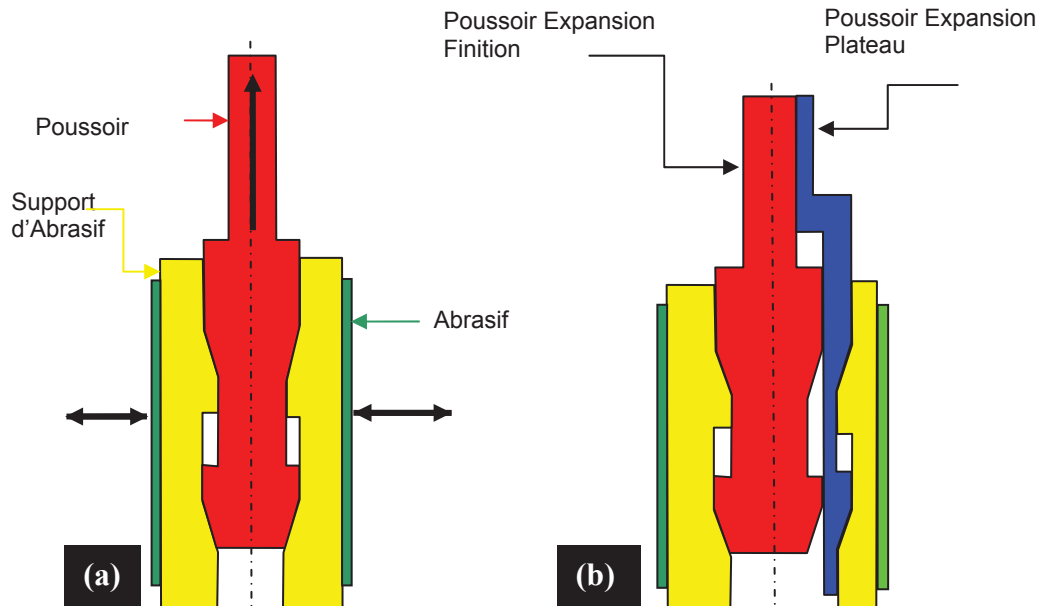


Figure 20. Représentation schématique de l'outil de rodage à (a) simple expansion et à (b) double expansion.

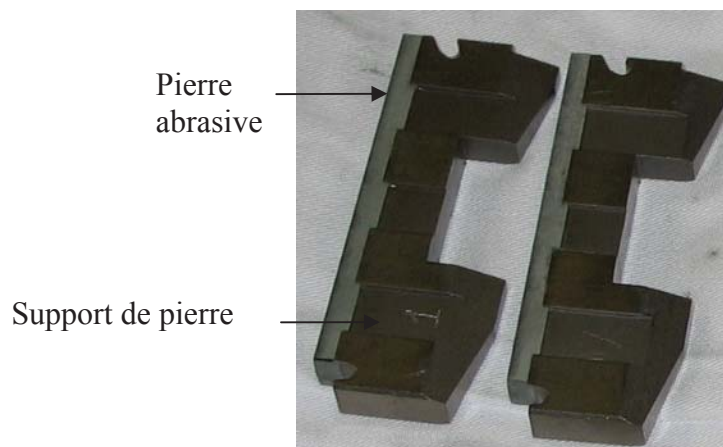


Figure 21. Illustration des pierres et de leurs supports pour un outil de rodage.

- Un système d'entraînement électrique servant à produire le mouvement de rotation de la broche. Ce mouvement est assuré par un moteur électrique continu électro-réducteur à trains directs et d'une puissance de 5,5 kW produisant des vitesses de rotation allant de 125 à 750 tr/min.
- Un système d'entraînement hydraulique afin de générer le mouvement d'oscillation de la broche. Deux pistons hydrauliques sont installés parallèlement à l'axe de la broche comme le montre la figure 22. Le mouvement simultané et inverse des deux pistons permet d'avoir une vitesse d'oscillation résultante allant jusqu'à 25m/min. Les

positions et vitesse d'oscillations sont déterminées via un amplificateur électro-hydraulique relié à la commande numérique de la machine MS-U4.

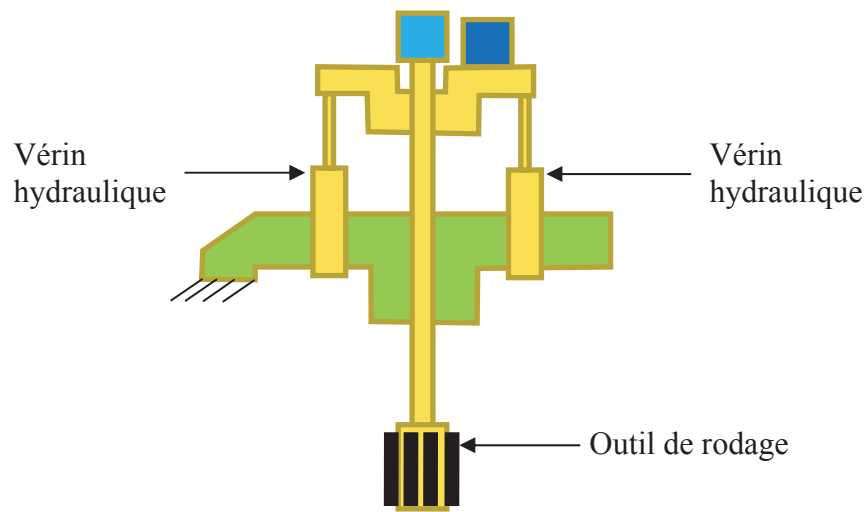


Figure 22. Croquis du système d'entraînement hydraulique

- Un système pneumatique de mesure sans contact du diamètre et intégré dans l'outil de rodage. La valeur de diamètre est obtenue par la mesure de la pression d'air entre l'outil et la surface du cylindre. La pression d'air est ensuite transformée en un signal électrique via un transducteur pneumo-électronique STOTZ. Ce signal proportionnel aux variations de pression est alors enregistré sur la commande numérique de la machine.
- Un système d'expansion mécanique des pierres de rodage illustré dans la figure 23.a. Le mouvement de poussée de la tige de l'outil (poussoir) est généré via un moteur pas à pas et transféré ensuite à un système d'engrenage pour obtenir un mouvement de poussée verticale. Ce système est activé pour les phases de rodage ébauche et de rodage finition.
- Un système d'expansion hydraulique avec un piston se déplaçant sous l'action d'une pression d'un flux d'huile (figure 23.b). L'effort d'expansion est transmis via le cône de l'outil de rodage. Cette expansion est utilisée pour le rodage plateau.

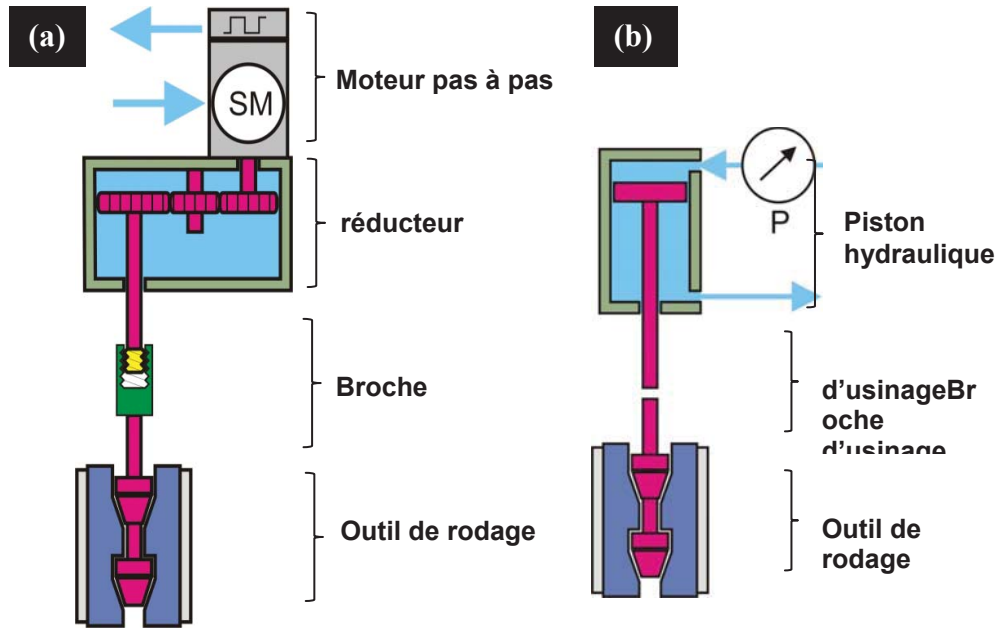


Figure 23. Schéma du dispositif d'expansion (a) mécanique, (b) hydraulique

3. Instrumentation intégrée

L'opération de rodage fait appel à des mécanismes physiques microscopiques générant de l'enlèvement de matière par abrasion. De ce fait, la connaissance des variables physiques in-situ du contact pierre abrasive/cylindre est primordiale pour la compréhension du procédé. On présente ci-après les différentes variables physiques mesurées qui seront exploitées pour l'étude des modes d'abrasion activés pendant l'opération de rodage.

3.1. Détermination de la puissance de rodage « P_{rodage} »

La puissance est relevée durant toute l'opération de rodage via un transducteur de puissance Digital Way-16kW associé au logiciel de traitement « LabView ». La puissance consommée par le procédé de rodage « P_{rodage} » est la différence entre la puissance moyenne en charge « P_{charge} » et celle à vide « P_0 » de la broche. Comme le montre la figure 24, la puissance de rodage progresse rapidement au contact de la pierre avec le cylindre pour se stabiliser pendant le rodage. Elle décroît ensuite lors du début de rétraction des pierres.

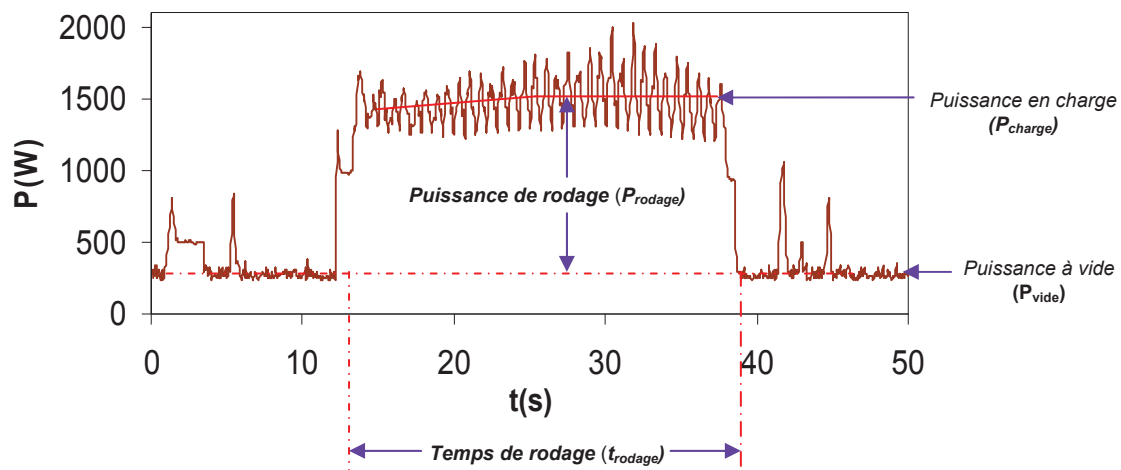


Figure 24. Courbe typique de l'évolution de la puissance consommée pendant une opération de rodage.

3.1. Mesure des efforts de coupe

Les trois mouvements simultanés de rotation, d'oscillation et d'expansion des pierres engendrent trois composantes d'efforts de coupe pendant le rodage comme illustré dans la figure 25.

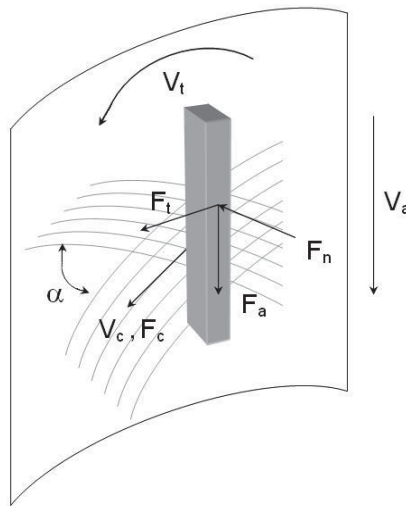


Figure 25. Représentation schématique des composantes des efforts de coupe relatifs au procédé de rodage.

Il s'agit de :

- L'effort tangentiel « F_t » produit par le mouvement de rotation de la broche. Celui-ci est calculé à partir de la puissance consommée pendant le rodage suivant la formule suivante :

$$F_t = \frac{P_{consommée}}{V_{coupe}} \quad (15)$$

- L'effort axial « F_a » provenant du mouvement de battements alternés des pistons hydrauliques et déterminé via deux capteurs de pression placés au niveau des deux vérins hydrauliques. Des mesures à vide (sans contact pierre/pièce) des capteurs ont été réalisées pour le calibrage des mesures de pression. La valeur de l'effort est obtenue après multiplication par l'aire des pistons.
- L'effort normal « F_n » résultant de l'expansion des pierres. L'effort d'expansion correspondant F_n est obtenu grâce au cône de l'outil de rodage d'angle β selon la formule : $F_n = F \cdot \tan \beta$, avec β l'angle d'inclinaison du cône (dans notre cas $\beta = 21,5^\circ$).

Dans le cas de l'expansion mécanique, un capteur d'effort MAGTROL de charge maxi égale à 100 N est placé au niveau du moteur pas à pas (figure 26). Dans le cas de l'expansion hydraulique, un capteur de pression est placé à la sortie de chaque vérin hydraulique comme le montre la figure 27.

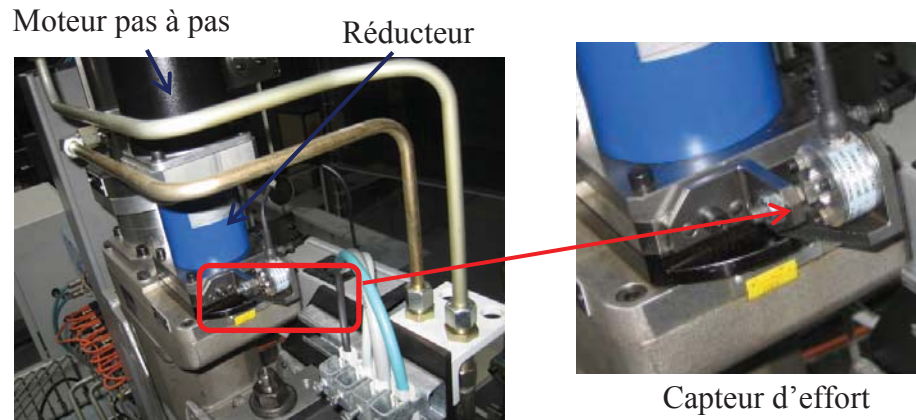


Figure 26. Localisation du capteur d'effort au niveau du moteur d'expansion.

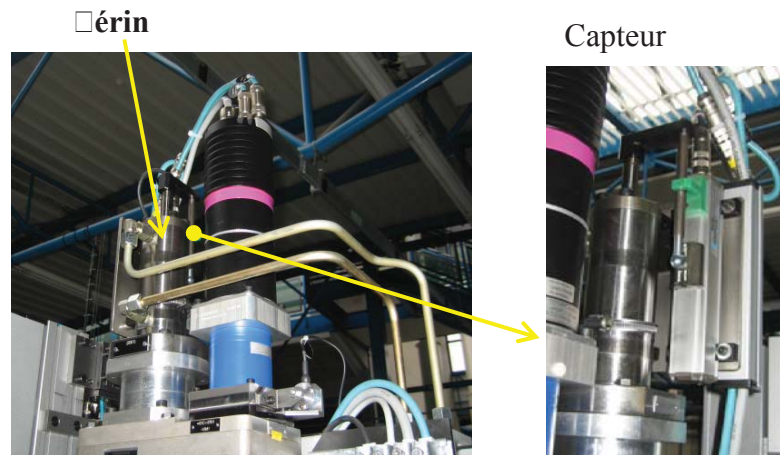


Figure 27. Localisation du capteur de mesure de la pression hydraulique d'expansion.

2. Méthodologie expérimentale

2.1. Pierres de rodage

Pour chaque étape de rodage (ébauche, finition ou plateau), six pierres abrasives sont utilisées. Elles se présentent sous forme de bâtonnets de dimensions 6mm x 6mm x 70mm. Il est ressorti de l'étude bibliographique que la structure de la pierre a une influence majeure sur les performances de rodage. En plus, deux pierres ayant la même structure provenant de deux fabricants différents n'aboutissent pas nécessairement à la même qualité de finition [25]. Ceci est dû en grande partie aux techniques et conditions de fabrication et au caractère stochastique des caractéristiques des éléments de la pierre abrasive (tel que la taille, la forme des grains et le liant utilisé).

En pratique de rodage, les pierres communément utilisées sont de deux types :

- soit des grains de carbure de silicium (SiC) avec liant céramique ;
- soit des grains diamant (Dia) avec liant métallique.

Ainsi, nous avons étudié différentes tailles de grain des pierres classiques de rodage et avons testé de nouvelles structures de pierres afin d'avoir un meilleur compromis qualité de surface produite/ productivité du process (usure et taux d'enlèvement de matière). Le tableau suivant résume les caractéristiques des différentes pierres utilisées.

<i>Etape de rodage</i>	<i>Type de grain</i>	<i>Taille de grains (μm)</i>	<i>Type de liant</i>
<i>Ebauche (RE)</i>	<i>Diamant</i>	126	<i>Métallique (Bronze)</i>
<i>Finition (RF)</i>	<i>Carbure de silicium</i>	30- 380	<i>Vitrifié V1</i>
	<i>Diamant</i>	107	<i>Vitrifié V1, V2, V3</i>
		91, 76	<i>Métallique</i>
		91	<i>Résine</i>
<i>Plateau (RP)</i>	<i>Carbure de silicium</i>	30	<i>Vitrifié</i>

Tableau 2. Caractéristiques des pierres de rodage étudiées.

□.□. Pièces d'essais

Les tests ont été réalisés sur des carters cylindres RENAULT à quatre cylindres en fonte grise à graphite lamellaire désignée par le sigle GL08 (cf. figure 28). Chaque cylindre a un diamètre de 75.937 mm et une longueur de 141mm. L'opération de rodage est réalisée après l'opération d'alésage de pas égal à 320 μm et donnant une rugosité arithmétique moyenne de l'ordre de 20 μm .

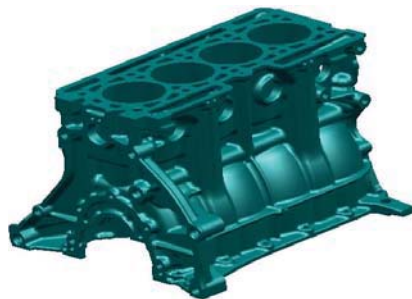


Figure 28. Représentation schématique des carters à quatre cylindres.

La composition chimique de la fonte de ces carters est donnée par le tableau 3. Quant à la structure micrographique, elle est définie par une matrice perlitique de ferrite inférieure à 20%. La structure micrographique des graphites est de type IA 4-5 correspondant à une distribution homogène des lamelles qui ont des dimensions allant de 0.06 à 0.25 mm (figure 29).

<i>Elément chimique</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Sn</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>
<i>Composition (%)</i>	3.10	1.90	0.50	< 0.15	< 0.12	0.25	< 0.15	< 0.60	< 0.20	< 0.10
	3.50	2.40	0.90			0.35				

Tableau 3. Composition chimique de la fonte grise GL08.

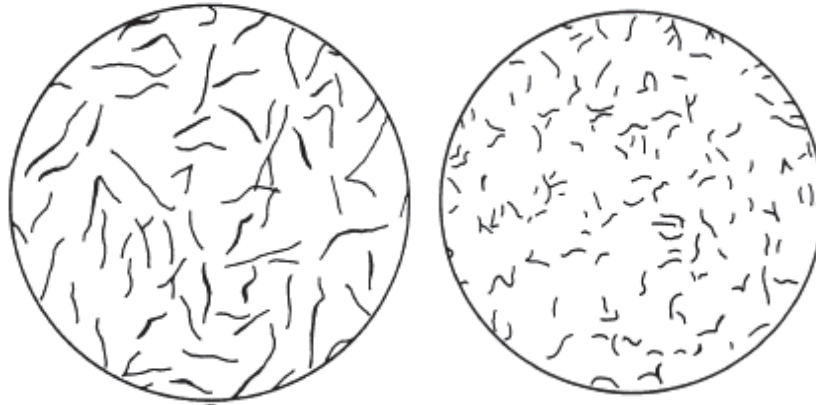


Figure 29. Deux exemples d'aspect au grossissement 100 des distributions des graphites au sein de la fonte GL04 utilisée

4.3. Cycles de rodage

Le fonctionnement d'un cycle de rodage varie en fonction du mode d'expansion choisi. Quatre modes d'expansion sont possibles :

- Mode de fonctionnement « **Normal** » où un diamètre est prédéfini par un premier étalonnage du système de soufflage de l'outil dans une bague étalon. Une fois l'outil de rodage est positionné à l'intérieure du cylindre à roder, une première mise au contact des pierres avec le cylindre est réalisée. Ensuite l'expansion (via le système d'expansion mécanique) démarre jusqu'à une position UM1 inférieure au diamètre final requis. Les pierres se rétractent légèrement pour que la mesure de diamètre soit réalisée. L'expansion des pierres reprend juste après jusqu'au diamètre final. La vitesse d'expansion est un paramètre déterministe pendant cette étape. Le temps de rodage n'est ici pas une variable d'entrée mais plutôt de sortie qui dépend du matériau, des vitesses (d'expansion, de rotation et d'oscillation) ainsi que de la pierre utilisée. Ce mode est le plus utilisé sur les lignes de production pour les étapes de rodage ébauche et finition afin de corriger les erreurs de côtes provenant des opérations d'usinage précédentes.
- Modes de fonctionnement « **Temps** » et « **Nombre de battements** » avec lesquels un temps de cycle de rodage est imposé sans prise en compte du diamètre du cylindre. Après la mise au contact des pierres abrasives avec le cylindre, leur expansion est actionnée pendant un temps prédéfini que l'on peut traduire dans la commande numérique par une variable temps ou un nombre d'oscillations. Ce mode de rodage est

utilisé pendant la phase de rodage plateau où un écrêtement de la rugosité de la surface est recherché.

- Mode de fonctionnement par « **Position** ». Ce mode consiste à définir une position de départ de l'expansion des pierres jusqu'à une autre prédéfinie et ce avec une vitesse d'expansion fixe. Il est généralement utilisé pour des mises au point ou des applications de rodage ponctuelles ne prenant pas en compte la précision finale de la cote de diamètre.

Les figures suivantes illustrent les cycles de rodage ébauche/ finition (figure 30) et plateau (figure 31).

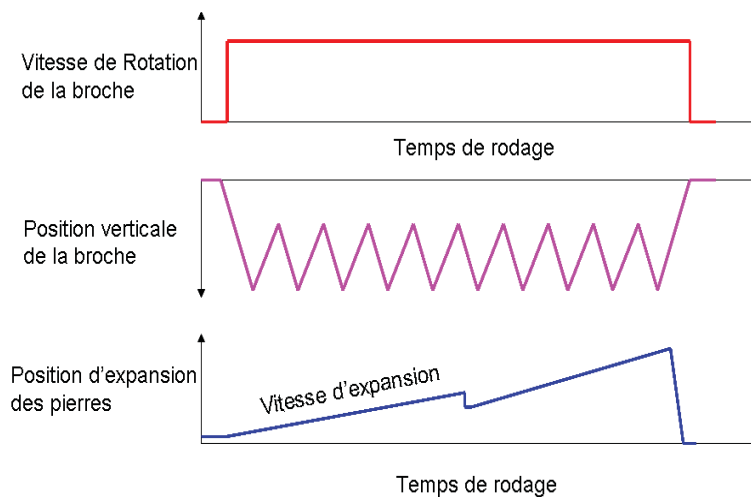


Figure 30. Illustration d'un cycle typique des phases de Rodage Ebauche (RE) ou Finition (RF).

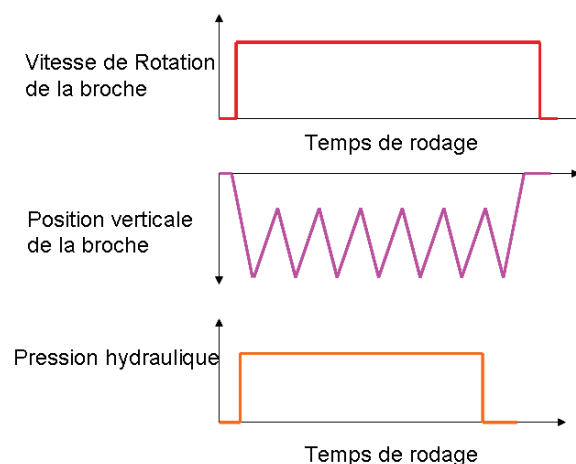


Figure 31. Illustration d'un cycle typique de la phase de Rodage Plateau (RP).

4.4. Procédure expérimentale

La mise en œuvre d'un test instrumenté de rodage suit la procédure suivante :

- 1- Mesurage de forme et d'état de surface avant rodage ;
- 2- Préparation du bac de récupération des copeaux ;
- 3- Chargement de l'outil abrasif ;
- 4- Lancement du programme approprié (ébauche, finition ou plateau) puis démarrage du cycle ;
- 5- Acquisition simultanée et in situ des variables physiques ;
- 6- Arrêt du cycle du rodage ;
- 7- Prélèvement de la pièce ;
- 8- Mesurage dimensionnel et topographique (forme, état et aspect de surface) ;
- 9- Expertise de la surface rodée.

4.4.1. Contrôle des surfaces rodées

L'évaluation de la qualité du fini des surfaces rodées permet de contrôler les différents changements résultants des différentes étapes de rodage et des différentes variations des variables process. Nous développerons dans cette section les moyens expérimentaux mis en œuvre pour le contrôle de ces surfaces rodées à différentes échelles de l'échelle micro (rugosité) à l'échelle macro (forme).

4.4.1.1. Mesure des diamètres

Les diamètres des fûts sont mesurés par un comparateur SUBITO (cf. figure 32). Le zéro de la jauge micrométrique est défini à partir de la bague étalon de diamètre 76,005 mm puis trois relevés de diamètre sont réalisés dans le fût à trois niveaux du cylindre (PMH, PM et PMB). Le diamètre final sera la moyenne des mesures réalisées sur les trois niveaux.



Figure 32. Appareil de mesure des diamètres (SUBITO)

2.2. Mesure des écarts de forme

L'étanchéité du système tribologique Segment-Piston-Fût (SPF) de carter dépend des écarts de forme des cylindres. Des écarts de circularité et de cylindricité sont alors définis pour chaque produit. Ils sont calculés à partir des profils palpés sur des portées cylindriques à trois niveaux du cylindre avec une machine de mesure 2D Mahr Modèle 1100 (cf. figure 33) à laquelle un montage adapté d'équilibrage du carter sur le plateau a été réalisé. A chaque niveau, le défaut de circularité « C_i » est d'abord calculé par la méthode de la distance radiale minimale (MZC : Minimum Zone Circles). Cette distance est la différence minimale entre les rayons de deux cercles concentriques qui contiennent tout le profil palpé. La cylindricité est ensuite définie à partir des génératrices des cercles des trois niveaux.

2.3. Mesure de l'état de surface

Des mesures 2D et 3D des états de surface sont réalisées respectivement par profilométrie tactile et interférométrie optique.

2.3.1. Mesure tactile

Les mesures profilométriques sont réalisées au moyen d'un rugosimètre tactile Surfscan doté d'un palpeur avec une pointe en diamant de rayon de courbure $2\mu\text{m}$ (cf. figure 34). Les principales caractéristiques de cet appareil de mesure sont les suivantes :

- Amplitude de mesure verticale maximale : 6mm ;
- Résolution verticale : 10nm ;
- Résolution latérale : $2\mu\text{m}$.



Figure 33. Dispositif de mesure des écarts de forme.



Figure 34. Illustration de la machine Surfscan pour la profilométrie tactile.

Les mesures sont réalisées au niveau du Point Mort Haut (PMH), Point Milieu (PM) et Point Mort Bas (PMB) comme illustré par la figure 35. Les longueurs de profils sont de 16mm.

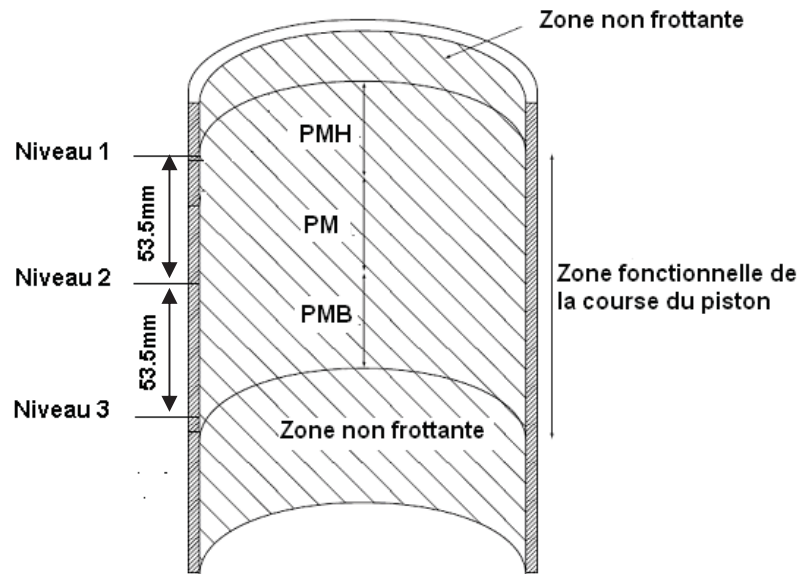


Figure 35. Schématisation des trois niveaux de mesures PMH, PM et PMB.

3.3.3 Mesurage optique 3D

Les mesures tridimensionnelles sont obtenues par un interféromètre optique VEECO NT 3300. Ce rugosimètre, constitué principalement d'un microscope, est solidaire d'un translateur piézo-électrique dont le déplacement est contrôlé par un microcalculateur (figure 36). Il utilise une technique de détection de phase par interférométrie où la lumière blanche réfléchie par la surface à analyser est comparée à une surface de référence. Le phénomène d'interférences résultant est visualisé et enregistré par une caméra CCD. Les franges d'interférences se déplacent avec le mouvement du translateur piézo et elles sont enregistrées pour quatre positions différentes de l'interféromètre. Ces acquisitions correspondent à quatre images dont on connaît l'intensité lumineuse en chaque point du plan (x, y) de la surface de l'échantillon. Un algorithme adapté traduit les variations d'intensité lumineuse en variation de relief. Cet interféromètre possède les caractéristiques suivantes :

- Amplitude de mesure verticale maximale : 500 μ m ;
- Résolution verticale : 10nm ;
- Résolution latérale : 2 μ m.

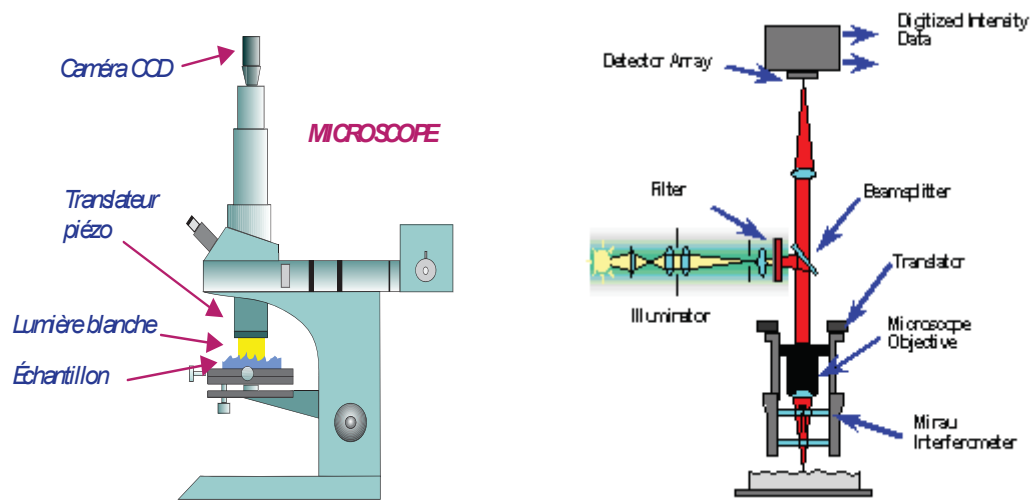


Figure 36. Interféromètre optique en lumière blanche.

Une technique de mesure par réplcation a été mise au point pour permettre un contrôle non-destructif et une acquisition rapide et facile des surfaces rodées. Elle consiste à recueillir un négatif de la surface (empreinte) qui épouse les formes de la pièce en utilisant le mélange d'un produit pâteux appelé SILFLO, d'un catalyseur et d'un adoucisseur. La procédure de réalisation de cette réplique consiste à verser le mélange sur la surface du fût. Ensuite, un élément d'impression est appliqué sur ce mélange pâteux jusqu'à son durcissement. L'empreinte obtenue sur la réplique représente alors la topographie inversée de la surface du fût. Ces empreintes sont relevées sur la même génératrice choisie pour les mesures d'état de surface par profilométrie tactile et aux mêmes niveaux (PMH, PM et PMB). Le relevé topographique de la surface du fût est réalisé ensuite sur la réplique avec interférométrie optique.

Afin de valider les mesures des empreintes, on a déterminé l'erreur engendré entre une mesure directe sur la surface réelle et celle réalisée sur la réplique. Quatre répliques ont alors été réalisées sur la même pièce. Cinq mesures sont effectuées sur différents endroits de la surface et sur chacune des répliques. Les résultats sont reportés sur la figure 37.

Compte tenu de ces résultats, il n'existe pas d'écart significatif entre la mesure par réplique et la mesure directe sur la surface du fût.

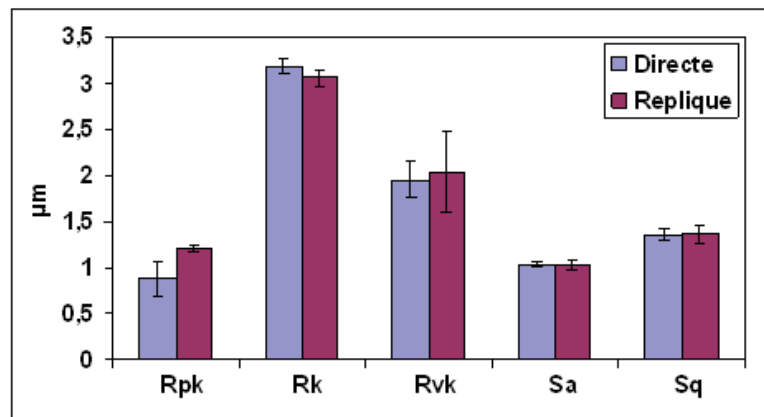


Figure 37. Comparaison entre les paramètres d'état de surface obtenus par une mesure 3D directe de la surface rodée et celle issue d'une réplique.

La phase de traitement des mesures brutes, réalisées sur les empreintes, comprend trois étapes :

- la détermination des altitudes des points non mesurés par interpolation. Les paramètres de mesure adoptés ont été choisis de façon à avoir un nombre total de points non mesurés inférieur à 5% ;
- l'inversion de l'image topographique de l'empreinte mesurée sur la réplique. Cette inversion permet de retrouver la topographie de la surface du fût ;
- l'extraction de la forme de la surface. Elle consiste à enlever la forme cylindrique de la surface. Cette forme correspond aux composantes basses fréquences et elle constitue un élément non important pour la définition des paramètres d'état de surface. Cette séparation de la forme est réalisée en utilisant l'approximation des moindres carrés basée sur les fonctions Splines cubiques.

4. Mesure de l'aspect de surface

L'aspect de surface est également défini à partir des relevés d'empreintes mesurées par interférométrie optique 3D ainsi que par relevés dits de Fax-film. La méthode du Fax-film est définie selon les étapes successives suivantes :

- dégraissage et nettoyage de la surface à examiner avec un papier imprégné d'Ether de pétrole ;
- application de deux gouttes d'acétate sur la surface à observer ;

- posage d'une feuille d'acétate sur cette surface mouillée en appuyant sur l'ensemble durant environ 30 secondes ;
- décollage de la feuille d'acétate après 5 minutes ;
- Observation au microscope optique de la zone relevée avec des grossissements x100 et x200.

□ Conclusion

Nous avons opté pour l'étude du procédé de rodage pour une machine de production afin de s'approcher au mieux des conditions réelles de fabrication industrielle. Les différentes études relatives au procédé de rodage ne sont souvent que des analyses empiriques basées sur des variations aléatoires des paramètres process et des définitions de la qualité obtenue, quelques fois hasardeuses. L'approche expérimentale développée dans ce chapitre permet d'aborder le process dans sa globalité en tenant compte :

- des différentes actions physiques inhérentes au procédé de rodage et aux interactions entre les différents paramètres process obtenus par l'instrumentation de la machine ;
- de la complexité des caractéristiques topographiques résultantes par l'introduction des mesures 3D non destructives des surfaces rodées comparées aux mesures classiques.

Chapitre 3

Caractérisation multi-échelle des surfaces rodées

1. Introduction

Quelles que soient les conditions d'usinage à l'abrasif, il est toujours possible de définir à posteriori un paramètre de caractérisation de la surface générée par le calcul de moyennes arithmétiques de ses irrégularités micro ou macro-géométriques. Dans le premier chapitre, l'exposé de ce type de caractérisation classique à des surfaces résultant de manipulations successives de finition avec l'appoint d'abrasif, a montré qu'il ne peut fournir une base adéquate pour l'analyse des résultats expérimentaux (influence des variables process, facteurs de corrélation physique, effets d'échelle, etc.).

Dans ce chapitre, deux types de caractérisations par rapport à l'approche classique vont être introduits :

- une description texturale multi-échelle des irrégularités superficielles et décrochements géométriques résultant de la préparation de surface par suite des processus de rodage ;
- une reconstruction structurale de l'aspect de surface résultant des manipulations de rodage qui se traduit par la description objective de son orientation et son anisotropie en harmonie avec le besoin fonctionnel. Cette reconstruction conduit à introduire des paramètres de corrélation fonctionnelle « effectifs ».

L'importance pratique de cette nouvelle caractérisation des surfaces rodées est très grande, et, dans les applications industrielles, il importe au préalable d'examiner soigneusement si la nature des paramètres introduits, ou leur valeur numérique, répond bien au problème étudié.

2. Analyse multi-échelle par ondelettes continues

2.1. Principe

Le principe de l'analyse par ondelettes est basé sur l'utilisation des fenêtres d'analyse de tailles variables. L'idée est de permettre une analyse multi-résolution des données de la surface, et quantifier aussi localement les différentes composantes fréquentielles de l'image topographique de la surface. On examine ces données avec une faible résolution à l'aide d'ondelettes larges. Par contre, pour une grande résolution, on utilise un grand nombre de petites ondelettes qui permettent une analyse plus fine [67,68]. Par analogie, l'analyse par ondelettes est équivalente à l'observation par un microscope optique, dont les grossissements des objectifs sont les ondelettes analysantes à différentes largeurs ou échelles. La compression des ondelettes analysantes accroît ainsi le grossissement du microscope numérique et révèle les détails de plus en plus fins [68-70]. Le pavage du plan espace-échelle des coefficients de la transformée par ondelette $C(a,b)$ n'est donc pas régulier comme celui du plan espace-fréquence dans le cas d'une transformée de fourrier (figure 38). Dans l'analyse de fourrier, les fréquences spatiales sont en effet échantillonnées à $\frac{1}{\lambda_j} = \frac{j}{N\Delta}$ en intervalles réguliers (j varie entre 1 et $N/2$ avec N le nombre de points d'échantillonnage) [71,72].

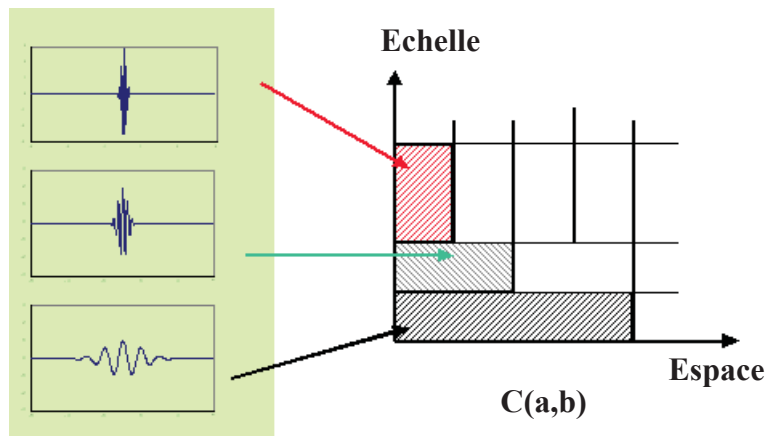


Figure 38. Le plan Espace-Echelles de la transformée en ondelettes.

Ce type de pavage permet alors d'avoir une résolution spatiale 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.

2.2. Conditions d'existence des ondelettes

Le nom d'ondelette vient du fait que c'est une fonction oscillante (comme une onde), localisée et à décroissance rapide ($\psi(x) \xrightarrow{|x| \rightarrow \infty} 0$, avec $\psi(x)$ est l'ondelette Mère de variable réelle " x ").

Une fonction $\psi(x)$ est dite ondelette analysante si elle est [70-73] :

- continue, absolument intégrable et de carré intégrable (énergie finie), c'est à dire :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2(x) dx < \infty \quad (16)$$

- analytique : sa transformée de Fourier doit être nulle pour $f < 0$
- admissible : $\Psi(0) = 0$ (17)

La propriété d'admissibilité implique que $\Psi(x)$ est de moyenne nulle [73,74] :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (18)$$

2.3. Familles d'ondelettes

Les fonctions d'ondelettes $\psi_{a,b}(x)$ $a > 0, b \in \mathbb{R}$ forment une famille d'ondelettes et sont générées avec une seule et même ondelette « Mère » par dilatation et translation suivant cette équation [73-76] :

$$\psi_{b,a}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (19)$$

Où « a » traduit le changement d'échelle et « b » la translation dans l'espace. Le nombre d'oscillations est constant pour toutes les fonctions analysantes de la transformation en ondelettes. La figure 39 montre l'effet du changement des échelles représenté par la contraction des ondelettes. Cette figure illustre la signification et l'impact de chaque échelle. En effet, plus le coefficient de contraction « a » diminue, plus la bande passante de l'ondelette devient étroite et son amplitude augmente.

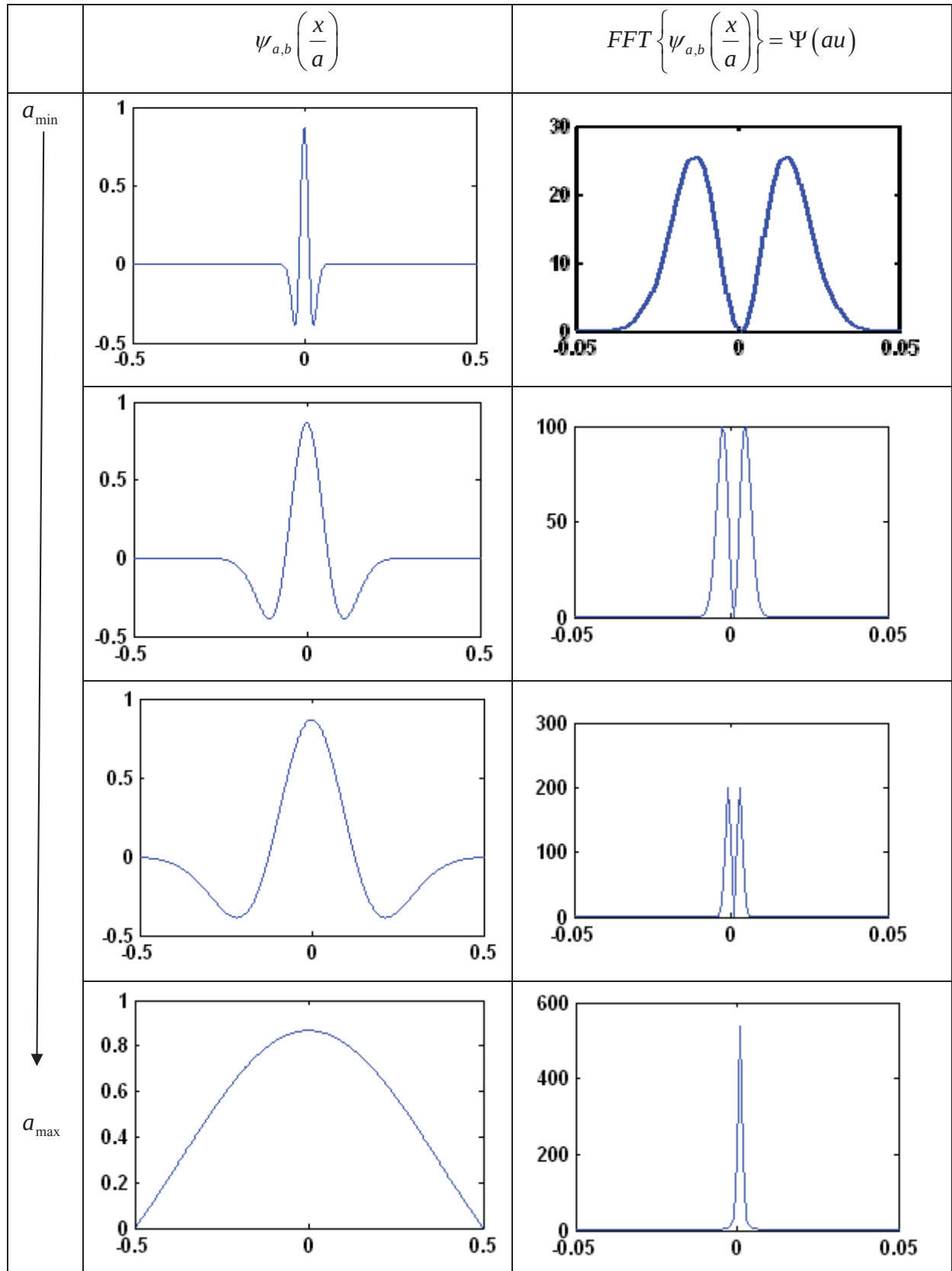


Figure 39. Génération d'une famille de l'ondelette chapeau mexicain et sa transformée de fourrier à différentes échelles.

Les fonctions $\psi_{a,b}(x)$ forment une famille d'ondelettes de même énergie. En d'autres termes, si l'on considère $\psi_{a,b}(x)$ comme un banc de filtres, la résolution en espace augmente tout en gardant une largeur de bande relative $\Delta f / f$ constante. Les filtres sont répartis régulièrement sur une échelle logarithmique de fréquences (Figure 40).

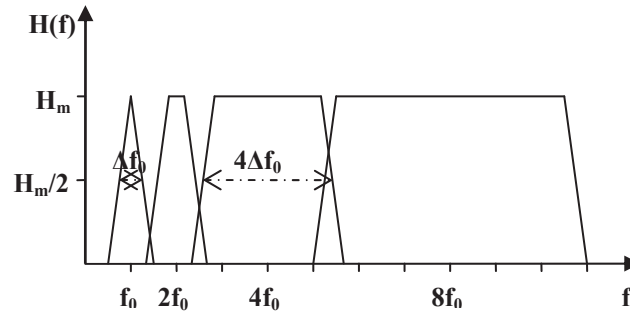


Figure 40. Division du domaine fréquentiel pour la Transformée par Ondelette (TO) (couverture logarithmique) [74,77]

2.4. Transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes est décrite par l'équation suivante [78] :

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}^*(x) dx \quad (20)$$

Mathématiquement, il s'agit d'une convolution du signal à traiter par une famille d'ondelettes $\psi_{a,b}$ [79,80]. L'ensemble des valeurs $C(a,b)$ constitue les coefficients en ondelettes du signal $f(x)$ relatif à la famille d'ondelettes $\psi_{a,b}$ considérée.

Pour chaque couple (a,b) , $|C(a,b)|^2$ est proportionnel à l'énergie du signal $f(x)$ et mesure à priori ses fluctuations autour du point « b » et à l'échelle « a » [73,74].

2.5. Transformée en ondelettes inverse

On peut montrer que si la fonction d'ondelette est convenablement choisie, la transformation en ondelettes est inversible et la fonction peut être reconstruite après analyse suivant l'équation suivante [74,75] :

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \iint C(a,b) \hat{\psi}_{ab}(x) \frac{db da}{a^2} \quad (21)$$

$\hat{\psi}_{a,b}$ est appelée famille d'ondelettes duale.

Cette possibilité reste théorique car le calcul n'est possible que numériquement et sa convergence peut-être très lente. Le coefficient C_ψ , s'il existe, est donné par l'équation suivante [74,75] :

$$C_\psi = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega \quad (22)$$

Avec Ψ est la transformée de fourrier de la fonction d'ondelette Mère « $\psi(x)$ ».

La condition d'existence de ce coefficient représente aussi la condition d'admissibilité de la fonction ondelette analysante. Cette condition est explicitée par l'équation (17) qui se ramène le plus souvent à la condition exprimée par l'équation (18). Cette équation n'est pas très contraignante et indique seulement que la fonction ondelette doit être à moyenne nulle [74,75].

3. Algorithme de caractérisation multi-échelle par ondelettes continue

La caractérisation multi-échelle de surface basée sur l'analyse par ondelettes continues consiste à [78-82] :

1. déterminer des coefficients d'ondelettes $C(a,b)$ par application de la transformée en ondelettes continues ;
2. effectuer ensuite la transformée inverse ;
3. calculer enfin des paramètres d'état de surface à chaque échelle d'analyse.

La figure 41 montre l'application de cette procédure à une surface rodée qui traduit la décomposition de son signal topographique à différentes échelles. Cette décomposition correspond au plan de reconstruction obtenu par application de la transformée en ondelettes continues directes puis inverse du signal. Les différentes échelles peuvent être regroupées par bande en faisant varier l'intervalle de l'intégration da dans l'équation (21) [82,83]. Dans ce cas, le signal peut être décomposé en trois domaines. Les petites échelles correspondent à la rugosité du profil, les grandes échelles correspondent à la forme et les échelles intermédiaires aux ondulations. La reconstruction du signal initial (reconstruction totale) est réalisée par sommation totale des composantes d'échelles de la surface.

On peut noter ici la capacité de cette approche de caractérisation à étudier les échelles du signal analysé sur toute la gamme des longueurs d'onde le composant.

Une fois la décomposition du signal topographique est réalisée, on peut déterminer les différents critères d'état de surface à chaque échelle. On obtient ainsi une description multi-échelle représentée sous forme d'un spectre de rugosité par un critère donné.

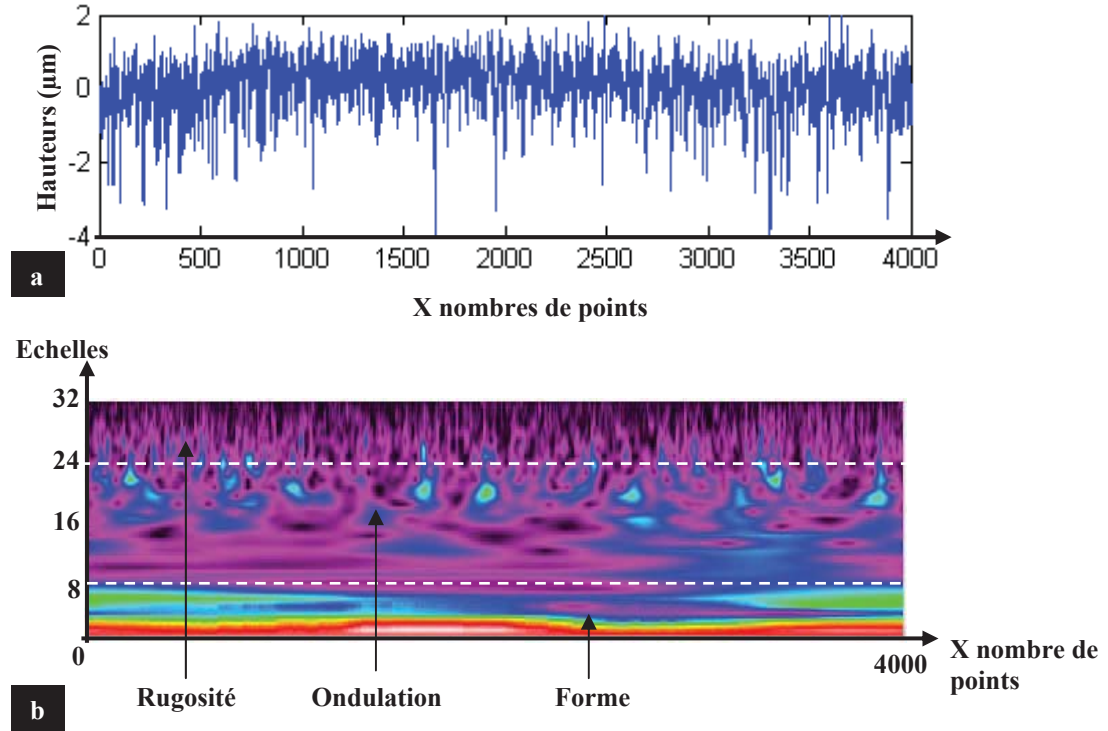


Figure 41. Décomposition multi-échelle d'un profil d'une surface rodée : (a) signal topographique, (b) plan de reconstruction montrant les échelles caractéristiques des composantes de la surface rodée.

3.1. Spectre multi-échelle d'état de surface

Les différents paramètres issus des différentes normes de spécification d'état de surface (ISO 4287, ISO 12085 et ISO13565) peuvent être exprimés par cette approche sous la forme de spectres multi-échelles.

Le spectre de rugosité SMa représente la valeur de l'écart absolu moyen à chaque échelle. Il est défini par l'équation suivante :

$$SMa(a) = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N |f_a(x)| \quad (23)$$

La figure 42 montre le spectre SMa associé à un profil issu d'une surface rodée. Ce spectre permet d'identifier les échelles caractéristiques de chaque composante du signal topographique (rugosité, ondulation et forme).

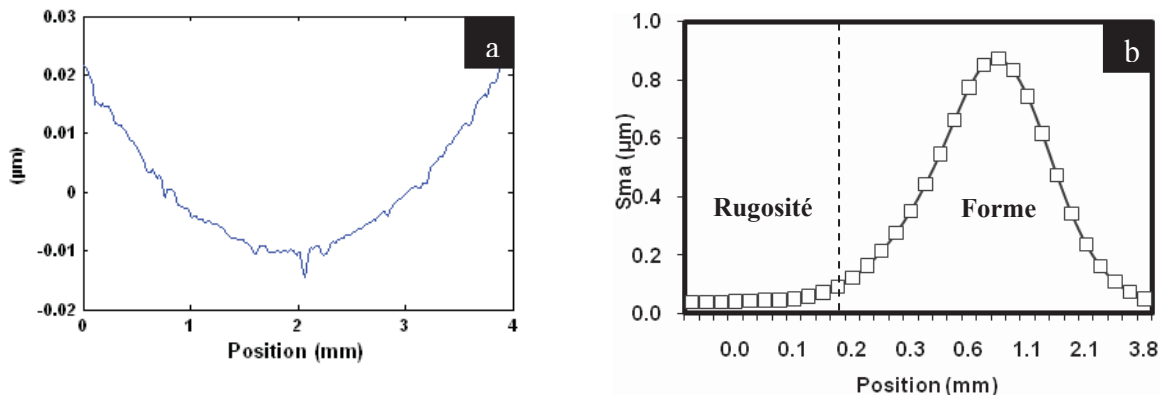


Figure 42. (a) Profil d'une surface rodée et (b) son spectre SMA associé.

De la même manière, cette analyse peut être généralisée aux autres paramètres d'état de surface et plus particulièrement les paramètres fonctionnels de surface tels que les paramètres CNOMO : Cr, Cf et Cl.

Il est important de noter que ce type de traitement des données profilométriques n'est valide que si la taille de la surface mesurée est représentative avec un mesurage 3D de haute résolution – sinon les échelles caractéristiques du signal topographique ne sont pas calculables. Pour étudier plus précisément ce problème, une analyse plus détaillée de la surface échantillon est nécessaire. Elle fait explicitement apparaître les trois constituants du traitement : résolution, pas d'échantillonnage et taille de surface cible. Le paragraphe suivant explique la méthode du choix de la surface cible avec la précision de mesure requise.

3.2. Etude de la taille optimale de la surface échantillon

Lorsqu'on fait varier la résolution optique lors d'un mesurage 3D de surface, on doit essayer systématiquement d'atteindre les niveaux de précision les meilleurs possibles. Le tableau 4 montre à ce sujet le niveau de précision obtenu - quantifié ici par le pourcentage de points non mesurés - sur une surface résultant du rodage en fonction de la résolution optique.

Résolution optique	Pas d'échantillonnage (μm)	Taille de la surface cible (mm x mm)	Pourcentage de points non mesurés (%)
2.5x	3.88	2.47 x 1.88	15
5x	1.94	1.24 x 0.94	7
20x	0.48	0.31 x 0.24	15

Tableau 4. Relation entre précision de mesure et taille de surface cible en fonction de la résolution de mesurage optique. Essais effectués avec un interféromètre optique VEECO NT

Comme on le voit, l'augmentation de la résolution engendre un niveau de précision optimal qui réduit le pas d'échantillonnage et la taille de surface cible. La précision maximale est obtenue avec un pas d'échantillonnage de $1,94\mu\text{m}$ pour une taille de surface de l'ordre de $1,165\text{ mm}^2$. Notons à ce stade deux difficultés :

- d'une part, la petite taille de la surface échantillon peut entraîner des écarts de répétitivité de paramètres texturaux ;
- d'autre part, la résolution optique n'est pas suffisante aux échelles fines. En pratique, l'analyse peut se faire suivant une analyse multi-échelle de surfaces de fûts de carter cylindre dont la qualité d'aspect est différente (classifiées en Q_2 et Q_4). Comme le montre la figure 43, ces surfaces sont nettement différenciées par les informations texturales contenues à des échelles inférieures à $350\text{ }\mu\text{m}$. Les coefficients majeurs de la transformée en ondelettes sont en effet constants pour les échelles supérieures à cette valeur limite. Ceci implique la nécessité de conjuguer une haute résolution optique à une grande taille de surface échantillon tout en maximisant le niveau de précision de la mesure.

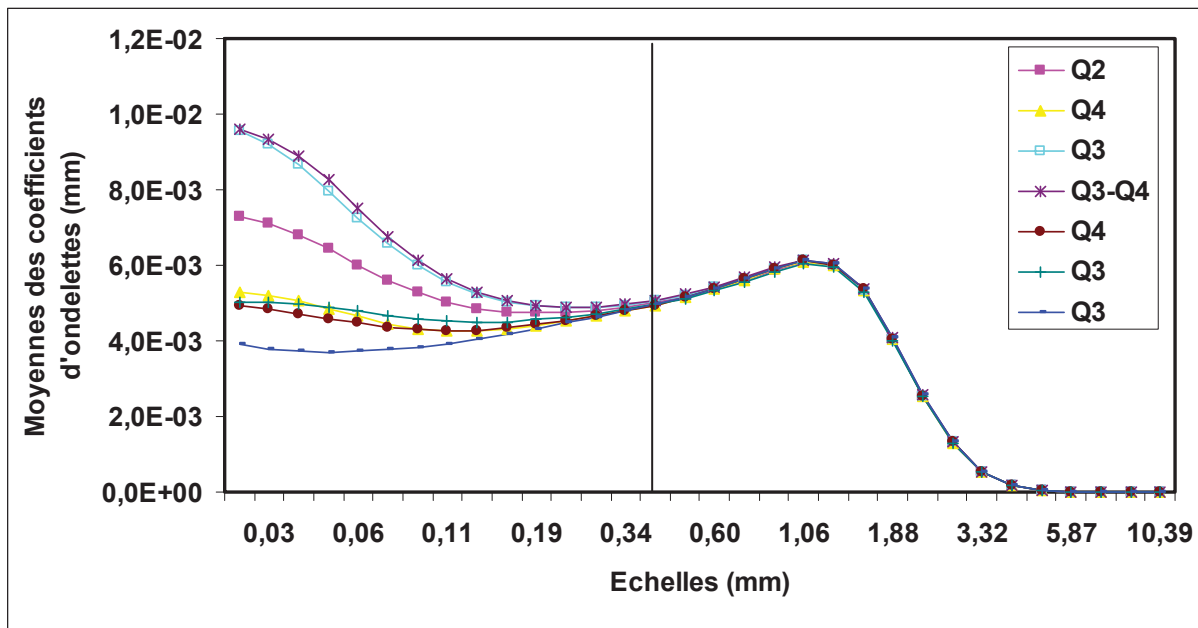


Figure 43. Spectres des moyennes des coefficients d'ondelettes de surfaces de fûts de carter cylindre de différentes qualités d'aspect.

Suite à différents tests de sensibilité à la micro-rugosité due aux différents stages de rodage, la technique de recollage d'images « stitching » a été adoptée avec un taux de recouvrement maximal de 50%. Le processus de mesure par microscopie interférométrique réalise, in fine, des images topographiques de pas $3,88\mu\text{m}$ pour une dimension de $1,868 \times 2,489\text{ mm}$ avec un niveau de précision supérieur à 95%.

Remarques :

- la surface échantillon correspond à une longueur de 1,868 mm dans le sens de la génératrice (sens de déplacement du piston) et une longueur de 2,489 mm dans la direction transverse;
- la méthode de mesure interférométrique est d'une mise en œuvre simple, dès que l'on maîtrise la technique de réplique qui prendra l'empreinte sur le fût ;
- elle permet d'étudier l'enlèvement et le transport de la matière qui sont à la base du processus de rodage;
- on étudie l'orientation et l'anisotropie de la surface puisqu'elles sont fonction du profil et de la direction des sillons (stries d'usinage) – ce qui rend aisé l'analyse des effets structuraux.

4. Etude de l'influence du choix de la fonction ondelette

Le cadre de caractérisation multi-échelle par ondelettes continues, exposé ci-dessus, s'applique à toute fonction d'ondelette analysante. Pour étudier une texture issue spécialement de rodage par cette approche, il faut répondre à la double interrogation suivante :

- le choix de l'ondelette d'analyse a-t-il une influence sur les résultats de caractérisation ?
- existe-il par ailleurs une famille d'ondelettes spécifique qui optimise l'analyse de la topographie de surfaces obtenus par rodage ?

Le choix de l'ondelette est en principe très ouvert puisque les conditions d'existence et d'inversion de l'ondelette analysante se ramènent à ce que la fonction ondelette soit de moyenne nulle. Une condition pas très exigeante et réalisable facilement. Toutefois, la robustesse et la vitesse de convergence de l'algorithme de reconstruction dépendent du choix de l'ondelette. Celle-ci conditionnera également la capacité du système à capter les détails les plus fins de la surface en changeant l'ondelette (compacte ou pas). Plusieurs études ont, donc, essayé de définir le choix du type d'ondelette analysante mais il n'existe pas de réponse générale. Les conclusions de ces travaux sont tributaires des applications dans lesquelles étaient utilisées les ondelettes. Par exemple, dans les applications de classification de textures de surface à l'échelle macro, plusieurs études comparatives concluent que le choix de la fonction d'ondelette mère a peu d'effets sur les résultats [84,85]. Tandis que, d'autres études montrent que l'ondelette dite de « Meyer » est la mieux adaptée à l'analyse des signaux

cardiaques [86]. Ces différences d'analyses entre les applications sont dues à la nature des caractéristiques des motifs à isoler. D'où l'importance du choix de l'ondelette par rapport à sa capacité de détection spatiale et fréquentielle.

Il s'agit dans ce travail de préciser l'action des fonctions d'ondelettes sur l'analyse de surfaces spécifiques de rodage.

4.1. Les différentes familles d'ondelettes

Il existe différentes familles d'ondelettes. Leurs qualités varient selon plusieurs critères dont les principaux sont [87]:

- le support de l'ondelette qui est étroitement lié à sa vitesse de décroissance ;
- la symétrie qui permet d'éviter le déphasage lors du traitement des images ;
- la régularité qui se traduit ainsi : si le signal $f(x)$ est n fois continue et dérivable au point x_0 avec $n \geq 0$, alors la régularité est égale à n . Cette propriété est très utile pour une meilleure reconstruction des motifs caractéristiques du signal.

Ces critères sont associés souvent à une propriété moins importante qui est l'existence d'une expression explicite de la fonction d'ondelette « Mère ».

La figure 44 illustre les familles d'ondelettes fréquemment exploitées en transformation continue [87,88]. Il s'agit de :

- **Haar** : C'est l'ondelette la plus simple possible. Son principal inconvénient est sa non continuité qui implique sa non différentiabilité. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1/2, \\ -1 & 1/2 \leq t \leq 1, \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (24)$$

- **Morlet**, définie par l'expression suivante :

$$\psi(x) = e^{i\omega_0 x} e^{\left(-\frac{x^2}{2}\right)} \quad (25)$$

- **Barrat**, qui traduit la convolution d'une gaussienne par une fenêtre triangulaire et s'exprime par l'équation suivante :

$$\psi(x) = e^{-\sigma|x|} (1 + \sigma|x|) e^{icx} \quad (26)$$

avec $\sigma = 1.5$ et $c = 1.5$.

Elle est beaucoup moins satisfaisante du point de vue de l'admissibilité, ce qui induit des erreurs de reconstruction du signal. Cette fonction d'ondelette n'est donc pas adaptée à notre approche de caractérisation.

- **Meyer**, qui est définie dans le domaine fréquentiel par :

$$\begin{cases} \hat{\psi}(\omega) = (2\pi)^{-1/2} e^{i\omega/2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \nu\left(\frac{3}{2\pi}|\omega| - 1\right)\right) & \text{if } \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3} \\ \hat{\psi}(\omega) = (2\pi)^{-1/2} e^{i\omega/2} \cos\left(\frac{\pi}{2} \nu\left(\frac{3}{2\pi}|\omega| - 1\right)\right) & \text{if } \frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3} \end{cases} \quad (27)$$

Avec $\nu(a) = a^4(35 - 84a + 70a^2 - 20a^3)$ $a \in [0, 1]$

- **DOG**, qui est une fonction représentant la dérivée d'ordre « n » de la fonction gaussienne donnée par :

$$\psi(x) = \frac{\partial^n}{\partial x^n} e^{-x^2/2} \quad (28)$$

En particulier si $n = 2$, on obtient l'ondelette appelée « Chapeau Mexicain ».

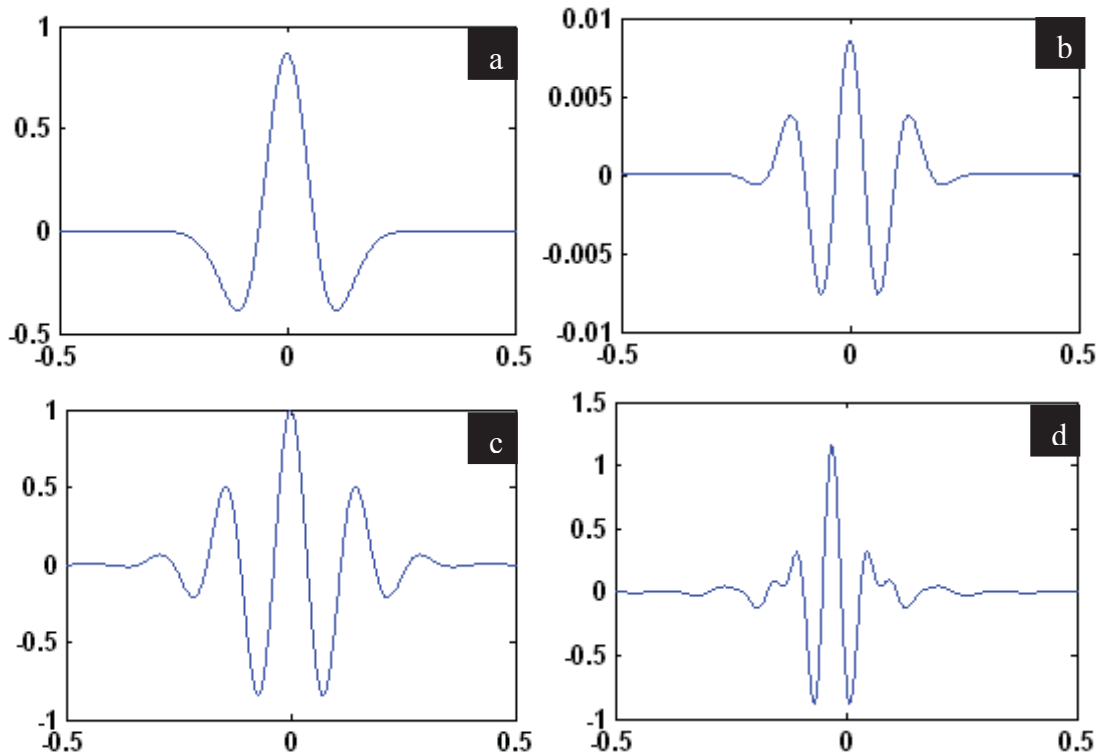


Figure 44. Différentes familles d'ondelettes (a) Chapeau Mexicain (2^{ème} dérivée d'une gaussienne), (b) 8^{ème} dérivée d'une gaussienne (DOG8), (c) Morlet et (d) Meyer

4.2. Effet du choix de l'ondelette « Mère »

La figure 45 montre que la reconstruction d'un profil topographique d'une surface rodée varie avec l'utilisation de différentes familles d'ondelettes.

L'erreur entre le signal original et le signal de synthèse (signal après reconstruction par application de la transformée en ondelettes inverse) engendrée par l'étape de reconstruction a été calculée par l'expression suivante :

$$\varepsilon_{ormoy} = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N |f_o(x) - f_r(x)| \quad (29)$$

Avec f_o : signal original; f_r : signal reconstruit et N le nombre de points du signal analysé.

Le tableau 5 montre que toutes les fonctions d'ondelettes « Mère » utilisées aboutissent à une erreur de reconstruction assez faible.

<i>Fonction d'ondelette</i>	<i>DOG1</i>	<i>Chapeau Mexicain (DOG2)</i>	<i>DOG8</i>	<i>Morlet</i>	<i>Paul2</i>	<i>Meyer</i>
<i>Erreur de reconstruction</i>	6.10^{-3}	3.10^{-3}	45.10^{-4}	$<10^{-6}$	59.10^{-4}	2.10^{-4}

Tableau 5. Erreur de reconstruction générée par différentes fonctions d'ondelettes analysantes

Cependant, les spectres *SMA* de rugosité illustrés dans la figure 46, varient d'une ondelette analysante à une autre. Il ressort donc que le choix de l'ondelette « Mère » a une influence majeure sur l'évolution des paramètres statistiques de caractérisation du signal topographique. Quelle est donc l'ondelette analysante qui décrit au mieux la topographie de la surface rodée ? Pour répondre à cette question, il faut déterminer la famille d'ondelettes qui permet de mieux détecter l'ensemble des motifs élémentaires de surfaces rodées. Ceci se ramène tout simplement à l'analyse de sa capacité de localisation spatiale et fréquentielle des motifs du signal topographique.

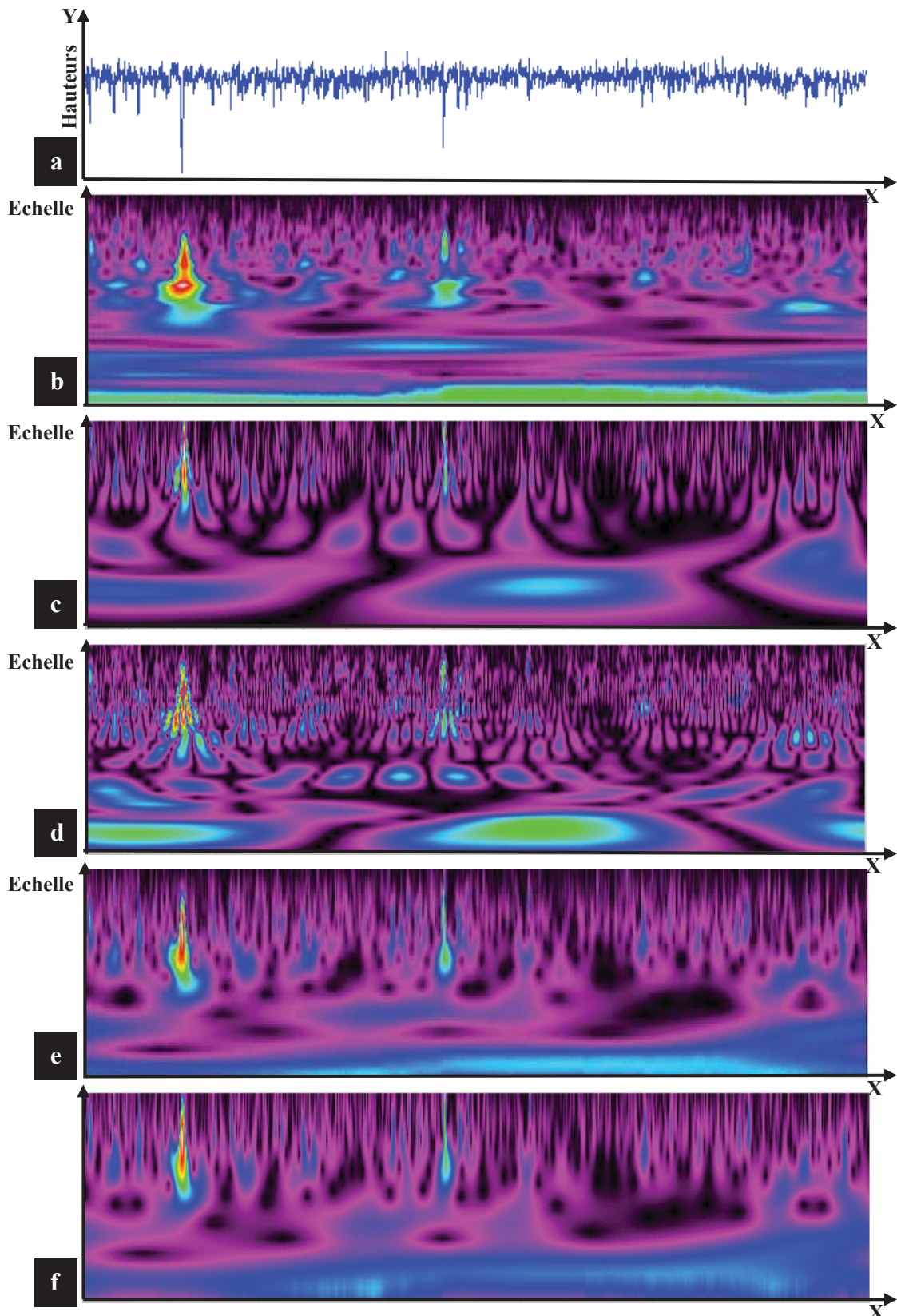


Figure 45. Décomposition d'un profil topographique d'une surface rodée par différentes familles d'ondelettes : (a) Profil topographique d'une surface rodée, plan de reconstruction obtenu avec l'ondelette (b) Morlet, (c) Chapeau Mexicain, (d) DOG8, (e) Meyer et (f) Paul d'ordre 2 (Paul2).

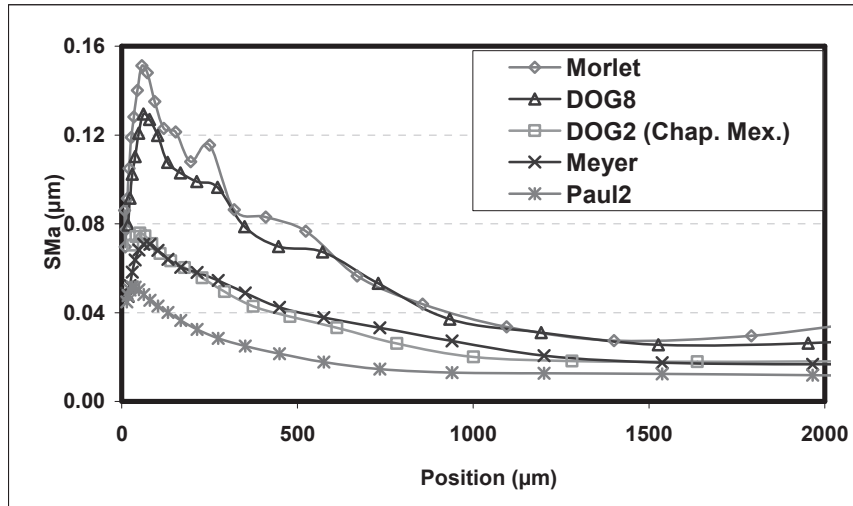


Figure 46. Spectres SMA obtenus par différentes fonctions d'ondelettes analysantes.

Afin de pouvoir réaliser cette étude comparative, il est nécessaire d'identifier en premier lieu le motif élémentaire et typique d'une surface générée par rodage. La figure 47-b présente un motif de base sélectionné sur un profil de surface rodée (figure 47-a). On remarque que la forme de ce motif caractéristique n'est autre que la trace d'indentation imprégnée par un grain abrasif sur la surface du cylindre. Notons ici que les résultats de cette étude de choix de l'ondelette analysante peuvent être généralisés aux cas des procédés générant le même motif élémentaire. Ceci est a priori le cas des procédés de finition par abrasion similaires au rodage.

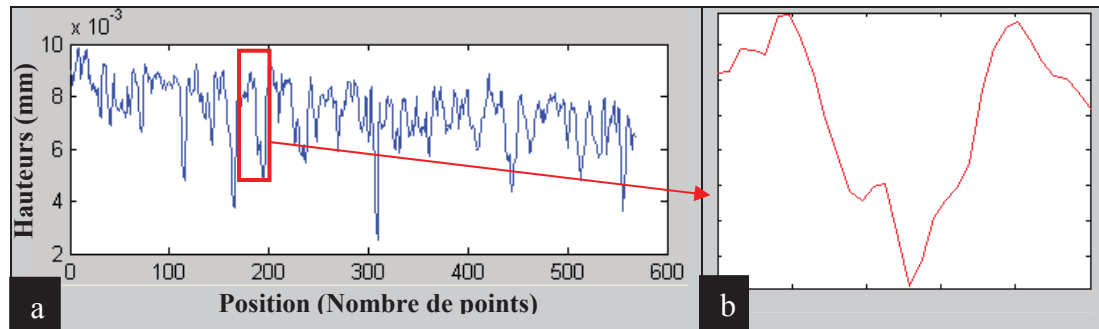


Figure 47. (a) Profil topographique d'une surface rodée, (b) Exemple d'un motif sélectionné représentatif d'une surface rodée.

En considérant ce motif élémentaire à deux positions et à deux échelles différentes, un signal $t(x)$, illustré dans la figure 48, est généré à partir de l'expression suivante :

$$t(x) = f((x - b_1)/a_1) + \sqrt{2} f((x - b_2)/a_2) \quad (30)$$

Les coefficients de changement d'échelle « a_i » et de localisation « b_i » ainsi définis couvrent un domaine de valeurs numériques très large. Pour une démonstration de la capacité

des ondelettes analysantes à détecter ce motif élémentaire, le calcul de la transformée en ondelettes s'effectuera à partir des valeurs numériques suivantes :

$$a_1 = 8, \quad b_1 = 20 \text{ et } a_2 = 4, \quad b_2 = 40$$

Le problème consiste donc à trouver la bonne ondelette analysante permettant de détecter les deux maxima locaux représentés sur le diagramme espace-échelle de sa transformée comme suit :

- le premier doit être repéré à la position $b = 20$ et à l'échelle $a = 8$;
- le second doit être à la position $b = 40$ et à l'échelle $a = 4$.

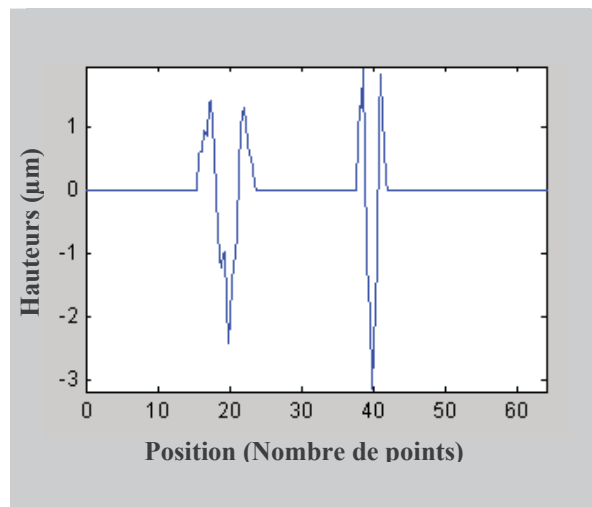


Figure 48. Signal $t(x)$ composé de deux motifs à deux échelles et positions différentes

En comparant les plans des coefficients de la transformée directe du signal $t(x)$ pour les différentes ondelettes testées (figure 49), on peut donc déduire leur capacité d'analyse- c'est-à-dire la localisation spatiale et fréquentielle. Il s'ensuit que :

- l'ondelette Chapeau Mexicain est mal adaptée à la détection des motifs des surfaces rodées (figure 49-a). Elle présente une mauvaise localisation fréquentielle des motifs du signal topographique. Le motif qui devrait être détecté à l'échelle 4 n'apparaît pas dans le spectre des coefficients d'ondelette ;
- l'ondelette Meyer est mal adaptée aussi à la détection des motifs des surfaces rodées (figure 49-b). En effet, elle présente une mauvaise localisation fréquentielle et spatiale des motifs du signal analysé ;
- la fonction ondelette Morlet montre une capacité significative à détecter le signal aux deux points de référence (cf. figure 49-c) ;

- Les fonctions DOG testées à l'ordre 1, 4 et 8 (figures respectives 49-d, 49-e, 49-f) montrent que la localisation fréquentielle est meilleure pour des ordres élevés. Ceci montre que la propriété de régularité de l'ondelette a une grande influence sur la pertinence de la description multi-échelle dans le cas d'une surface rodée.

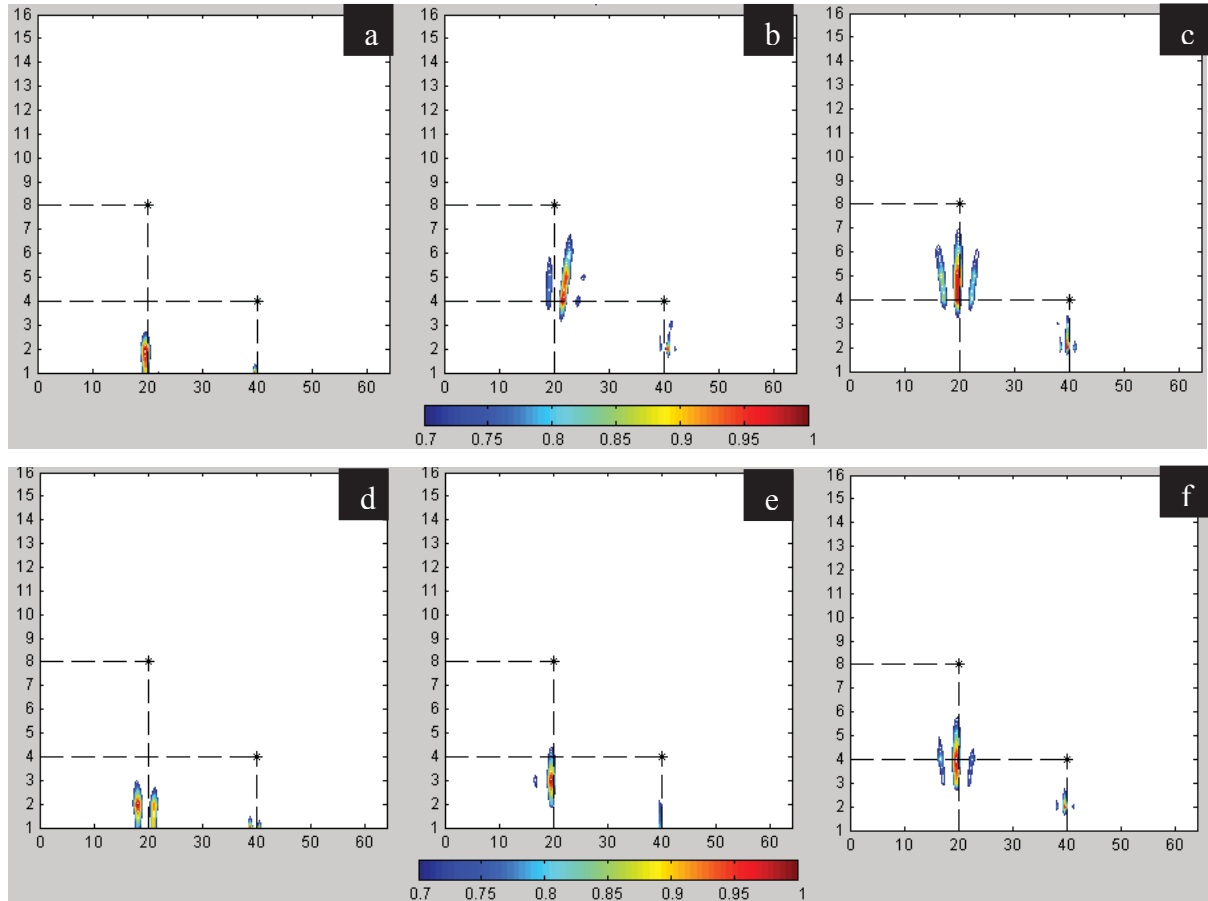


Figure 49. Comparaison des performances de localisation spatiale et fréquentielle avec différentes fonctions d'ondelettes : (a) Chapeau mexicain, (b) Meyer, (c) Morlet, (d) dérivée première d'une gaussienne, (e) dérivée 4^{ème} d'une gaussienne, (f) dérivée 8^{ème} d'une gaussienne

D'après ces résultats, les deux ondelettes de Morlet et la gaussienne d'ordre 8 conduisent à une meilleure interprétation du motif élémentaire fondée sur leur capacité de localisation spatiale et fréquentielle. Cette interprétation sera confrontée par des mesures de l'effet de l'amplitude de rugosité.

4.3. Sensibilité du choix de l'ondelette à l'amplitude de rugosité

Les surfaces rodées présentent des niveaux de rugosité différents à chaque étape de rodage. De ce fait, la détection des motifs élémentaires devrait être réalisée en présence d'un bruit

additionnel. Celui-ci peut être assimilé à de la microrugosité des plateaux de la surface (figure 50). On considère donc le signal $t'(x)$ défini par l'expression suivante :

$$t'(x) = t(x) + N = f((x-20)/8) + \sqrt{2} f((x-40)/4) + N \quad (31)$$

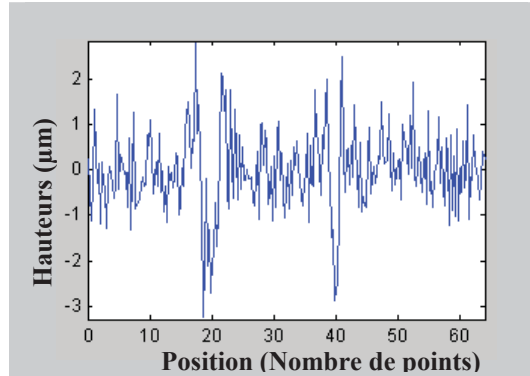


Figure 50. Signal composé par le motif élémentaire à deux positions et échelles différentes ($x=20$ et $x=40$) et incluant du bruit additionnel.

L'utilisation de différentes ondelettes pour l'analyse de ce nouveau signal, décrite par la figure 51, montre alors que :

- l'ondelette de Meyer ou Paul est très sensible à cette micro-rugosité des surfaces plateaux. En effet, le motif présent aux petites échelles ne peut plus être détecté ;
- l'ondelette de Morlet affiche les mêmes performances que celles obtenues précédemment. Aussi, vu l'amplitude des maxima des coefficients d'ondelettes, elle présente une meilleure détection aux petites échelles que l'ondelette gaussienne d'ordre 8.

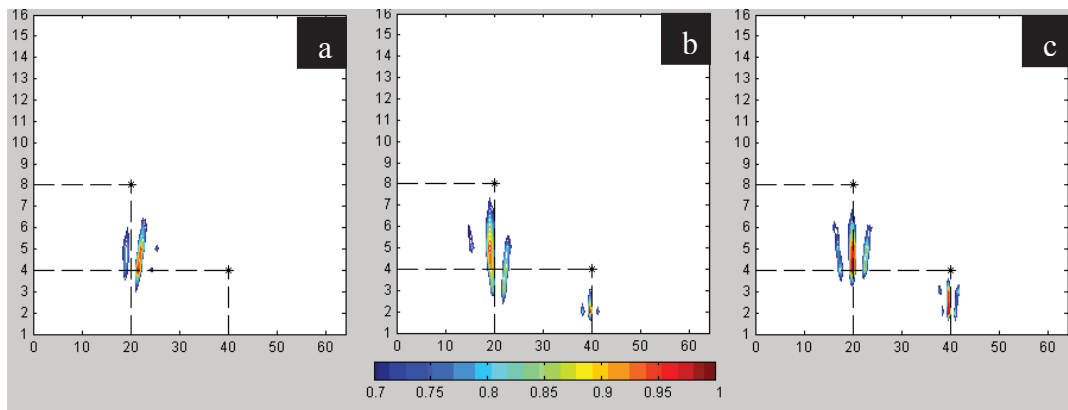


Figure 51. Comparaison des performances de localisation spatiale et fréquentielle avec différentes fonctions d'ondelettes : (a) Meyer, (b) dérivée 8^{ème} d'une gaussienne, (c) Morlet.

Les raisonnements et calculs ci-dessus confortent le choix de l'ondelette de Morlet pour analyser l'évolution des modifications texturales avec le processus de rodage ; ceci est intéressant à plusieurs registres pour :

- 1) fixer la concentration des irrégularités majoritaires, induites à chaque étape de rodage, en fonction des échelles d'influence. Ceci constitue des marqueurs de la signature multi-échelle résultant des manipulations de rodage ;
- 2) étudier les mécanismes physiques qui gouvernent le processus abrasif par rodage en fonction des variables process d'influence majeure.

Au terme de cette analyse de choix de l'ondelette, nous utiliserons l'ondelette de Morlet comme ondelette analysante pour le traitement des surfaces rodées.

5. Caractérisation objective de l'aspect de surface

Après avoir décrit comment on pouvait se représenter la genèse texturale d'une surface, résultant de rodage divers, il s'agit maintenant de préciser la méthode de caractérisation de son aspect. L'étude d'une rugosité adaptée au frottement, dans le cas d'une surface fonctionnelle du fût, doit être en effet suivie ou accompagnée d'une technique d'analyse quantitative qui fait intervenir :

- d'une part, une orientation relative du sens de déplacement envisagé (course piston) et du sens de traits d'usinage (stries d'abrasion) ;
- d'autre part, l'aire totale des sections des aspérités de surface (la capacité de charge portante relative).

Dans cette section, on présente des méthodes alternatives à celle de caractérisation subjective de l'aspect par fax-film. Elles reposent sur des outils mathématiques de traitement de signal et permettent d'introduire de nouveaux critères quantitatifs.

5.1. Angle de rodage " θ "

Ce paramètre joue un rôle important dans la définition des performances fonctionnelles de la surface du fût. En effet, des études expérimentales ont montré que la consommation d'huile augmente avec l'angle de rodage [89]. Il est usuellement contrôlé à partir des images de Fax film en calculant une moyenne visuelle approximative de l'angle de rodage sur cinq échantillons. D'autres méthodes de traitement permettent, par ailleurs, d'obtenir une valeur plus objective et plus précise de l'angle de rodage en le calculant sur l'ensemble de

l'échantillon. Nous avons, ainsi, testé deux approches en utilisant la méthode de la densité spectrale de puissance (DSP) et la méthode de la Transformée de Radon (TR).

5.1.1. La méthode de la DSP

La densité spectrale de puissance est le carré du module de la transformée de Fourier de la surface :

$$DSP(S) = |FFT(S(x, y))|^2 \quad (32)$$

Dans ce cas, l'histogramme angulaire des directions des maxima locaux de la densité spectrale est déterminé. Il permet ainsi de préciser les directions principales de la surface structurée et son anisotropie créée par la présence des stries dues à l'usinage par rodage (figure 52). Ces stries se trouvent disposées en sillons croisés et forment un angle de croisement : « angle de rodage θ ».

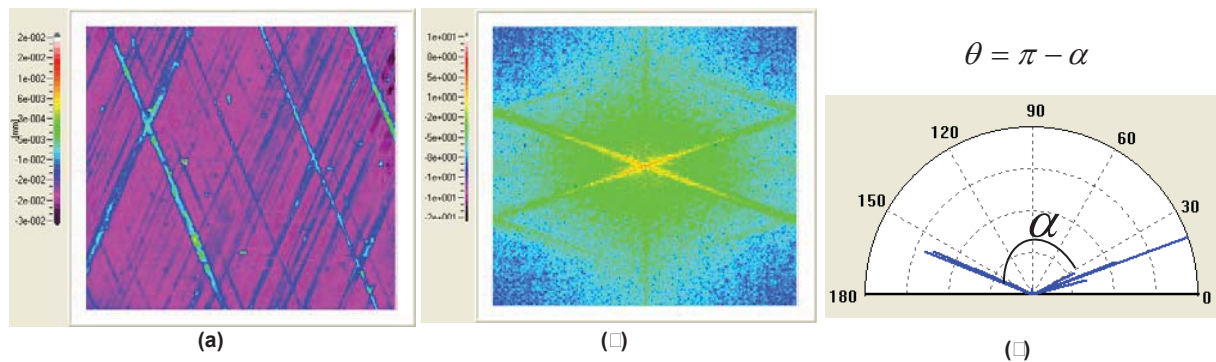


Figure 52. (a) Surface de fût de carter, (b) sa DSP et (c) sa rose d'anisotropie

Contrairement au cas des mesures par fax film fondées sur appréciation visuelle, l'angle de rodage calculé ici à partir de la densité spectrale de la surface analysée codifie un degré de son anisotropie de structure (structure dite en « stries croisées »). La portée objective de cette mesure est en outre importante d'autant plus que l'angle de rodage est un paramètre fonctionnel d'ordre 1 (cf. remarque).

La répartition des grains abrasifs dans la pierre agglomérée de rodage est aléatoire. Cette distribution rend l'action de ces pierres difficile à cerner. En effet, il est parfois possible d'avoir des stries déviées des deux directions principales. Dans ce sens, la transformée de Radon permet de déterminer la distribution des stries sur la surface avec précision ce qui implique une meilleure maîtrise de l'action de l'outil de rodage.

Remarque: si deux surfaces de caractéristiques identiques ont leurs traits d'usinage disposés au hasard par rapport au sens du frottement, c'est la surface dont les stries sont les plus disposées au sens de la direction de marche qui s'use le plus.

5.1.2. La méthode de la transformée de Radon

Comme évoqué dans le chapitre 1, la transformée de Radon permet de transformer des structures linéaires (correspondant à des stries de rodage dans le cas des chemises ou fûts de carter cylindres) en des points singuliers (figure 17). Cette transformée se distingue par sa capacité d'extraire les éléments texturaux linéaires de la surface directement à partir de sa description spatiale qui offre la possibilité d'une caractérisation plus complète et détaillée de la répartition de ces attributs.

En dehors de l'angle de rodage qui constitue un marqueur de la disposition des stries et de leur orientation, on peut admettre qu'il y aura par « rodage » deux surfaces de même profil et de croisement des stries rigoureusement identiques mais avec un rythme différent dans les motifs superficiels. Dans ce cas, les deux surfaces présentent une anisotropie différente, liée à la structure des stries « unités structurales » qui se répètent selon une périodicité variable. En toute rigueur, il faudrait considérer toutes les contributions à la construction structurale de la surface, y compris la concentration des stries et leurs caractéristiques telles que la hauteur, la forme et l'acuité.

Les sections suivantes introduisent les paramètres définis dans le cadre de ce travail pour évaluer et qualifier l'aspect structural des surfaces rodées.

5.2. Densité des stries " D_s "

La densité de stries, notée " D_s ", est le nombre de stries par unité de surface. Ce paramètre représente le rapport entre le nombre de stries (c'est-à-dire le nombre des maxima locaux de la transformée de radon de la surface N_i) et l'aire de la surface analysée suivant la formule suivante :

$$D_s = \frac{N_G + N_D}{S} \quad (33)$$

Avec " N_D " le nombre des stries droites, " N_G " le nombre des stries gauches, " S " l'aire de la surface étudiée.

5.3. Coefficient de striation " R_s "

Le coefficient de striation est le rapport entre le nombre des stries dans deux directions opposées de la surface analysée (droite et gauche par exemple). Il est calculé par isolement-comptage des stries à partir des images de surface traitée par la méthode de la transformée de Radon. Il s'écrit :

$$R_s = \frac{N_G}{N_D + N_G} \quad (34)$$

Le paramètre est défini entre les stries de direction $\vec{i}$ (G pour gauche et D pour droite) et la somme des stries de deux directions opposées ($\vec{i}, -\vec{i}$).

Ce paramètre donnera une idée sur la distribution des stries imprimées dans la surface et leur symétrie ainsi que sur sa capacité à répartir le lubrifiant en régime hydrodynamique.

5.4. Taux de stries résiduelles " m_{turn} "

Le taux des stries résiduelles " m_{turn} " est un paramètre qui caractérise les traces résiduelles sur la surface. Ces dernières sont généralement dues à un temps de rodage insuffisant pour enlever la trace d'alésage entraînant, ainsi, l'obtention de surfaces non conforme. Elles peuvent également résulter d'un mauvais paramétrage de la machine de rodage engendrant une faible décélération avec le système hydraulique (pour la génération du mouvement axial) au niveau du point mort haut (PMH) et du point mort bas (PMB). Ce paramètre de stries résiduelles est calculé en utilisant la DSP. Il est défini par la formule suivante [90]:

$$m_{turn} = \frac{\sum_{f \in A} \psi_{ss}(f)}{\sum_{f \in A_{\perp}} \psi_{ss}(f)} \quad (35)$$

Les domaines A et $A_{\perp}$ sont définis conformément à la figure 53. $\psi_{ss}(f)$ représente l'amplitude d'un maxima locale de la DSP de la surface " f ".

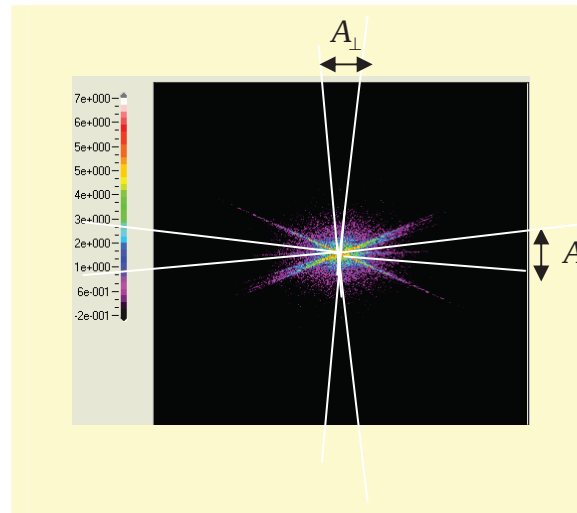


Figure 53. DSP d'une surface de fût de carter cylindre : Définition des domaines A et $A_{\perp}$

Les surfaces résultantes du rodage pour lesquelles la structure est perturbée sur une épaisseur en sous-couche par les stries d'alésage présentent une qualité fonctionnelle médiocre. Par ailleurs, pour ne pas altérer le processus même d'usinage par rodage et par suite la structure de la surface, le taux des stries résiduelles doit être minimal, voire nul. Les résultats de mesure du paramètre " m_{turn} " sur la surface d'un cylindre moteur (figure 54) confirment ce phénomène.

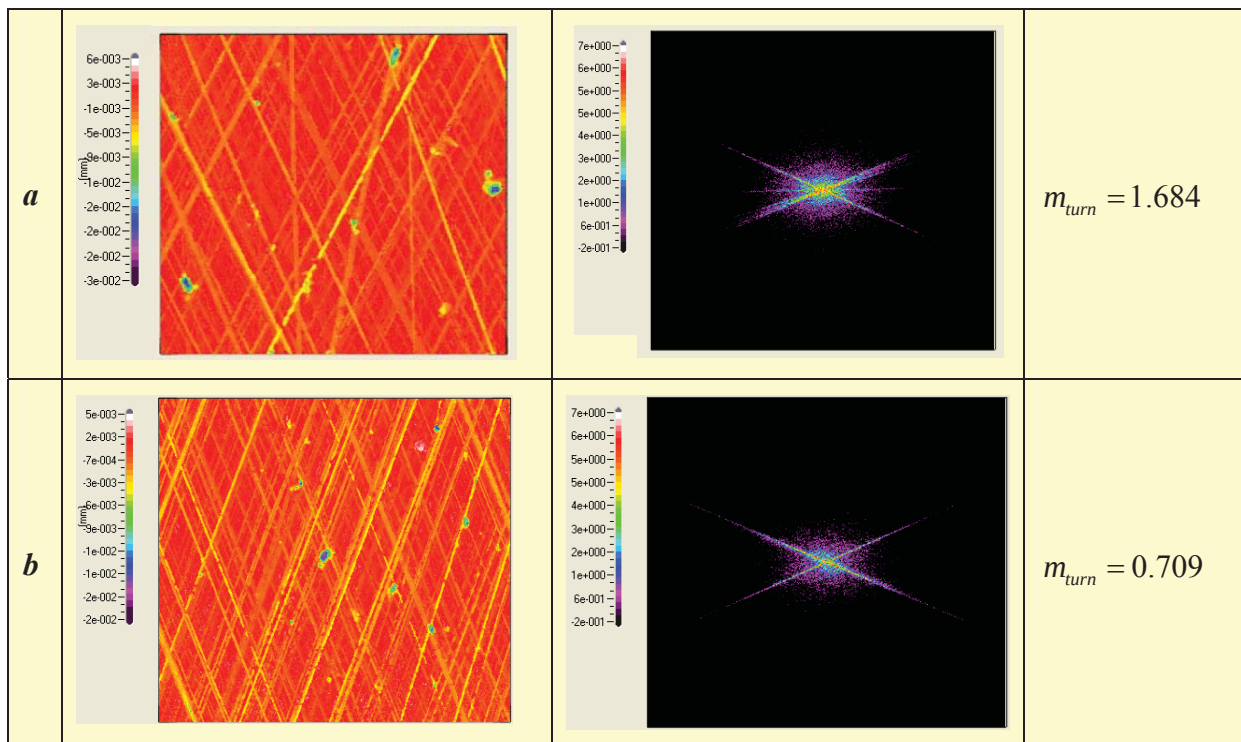


Figure 54. Calcul paramètre m_{turn} pour une surface de chemise moteur : (a) au niveau du Point Mort Haut et (b) au niveau du Point Milieu.

6. Conclusion

Le développement d'une méthodologie rigoureuse de caractérisation des surfaces se situe au cœur de ce travail de thèse. Au niveau de la caractérisation de l'aspect de surface, des paramètres quantitatifs et objectifs ont été définis. Ils remplacent l'évaluation visuelle de l'expert. Au niveau de la caractérisation de la topographie, la transformée en ondelettes s'est avérée un outil intéressant car elle permet de prendre en compte toutes les familles de longueurs d'ondes de la surface comparativement à d'autres méthodologies utilisant l'extraction de bandes de fréquences par filtrage spécifique à une surface résultante du rodage. Une fois que le choix du type d'ondelette a été précisé, différents paramètres ont été définis afin de transiter d'une caractérisation globale de la surface à une cartographie de la topologie de la surface via des spectres d'évolution de la texture de la surface.

Ces méthodes de caractérisation peuvent être maintenant étendues à l'étude du processus de rodage industriel. On introduit alors le concept de signature process multi-échelle comme outil d'analyse des mécanismes physiques actifs au cours du rodage en fonction des conditions opératoires.

Chapitre 4

Etude de l'intervention des variables process par distorsion des macros et micro-topologies spécifiques au rodage : concept de signature process multi-échelle

1. Introduction

L'étude expérimentale du choix des variables process pour le rodage d'une surface avec l'appoint d'un abrasif, en harmonie avec les tolérances de rugosité et de géométrie prédéfinies, peut être qualitative ou semi-quantitative. Ceci est fréquent en fabrication, où la batterie de tests itératifs, grâce à des plans d'expérience adéquats, met en évidence la hiérarchisation des variables process et éventuellement leurs effets corrélés. Cette expérimentation est utilement complétée par des mesures d'état de surface et des observations micrographiques de son aspect. Mais ce chapitre sera essentiellement consacré à la mesure quantitative de la signature multi-échelle du process de rodage et de sa variation avec les paramètres du procédé pour identifier leur influence.

La signature multi-échelle constitue ici un traceur ex-situ des distorsions texturales et structurales de la surface introduite par le rodage. Le process de rodage se propose en effet par abrasion de créer dans la surface de pièces des textures et structures nouvelles qui naissent des sollicitations d'usinage et qui seront contre l'usure le meilleur des antidotes. Il y a donc tout un ensemble de phénomènes physiques aboutissant, avec les variables process selon l'opération de rodage, à la genèse de ces textures et structures. Il serait intéressant d'examiner, de concert avec la topologie et l'aspect de la surface générée, les relations exactes d'enchaînement causes/conséquences de l'intervention de chaque variable procédé.

Pour illustrer tout ceci, on étudie successivement :

- l'intervention du facteur pierre abrasive suivant la taille de grain ;
- l'intervention de la cinématique du process en particulier à travers les vitesses d'expansion et de coupe.

1.1. Concept de signature process multi-échelle

1.1. Concept de signature process multi-échelle

La surface des fûts de carter-cylindre résulte de la superposition des signatures inhérentes aux opérations consécutives de rodage. Ce processus abrasif est généralement le lit par excellence de phénomènes physique couplés et transitoires, d'interaction physico-chimiques extrêmes, etc. L'idée consiste donc à identifier, dans un premier temps, la signature qui pilote la course du process et à estimer ensuite l'intervention des variables opératoires du process en liaison avec les mécanismes physiques activés par abrasion.

Il s'agit ainsi d'une approche globale mais multi-échelle qui suppose initialement le process une « boîte noire » avec des variables d'entrée (physiques, géométriques et cinématiques) et des paramètres de sortie (physiques, besoin fonctionnel exprimé en termes de spécifications d'états de surface, de forme et d'aspects). Les variables d'entrée regroupent un ensemble de paramètres $\langle X_i \rangle$ qui vont se transformer en un groupe d'éléments, appelés paramètres de sorties $\langle Y_j \rangle$. La relation de transformation entre ces deux groupes définit la fonction du transfert du process abrasif FT_p :

$$\langle X_i \rangle \xrightarrow{FT} \langle Y_j \rangle \quad (36)$$

Comme l'opération de finition à l'abrasif est un système thermodynamique ouvert qui interagit fortement avec son environnement, elle est par conséquent un système non protégé et dissipatif. Il s'agit là d'un point de vue de la thermodynamique des processus irréversibles d'un système qui va chercher à accroître son état d'ordre lors de la dégradation de son énergie interne. A l'échelle millimétrique du système « boîte noire », la fonction de transfert du système de finition à l'abrasif définit l'influence des variables d'entrée sur les paramètres de sortie. S'il est relativement simple d'établir la fonction du transfert du process, à l'échelle du système, par des relations empiriques entre les variables d'entrée et les résultats de sorties ; la compréhension des mécanismes physiques qui s'opèrent à des échelles inhérentes à la « boîte noire » est très difficile et exige la prise en compte de phénomènes complexes. La pertinence de ces échelles se situe en effet selon les interactions matériau–procédé activées par le process à l'échelle mésoscopique (outil abrasif-pièce) et très souvent à l'échelle microscopique (grain d'abrasif-rugosité de surface).

Les signatures du processus de rodage à ces échelles peuvent être déclinées comme suit [83] :

- une signature aux macro-échelles représentant les différentes composantes de la surface à l'échelle millimétrique. Celle-ci correspond à l'échelle des macro-rugosités induites par les interactions avec les différents angles de coupe des grains abrasifs et la nature d'accommodation des aspérités superficielles (abrasion par émission de micro copeaux (action de coupe) et de débris (action de labourage)). Les variations des amplitudes de rugosité seront, à ce niveau, directement tributaires des caractéristiques de l'outil (type de pierre) et du chargement appliqué ;
- une signature aux micro-échelles relative aux caractéristiques de la surface à l'échelle des microns. Elle spécifie les microrugosités créées par cisaillement des aspérités superficielles et leur accommodation par aplatissage des crêtes. Cet intervalle d'échelles situé à de hautes fréquences se caractérisera par de fortes variations dues à la complexité des phénomènes activés (labourage et frottement par cisaillement) ;
- une signature aux nano-échelles qui traduit les effets catalytiques de la construction/régénération des états de surface par consommations physico-chimiques de l'interface avec des éléments de l'ambiance (ex. liquide de coupe).

Ces différentes signatures dépendent des conditions aux limites du process (i.e. conditions opératoires) et consistent à suivre le changement des composantes topologiques de la surface, qui résulte de l'abrasion mécanique par rodage. Connaissant le profil de surface d'entrée donnant lieu à l'interaction par rodage étudiée, on peut calculer le spectre topographique de la surface émise. La signature process est donc déterminée par le calcul de la fonction de transfert du process FT_P qui traduit l'écart relatif entre le spectre de surface d'entrée et celui obtenue après rodage :

$$FT_P(\%) = \frac{SMa^F - SMa^I}{SMa^I} \times 100 \quad (37)$$

avec SMa^F le spectre multi-échelle du profil de surface final (de sortie) et SMa^I le spectre multi-échelle du profil de surface initial (d'entrée).

Chaque étape de rodage aura donc une signature, c'est-à-dire une fonction de transfert spécifique en fonction des conditions aux limites du process.

Remarque :

Nous renvoyons le lecteur à l'article d'El Mansori et al. (2010) [83] publié dans la revue « surface engineering » pour plus de détails sur le concept de signature process multi-échelle.

□□ Identification de la signature multi-échelle de chaque étape du rodage plateau

Considérons le cas du processus de rodage suivant :

- (1) Rodage ébauche (RE) ;
- (2) Rodage finition (RF);
- (3) Rodage plateau (RP).

Les conditions opératoires de ce processus sont données dans le tableau 6.

<i>Paramètres process</i>	<i>Rodage ébauche</i>	<i>Rodage finition</i>	<i>Rodage plateau</i>
<i>Vitesse axiale (m/min)</i>	28	28	28
<i>Vitesse de rotation (tr/min)</i>	230	230	230
<i>Durée de rodage (sec)</i>	20	15	2
<i>Type d'expansion</i>	<i>Mécanique</i>	<i>Mécanique</i>	<i>Hydraulique</i>
<i>Vitesse d'expansion (µm/s)</i>	5	3	
<i>Nombre de courses</i>			4
<i>Pression de contact (bar)</i>	8	6	3
<i>Nombre de pierres</i>	6	6	6
<i>Type d'abrasif</i>	<i>Diamant</i>	<i>Carbure de Silicium</i>	<i>Carbure de Silicium</i>
<i>Taille de grain (µm)</i>	125	110	30
<i>Type de liant</i>	<i>Métallique</i>	<i>Vitrifié</i>	<i>Vitrifié</i>
<i>Dimensions de la pierre abrasive (mm x mm x mm)</i>	2x5x70	6x6x70	6x6x70

Tableau 6. Conditions opératoires des différentes étapes du processus de rodage plateau

Extrayons de leur étude les signatures de chaque opération donnant la fonction de transfert en fonction des échelles d'irrégularité des surfaces (figure 55).

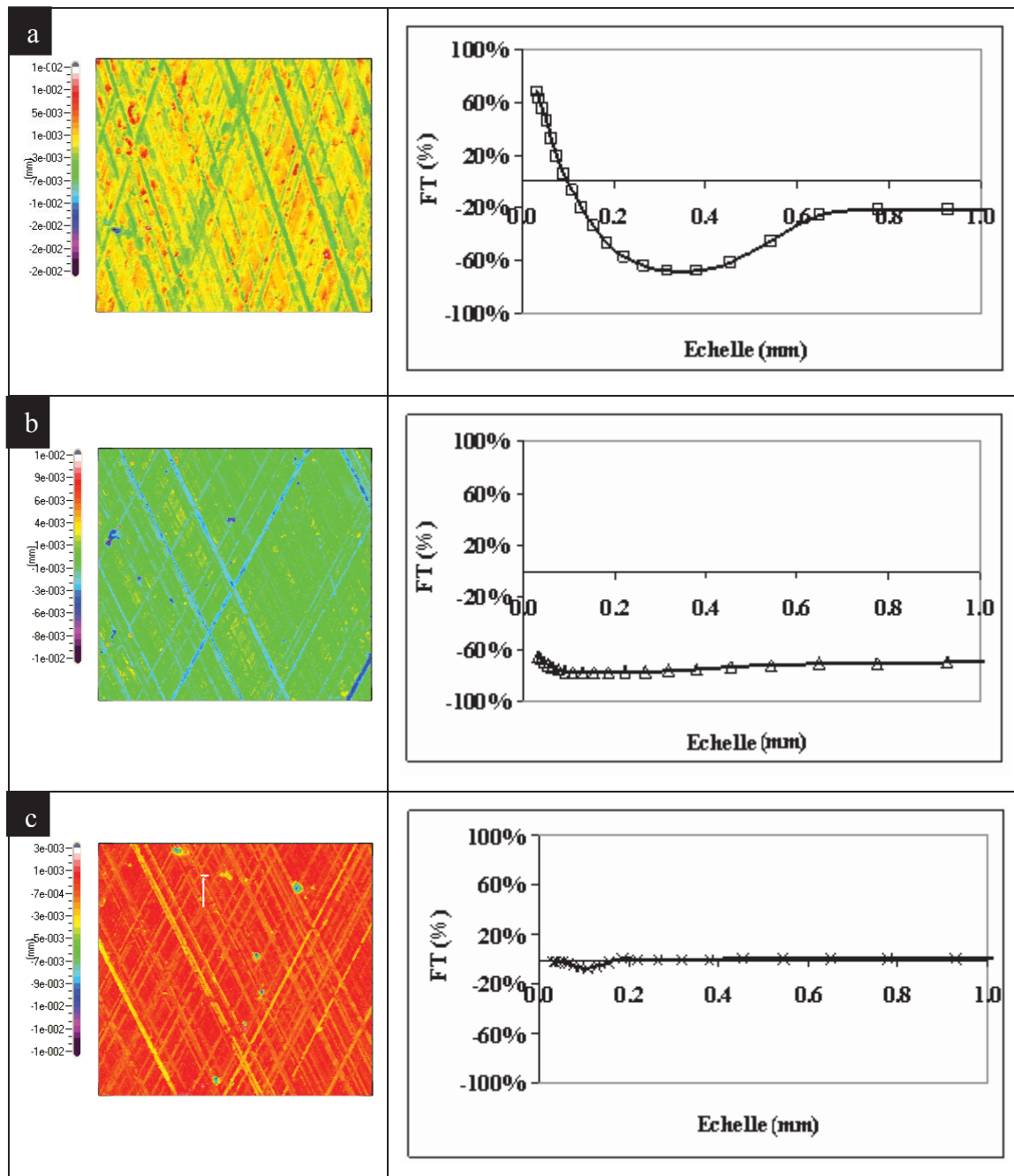


Figure 55. Signature multi-échelle des trois étapes de rodage (a) Ebauche, (b) Finition et (c) Plateau

On observe une forte atténuation de la rugosité aux échelles de la macro-rugosité correspondant à la réduction des irrégularités de la surface pendant l'étape de rodage ébauche (figure 55.a). L'augmentation observée, par ailleurs, aux petites échelles (inférieures à la taille moyenne des grains abrasifs) est due aux fortes pressions appliquées au cours de cette étape. Celles-ci permettent une meilleure capacité d'accommodation mais engendrent aussi des phénomènes d'arrachement de matière. Le mécanisme de labourage sans enlèvement de matière est alors activé à cause du nombre des grains actifs émoussés. L'étape de rodage finition montre, cependant, une réduction de la rugosité sur toutes les échelles. Cette réduction

atteint un taux maximal de 60%. Il en ressort donc que la rugosité principale de la surface finie est obtenue pendant cette opération (figure 55.b).

Au rodage plateau (figure 55.c), on observe, par contre, une faible réduction de la rugosité aux petites échelles de micro-rugosité inférieures à 200 μm . Cette action correspond uniquement à un simple écrêtage de la surface avec une faible pression de contact pendant un temps réduit pour enlever les pics de rugosité.

Les différentes signatures extraites ici permettent de ressortir l'action fondamentale de l'étape de rodage finition dans le résultat final de la surface rodée. Celle-ci définit la rugosité principale de la surface et corrige les irrégularités des étapes précédentes (alésage et rodage ébauche) sur toutes les échelles. Ainsi, on se propose de focaliser par la suite l'étude des effets des variables process au cours de cette étape de rodage finition. En convergeant notre étude vers l'analyse de l'étape de rodage finition, il reste tout de même des verrous à lever au niveau de la réponse de la surface à différentes sollicitations imposées par les variations des paramètres process. Ceux-ci concernent essentiellement la cinématique du process et la définition des caractéristiques de la pierre abrasive de finition.

□ Intervention des paramètres process en rodage de finition

Dans cette section, on considère comme référence commune d'analyse les pierres en carbure de silicium vitrifié avec le même liant en verre C7. On commence par étudier les effets cumulatifs inhérents aux principaux paramètres process que sont la vitesse d'expansion et la vitesse de coupe. Dans toutes les études qui suivent, les fûts de carter testés sont issus de l'étape de rodage ébauche. Leurs caractéristiques en termes d'état de surface et de forme sont résumées dans le tableau 7.

<i>Paramètres</i>		<i>moyenne</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>écartype</i>
<i>Etat de surface</i>	<i>Cr (μm)</i>	4,25	2,40	6,21	0,46
	<i>Cf (μm)</i>	4,56	2,82	6,54	0,47
	<i>Cl (μm)</i>	8,43	5,42	15,30	1,41
<i>Cylindricité</i>	<i>C (μm)</i>	9,96	6,92	15,09	1,44
<i>Diamètre du fût</i>	<i>D(mm)</i>	75,98	75,97	75,99	0,0023

Tableau 7. Caractéristiques géométriques et topographiques des fûts de carter cylindre après la phase de rodage ébauche.

□1 Influence de la taille de grain des pierres en carbure de silicium vitrifié

Les effets de la taille de grain abrasif ont été étudiés pour des grains en carbure de silicium SiC sur une large plage de tailles de grains allant de 30 μ m à 380 μ m. Toutes les autres variables process sont maintenues constantes ($V_{exp}=4\mu$ m/s, $V_a=23$ m/min et $V_r=190$ tr/min). Après chaque essai de rodage, nous procédons au contrôle de la qualité du fini des surfaces à différentes échelles (cylindricité, état de surface et aspect) ainsi qu'à l'évaluation des performances du process en termes d'enlèvement de matière et d'usure des pierres abrasives.

□1.1. sur les performances du process en rodage finition

Afin de rester dans une configuration de production, nous avons opté pour un mode d'arrêt d'expansion normal au diamètre 76,005 mm $\pm$ 5 μ m (cf. chapitre 2, paragraphe 4.3: arrêt de l'expansion à l'atteinte du diamètre final). Ainsi, nous avons analysé le taux d'enlèvement de matière en fonction de la taille de grain à l'étape de rodage finition. La figure 56 montre que le taux d'enlèvement de matière augmente avec la taille des grains abrasifs jusqu'à une taille de grain de 240 μ m, à partir de laquelle le pouvoir de coupe des grains diminue.

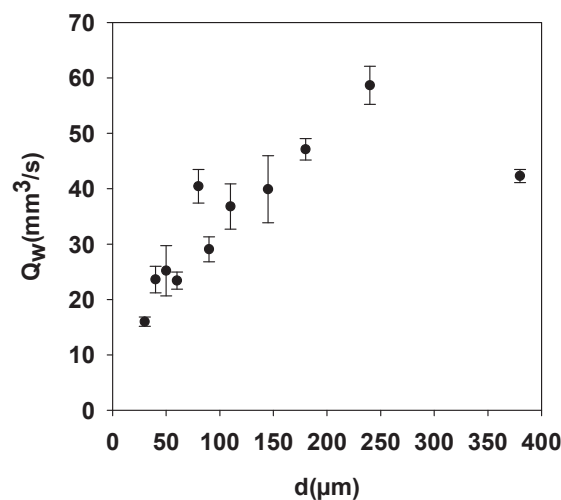


Figure 56. Evolution du taux d'enlèvement de matière en fonction de la taille des grains abrasifs (paramètres process : $V_{exp}=4\mu$ m/s, $V_a=23$ m/min et $V_r=190$ tr/min)

Si l'on se réfère aux performances des pierres en termes d'usure, la figure 57 montre leur usure volumique en fonction de taille des grains et de la vitesse d'expansion.

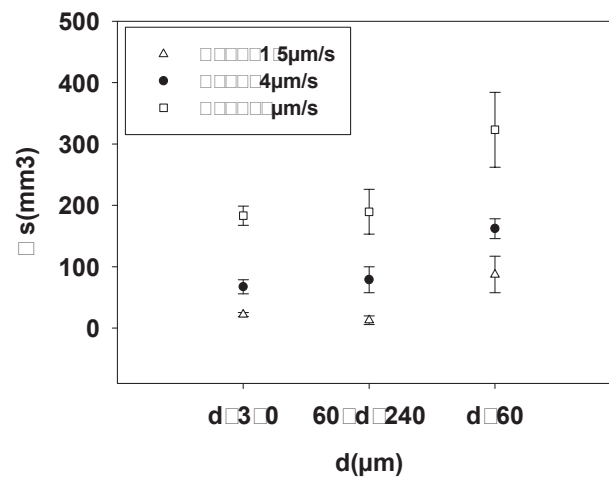


Figure 57. Variations de l'usure des pierres abrasives en fonction de la taille des grains SiC pour trois vitesses d'expansion 1,5 μm/s, 4 μm/s et 8 μm/s.
(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

On fait alors état de deux observations :

- les pierres de granulométrie inférieure à 60 μm s'usent plus rapidement que celles dont la granulométrie est supérieure à 60 μm ;
- l'usure des pierres s'intensifie avec la vitesse d'expansion et ce quelle que soit la granulométrie.

1. sur la qualité de la surface

a) Ecart de forme et état de surface

L'écart géométrique de cylindricité des fûts de carter est quantifié pour identifier l'impact de la taille de grain sur la forme des cylindres de carter. La figure 58 montre que les pierres de tailles de grains SiC inférieure à 60 μm dégradent la forme initiale issue de l'ébauche ($C=10,82\mu\text{m}$). A partir de la taille de grain supérieure à 60 μm, les défauts de formes sont améliorés en augmentant la granulométrie.

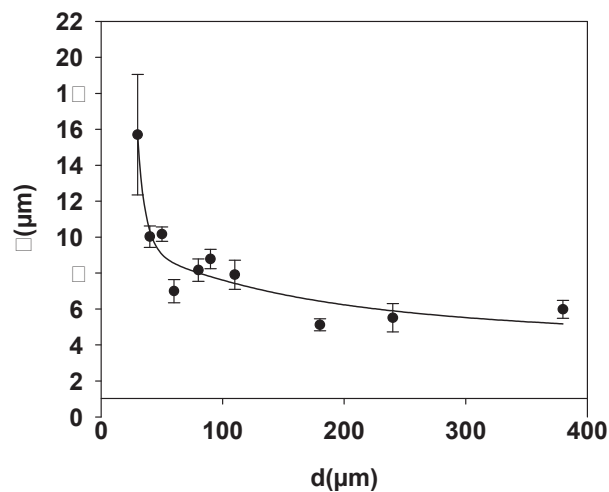


Figure 58. Evolution de l'écart géométrique de cylindricité en fonction de la taille des grains abrasifs. (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

Cette évolution peut être reliée directement au taux d'enlèvement de matière (figure 59). En effet, la cylindricité est inversement proportionnelle aux valeurs du taux d'enlèvement de matière. Plus le taux d'enlèvement de matière augmente, plus on réduit les défauts géométriques de forme du fût carter.

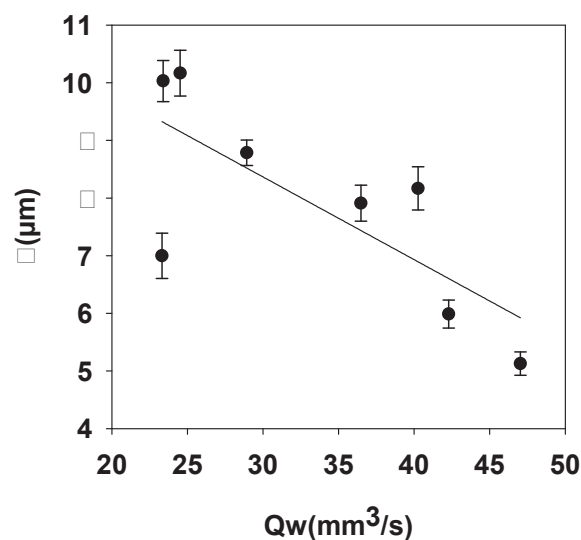


Figure 59. Evolution de la cylindricité en fonction du taux d'enlèvement de matière.

A l'échelle de la rugosité, l'intervention du facteur granulométrie, illustrée par les paramètres fonctionnels de rugosité (Cr , Cf et Cl), est critique en trois domaines caractéristiques (figure 60) :

- o d'une part, pour les tailles de grains inférieures à $60\mu\text{m}$ où règne un faible niveau de rugosité ;
- o d'autre part, la zone de granulométrie comprise entre $60\mu\text{m}$ et $240\mu\text{m}$ où se trouvent les niveaux de rugosité intermédiaire et stable ;
- o enfin, la granulométrie supérieure à $240\mu\text{m}$ où la rugosité est maximale.

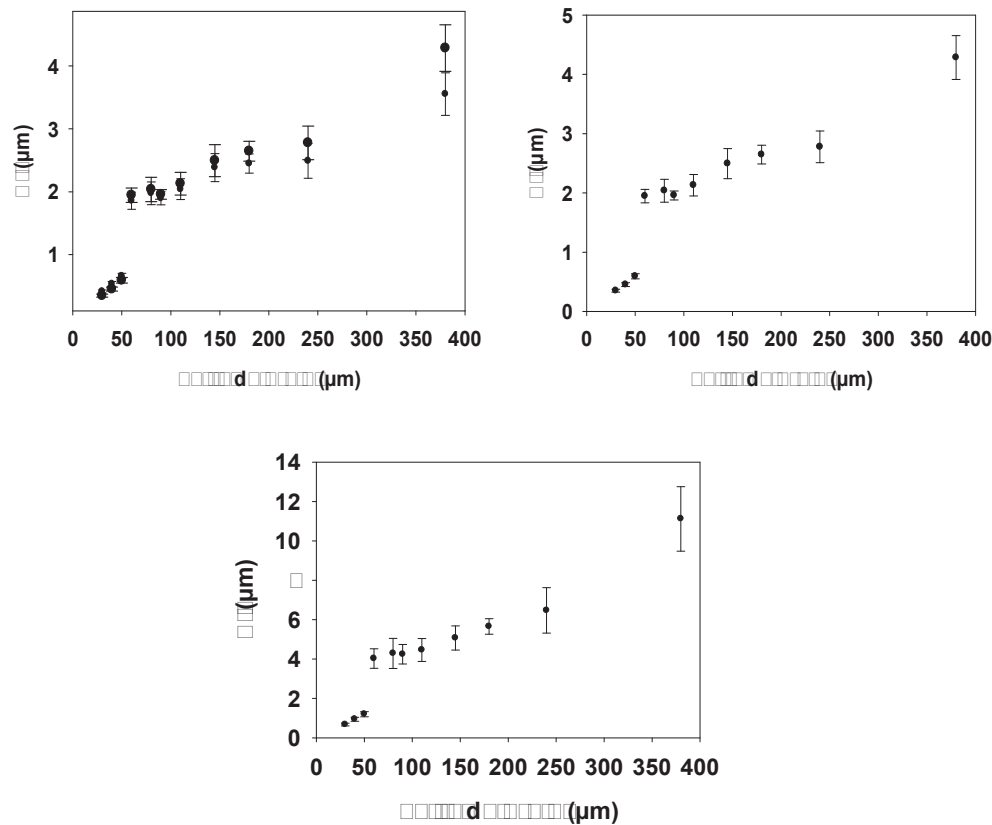


Figure 60. Les variations des paramètres fonctionnels de rugosité C_r , C_f et C_l avec la taille des grains SiC. (Paramètres process : $V_{exp} = 4\mu\text{m/s}$, $V_a = 23\text{m/min}$ et $V_r = 190\text{tr/min}$)

Outre l'identification de ces trois domaines caractéristiques, l'analyse multi-échelle de l'état de surface apporte une information importante sur l'évolution des échelles caractéristiques de la surface. En effet, les spectres multi-échelles SMA des surfaces rodées par les différentes tailles de grains SiC montrent que (figure.61) :

- Pour le *domaine 1*, les spectres de rugosité sont indépendants des échelles d'analyse. Une atténuation maximale de la rugosité est en effet observée sur toutes les échelles pour les tailles de grains de ce domaine ($<60\mu\text{m}$) ;
- Pour le *domaine 2*, les spectres de rugosité dépendent de l'échelle d'analyse. Ils présentent une amplitude maximale à une échelle inférieure à celle du spectre de la surface initiale ;

- Pour le *domaine 3*, le spectre d'amplitude de rugosité ne présente qu'une simple atténuation de l'amplitude de rugosité. Aucune action sur l'échelle caractéristique de la surface n'est observée.

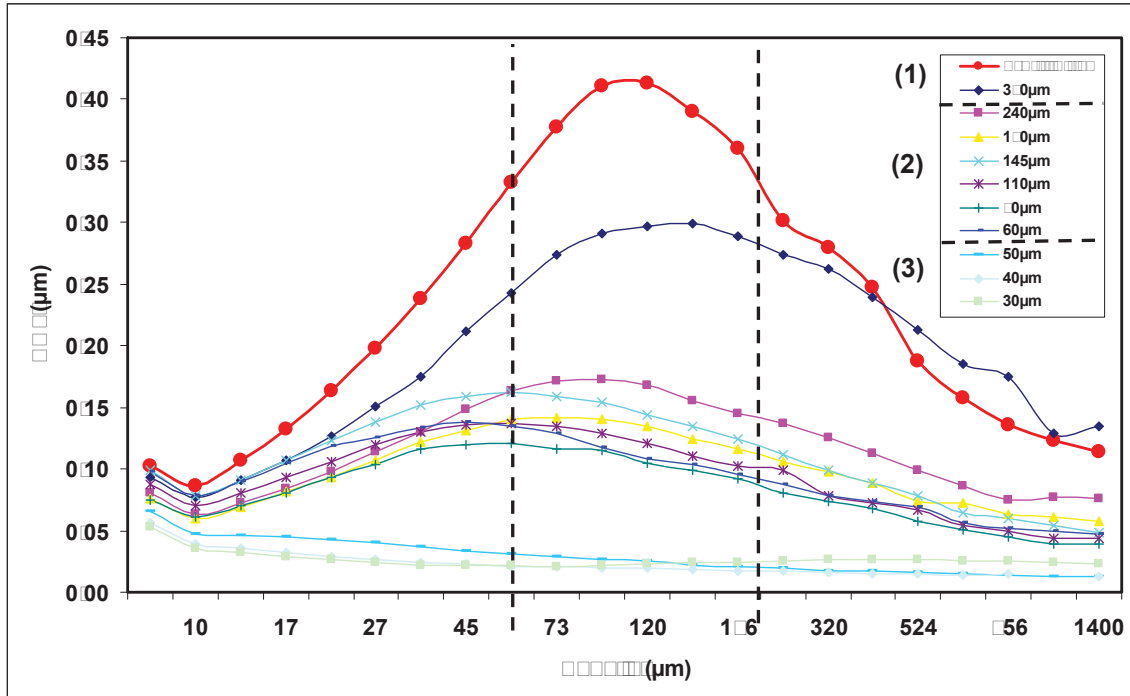


Figure 61. Evolution des spectres multi-échelles de rugosité SMA en fonction de la taille des grains.
(Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

b) Aspect de surface

L'observation au microscope optique des répliques des surfaces rodées issues de la méthode du fax film montre que l'augmentation des tailles de grains conduit à une striation large de la surface accompagnée d'une forte rugosité (figure 62).

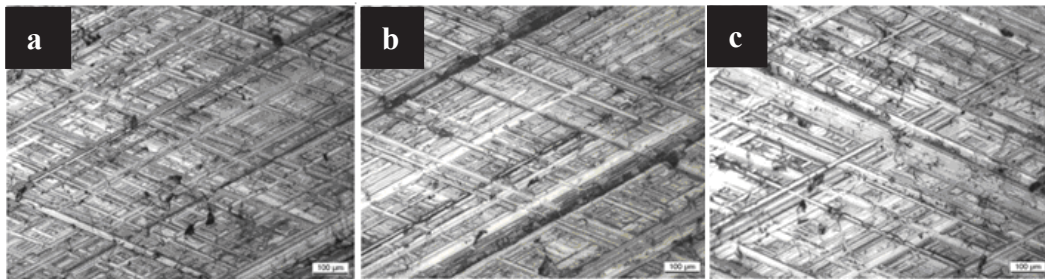


Figure 62. Observation de l'aspect des surfaces rodées avec différentes tailles de grains de SiC
(a) $110\mu\text{m}$, (b) $180\mu\text{m}$ et (c) $240\mu\text{m}$. (Paramètres process : $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

Cette inspection visuelle est complétée par le calcul des densités de stries formées par les différentes tailles de grains. La figure 63 précise ce résultat et confirme que la densité des

stries est élevée pour la taille de grains à 60 μm alors qu'elle se stabilise pour les autres tailles de grains supérieures.

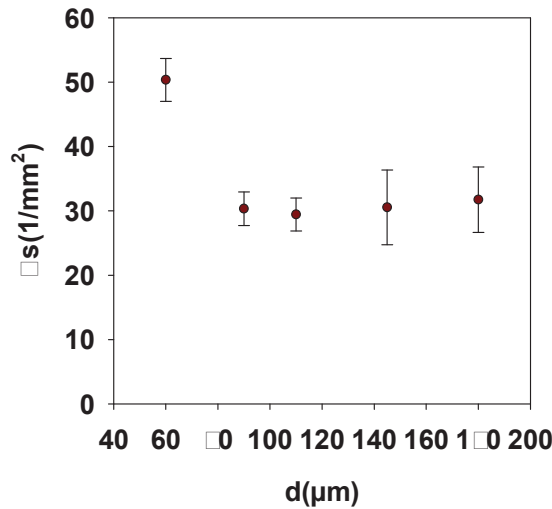


Figure 63. Variations de la densité des stries D_s en fonction de la taille des grains SiC (Paramètres process : $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

Ces variations de la qualité du fini de surface, par rodage, sous l'effet de la granulométrie sont le résultat des mécanismes physiques à l'origine de l'action des grains abrasifs. La mise en évidence de ces phénomènes est décrite dans le paragraphe ci-après.

Processus physiques induits par le facteur de granulométrie

Il s'agit maintenant d'analyser les processus physiques activés par la taille des grains, afin d'explicitier les effets d'échelles décrits précédemment. Si l'on effectue des mesures de l'énergie spécifique E_{sp} dans des conditions de rodage identiques ($V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$, $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$) avec différentes granulométries, on constate que (figure 64) :

- les pierres de granulométrie inférieure à 60 μm enregistrent une énergie de rodage très élevée avec un taux d'enlèvement de matière faible. Le processus de labourage par déformation plastique est ici privilégié. La faible rugosité obtenue démontre que le mode d'action du rodage est dominé par déformation plastique des sommets et lissage des rugosités par frottement ;
- l'énergie induite par le rodage entre les grains de taille supérieure à 60 μm et inférieure à 240 μm a été plus faible et plus stable. Ainsi, l'accroissement sensible de la rugosité issue du rodage résulte ici d'un couplage entre mécanismes de labourage et coupe ;

- l'énergie atteinte pour une granulométrie supérieure à 240 μm a été minimale. Le mécanisme de coupe est ici prépondérant et démontré par le taux de matière enlevé obtenu.

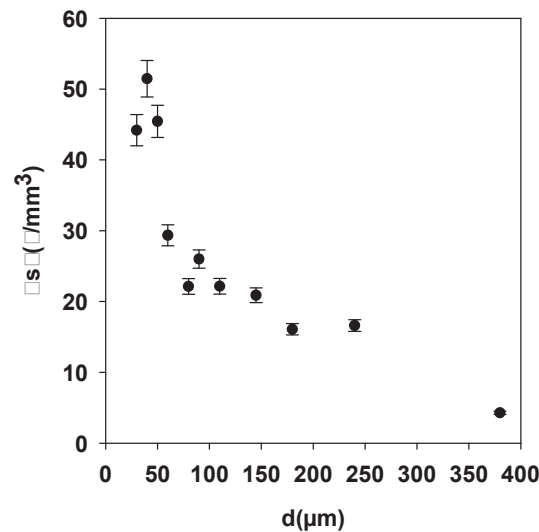


Figure 64. Evolution de l'énergie spécifique avec la taille des grains SiC.
(Paramètres process : $V_{\text{exp}} = 4 \mu\text{m/s}$, $V_a = 23 \text{m/min}$ et $V_r = 190 \text{tr/min}$)

Afin d'appuyer cette analyse des processus physiques qui sont actifs au cours du rodage suivant la granulométrie, des observations microscopiques des pierres ont été réalisées. Comme on le voit sur les photographies de la figure 65, la structure des pierres se définit par un nombre de grains d'abrasifs de plus en plus grand lorsque la granulométrie est faible. La réduction des volumes inter-granulaires dans ce cas facilite l'action de contact sur les grains par frottement des micro-copeaux détachés, facteur qui permet le maximum d'endommagement des grains et provoque soit leur émoussage, soit leur éclatement ou leur détachement de l'agglomérant (figure 65-a). Lorsque la grosseur du grain augmente (figure 65-b), la structure des pierres devient plus ouverte avec des grains qui présentent à la surface leurs meilleures aptitudes à la coupe. Notons également que la pierre offre une capacité de logement inter-granulaire.

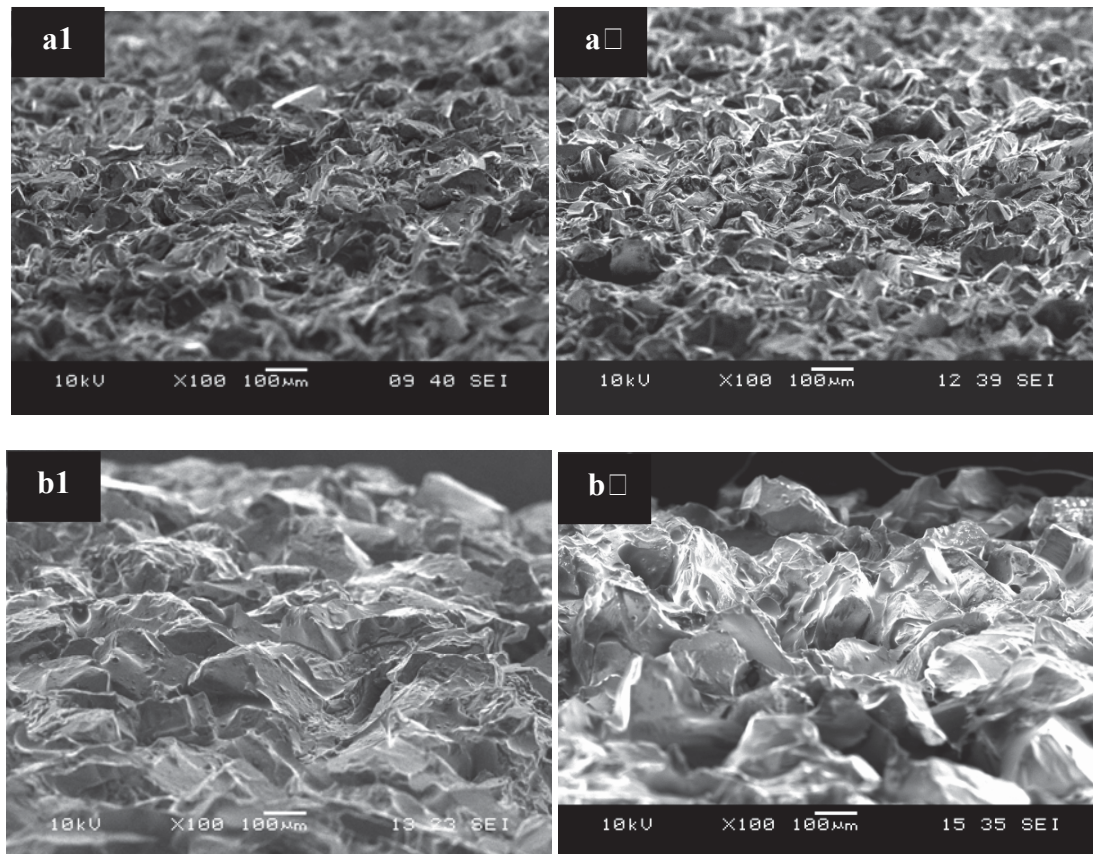


Figure 65. Structures des pierres abrasives pour deux granulométries 110 μm et 380 μm dont les caractéristiques avant (à gauche) et après rodage (à droite) s'apparentent à celles des meules de rectification. (a1 et a2) structure hétérogène et poreuse à faible granulométrie favorisant le recouvrement par les micro-copeaux de rodage, (b1 et b2) structure plus ouverte à forte granulométrie dont les volumes inter-granulaires seront des sites de logement des micro-copeaux de rodage.

Ce qui précède sur les structures des pierres donne une explication possible des processus physiques de rodage activés par le facteur grosseur de grain. En réalisant une série de mesures du coefficient de frottement en fonction de la granulométrie des pierres, pour un cycle de rodage finition, les résultats confirment (figure 66) :

- d'une part, l'explication d'un coefficient de frottement allant en diminuant avec une augmentation de la granulométrie des pierres (c'est le coefficient dynamique) : puisque les grains de petite taille n'auront pas le temps de travailler en coupe ;
- d'autre part, l'explication d'un coefficient de frottement de grandeur oscillante faisant intervenir une amplitude proportionnelle à la taille de grain : puisque à faible granulométrie, le processus de rodage devra régénérer la pierre après recouvrement des arrêtes coupantes et saturation de logement inter-granulaire ;
- enfin, la raison d'un régime transitoire prolongé dans le cas du rodage à granulométrie faible : ce temps est caractéristique du passage d'une action de rainure par émission de

micro-copeau au sillon de déformation plastique (micro-déplacement par labourage) ; c'est-à-dire que le régime est permanent.

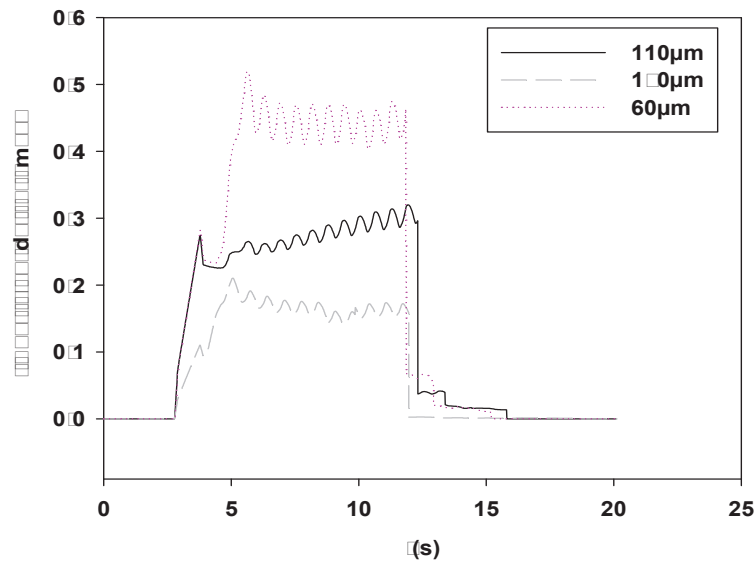


Figure 66. Variation du coefficient de frottement en fonction du temps de rodage pour trois tailles de grains $60\ \mu\text{m}$; $110\ \mu\text{m}$ et $180\ \mu\text{m}$. (Paramètres process : $V_{\text{exp}} = 4\ \mu\text{m/s}$, $V_a = 23\text{m/min}$ et $V_r = 190\text{tr/min}$)

Ainsi, suivant les valeurs du paramètre taille de grains, on distingue deux régimes d'abrasion dépendant de l'état de surface et faisant intervenir ou non des échelles caractéristiques en rodage finition :

- Régime 1 : sans effet d'échelle ($d_c \leq 60\ \mu\text{m}$)

Le rodage est un accommodement de surface par écrêtement des pics de rugosité et déformation plastique des sommets qui contribuent ainsi à l'augmentation des surfaces effectives de portée. Ce processus d'abrasion est ici indépendant des échelles caractéristiques de la surface d'entrée (figure 61).

- Régime 2 : avec effet d'échelle ($d_c > 60\ \mu\text{m}$)

C'est le cas intermédiaire et classique dans les procédés d'usinage à l'abrasif : il se produit simultanément un labourage à partir de la surface par production de sillons et un cisaillement en volume par émission de micro-copeaux. Suivant le matériau du grain, sa forme et sa granulométrie, les échelles caractéristiques de la surface initiale, l'un ou l'autre de ces mécanismes peut être privilégié ou peuvent être couplés.

3.3. Application du CSPM à la conception du process de rodage

Après avoir étudié l'influence du facteur de la granulométrie - dans le cas de rodage finition avec des pierres en carbure de silicium- sur la qualité des surfaces, des précisions ont été apportées quant aux mécanismes qui pilotent les performances de rodage finition. En particulier, l'analyse multi-échelle montre une bonne corrélation entre les mécanismes physiques activés et les effets d'échelle des longueurs caractéristiques du traceur des distorsions texturales de surface (CSPM). On appelle longueur caractéristique λ l'échelle précise d'analyse de rugosité du motif de surface. La taille de grains en rodage finition peut être ainsi déterminée en fonction des longueurs caractéristiques des défauts superficiels de la surface d'entrée (i.e. surface après rodage ébauche). En effet, on calcule le spectre de rugosité multi-échelle (S_{Ma}) qui traduit la signature du process lors du rodage ébauche. Ce profil montre en fonction de l'échelle d'analyse un intervalle de rugosité maximale (figure 67). Suivant le choix de λ entre λ_{Min} et λ_{Max} , c'est-à-dire de la longueur caractéristique λ_c , on peut situer la taille optimale d_c des grains qui règle la cinématique d'évolution de la surface dans l'opération ultérieure de rodage finition ($d_c \equiv \lambda_c$). Avec $70\mu m \leq \lambda_c \equiv d_c \leq 200\mu m$, la réduction du taux d'irrégularité superficiel sera prépondérante (figure 62) en rodage finition. Sur le plan industriel, cet outil d'analyse multi-échelle permettra d'accélérer la mise au point du process de rodage suivant les spécifications du produit. Ceci contribuera aussi à l'optimisation des coûts et du temps de la phase d'industrialisation.

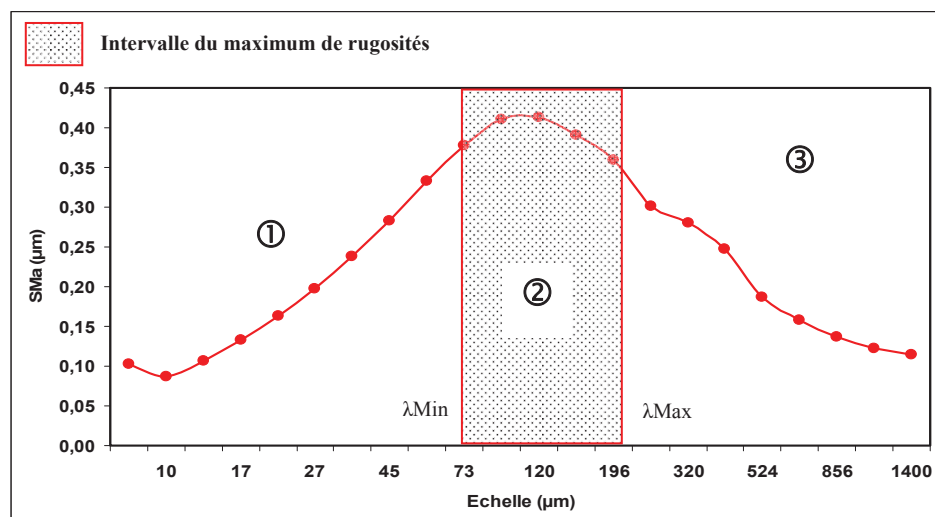


Figure 67. Spectre multi-échelle de rugosité d'une surface ébauchée

Retenons à la fin de cette étude sur la granulométrie des pierres en carbure de silicium que la fonctionnalité de l'opération de rodage finition définie auparavant par sa signature multi-échelle n'est effective que pour les tailles de grains du domaine 2. On note alors la présence d'un intervalle optimal des performances de rodage pour des tailles de grains abrasifs compris entre $70\mu\text{m}$ et $200\mu\text{m}$. Dans ce domaine, la qualité de la surface est stabilisée en termes d'état de surface, d'aspect et de forme. On limitera par la suite l'étude dans ce domaine optimal de tailles de grains pour identifier l'impact de la cinématique du process sur le comportement de ces pierres et sur la qualité des surfaces produites.

3. Influence de la cinématique du process de rodage finition

3.1 Impact de la vitesse d'expansion

On s'intéressera dans l'étude de l'influence de la vitesse d'expansion sur les pierres en Carbure de silicium à deux tailles de grains du domaine de stabilité défini ci-dessus.

3.4.1.1. sur les performances du process

Comme illustré dans la figure 68, la vitesse d'expansion est linéairement proportionnelle au taux d'enlèvement de matière. De plus, on remarque qu'il n'existe pas de différence entre les deux tailles de grains testées ; l'action du facteur vitesse d'expansion l'emporte sur celle de la granulométrie (effet lié au domaine de sensibilité de l'effet de granulométrie). La vitesse d'expansion sera considérée donc comme un paramètre d'ordre 1 d'un point de vue efficacité du process par abrasion mécanique.

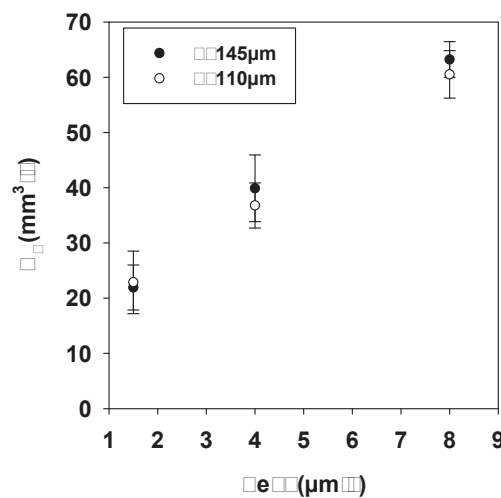


Figure 68. Taux d'enlèvement de matière en fonction de la vitesse d'expansion pour deux tailles de grains $110\mu\text{m}$ et $145\mu\text{m}$. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

L'augmentation du pouvoir de coupe est accompagnée par une réduction de l'énergie spécifique comme le montre la figure 69. Le rendement énergétique du process devient meilleur en augmentant la vitesse d'expansion qui n'est autre que la vitesse d'indentation des grains abrasifs dans le matériau. Le pouvoir de pénétration des grains dans la surface usinée augmente avec la vitesse d'expansion et conduit donc à l'émission de micro-copeaux. La réduction de l'énergie spécifique montre que la vitesse d'expansion favorise la prépondérance du mécanisme élémentaire de coupe abrasive par rapport au labourage et au frottement.

Toutefois, l'intensité de la charge appliquée ($P.V_{exp}$) aura un impact négatif sur les performances d'usure de la pierre. La figure 70 montre, en effet, que plus on augmente la vitesse d'expansion, plus l'usure devient sévère. Il s'agit là d'accélération du mécanisme de régénération des grains abrasifs. Ceux-ci travaillent pendant un temps réduit sous l'effet de fortes charges et se délogent en permanence de leur matrice.

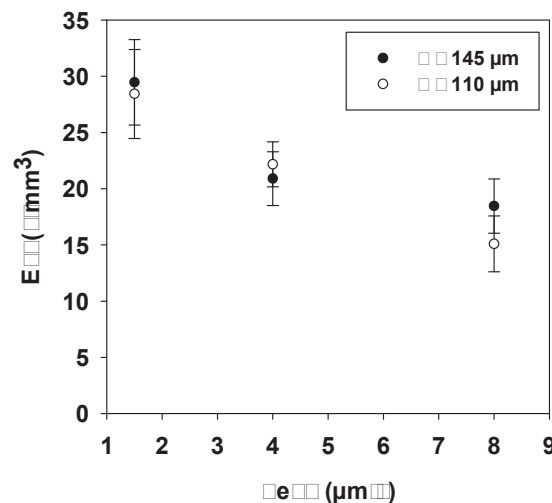


Figure 69. Evolution de l'énergie spécifique en fonction de la vitesse d'expansion en rodage finition avec les tailles de grains 145 μm et 110 μm . (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

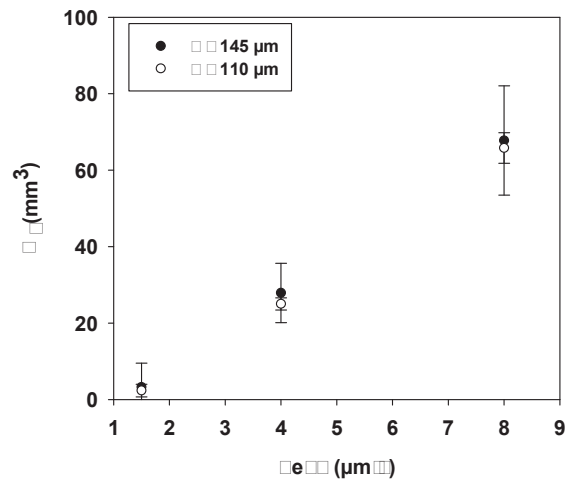


Figure 70. Evolution de l'usure des pierres en fonction de la vitesse d'expansion en rodage finition avec les tailles de grains 145µm et 110µm. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

3.4.1.2. sur la qualité de la surface

a) Ecart de forme et état de surface

L'impact de la vitesse d'expansion sur la forme des fûts en termes de cylindricité est reporté sur la figure 71. Elle montre une dépendance pratiquement linéaire à la vitesse d'expansion.

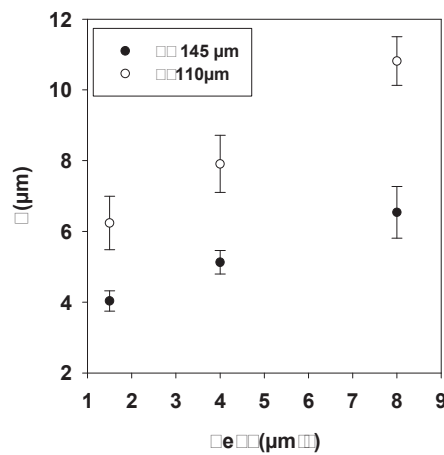


Figure 71. Variations de la cylindricité en fonction de la vitesse d'expansion pour deux tailles de grains 110µm et 145µm. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

L'état de surface suit la même tendance d'évolution que celle de l'écart de forme (figure 72) : plus on augmente la vitesse d'expansion, plus la surface devient rugueuse.

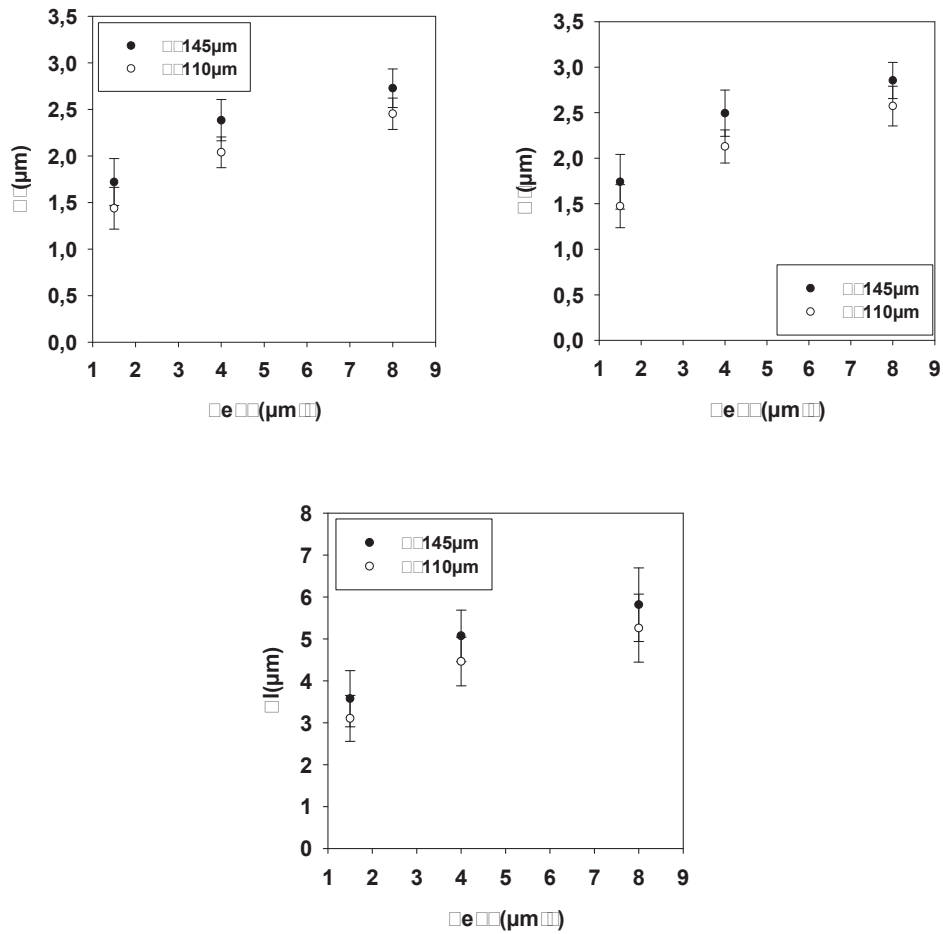


Figure 72. Influence de la vitesse d'expansion sur les paramètres de rugosité Cr , Cf et Cl (Paramètres process : $V_a=23m/min$ et $V_r=190tr/min$)

L'analyse multi-échelle rapportée sur la figure 73 montre, par ailleurs, que la vitesse d'expansion n'a pas d'influence sur les échelles caractéristiques de la surface générée et par la suite sur sa morphologie spatiale. L'impact de cette variable process est limité à la seule variation d'amplitude de la rugosité, en particulier, la profondeur des stries puisque ce paramètre conditionne le pouvoir d'indentation des pierres. Le choix alors de la vitesse d'expansion appropriée est important mais devrait prendre en compte la composante du temps de cycle. Ainsi, on pourrait proposer de décomposer le temps de rodage en deux temps : un premier avec une vitesse d'expansion élevée (cycle rapide) suivi d'un second temps avec une réduction de la vitesse d'expansion (cycle plus lent) réduisant la rugosité finale de la surface.

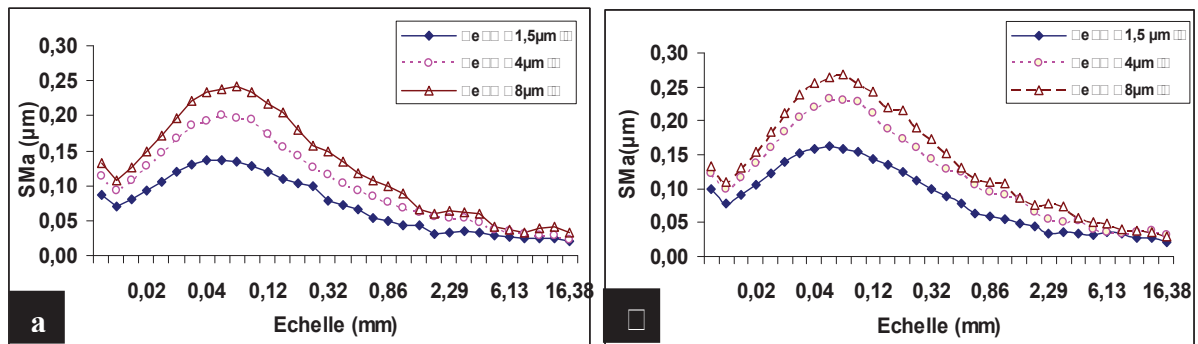


Figure 73. Spectres multi-échelles de rugosité à différentes vitesses d'expansion pour deux tailles de grains (a) 110 μm et (b) 145 μm . (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

b) Aspect de surface

L'influence de la vitesse d'expansion sur l'aspect de surface généré est illustrée sur la figure 74 en termes de densité des stries produites par rodage finition.

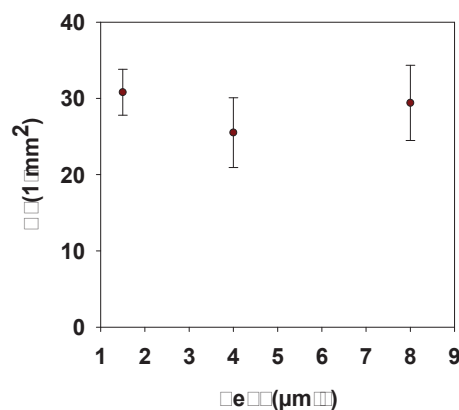


Figure 74. Évolution de la densité des surfaces rodées D_s en fonction de la vitesse d'expansion.

Ce résultat vient confirmer l'invariance d'échelle observée lors de l'augmentation de la vitesse d'expansion. La cinétique de régénération des pierres et l'augmentation des charges appliquées montrent que la vitesse d'expansion intervient essentiellement dans la définition de la profondeur de pénétration des grains et de l'amplitude de rugosité.

3. Influence de la vitesse de coupe

3.4.2.1. sur les performances du process

La vitesse de coupe agit d'une façon singulière pendant l'opération de rodage. En effet, en rapportant l'évolution du taux d'enlèvement de matière en fonction de la vitesse de coupe sur la figure 75, on observe l'existence d'un seuil de vitesse de coupe critique à 45 m/min à partir duquel on assiste à une stabilisation du pouvoir d'enlèvement de matière. Pour les vitesses de

coupe inférieures à 45m/min, le taux d'enlèvement de matière affiche une évolution quasi-linéaire avec la vitesse de coupe.

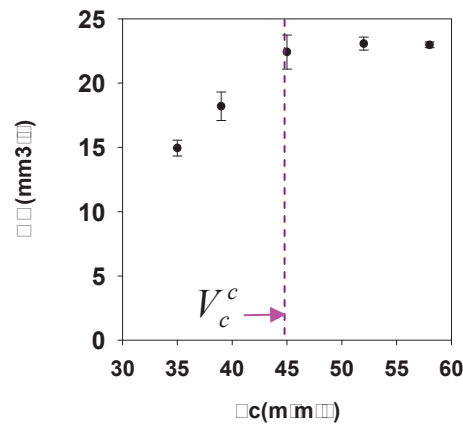


Figure 75. Taux d'enlèvement de matière en fonction de la vitesse de coupe
(Paramètres process : taille de grain $d=110 \mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)

En termes d'usure des pierres abrasives, la figure 76 illustre le comportement des pierres à l'usure en fonction de la vitesse de coupe. On note ici aussi l'existence d'une valeur de coupe critique à $V_c^c = 45 \text{ m/min}$ définissant deux zones de variations de l'usure comme suit :

- pour les vitesses de coupe inférieures à V_c^c , on remarque une forte augmentation de l'usure ;
- Pour les vitesses de coupe supérieures à V_c^c , l'usure montre une décroissance linéaire avec la vitesse de coupe.

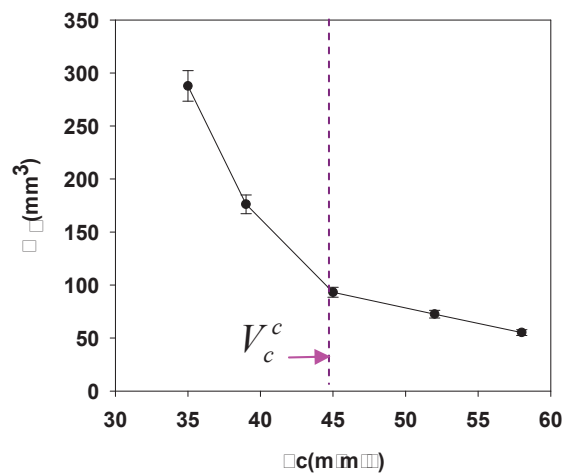


Figure 76. Usure des pierres abrasives SiC en fonction de la vitesse de coupe
(Paramètres process : taille de grains $d=110 \mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)

Il est clair ici que l'intervention de la vitesse de coupe montre deux régimes d'abrasion différents. L'analyse de l'énergie spécifique en fonction de V_c et du coefficient de frottement avec le temps de cycle, rapportés respectivement aux figures 77 et 78, confirme l'existence de ces deux régimes :

- un régime transitoire pour les vitesses de coupe $V_c < V_c^c$ dans lequel on enregistre des énergies spécifiques fortes accompagnées d'un fort coefficient de frottement. Ce constat est attribué à la prépondérance des mécanismes de labourage et de frottement. L'augmentation du coefficient de frottement montre que l'effort tangentiel devient supérieur à l'effort normal d'indentation. Le pouvoir de coupe est alors faible et l'enlèvement de matière se fait essentiellement par des actions de labourage et de frottement ;
- un régime secondaire pour les vitesses de coupe $V_c \geq V_c^c$ dans lequel l'énergie spécifique augmente légèrement mais avec une stabilisation du coefficient de frottement. Le rodage devient alors régulier grâce à la prépondérance du mode de micro-coupe.

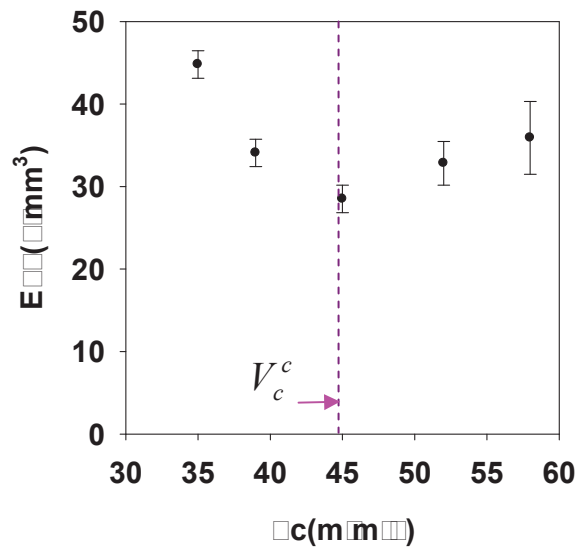


Figure 77. Variation de l'énergie spécifique en fonction de la vitesse de coupe
(Paramètres process : taille de grains $d=110 \mu\text{m}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)

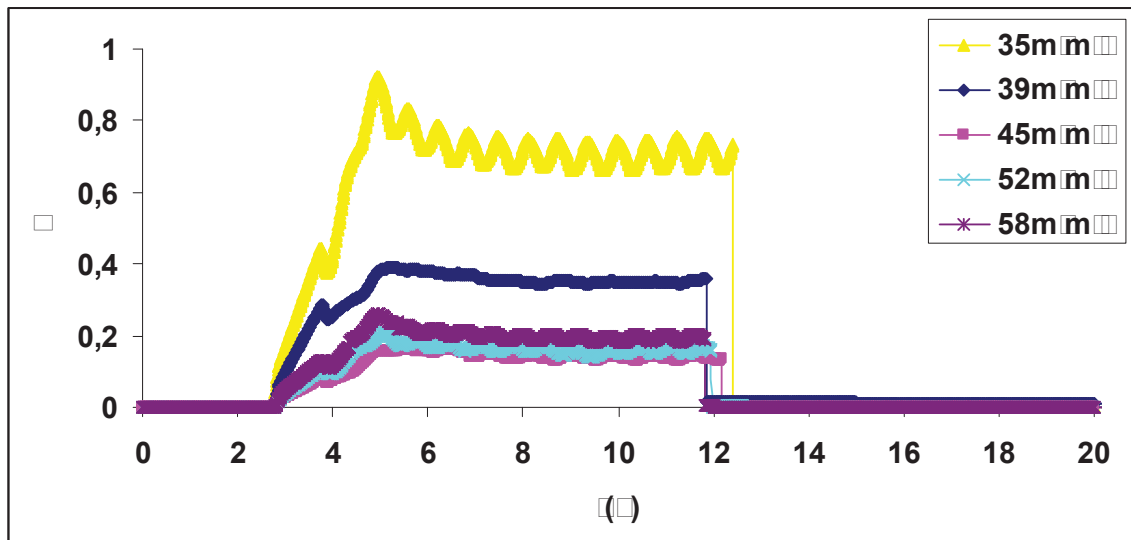


Figure 78. Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de coupe
(Paramètres process : taille de grains $d=110 \mu\text{m}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

3.4.2.2. sur la qualité du fini de surface

La figure 79 montre, encore une fois, l'existence d'une vitesse de coupe V_c^c qui permet de distinguer deux domaines :

- un domaine pour les vitesses de coupe inférieures à V_c^c , dans lequel la forme est dégradée par rapport à l'étape ébauche ($C_{ébauche} = 10,82\mu\text{m}$)
- un domaine pour les vitesses de coupe supérieures à V_c^c qui améliore nettement la cylindricité des fûts pour des vitesses de coupe élevées

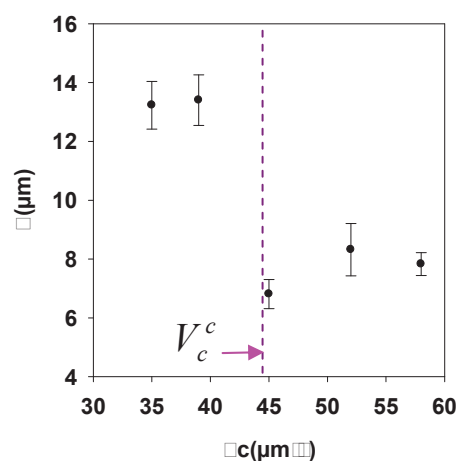


Figure 79. Les variations de la cylindricité (C) avec la vitesse de coupe. (Paramètres process : taille de grains $d=110 \mu\text{m}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

Par ailleurs, les performances en termes de rugosité en fonction de la vitesse de coupe rapportées sur la figure 80 sont inquantifiables avec les paramètres arithmétiques de rugosité. Notons tout de même une augmentation des dispersions pour le critère de lubrification (Cl) renseignant sur la profondeur des vallées.

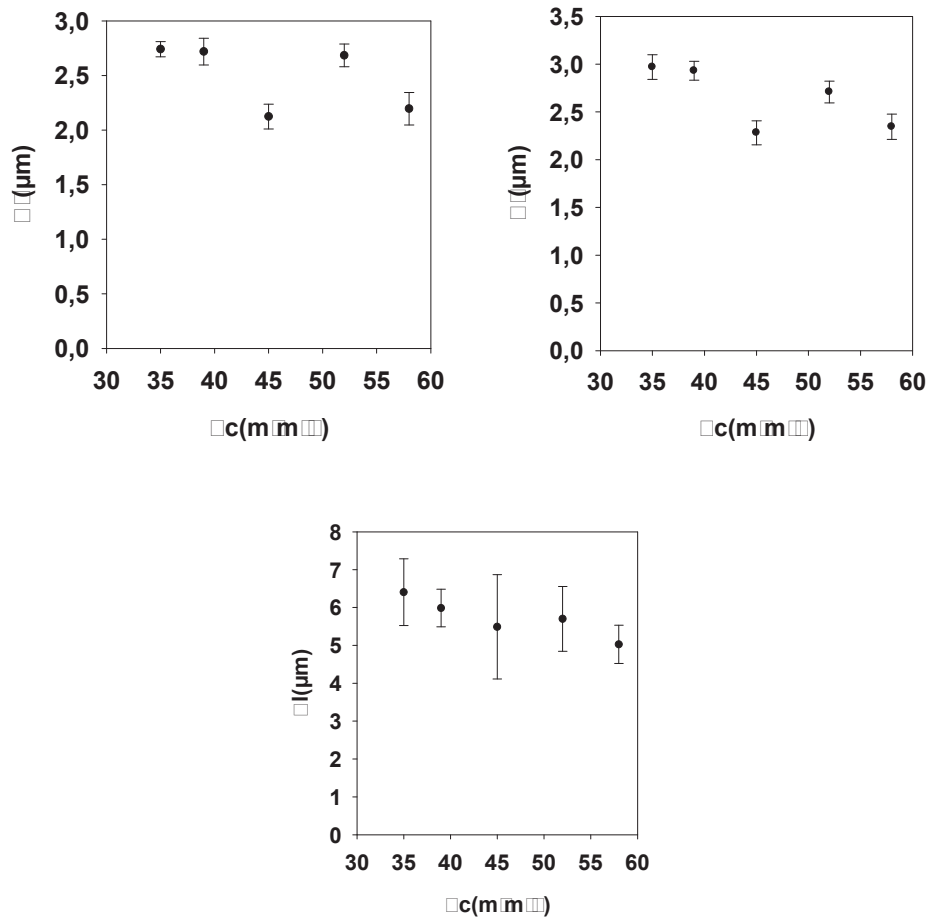


Figure 80. Les variations des paramètres d'état de surface Cr , Cf et Cl avec la vitesse de coupe (Paramètres process : taille de grains $d=110 \mu m$ et $V_{exp}=4 \mu m/s$)

Cependant, l'analyse multi-échelle permet d'apporter une information importante quant à l'intervention du facteur vitesse de coupe. La figure 81 montre, en effet, que la vitesse de coupe n'induit pas d'effet d'échelle sur la surface puisque les spectres de rugosité SMA ne sont que légèrement décalés en amplitudes.

Au final, la vitesse de coupe n'aura d'impact significatif que sur les variations macro-géométriques de la surface en termes de cylindricité.

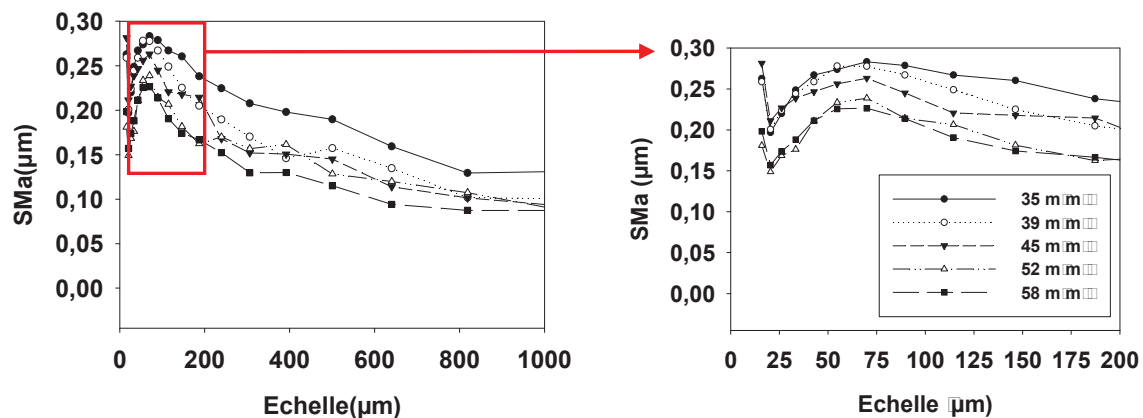


Figure 81. Les spectres multi-échelles de rugosité S_{ma} en fonction de la vitesse de coupe sur les intervalles d'échelles (a) $[0, 1000\mu\text{m}]$ et (b) $[0, 200\mu\text{m}]$
(Paramètres process : taille de grains $d=110\mu\text{m}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$).

□ Conclusion

L'outil d'analyse multi-échelle du process de rodage développé dans ce chapitre a clairement mis en évidence que la phase de rodage de finition détermine la rugosité de la surface rodée. Il est d'une mise en œuvre assez simple, dès que l'on maîtrise le concept de signature process multi-échelle, et permet d'étudier les effets des conditions aux limites du process. Ces derniers explicités dans le cas de la granulométrie et de la cinématique du process en rodage finition montrent que :

- la pierre abrasive joue un rôle déterministe sur les performances du process et la qualité de la surface rodée en fonction de la taille de grain ;
- un intervalle optimal de stabilité du process en termes de taux d'enlèvement de matière, d'usure et de qualité de surface est conditionné par une granulométrie en Carbure de Silicium comprise entre 70 et 200 μm ;
- la vitesse d'expansion intervient essentiellement sur le taux d'enlèvement de matière et la réduction d'écart de forme ;
- une vitesse de coupe critique est définie à 45m/min pour laquelle le rodage finition réalise le meilleur taux d'enlèvement de matière avec une réduction des défauts géométriques.

L'apport de cet outil d'analyse multi-échelle du process dans la compréhension et l'identification des mécanismes physiques activés en rodage finition a aussi été mis en

évidence. L'outil, par son aspect pluridisciplinaire, peut être exploité comme moyen de conception du process, d'analyse de la qualité fonctionnelle du produit et de diagnostic des dérives du process. Cette extension fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre

Étude d'applications Process-Produit comprises et concertées par analyse multi-échelle et qualification fonctionnelle.

1. Introduction

Nous avons eu l'occasion de montrer, au cours des deux chapitres précédents, l'intérêt de l'analyse multi-échelle dans la caractérisation des surfaces produites par rodage et son déploiement pour la compréhension du process. Mais, de même que nous avons essayé de décrire, d'après la signature process, l'intervention des variables du procédé dans la genèse des surfaces des fûts, créés par succession d'étapes de rodage, nous croyons utile de montrer, à travers deux applications, comment exploiter les résultats de ce travail dans la recherche technique en production mécanique. La première application concerne le problème de productivité : est-il possible de concevoir un protocole de rodage exclusif avec des superabrasives en diamant (Rodage Diamant)? Quels sont dans ce cas les choix possibles des structures des pierres abrasives en diamant ?

La seconde application traite le problème du produit de rodage en termes de la qualification objective de son besoin fonctionnel. Est-il possible de décrire l'effet des différents attributs de la texture des surfaces de fûts sur les performances des frictions moteur ? Nous avons préconisé (dans le chapitre 3) l'emploi de nouveaux paramètres pour la caractérisation des éléments texturaux des surfaces de rodage. Ces paramètres seront exploités ici afin de pouvoir établir des relations entre les caractéristiques texturales de la surface- essentiellement en termes d'aspect- avec les performances de frottement segment/fût via un modèle de simulation du contact. Une fois ces corrélations établies, il sera possible de proposer des configurations optimales des textures de surfaces rodées.

□ Étude du procédé de □ rodage □ iament

On doit rappeler que le rodage diamant exploite des pierres abrasives agglomérées à base de grains diamants et à distribution aléatoire. La gamme de rodage diamant peut être déployée soit dans les trois étapes de rodage (ébauche, finition, plateau) avec des tailles de grains différentes ; soit dans les phases de rodage ébauche et finition puis un passage à l'étape plateau avec du Carbone de Silicium Vitrifié. Bien que cette gamme « diamant » améliore la productivité du process -grâce aux performances contre l'usure des grains en diamant (dureté égale à 7000 contre 3000 pour le Carbone de Silicium à l'échelle de Knoop), l'utilisation des pierres en diamant métallique introduit des manteaux de tôle à cause du refoulement de la matière sur les bords des stries. Ils sont sous forme d'écailles de poisson qui froteront mal avec les segments surtout quand le glissement prend les écailles « à rebrousse-poil ». Ce type de texture de surface risque de détériorer la fonctionnalité de la surface et d'augmenter l'usure du système Segment/Piston/ Fût (SPF). Face à cette problématique, on propose ici d'étudier cette application de rodage diamant.

Remarque : Les essais du rodage diamant ont été réalisés pendant la phase de rodage finition : c'est la phase qui conditionne l'aspect principal de la surface et détermine sa rugosité.

2.1. Le rodage diamant avec des pierres en diamant métallique

Prenons un exemple de superabrasive utilisé en production pour l'opération de rodage finition (figure 82). Ce type de pierre est composé des éléments structuraux suivants :

- un liant métallique en bronze à l'étain de concentration inférieure à 15% afin d'augmenter la dureté et la résistance à l'usure du cuivre. Des traces de phosphore sont également présentes dans la composition du liant ;
- des grains de diamant d'une concentration évaluée à 4,4 carats/cm³ correspondant à une densité de 0,88 g/cm³ et une distribution de 25% par rapport au volume totale de la pierre.

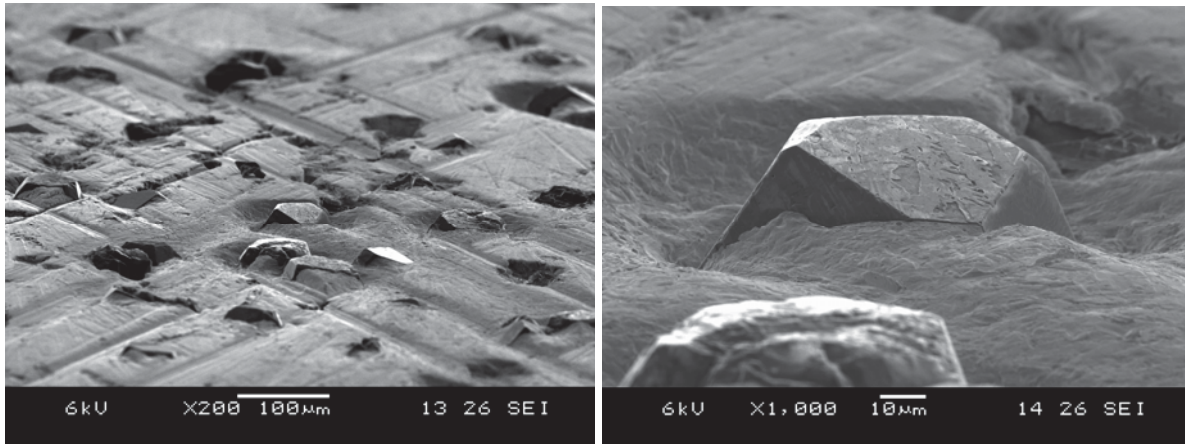


Figure 82. Observations microscopiques aux grossissements $\times 200$ et $\times 1000$ des pierres en diamant métallique après la phase de mise au rond.

Deux tailles de grains de $76\mu\text{m}$ (D76) et de $91\mu\text{m}$ (D91) seront examinées. L'impact de la vitesse d'expansion sera pris en compte dans ce paragraphe de façon à faire ressortir les deux aspects suivants :

- les performances du process en termes de consommation d'énergie, de pouvoir de coupe et d'usure des pierres ;
- la qualité de la surface produite en corrélation avec les mécanismes physiques identifiés.

2.1.1. Étude des performances du process

L'étude du taux d'enlèvement de matière reporté sur la figure 83 en fonction de différentes vitesses d'expansion montre, tout d'abord, que le résultat d'enlèvement de matière est pratiquement le même pour les deux tailles de grains $91\mu\text{m}$ et $76\mu\text{m}$. Notons également la présence d'un régime établi à partir de la vitesse d'expansion $V_{\text{exp}}^l = 6\mu\text{m/s}$. Pour des vitesses d'expansion supérieures à cette valeur critique, la vitesse d'expansion ne paraît pas influencer significativement le taux d'enlèvement de matière. Partant du principe que ces résultats sont obtenus à iso paramètres process (vitesses de rotation et de battement), il résulte que le pouvoir d'indentation varie très peu avec la vitesse d'expansion à partir de V_{exp}^l .

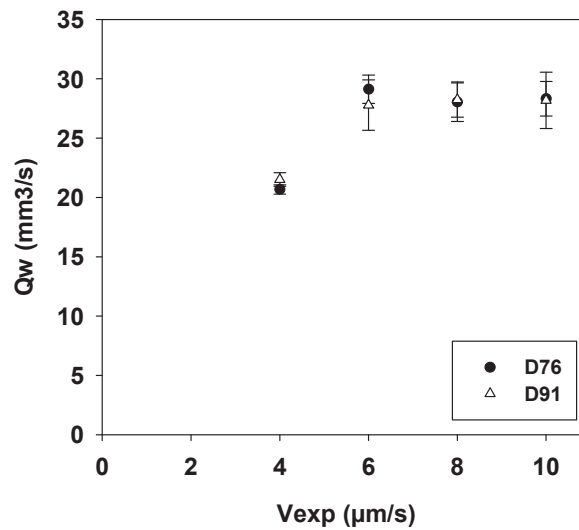


Figure 83. Evolution du taux d'enlèvement de matière avec la vitesse d'expansion pour deux tailles de grains en Diamant à $76\mu\text{m}$ et $91\mu\text{m}$.
(Paramètres process : $V_a=23\text{m}/\text{min}$ et $V_r=190\text{tr}/\text{min}$)

Afin de conforter ce résultat, des observations au MEB ont été réalisées pour qualifier le dégagement des grains diamant par rapport à la surface en contact avec la pièce. Ces observations permettent de dresser les remarques suivantes (figure 84) :

- le dégagement des grains du liant métallique est pratiquement inchangé en variant la vitesse d'expansion ;
- les grains présentent deux formes d'usure : de faibles micro-fractures au niveau des faces du tétraèdre en contact avec la pièce ou un délogement complet du grain de la structure de la matrice ;
- la présence de marques dans deux directions correspondant aux deux mouvements de rotation et de battement simultanés explique l'augmentation des valeurs de l'énergie spécifique en comparaison avec les valeurs obtenues pour le Carbure de Silicium (chapitre 4). Elles montrent en effet que la surface de contact pierre/pièce est plus importante ce qui engendre une accentuation du mécanisme de frottement.

Si l'on compare ces images à celles des pierres en carbure de silicium à iso conditions opératoires, on remarque que les arêtes de diamant sont moins aiguës (figure 85-a) alors que celles du carbure de silicium se présentent sous forme d'arêtes minuscules tranchantes (figure 85-b). Etant donné que les charges appliquées sont les mêmes, les grains diamant vont supporter des pressions locales plus élevées que le carbure de silicium. Les graphites de la fonte seront alors chassés rapidement et formeront alors une couche de métal écroui. De

l'autre côté, les carbures de silicium vont affleurer les graphites par leurs arêtes aiguës pour couper le métal d'une façon très franche.

Ces différentes réponses de la pierre influent de façon évidente sur la texture de la surface produite.

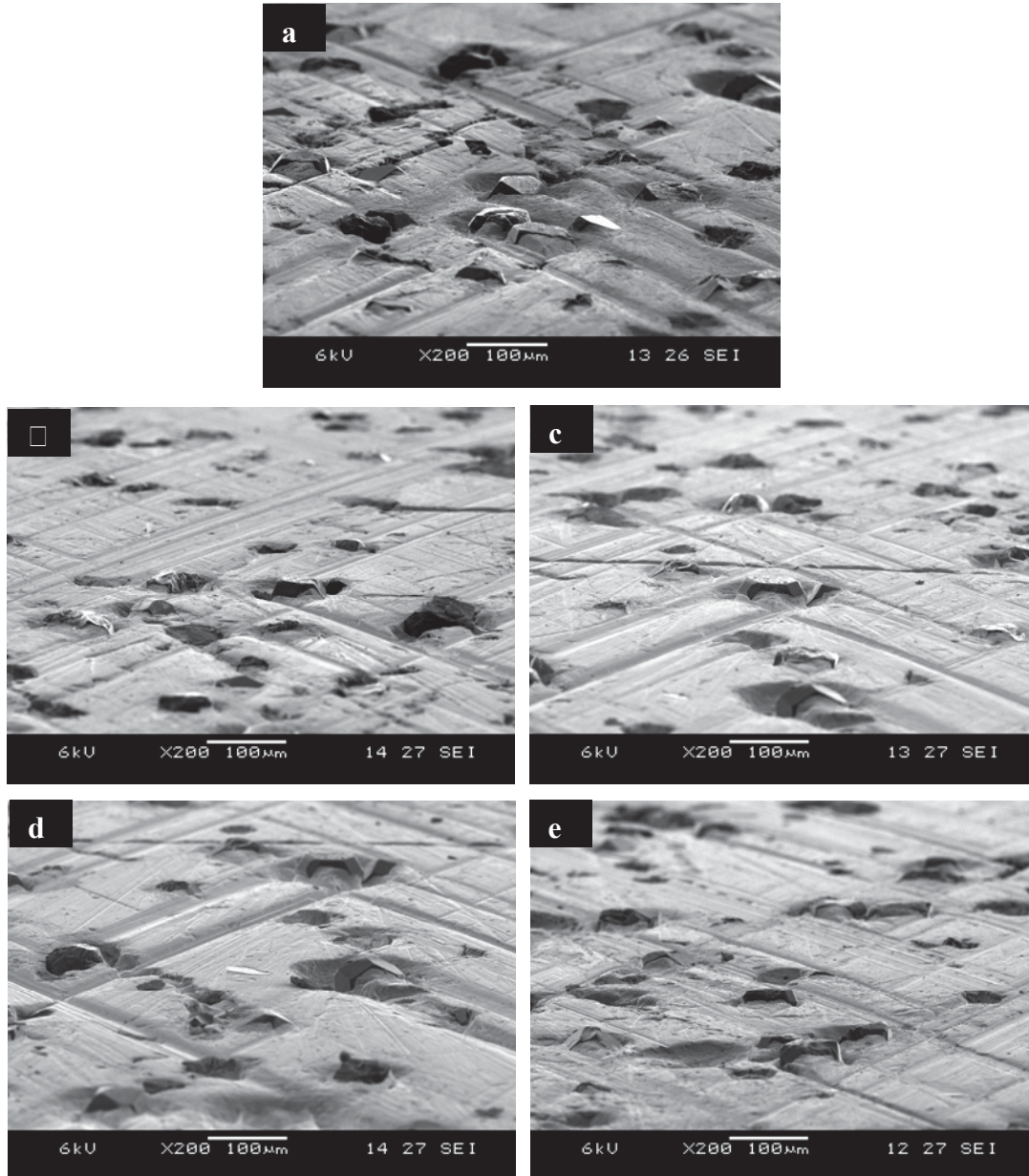


Figure 84. Structure des pierres abrasives en diamant métallique (a) au départ (mise au rond), après rodage finition avec vitesses d'expansion égales à : (b) $4 \mu\text{m/s}$, (c) $6 \mu\text{m/s}$, (d) $8 \mu\text{m/s}$ et (e) $10 \mu\text{m/s}$. (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

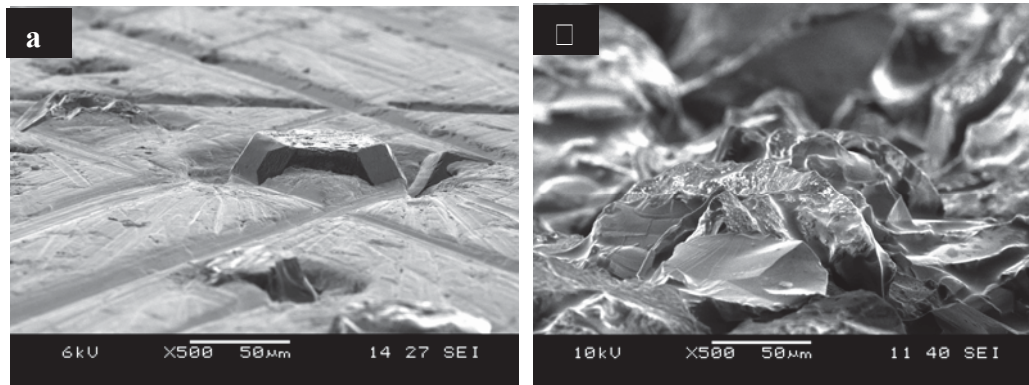


Figure 85. Exemples d'images microscopiques de comparaison entre la forme des arêtes de coupe après la phase de rodage finition avec (a) des grains diamant et (b) des grains carbure de silicium (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{\text{exp}}=4\mu\text{m/s}$)

Examinons dans le paragraphe suivant comment évolue la topographie de la surface dans ces conditions opératoires.

2.1.2. Étude de la qualité des surfaces

Les variations de la cylindricité des fûts rodés à différentes vitesses d'expansion pour les deux tailles de grains en diamant testées sont illustrées dans la figure 86. Celle-ci montre que la cylindricité est améliorée à partir de la vitesse d'expansion $6\mu\text{m/s}$. Au-delà de cette vitesse, l'augmentation de la vitesse d'expansion ne semble pas impacter la cylindricité. Nous montrons ici aussi que la vitesse d'expansion $6\mu\text{m/s}$ est une vitesse d'expansion critique à partir de laquelle la cylindricité est améliorée.

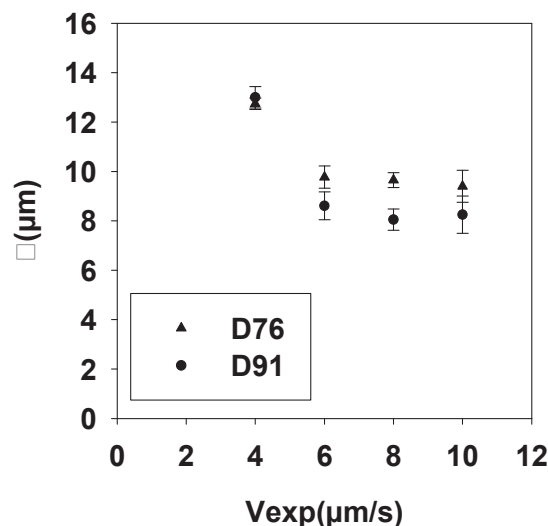


Figure 86. Variations de la cylindricité C en fonction de la vitesse d'expansion pour les pierres en diamant D91 et D76 (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

Concernant les paramètres de rugosité, la figure 87 ne permet pas d'être concluant quant à l'effet de la variation de la vitesse d'expansion sur les paramètres de rugosité Cr, Cf et Cl.

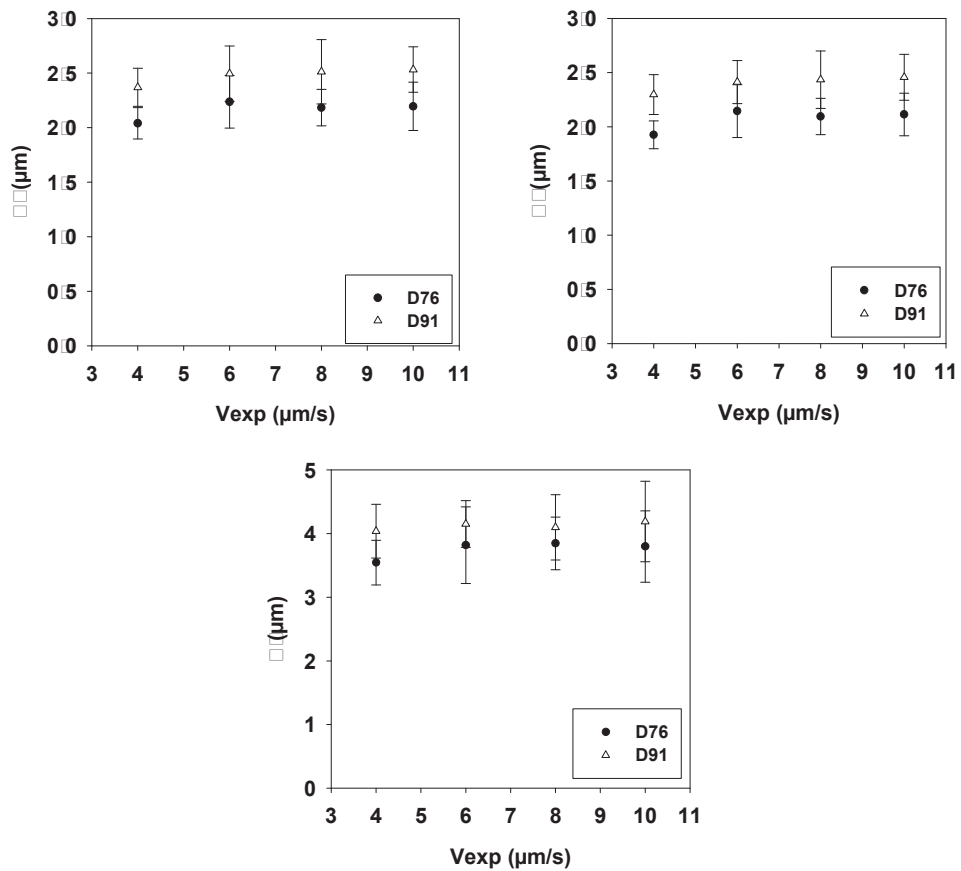


Figure 87. Variations des paramètres fonctionnels de rugosité en fonction de la vitesse d'expansion dans le cas du rodage diamant avec les tailles de grains 76μm et 91μm (Paramètres process : $V_a=23m/min$ et $V_r=190tr/min$)

Toutefois, l'analyse multi-échelle de la rugosité (figure 88) permet de montrer une légère réduction de la rugosité, compte tenu des écarts types : des surfaces fines sont produites avec la vitesse d'expansion 4μm/s mais restent ensuite inchangées sur toutes les échelles en augmentant la vitesse d'expansion. A partir de $V_{exp}^l = 6\mu m/s$, la topographie reste pratiquement inchangée à toutes les échelles.

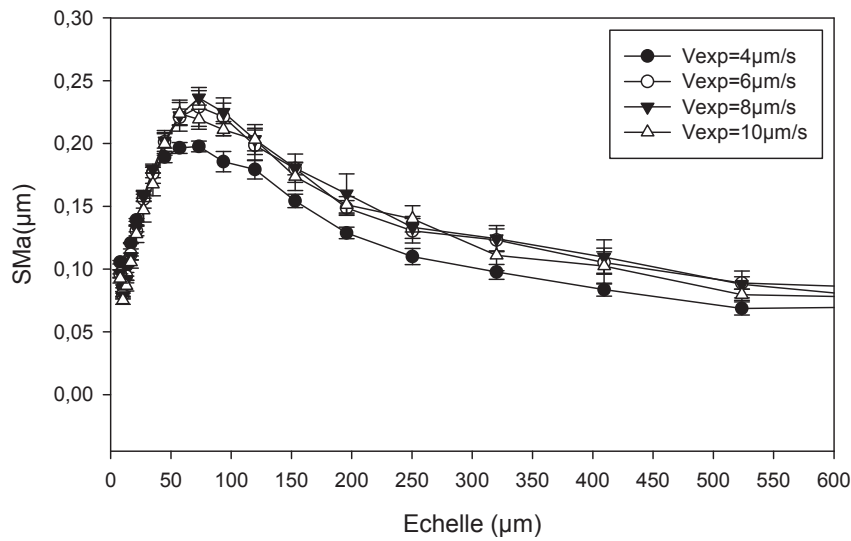


Figure 88. Spectre multi-échelle de rugosité du diamant métallique D91 à différentes vitesses d'expansion
(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

L'analyse de l'aspect en termes de densité des stries est reportée sur la figure 89. Celle-ci montre que la vitesse d'expansion n'a pas d'impact significatif sur la densité des stries. Cette non variation de la densité des stries est liée au degré de pénétration des grains dans la surface usinée qui, en se basant sur les images MEB de la figure 84, reste invariable. Notons tout de même une réduction de l'écart type en augmentant la vitesse d'expansion.

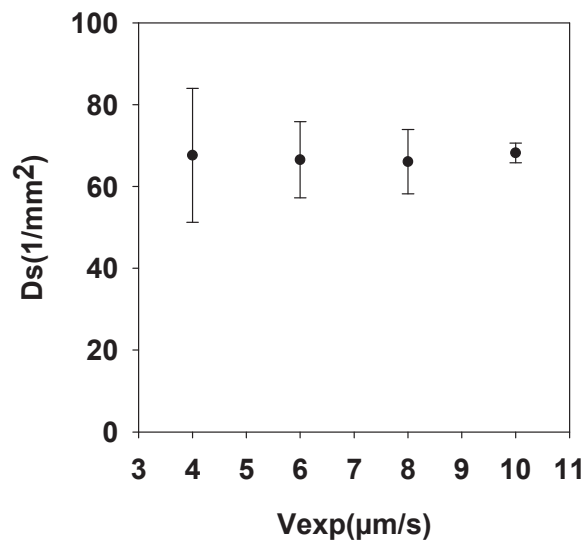


Figure 89. Densités des stries de surfaces rodées avec du diamant métallique à différentes vitesses d'expansion
(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$ et $V_r=190\text{tr/min}$)

De cette analyse, il ressort que le rodage avec le diamant métallique réduit l'effet de la vitesse d'expansion sur la rugosité et permet, en revanche, d'améliorer la coupe avec un taux d'enlèvement de matière élevé et une meilleure forme des fûts à grandes vitesses d'expansion. Toutefois, l'augmentation de la vitesse d'expansion peut détériorer l'aspect des surfaces rodées en favorisant la formation des manteaux de tôle (blechmantel) et des dentelles sur les bords des stries. Pour palier à ces limitations de l'efficacité du process avec l'emploi du rodage diamant, de nouvelles structures de pierres à base de grains diamant ont été étudiées afin d'améliorer la qualité des surfaces rodées tout en gardant de bonnes performances en termes d'enlèvement de matière et d'usure.

2.2. Le rodage avec de nouvelles structures de pierres à base de grains diamant

L'idée de définition de nouvelles pierres de rodage est basée sur la combinaison entre les propriétés de durée de vie du diamant aux qualités de textures poreuses des liants vitrifiés ou résinoides comme il est le cas pour les meules de rectification. La figure 90 montre les caractéristiques structurales des deux nouvelles pierres abrasives testées comparées à celles du diamant métallique. Les trois types de pierres ont les mêmes dimensions (6x6x70mm) et ont subi une phase de mise au rond par 10 passages de cycles de rodage finition afin de les dresser et aviver les grains. En résumé, ces pierres sont définies comme suit :

- 1- *diamant métallique* (Dia-M) : composé d'un liant métallique en bronze et de grains en diamant de taille égale à 91 μ m et d'une concentration de 50% par rapport au volume total de la pierre. Le liant présente, dans ce cas, une structure fermée et marquée par les traces de striation générées lors du mouvement hélicoidal des pierres (figure 90-a) ;
- 2- *diamant vitrifié* (Dia-V) : composé d'un liant vitrifié (verre C7) et de grains diamant de taille moyenne égale à 107 μ m et de concentration égale à 50% du volume total de la pierre. Des grains de Carbone de Silicium de taille égale à 60 μ m sont rajoutés pour assurer un meilleur accrochage des grains. La structure des pierres est plus ouverte et présente plus d'espace inter-granulaire par rapport au diamant métallique (figure 90-b) ;
- 3- *diamant résinoïde* (Dia-R) : composé d'un liant résinoïde et de grains diamant de taille moyenne égale à 91 μ m. Les grains abrasifs sont revêtus de Nickel pour mieux les retenir dans la matrice. Cette pierre donne une structure moins ouverte que le diamant

vitrifié mais contient tout de même des pores permettant de réduire les phénomènes d'encrassement des copeaux (figure 90-c).

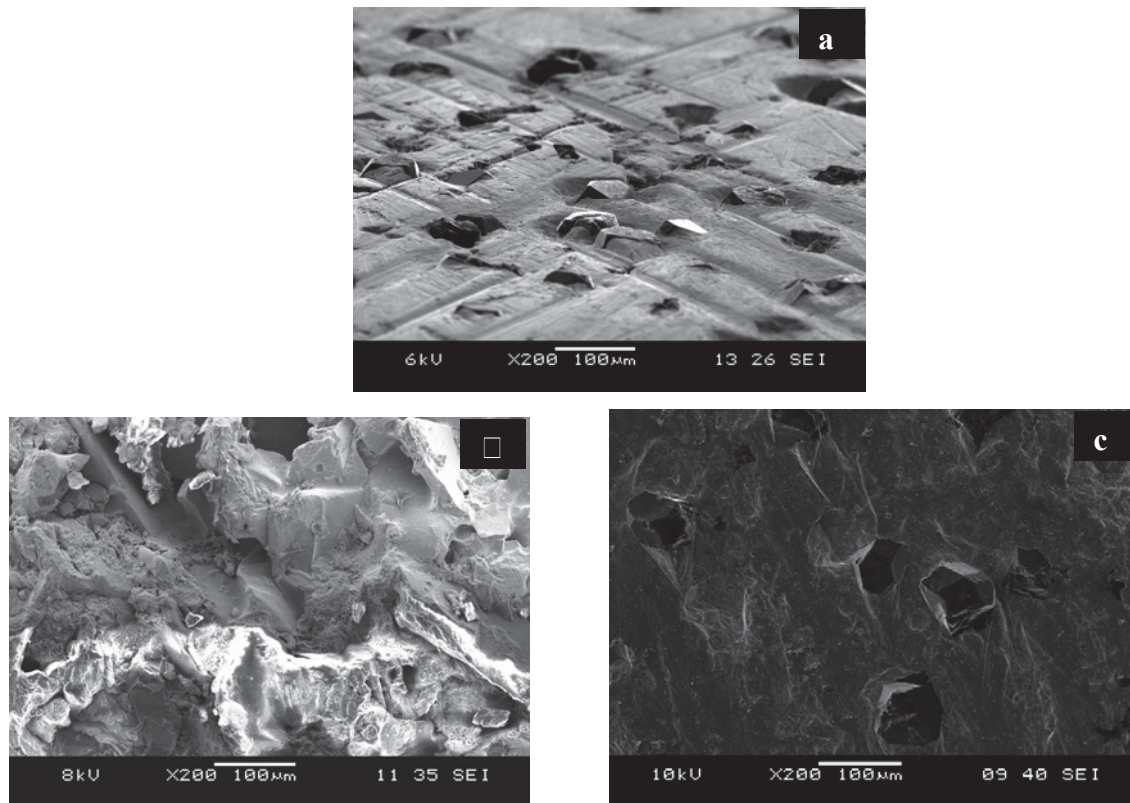


Figure 90. Morphologie structurale des différentes pierres à base de diamant : (a) diamant métallique, (b) diamant vitrifié et (c) diamant résinoïde.

Nous allons dans ce paragraphe examiner et comparer les performances de ces trois pierres en termes d'efficacité du process et en termes de la qualité des surfaces rodées.

2.2.1. Étude des performances du process

Dans les conditions de rodage testées, le liant conditionne fortement le taux d'enlèvement de matière. Comme le montre la figure 91, le liant vitrifié présente le meilleur pouvoir d'enlèvement de matière alors que le liant résinoïde possède le taux d'enlèvement le plus bas. S'agissant de l'usure de ces trois pierres à différents liants, on rapporte sur la figure 92, l'évolution de l'usure de chacune d'entre elles en fonction du nombre de cylindres rodés. Il en ressort que le diamant vitrifié est celui qui présente le taux d'usure le plus élevé.

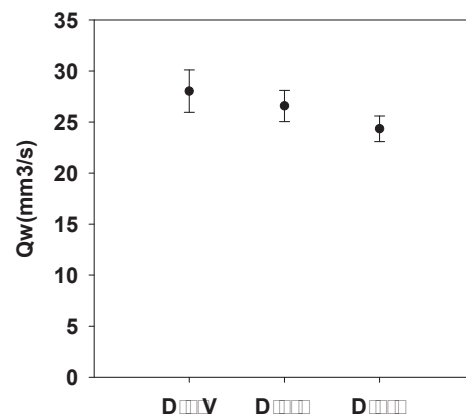


Figure 91. Taux d'enlèvement de matière en fonction du type de liant agglomérant les grains de diamant.

(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

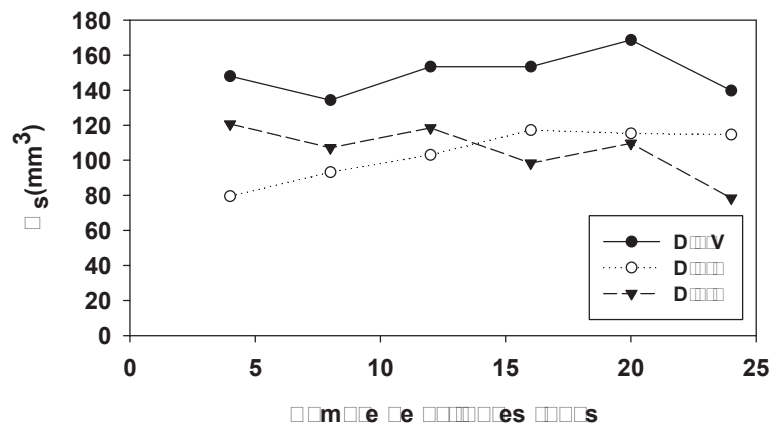


Figure 92. Comparaison de l'usure des pierres abrasives avec Diamant vitrifié et Carbure de Silicium vitrifié (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

De plus, l'introduction de l'indice de rodage H défini comme le rapport entre le volume d'enlèvement de matière et le volume d'usure des pierres abrasives permet de quantifier le pouvoir de productivité de chacune de ces pierres. La figure 93 montre que le diamant vitrifié ainsi que le diamant résinoïde présentent des évolutions cycliques en fonction du nombre de cylindres usinés. A contrario, le diamant métallique fait état d'une stabilité d'évolution avec les cylindres usinés. Le diamant résinoïde enregistre, de surcroît, une meilleure productivité par rapport au diamant métallique et au diamant vitrifié.

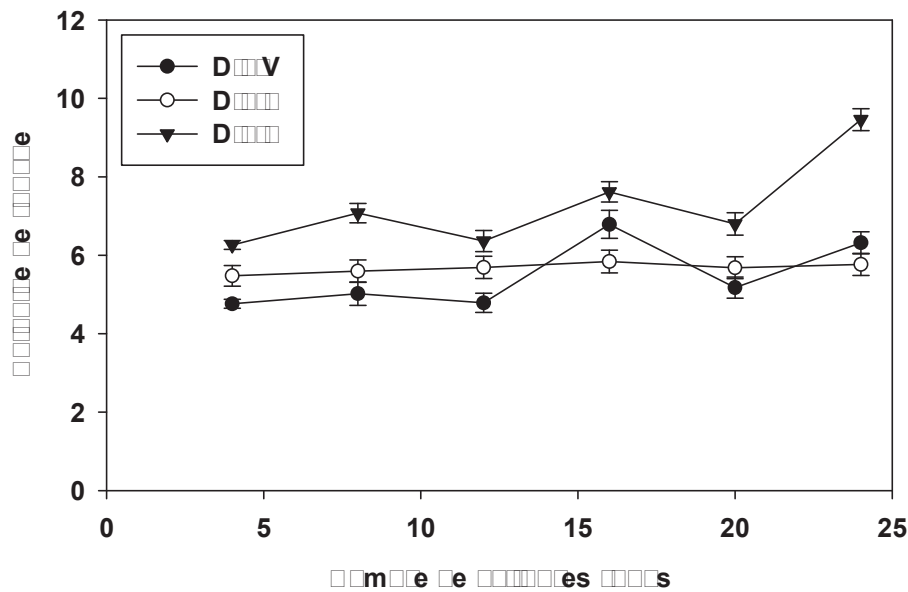


Figure 93. Evolution de l'indice de rodage H en fonction du nombre de cylindres rodés pour le Carbure de silicium vitrifié et le diamant vitrifié
(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

Les conditions opératoires étant les mêmes, ce comportement ne peut être attribué qu'à la nature de la structure du liant et le mode de son accrochage avec le grain. Ces deux éléments conditionneront les modes d'usure de chacune de ces pierres. Comment sont donc définis ces modes d'usure ? Tel sera l'objet du paragraphe suivant en se basant sur une étude énergétique couplée à des expertises in situ du comportement des pierres.

2.2.2. Identification des mécanismes physiques activés

Afin d'étudier les modes d'action de chacune des trois configurations des pierres, on examinera l'évolution de l'énergie spécifique. La figure 94 montre que le diamant vitrifié possède un rendement énergétique supérieur aux deux autres pierres en résine et métal.

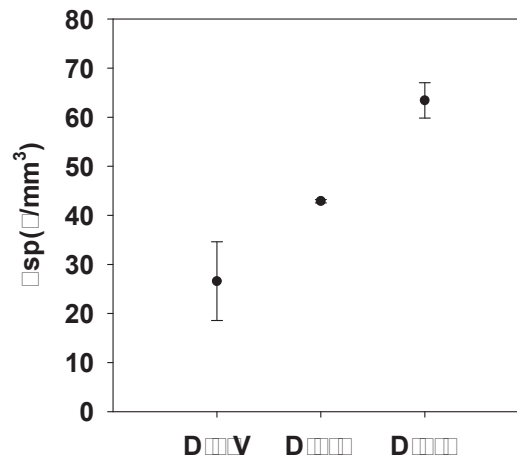


Figure 94. Variation de l'énergie spécifique en fonction du type de liant appliqué aux grains diamant 107 μ m. (Paramètres process : $V_a=23$ m/min, $V_r=190$ tr/min et $V_{exp}=4\mu$ m/s)

L'observation de ces trois pierres après la phase de rodage finition (figure 95) justifie ce résultat. En effet, la structure poreuse du diamant vitrifié permet d'augmenter le taux d'enlèvement de matière et de réduire l'énergie spécifique grâce à une meilleure accommodation des copeaux et une meilleure régénération des pierres. En revanche, l'augmentation de l'énergie spécifique avec le diamant résinoïde est due au revêtement appliqué sur le diamant. Comme le montrent ces images MEB, la couche du revêtement utilisé pour bien ancrer le diamant dans le liant défavorise le pouvoir de coupe du grain puisqu'elle couvre les angles d'attaque du grain.

Notons par ailleurs que les évolutions de l'indice de rodage H illustrées dans la figure 93 sont reliées aux mécanismes d'usure de la pierre (figure 96). Le grain étant le même, et d'une dureté très élevée, le mode d'usure dépendra essentiellement de l'énergie de destruction de la liaison matrice/grain (mode c de la figure 96) [91]. Ces différents comportements sont à prendre en considération en harmonie avec la qualité de la surface finie.

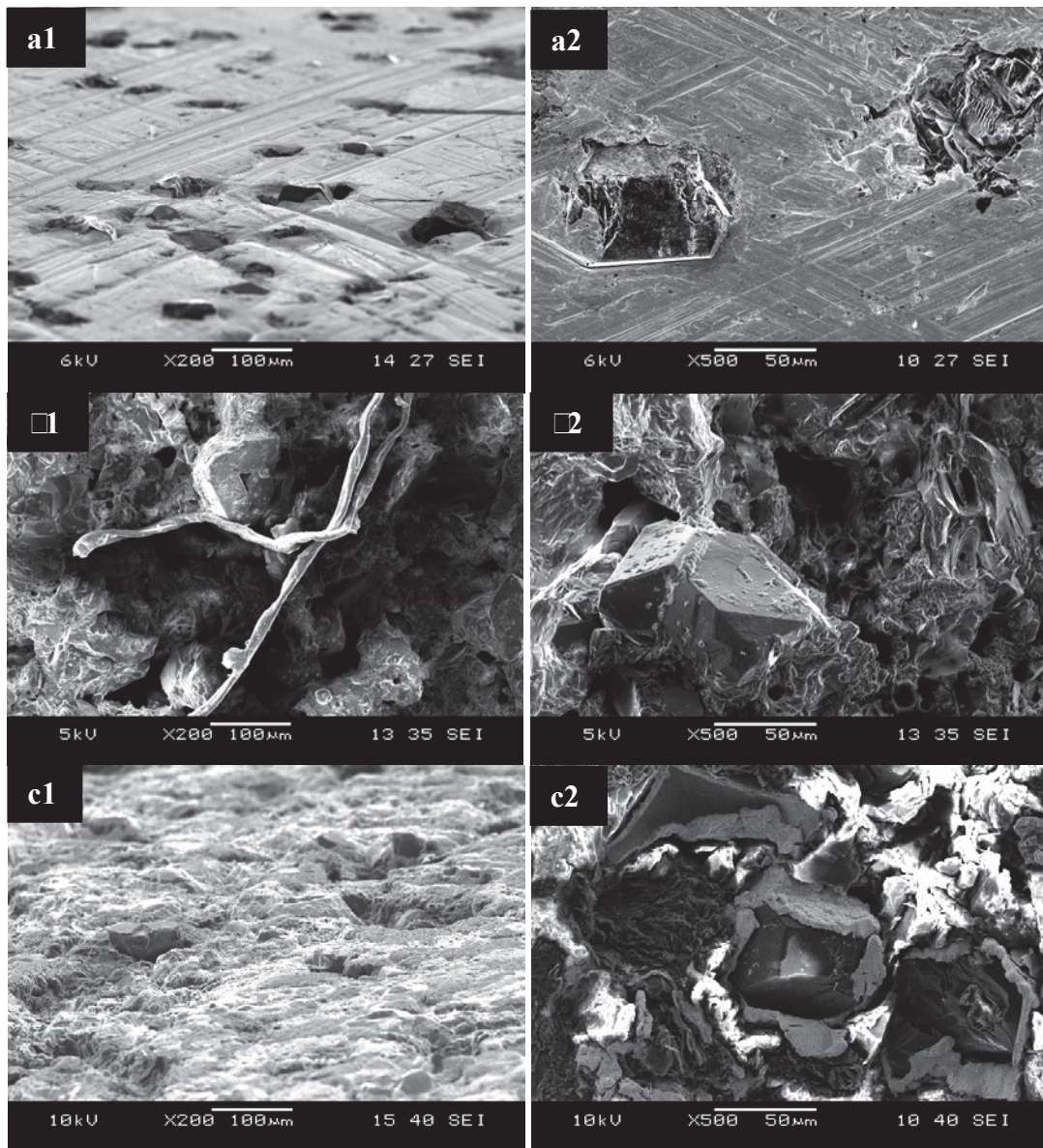


Figure 95. Morphologies des pierres de rodage (a) Dia-M, (b) Dia-V et (c) Dia-R à deux grossissements (1) x200 et (2) x500
(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

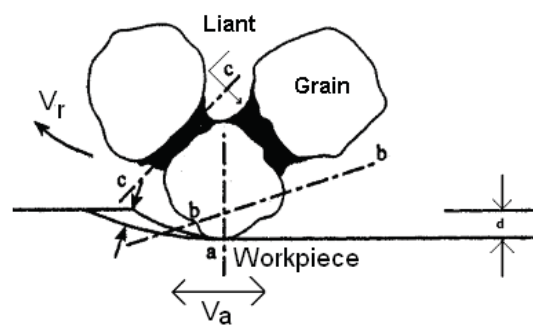


Figure 96. Modes d'usure des pierres abrasives

2.2. Étude de la qualité des surfaces produites

La figure 97 souligne une nette influence du type de liant sur les défauts de forme des fûts rodés. Le diamant résine, Dia-R, dégrade la forme par rapport à un écart de cylindricité initial de 10,82 μm obtenue lors de l'ébauche. Le diamant vitrifié, Dia-V améliore, pour sa part, la cylindricité alors que le diamant vitrifié n'apporte pas d'amélioration significative à la cylindricité. Cette différence au niveau des écarts de cylindricité est due aux variations du taux d'enlèvement de matière obtenues par les différents types de liant.

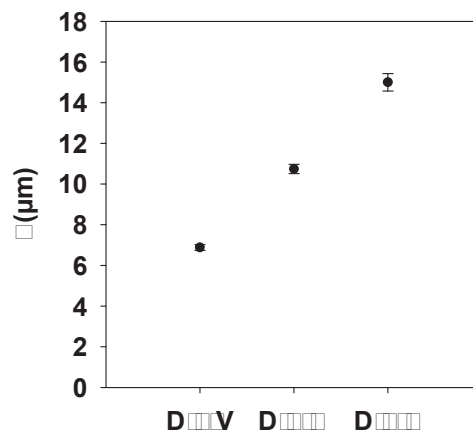


Figure 97. Variations de la cylindricité avec différents types de liant à grains diamants
(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

Concernant les irrégularités de la surface en termes d'état de surface, le diamant vitrifié et métallique n'ont pas de différences entre les paramètres Cr, Cf et Cl alors que le diamant résinoïde produit une surface plus fine (figure 98).

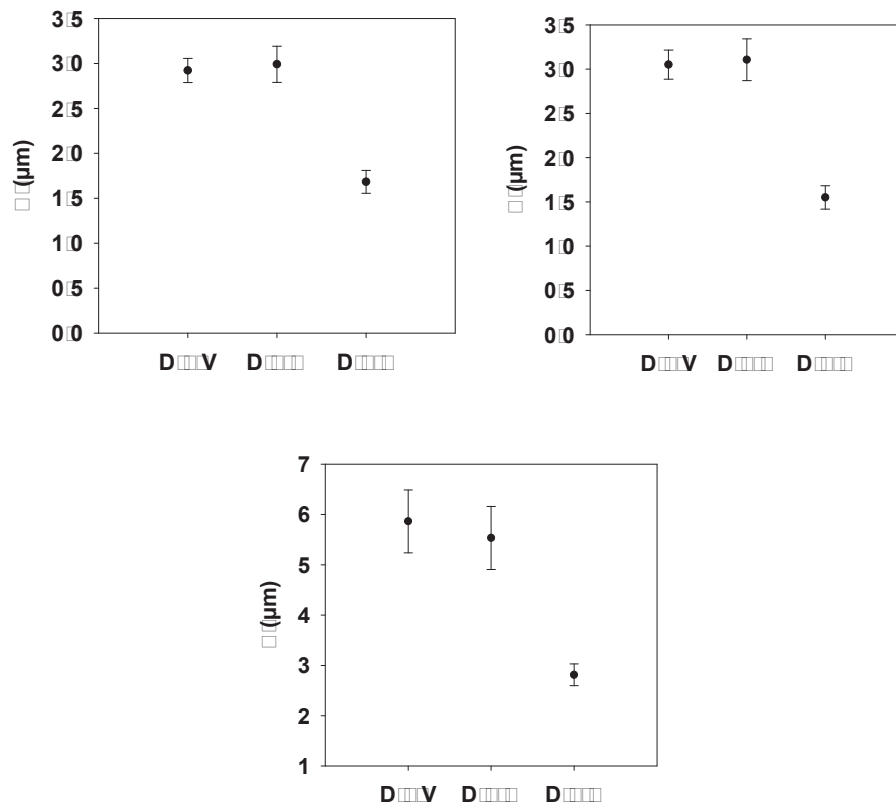


Figure 98. Les variations des paramètres d'état de surface en fonction du type de liant agglomérant les grains diamant
(Paramètres process : $V_a=23m/min$, $V_r=190tr/min$ et $V_{exp}=4\mu m/s$)

L'analyse multi-échelle permet une fois de plus d'apporter plus de précisions quant aux différentes variations de la rugosité de la surface. La figure 99 montre l'effet d'échelle dû au changement de liant :

Pour les échelles supérieures à $100\mu m$, on remarque un simple décalage des spectres de rugosité, le Dia-R étant le plus fin

Pour les échelles inférieures à $100\mu m$, différents comportements sont observés en fonction du liant :

- le diamant résinoïde a une action de réduction maximale de la rugosité avec une légère augmentation pour les échelles inférieures à $30\mu m$;
- le diamant métallique et le diamant vitrifié présentent un maximum de rugosité pour les échelles respectives de $60\mu m$ et $80\mu m$.

Cette dépendance à l'échelle montre que le liant impact directement la morphologie et l'amplitude de la texture de la surface.

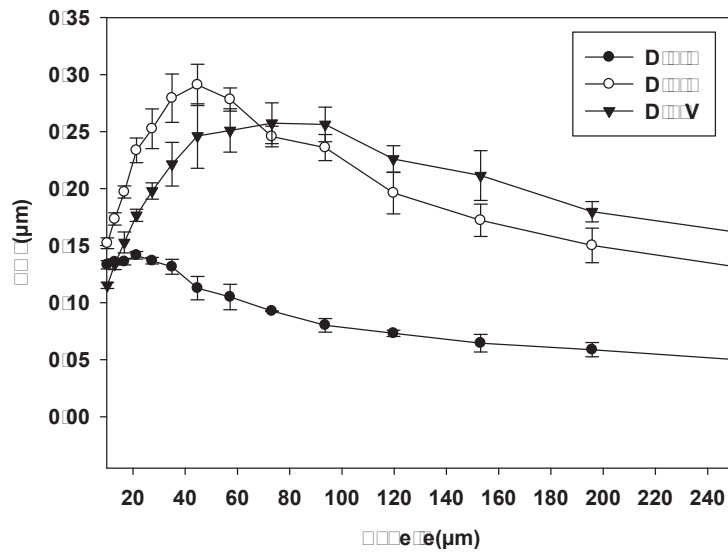


Figure 99. Spectres multi-échelles de rugosité pour les pierres à grains diamants et à liants vitrifié, résinoïde et métallique.

(Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

Au niveau de l'aspect, le type du liant influe fortement la formation des stries. Comme illustré sur la figure 100, on observe une augmentation de la densité des stries pour le diamant résinoïde alors qu'elle est minimale pour le diamant vitrifié.

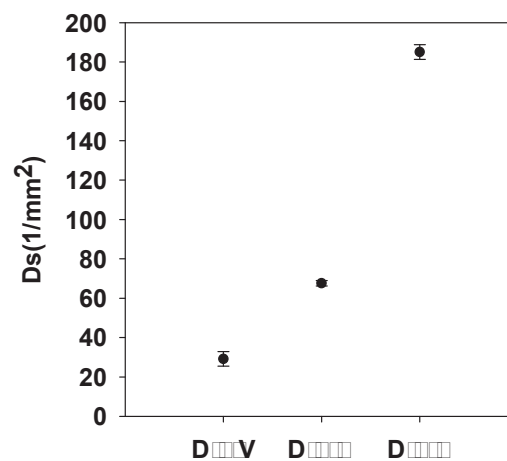


Figure 100. Variation du paramètre D_s de densité des stries en fonction du type de liant (Paramètres process : $V_a=23\text{m/min}$, $V_r=190\text{tr/min}$ et $V_{exp}=4\mu\text{m/s}$)

Au final, les deux nouvelles pierres ont montré leur potentiel en termes de production d'une meilleure qualité de surface. Leurs propriétés d'usure restent toutefois limitées. Le diamant résinoïde est une solution prometteuse mais nécessiterait encore des améliorations au niveau des processus de revêtement des grains diamant pour un meilleur accrochage des grains sans gêner l'action tranchante des arêtes de coupe.

4. Influence du besoin fonctionnel des surfaces des fûts dans le triosystème

Quelque soit la configuration de la conception process proposée, chaque propriété géométrique et texturale de la surface usinée intervient directement dans la performance fonctionnelle du système Segment/Piston/Fût (SPF). Toutefois, compte tenu de la complexité du contact SPF, le rôle précis de la texture du fût dans la lubrification et le frottement n'est pas bien connu aujourd'hui. En effet, sous l'action du mouvement par friction, les élévations de température provoquent, combinées à de grandes pressions, des jonctions de contact qui doivent être constamment cisailées pour assurer le mouvement de frottement. La résistance engendrée par le labourage mécanique de ces aspérités impose, alors, la prise en compte de la topographie de la surface dans le calcul du coefficient de frottement. Cela devient d'autant plus important que le contact se situe à la frontière entre les contacts basses pressions ou contacts surfaciques et ceux à hautes pressions ou contacts hertziens. De plus, dans cette typologie de contact, l'intervention du lubrifiant devient prépondérante. L'épaisseur du film d'huile dépend non seulement de la hauteur et de la densité des aspérités, mais également de leur forme, de leur « acuité » et de l'orientation des sillons. Une surface grossière et rugueuse du cylindre est synonyme d'un frottement élevé avec un fort taux d'usure (facteur défavorable) même si elle présente une grande capacité de rétention de l'huile de lubrification [92]. Ainsi une typologie intermédiaire et spécifique de surface du cylindre est nécessaire pour minimiser frottement et usure dans l'objectif d'accroître la durabilité du moteur.

Nous allons, dans cette section, utiliser un modèle numérique 3D du contact hydrodynamique SPF pour étudier la réponse au frottement segment/fût en relation avec la texture de la surface usinée. Ce modèle a été introduit dans [93,94] par Caciù. L'écoulement du fluide à l'intérieur du contact sera étudié à l'aide des équations de Reynolds et de Navier-Stokes. Il tiendra compte de la texture des stries et des paramètres géométriques et physiques du contact.

1. Description du modèle de contact hydrodynamique

Le modèle considéré ici consiste à mettre en contact une surface plane P et une surface rugueuse R comme illustré dans la figure 101. Cette représentation est une simplification du contact réel car les profils de segments présentent en général une légère courbure afin de créer de la portance et permettre un contact hydrodynamique. La rugosité du segment est également négligée car elle est nettement inférieure à celle de la surface du fût. On étudiera l'écoulement d'un film mince de fluide visqueux incompressible occupant à l'instant t un domaine horizontal limité supérieurement par une plaque lisse P et inférieurement par une surface rugueuse R . L'épaisseur du film d'huile $h(x_1, x_2)$ est définie dans le domaine Ω variant selon l'axe Ox_1 de 0 à l_1 et suivant l'axe Ox_2 de 0 à l_2 . La surface plane est animée d'une vitesse " u_1 " suivant l'axe Ox_1 alors que la surface rugueuse R est statique. Le modèle sera limité au plan (x_1, x_2) car les variations sont considérablement plus petites dans la direction x_3

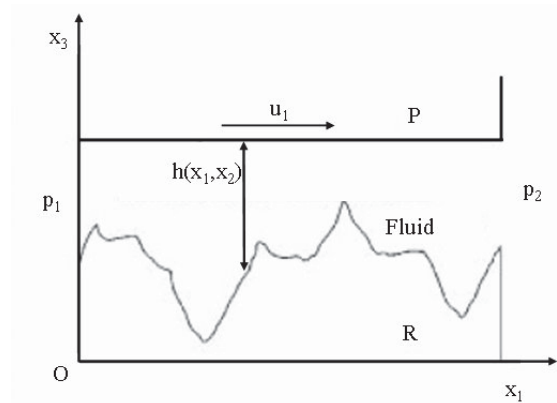


Figure 101. Schématisation du modèle de contact entre une surface rugueuse R et une surface plane P pour la simulation du contact SPF.

Le contact hydrodynamique est simulé par l'équation de Reynolds suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x_2} \right) = 6\mu\rho u_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} \quad (38)$$

Avec " h " l'épaisseur du film d'huile, " p " la pression appliquée, " μ " la viscosité de l'huile, " ρ " la densité de l'huile and " u_1 " la vitesse de glissement de la surface plane P .

Pour assurer la stabilité numérique du modèle, des variables adimensionnelles sont utilisées. Le champ de pression est alors normalisé par la pression atmosphérique. Une longueur caractéristique " h_m " a aussi été définie pour normaliser l'épaisseur du film d'huile. On note alors:

$$P = \frac{p}{p_0}; X_1 = \frac{x_1}{h_m}; X_2 = \frac{x_2}{h_m}; H = \frac{h}{h_m} \quad (39)$$

L'équation de Reynolds (38) devient donc :

$$\frac{\partial}{\partial X_1} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial X_1} \right) + \frac{\partial}{\partial X_2} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial X_2} \right) = \lambda \frac{\partial H}{\partial X_1} \quad (40)$$

Avec “ λ ” le Nombre de Portance (Bearing Number) défini comme étant égal à $\frac{6\mu\rho_0 u_1}{h_m p_0}$.

La formulation mathématique du modèle et sa résolution s'accompagnent d'un certain nombre d'hypothèses que voici :

- Le fluide est considéré comme Newtonien et incompressible. Cela implique que les vitesses sont supposées faibles devant celle du son et que les phénomènes ondulatoires sont négligés ;
- La thermodynamique ne joue aucun rôle, les paramètres physiques caractéristiques du fluide (masse volumique ρ , viscosité $\mu=0.04$ Pa.s) sont des grandeurs considérées comme constantes ;
- Les conditions aux limites suivantes sont imposées pour les pressions :

$$\begin{cases} p(0, x_2) = p_1 = p_0 \\ p(l_1, x_2) = p_2 = p_0 \end{cases} \quad (41)$$

- Toute réaction chimique est exclue dans le fluide supposé monophasique ;
- Le fluide adhère totalement aux surfaces solides ;
- Des conditions périodiques ou les conditions restrictives de Dirichlet ont été imposées le long de l'axe “ Ox_2 ” ;
- Les conditions de cavitation du fluide (c'est-à-dire la formation de cavités gazeuses dans les régions divergentes du film fluide) sont celles de Reynolds ou Swift-Steiber, qui préconisent que le gradient de pression dans la direction de la normale à l'interface fluide-cavité est nul :

$$\begin{cases} p = p_{cav} \\ \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (42)$$

Avec “ p_{cav} ” la pression de saturation généralement définie par la pression atmosphérique et n la normale à l'interface fluide-solide en chaque point x .

2. Procédure numérique de résolution

L'équation de Reynolds (équation 40) est résolue sur le domaine Ω avec les conditions aux limites de type Dirichlet. Pour cela, on emploie la même méthode numérique que Caciù et al. dans leur étude du contact Segment/Chemise en travaillant avec les différences finies [94]. Notons aussi la prise en compte de la forme du segment comme illustré dans la figure 102. L'épaisseur du film d'huile considérée est alors exprimée par l'équation suivante :

$$h(x_1, x_2) = h_0 + \frac{x_1^2}{2Rx_1} + \frac{x_2^2}{2Rx_2} + Rh(x_1, x_2) \quad (43)$$

Avec Rx_1 et Rx_2 les rayons de courbure dans les deux directions respectives Ox_1 et Ox_2 , $Rh(x_1, x_2)$ l'amplitude de la surface à la position de coordonnées (x_1, x_2) et h_0 une constante caractéristique de séparation entre les deux corps chemise/piston.

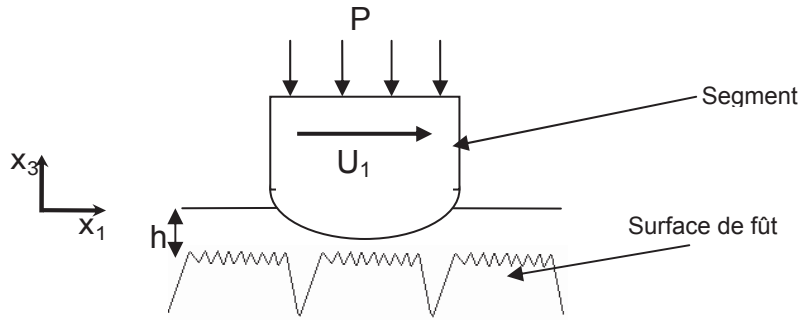


Figure 102. Description du contact SPF

L'épaisseur du film d'huile est définie par la topographie 3D de la surface rodée. Le champ de distribution de l'épaisseur du film d'huile est ensuite injecté dans l'équation 40 pour le calcul de celui des pressions. Couplant la résolution de l'équation de Reynolds et les propriétés du fluide, les forces normales et tangentielles exercées par le fluide et le coefficient de frottement sont ensuite définis. Le coefficient de frottement est alors formulé comme suit [94]:

$$f_{cx,i} = \frac{\int_{\Omega} \tau_{x_1x_2,i} d\Omega}{W}, \quad i = 1 \text{ or } 2 \quad (44)$$

avec $\tau_{x_1x_2,i} = \mu \dot{\gamma}_{x_1x_2,i}$

$$\text{et } \dot{\gamma}_{x_1x_2,i} = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x_1} (2x_{3,i} - h) + \frac{u_1 - u_2}{h}$$

le cas $i = 1$ correspond à la surface plane et $i = 2$ fait référence à la surface rugueuse ; u_1 et u_2 correspondent respectivement aux vitesses de glissement de la surface plane et de la surface rugueuse ($u_2 = 0$).

□□□rocessus de génération des sur□aces simulées

Il est à préciser que le choix d'étude du contact SPF émane de la complexité d'atteinte de surfaces parfaitement similaires. La propriété de distribution aléatoire des grains dans la pierre abrasive rend difficile l'obtention de surfaces avec exactement les mêmes distributions, concentrations et formes des stries. Aussi, nous avons choisi d'employer les paramètres de caractérisation de l'aspect définis dans ce travail pour générer des surfaces à propriétés texturales maîtrisées.

Les surfaces sont simulées à partir des éléments texturaux suivants (figure 103):

- l'angle de rodage θ ;
- le nombre des stries déterminé à partir du paramètre de la densité des stries Ds ;
- la distribution des stries définie par le coefficient de striation Rs (répartition des stries droites par rapport aux stries de gauche) ;
- la largeur des stries « l » fixée à $25\mu\text{m}$;
- la profondeur des stries maintenue ici constante.

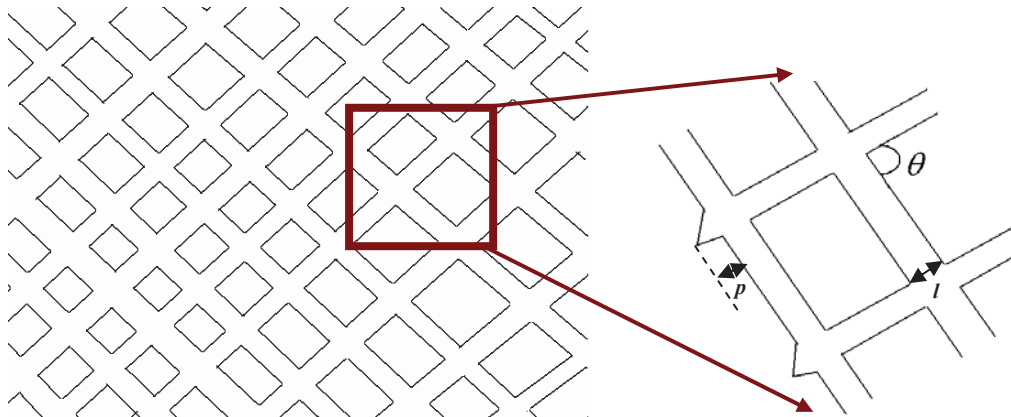


Figure 103. Illustration des surfaces simulées.

1.1. Effet de l'aspect de surface sur le frottement dans le système

1.1.1. Effet de l'angle de rodage

L'étude de l'effet de l'angle de rodage sur la fonctionnalité de la surface a souvent été reliée à la consommation d'huile. Des études expérimentales sur des bancs moteurs ont montré que la consommation d'huile peut être réduite en augmentant l'angle de rodage [95]. L'effet de ce dernier sur le frottement n'a, toutefois, pas été abordé. La simulation de différentes surfaces 3D avec des angles de rodage variables (figure 104) et son implémentation dans le modèle défini ci-haut a permis de montrer l'impact de l'angle de rodage sur le coefficient de frottement à iso distribution des hauteurs de la surface. La figure 105 montre qu'il existe deux minimas du coefficient de frottement pour deux intervalles d'angles à $[40^\circ-55^\circ]$ et $[115^\circ-130^\circ]$. Il est à noter que ces deux intervalles correspondent respectivement aux deux procédés classiques de rodage plateau et rodage hélico-glissant. D'autres études expérimentales, ont montré, par ailleurs, que la réduction de l'angle de rodage augmente la surface réelle de contact ce qui favorise les risques de grippage. Il semblerait, ainsi, que le rodage hélico-glissant $[115^\circ-130^\circ]$ offre un meilleur compromis entre les performances globales du moteur.

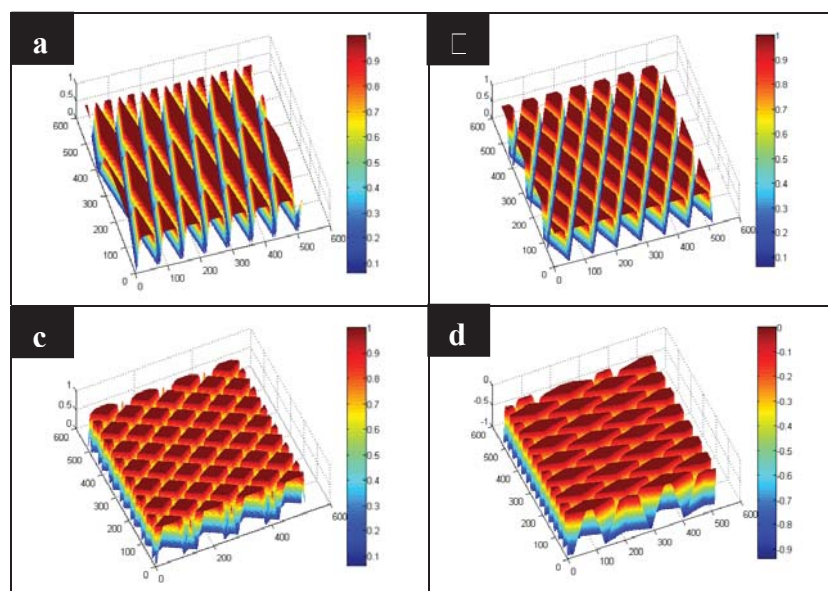


Figure 104. Différentes surfaces simulées avec différents angles de rodage : (a) 20° , (b) 50° , (c) 120° et (d) 160°

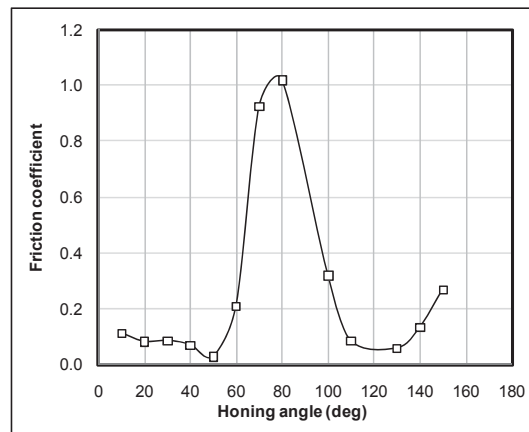


Figure 105. Impact de l'angle de rodage sur le coefficient de frottement

3.4.2. Effet de la densité des stries

Le paramètre de densité de stries “Ds” a été défini pour différentes surfaces issues du rodage plateau dans un intervalle variant de 16 à 42 stries/mm². L'influence de ce paramètre sur le coefficient de frottement est rapportée sur la figure 106.

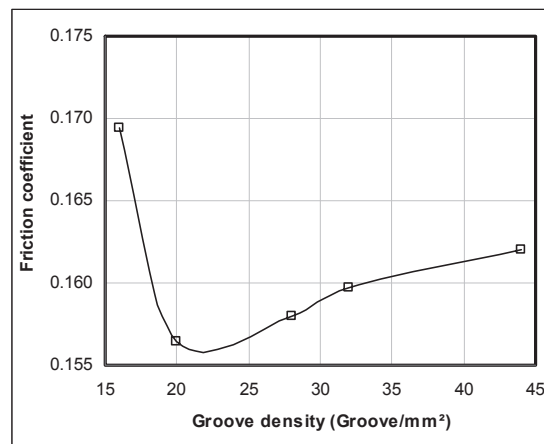


Figure 106. Effet de la densité des stries Ds sur le coefficient de frottement

Les conditions optimales de frottement sont obtenues pour les surfaces de densité de stries comprises entre 20 et 30 stries/mm². L'augmentation du coefficient de frottement en diminuant la densité de stries est, en effet, due à la réduction de la pression d'écoulement du fluide. Celle-ci altère la viscosité effective de l'huile et crée des zones de blocage de glissement entre le segment et la surface du fût. L'augmentation de la densité des stries montre certes une nette réduction du coefficient de frottement mais engendre une grande consommation d'huile par l'augmentation du nombre des canaux de rétention d'huile [96].

3.4.3. Effet du coefficient de striation

Le coefficient de striation définit le balancement total de la surface (figure 107). Ce paramètre est directement relié à la distribution et la consommation de l'huile.

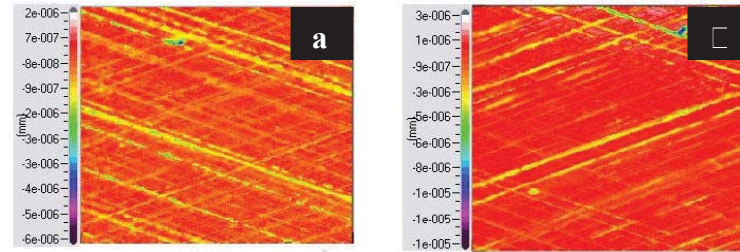


Figure 107. (a) stries balancées (surface conforme) (b) stries non balancées (surface non conforme)

Le coefficient de frottement a été étudié en variant le coefficient de striation (figure 108). Il en ressort que le coefficient de frottement augmente d'une façon exponentielle avec le coefficient de striation. Le plus faible frottement est défini pour des surfaces parfaitement balancées ($R_s = 0.5$).

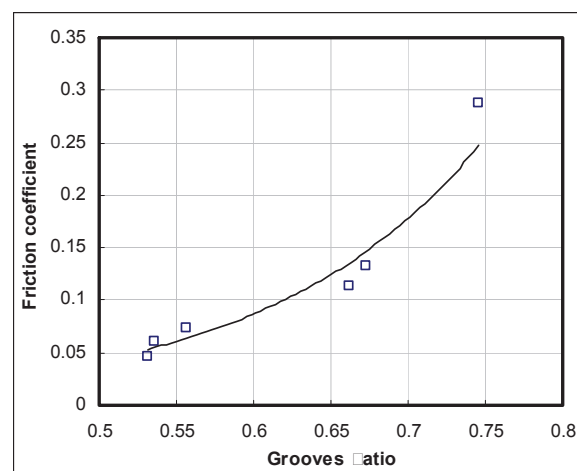


Figure 108. Evolution du coefficient de frottement avec le coefficient de striation R_s

4. Conclusion

Nous avons démontré la robustesse de l'approche développée dans ce travail de thèse par deux applications de conception Process/produit.

La première a montré que la production est plus régulière avec le diamant métallique et que l'effet de la vitesse d'expansion sur la rugosité est réduit. L'introduction de nouvelles structures à base de grains diamant agglomérés dans des liants vitrifiés et résinoides a mis en

évidence l'impact considérable du liant dans l'amélioration de la qualité des surfaces rodées par rapport à l'utilisation d'un superabrasive diamant métallique. Toutefois, des optimisations supplémentaires sont à apporter aux liants, notamment au revêtement des grains dans le cas des pierres à liant résinoïde, pour augmenter leur durée de vie et les industrialiser.

La seconde application a montré l'impact des composantes texturales sur les performances de frottement du tribosystème SPF. La génération de surfaces -à partir des paramètres d'aspect d'angle de rodage, de densité des stries D_s et de coefficient de striation R_s - ainsi que leur implémentation dans un modèle de simulation du contact hydrodynamique SPF a permis de proposer des textures de surfaces optimales. Celles-ci incluent :

- des stries définies dans des intervalles d'angle de rodage à $[40^\circ-55^\circ]$ ou $[115^\circ-130^\circ]$;
- des stries balancées ($R_s = 0.5$) dans ce cas de segmentation;
- des stries à densité supérieure à 20 stries/mm^2 .

Même si ce modèle se propose de rester le plus générique possible, tenant compte de la complexité des phénomènes à l'intérieur du contact et des hypothèses simplificatrices posées, on a donné des configurations de textures de surfaces optimales pour réduire le coefficient de frottement. En travaillant, ensuite, avec des modèles plus élaborés du contact (incluant la rugosité et la variation de la viscosité de l'huile par exemple), il serait possible, in fine, d'aboutir à des relations -les plus proches possible du réel de fonctionnement- entre les différents attributs de la texture des surfaces et les performances moteurs en consommation d'huile et en frottement.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux de recherche, objet du présent mémoire, ont porté sur deux principaux axes :

- un axe relatif à la compréhension du process de rodage en s'affranchissant de l'empirisme qui le caractérise et en définissant les actions physiques mises en jeu pour finir les fûts de carter cylindre ;
- un deuxième axe traitant la problématique des limitations des approches de caractérisation de ces finis de surface face aux exigences du produit. Cet axe a permis de déployer un nouvel outil de caractérisation multi-échelle pour explorer, de façon vigoureuse, la signature du process de rodage.

Le premier chapitre a fait ressortir l'insuffisance des travaux scientifiques sur l'étude du procédé de rodage. Ils sont usuellement basés sur des séries d'expérimentations à différentes conditions opératoires. Ajoutons à cela, qu'ils sont fondés sur des expertises de la qualité de la surface via des paramètres arithmétiques de rugosité et des inspections visuelles assez subjectives. Il existe, certes, des études qui ont tenté d'optimiser ces paramètres, notamment avec des décompositions plateaux/vallées ou l'utilisation de la transformée de Fourier. Toutefois, elles restent incomplètes et difficiles à mettre en place dans une configuration industrielle.

Nous avons alors proposé, dans ce travail, une méthodologie expérimentale à l'échelle de production avec des moyens d'expertise in-situ via une instrumentation des opérations d'usinage, et ex-situ avec une analyse poussée de la qualité des surfaces.

La méthodologie de caractérisation des surfaces est établie à partir d'une prise en compte de la variation des irrégularités et distorsions texturales de la surface à différentes échelles (longueurs d'ondes d'analyse). Ainsi, une décomposition multi-échelle par ondelettes de Morlet 1D, dont le choix a été justifié en comparaison avec d'autres types d'ondelettes, a été mise en place. Cette approche permet de remplacer les paramètres classiques de caractérisation par des spectres d'évolution de la rugosité en fonction de la composante fréquentielle de la surface. Pour compléter notre approche, nous avons également introduit

des paramètres d'évaluation quantitative de la surface par la transformée de $\square$ adon et la D $\square$ P en termes de densité, d'orientation et balancement des stries.

Cette méthodologie a été employée pour l'investigation de l'impact des paramètres process d'influence majeure sur les performances du process et pour la définition de la signature multi-échelle du process. Les mécanismes physiques activés ont été définis en liaison avec les échelles d'influence. Au final, l'action du process de rodage agit par une première augmentation de la composante de frottement pendant le premier tiers du temps de contact pierre/fût donnant lieu à un labourage. $\square$ nsuite, cette composition se stabilise en fonction des paramètres process pour passer à une action de micro-coupe dont l'intensité dépendra du pouvoir d'indentation des pierres et leurs propriétés de friabilité et régénération. L'enchaînement de ces actions produit une surface dont les caractéristiques géométriques dépendront ou pas de l'échelle.

La possibilité de réduction des essais nécessaires à la détermination de la granulométrie à utiliser pour chaque spécification produit a également été démontrée. La définition de l'échelle caractéristique de la rugosité maximale à l'étape de rodage ébauche permet, en effet, de prédire la taille de grain optimale de carbure de silicium à utiliser en rodage finition.

Le degré d'impact de la vitesse d'expansion et la vitesse de coupe a, par ailleurs, été précisé. Ces deux paramètres auront un rôle principal de réduction de l'amplitude de la rugosité.

Nous avons, enfin, conclu par des applications de l'approche de caractérisation développée à des cas de conception process et produit.

Au niveau du process, il s'agissait d'étudier le rodage diamant avec des pierres classiques à liant métallique pour ensuite analyser des structures optimisées à base de grains diamant agglomérés dans des liants vitrifiés et résinoïdes. Les modes d'usure des pierres et l'accommodation des micro-copeaux dépendront fortement du degré d'ouverture de la structure du liant ainsi que de l'énergie de rupture de la liaison grain/matrice du liant. Les pierres à liant résinoïde présentent des caractéristiques prometteuses mais des optimisations supplémentaires sont requises au niveau du revêtement employé pour augmenter leur durée de vie.

Au niveau du produit, l'impact des composantes texturales de la surface sur les performances de frottement dans le système $\square$ PF a été précisé. Pour ce faire, des surfaces simulées à partir des paramètres d'aspect définis dans ce travail ont été injectées dans un modèle de simulation du contact hydrodynamique du système $\square$ PF.

$\square$ ne approche de corrélation directe Process/Produit est maintenant nécessaire pour définir les intervalles de tolérances des nouveaux paramètres définis de manière à prendre en compte la

nature compliquée du contact segment/fût. Cette action pourra, notamment, servir à définir la gamme process à utiliser et son impact direct sur la fonctionnalité. Nous pensons ici à l'utilisation de cette approche pour la compréhension des nouveaux process comme le rodage hélico-glissant en relation avec les performances de consommation d'huile et de frottement.

L'application de l'outil d'analyse proposé peut, de surcroît, être étendue à d'autres process de finition et d'autres pièces du moteur. Des études de cas industriels sur pignons et sur les procédés de toilage et rectification en sont un exemple (voir annexe 3).

Il peut aussi être déployé comme moyen de contrôle en production pour diagnostiquer les dérives du process et localiser les échelles spécifiques d'influence.

Année de formation scientifique

Publications dans des revues internationales

- [1] M. El Mansori, A. Mezghani, L. Labri, A. Ahouani, On the concept of process signature in the analysis of multi-stage surface formation, Surface Engineering, April 2017, Volume 23, Number 3, p. 233-243.
- [2] L. Labri, M. El Mansori, Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools, Surface and Coatings Technology, 15 December 2017, Volume 328, Issues 2-3, p. 1000-1008
- [3] L. Labri, A. Mezghani, M. El Mansori, A. Ahouani, Multiscale study of finish-honing process in mass production of cylinder liner, near, April 2017 (In press).

Publications dans des revues nationales

- [1] L. Labri, A. Mezghani, M. El Mansori, Optimisation fonctionnelle de production par rodage des surfaces des fûts de moteur, Mécanique & Industries, 2017 (In press).

Ensemble de lea

- [1] L. Labri, M. El Mansori, A. Mezghani, A. Le-Lan, Combinaison de pierres de carbure de silicium vitrifié avec des pierres en diamant vitrifié dans un rodoir de fût de carters cylindre, 2017, No. P-2017-0000
- [2] L. Labri, M. El Mansori, A. Mezghani, Méthodologie de contrôle non destructif de surfaces fonctionnelles, 2017, No. P-2017-3001.

Publications dans des congrès internationaux

- [1] L. Labri, A. Mezghani, M. El Mansori, A. Le Lan, D.N. Tommaso, 3D Multi-scale Topography Analysis in Specifying Quality of Honed Surfaces, AMPT: Advanced Energy Systems; Advanced and Digital Manufacturing; Advanced Materials; Aerospace, 2017, Volume 1, p. 23-33
- [2] M. El Mansori, A. Mezghani, L. Labri, A. Ahouani, On the concept of process signature in the analysis of multi-stage surface formation, Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT 2017) Conference, Manama, Bahrain, 10-11 Nov. 2017

- 3 P. Covington, L. abri, . Le Lan, Macroscopic cylinder honing process simulation, 1th CI^P conference on Modelling of Machining ^{op}érations, Donostia-San-Sebastien, Espagne, 1^{er} Mai, 2000
- L. abri, M. Mansori, Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools, proceedings of the 3th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF), San Diego, California, USA, April 22-May 1, 2000
- L. abri, Mezghani, M. Mansori, . Le Lan, Toward an objective 3D description for quality assessment of manufactured honed surfaces, Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, 2000, Volume 3, p. 1-2
- L. abri, Mezghani, . ahouani, M. Mansori, Scaling effects on the quality assessment for honed surface in cylinder liner production, 1th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Gueszo, Pologne, 1^{er} July 2000, p.133-134
- L. abri, Mezghani, M. Mansori, A study on the influence of bond material on honing engine cylinder bores with diamond coated stones, proceedings of the 3th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF), San Diego, California, USA, April 22-April 30, 2000

Innove 2 Ensembles de pierres démontables

Ensemble de pierres Combinaison de pierres de carbure de silicium vitrifié avec des pierres en diamant vitrifié dans un rodoir de fût de carters cylindre.

Problème technique

Dans les procédés de rodage, un compromis est généralement fait d'une façon empirique afin de choisir les pierres de rodage à utiliser pour une spécification produit donnée. Il s'agit d'un compromis entre la qualité fonctionnelle de surface recherchée et les performances du process en termes de productivité et coût (durée de vie des pierres).

Etat de la technique

En production, le rodage classique des fûts de carter-cylindre en fonte grise est réalisé avec deux types de pierres de rodage (figure 1.a et 1.b) :

- pierres en Carbure de Silicium Vitrifié qui produisent une bonne texture de surface respectant les spécifications fonctionnelles imposées par le plan BE mais au détriment d'une faible durée de vie des pierres*
- pierres en Diamant Métallique qui génèrent des surfaces avec un aspect de surface dégradé du à la présence d'irrégularités de surfaces comme les manteaux de tôle mais avec une meilleure durée de vie des pierres*

Avantages et fonctionnement de votre invention

A partir d'une étude expérimentale réalisée pour le développement d'une nouvelle pierre combinant les propriétés d'accommodation de copeaux d'un liant vitrifié à celles d'une grande dureté d'un grain diamant, nous avons montré la capacité du process en terme de productivité avec des pierres en Diamant Vitrifié (illustrée en figure 1.c). L'analyse des résultats de variabilité du process et des performances relatives au taux d'enlèvement de matière et la qualité de surface obtenue a montré le potentiel de ces pierres pour obtenir une qualité de référence avec une meilleure efficacité process. A partir de ces constats, nous proposons de combiner dans un même rodoir des pierres de Carbure de Silicium Vitrifié avec des pierres en Diamant Vitrifié selon les variantes suivantes :

- Alternance d'une pierre Carbure de Silicium/ pierre Diamant Vitrifié : figure 2.a
- Superposition d'une pierre Carbure de Silicium Vitrifié/ pierre Diamant Vitrifié : figure 2.b

Ces solutions permettront d'atteindre simultanément une meilleure qualité de surface avec une durée de vie optimale de pierres et taux d'enlèvement de matière plus élevés.

Présentation des figures ou photos

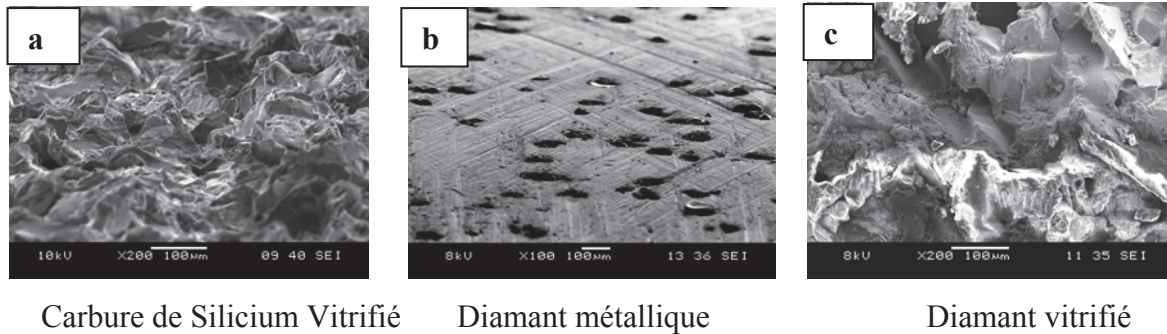


Figure 1 : Images MEB de différentes pierres de rodage

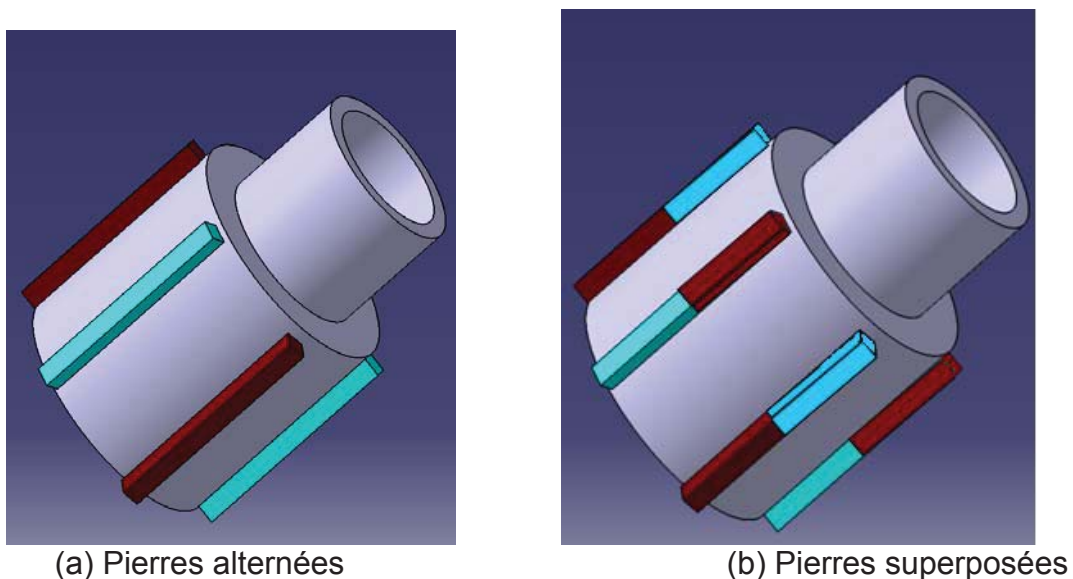


Figure 2 : illustration de la disposition des pierres de rodage

Observations sur la solution retenue

Point à améliorer : trouver un meilleur compromis entre productivité du process (tenue des pierres) et qualité de la texture de la surface recherchée.

Application de l'invention

*La solution peut être appliquée au rodage des fûts de carter cylindre aux étapes de rodage ébauche et finition.
Elle peut également permettre de supprimer une des trois étapes de rodage.*

Point d'avancement de l'invention

- ☐ es essais instrumentés ont été réalisés pour l'étude de chacune de ces pierres.
- ☐ autres essais sont programmés pour valider la solution retenue.

La mesure d'état de surface par profilométrie 2D et l'aspect de surface fonctionnelle

Problème technique

La qualité de surface est souvent évaluée à l'aide d'une mesure d'état de surface par profilométrie 2D associée à une visualisation d'aspect au microscope. Or une mesure de profil 2D ne peut être représentative de la surface elle-même que sous certaines conditions d'isotropie. Cette configuration est loin d'être adaptée aux surfaces anisotropes que sont les surfaces des carters cylindres rodés. Ainsi l'analyse profilométrique 2D peut induire à des corrélations peu marquantes entre les paramètres d'état de surface, les facteurs fonctionnels de qualité et les variables process. À titre d'exemple, des mesures profilométriques ont été réalisées pour des surfaces rodées ayant deux angles différents : respectivement 130° et 50°. La figure suivante montre la sensibilité des paramètres M_q (q critère de rodage, r critère de lubrification, f critère de fonctionnement) à l'angle de rodage.

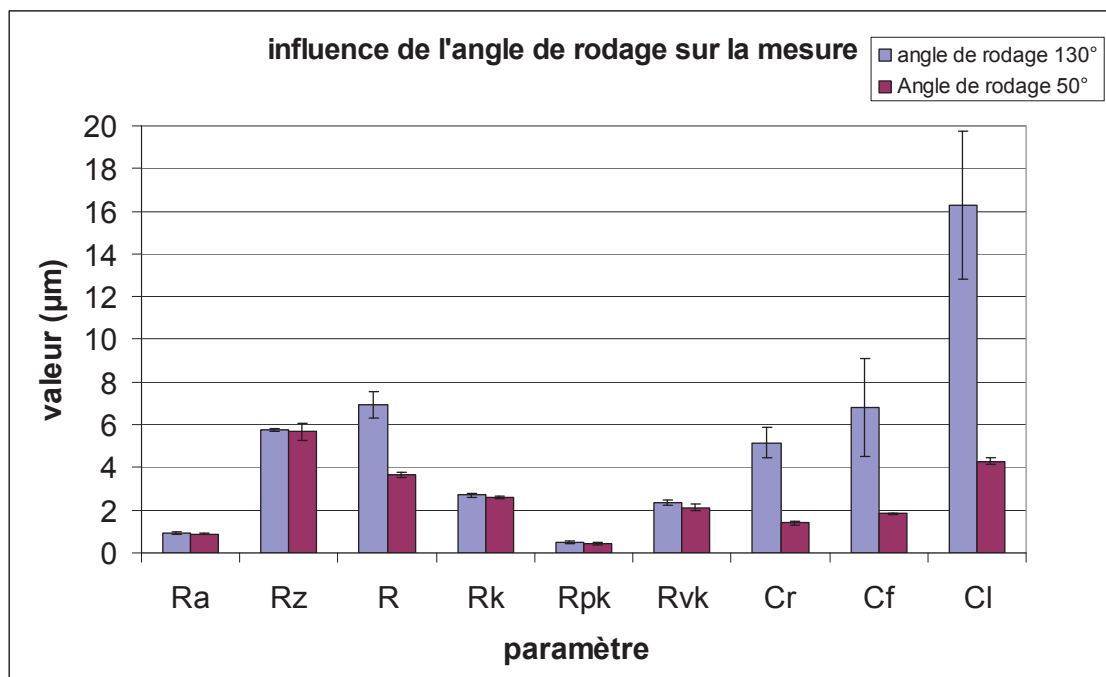


Figure 1: Influence de l'angle de rodage sur les mesures 2D

L'application de cette caractérisation, actuellement utilisée par Renault et par un grand nombre de constructeurs automobiles, contraint à considérer les surfaces ayant un angle de rodage 130° non conformes. Toutefois, des tests moteurs et des publications scientifiques témoignent de la qualité de ces surfaces en matière de lubrification et de réduction d'usure.

Le surcroît, l'emploi d'une caractérisation d'aspect par une visualisation au microscope et une notation de qualité 1, 2, 3 et 4 pose irrémédiablement des problèmes de subjectivité et de manque de rigueur.

Dans ce cas, le développement d'une méthodologie de mesure de surfaces et l'analyse de la texture est inextricable. Grâce à la popularisation des systèmes de mesure de topographie 3D, il a été possible de **mettre en place une approche de**

mesure permettant une meilleure appréciation de la qualité de la surface rodée elle-même présente l'avantage d'utiliser un contrôle non destructif pour obtenir une quantification fiable et objective de la surface.

Etat de la technique

La méthodologie industrielle de contrôle de qualité des surfaces rodées est aujourd'hui basée sur :

- ✓ une caractérisation de l'état de surface par une mesure profilométrique [2]
- ✓ une caractérisation d'aspect de surface par la méthode du fax-film¹

Avantages et fonctionnement de votre invention

La première étape de la procédure est le nettoyage de la surface à mesurer afin d'éliminer les traces d'huile. La réplique est réalisée en utilisant du ILFL. Le produit est composé de trois constituants : un produit pâteux, un catalyseur, un adoucisseur (thinner). La prise d'empreinte est réalisée sur la surface à analyser avec 10 à 20 grammes de mastic élastomère ilflo (Flexico, avis ealtcare services Ltd) mélangés préalablement à la spatule avec 10 à 20 gouttes de catalyseur et une goutte d'adoucisseur. Le mélange est étalé sur la surface usinée de la chemise au niveau du point milieu du côté poussé. La surface du dessous de l'empreinte est lissée afin de faciliter sa pose par la suite pour le mesurage. Après quelques minutes, la pâte de la réplique durcit. Elle est retirée délicatement. L'empreinte obtenue sur la réplique représente alors la topographie inversée de la surface de la chemise.

Le relevé topographique de la surface chemise moteur est réalisé sur la réplique avec un interféromètre optique à lumière blanche (Mettler, MTEC). La surface totale obtenue est le résultat d'un recollement de images (stitching) en adoptant un taux de recouvrement de 10%. Ce taux de recouvrement important permet de minimiser les défauts de recollage d'images au minimum. L'image topographique obtenue possède les caractéristiques suivantes : elle a une dimension de 1.0mmx2.0mm correspondant à 1000 points dans le sens de la génératrice (sens de déplacement du piston) et de 1000 points dans la seconde direction avec un pas de 0.001mm. La reproductibilité des mesures obtenues a été vérifiée sur une série de cinq mesures pour quatre répliques. Les résultats sont reportés sur la figure 2.

¹ Le fax-film est obtenu par élévation d'une empreinte de surface par acétate et visualisation au microscope.

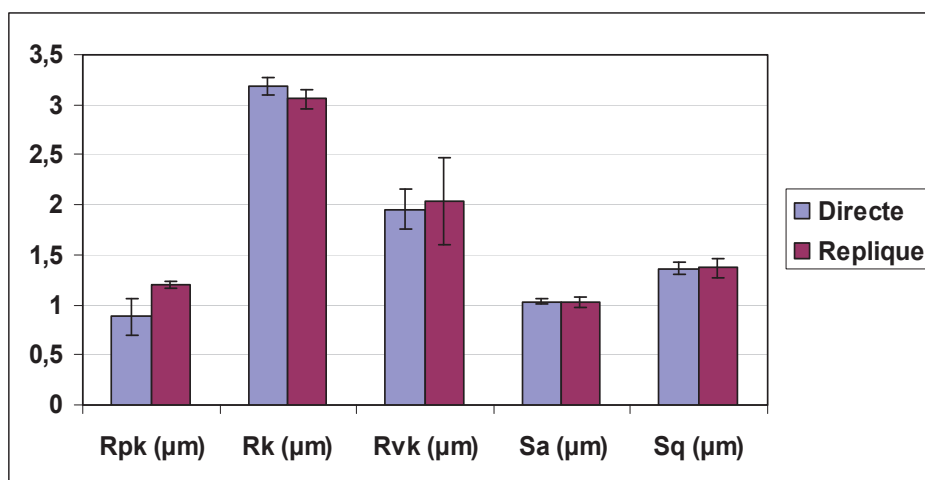


Figure 2 : reproductibilité de la mesure par répliques

Ainsi, **partant d'un seul relevé de surface, plusieurs paramètres sont définis pour permettre une qualification objective de la qualité de surface de chemise moteur**. Ils sont issus de différentes approches d'analyse et peuvent être classés en deux groupes :

- ✓ Paramètres d'état de surface : ils caractérisent la morphologie de la surface ;
- ✓ Paramètres d'aspect : ils caractérisent la texture de la surface.

Présentation des figures ou photos

La figure 3 illustre un exemple d'empreinte relevée sur une surface d'un cylindre interne.

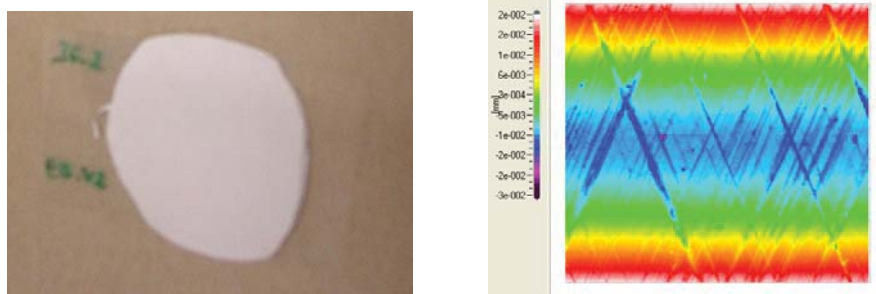


Figure 3 : Exemple d'empreinte SILFLO réalisée sur une surface rodée et sa vue 2D à analyser

Observations sur la solution retenue

Point à améliorer : Exploitation des données topographiques en post traitement

Solutions non retenues

- Fax-film
- Résines rigides

Application de l'invention

Cette invention concerne la mise en œuvre d'une méthodologie de **contrôle objectif et non-destructif** des surfaces fonctionnelles. Elle a été validée dans le cas des surfaces de fûts de carter et peut être étendue au contrôle des autres pièces du moteur vilebrequins denture de roues de vitesses.

Point d'avancement de l'invention

Cette méthodologie de contrôle est actuellement exploitée dans le cadre de la thèse IFRE REILL.

Un standard d'exploitation sur des pièces en série est en cours de rédaction.

Un logiciel métiers pour le post traitement des données topographiques de l'empreinte état et aspect de surface est en cours de développement.

Annexe 3 : Etude de cas industriels

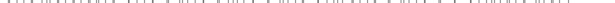
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Cas 1 : Détection des dérives de la gamme de fabrication des cônes des pignons fous de boîte de vitesses automobile

Contexte du cas industriel

[illegible]

Objectifs de l'étude

- ☐ 
- ☐ 
- ☐ ☐  

Démarche suivie

☐ _____

☐ _____

☐ _____

Démarche suivie

☐ _____

☐ _____

☐ _____

☐ _____

☐ _____

□ résultats et conclusions

Cas 3 : Chiffrage d'une idée Concrète de Production basée sur l'introduction de l'analyse multi-échelle à l'étape de rodage ébauche pour réduire les essais de mise au point

Objectifs de l'étude

[illegible]

□ résultats et conclusions

[illegible]

Références bibliographiques

[illegible][illegible][illegible][illegible]

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 104






A barcode consisting of a series of vertical black bars of varying widths, used for document identification.

11

[illegible][illegible]

[illegible]

1. 在下列各题中，选择正确的答案，将序号填入括号内。
 () 1. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 2. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 3. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 4. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 5. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 6. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 7. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 8. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 9. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 10. 下列各数中，最大的数是 ()

[illegible]

1. 2019 年 12 月 31 日，甲公司“应付账款”科目所属各明细科目期末贷方余额如下表所示：

应付账款明细科目	期末贷方余额（元）
应付账款——A 公司	100,000
应付账款——B 公司	200,000
应付账款——C 公司	300,000
应付账款——D 公司	400,000
应付账款——E 公司	500,000
应付账款——F 公司	600,000
应付账款——G 公司	700,000
应付账款——H 公司	800,000
应付账款——I 公司	900,000
应付账款——J 公司	1,000,000
应付账款——K 公司	1,100,000
应付账款——L 公司	1,200,000
应付账款——M 公司	1,300,000
应付账款——N 公司	1,400,000
应付账款——O 公司	1,500,000
应付账款——P 公司	1,600,000
应付账款——Q 公司	1,700,000
应付账款——R 公司	1,800,000
应付账款——S 公司	1,900,000
应付账款——T 公司	2,000,000
应付账款——U 公司	2,100,000
应付账款——V 公司	2,200,000
应付账款——W 公司	2,300,000
应付账款——X 公司	2,400,000
应付账款——Y 公司	2,500,000
应付账款——Z 公司	2,600,000
应付账款——合计	27,000,000

2. 2019 年 12 月 31 日，甲公司“应收账款”科目所属各明细科目期末借方余额如下表所示：

应收账款明细科目	期末借方余额（元）
应收账款——A 公司	100,000
应收账款——B 公司	200,000
应收账款——C 公司	300,000
应收账款——D 公司	400,000
应收账款——E 公司	500,000
应收账款——F 公司	600,000
应收账款——G 公司	700,000
应收账款——H 公司	800,000
应收账款——I 公司	900,000
应收账款——J 公司	1,000,000
应收账款——K 公司	1,100,000
应收账款——L 公司	1,200,000
应收账款——M 公司	1,300,000
应收账款——N 公司	1,400,000
应收账款——O 公司	1,500,000
应收账款——P 公司	1,600,000
应收账款——Q 公司	1,700,000
应收账款——R 公司	1,800,000
应收账款——S 公司	1,900,000
应收账款——T 公司	2,000,000
应收账款——U 公司	2,100,000
应收账款——V 公司	2,200,000
应收账款——W 公司	2,300,000
应收账款——X 公司	2,400,000
应收账款——Y 公司	2,500,000
应收账款——Z 公司	2,600,000
应收账款——合计	27,000,000

3. 2019 年 12 月 31 日，甲公司“预收账款”科目所属各明细科目期末贷方余额如下表所示：

预收账款明细科目	期末贷方余额（元）
预收账款——A 公司	100,000
预收账款——B 公司	200,000
预收账款——C 公司	300,000
预收账款——D 公司	400,000
预收账款——E 公司	500,000
预收账款——F 公司	600,000
预收账款——G 公司	700,000
预收账款——H 公司	800,000
预收账款——I 公司	900,000
预收账款——J 公司	1,000,000
预收账款——K 公司	1,100,000
预收账款——L 公司	1,200,000
预收账款——M 公司	1,300,000
预收账款——N 公司	1,400,000
预收账款——O 公司	1,500,000
预收账款——P 公司	1,600,000
预收账款——Q 公司	1,700,000
预收账款——R 公司	1,800,000
预收账款——S 公司	1,900,000
预收账款——T 公司	2,000,000
预收账款——U 公司	2,100,000
预收账款——V 公司	2,200,000
预收账款——W 公司	2,300,000
预收账款——X 公司	2,400,000
预收账款——Y 公司	2,500,000
预收账款——Z 公司	2,600,000
预收账款——合计	27,000,000

4. 2019 年 12 月 31 日，甲公司“预付账款”科目所属各明细科目期末借方余额如下表所示：

预付账款明细科目	期末借方余额（元）
预付账款——A 公司	100,000
预付账款——B 公司	200,000
预付账款——C 公司	300,000
预付账款——D 公司	400,000
预付账款——E 公司	500,000
预付账款——F 公司	600,000
预付账款——G 公司	700,000
预付账款——H 公司	800,000
预付账款——I 公司	900,000
预付账款——J 公司	1,000,000
预付账款——K 公司	1,100,000
预付账款——L 公司	1,200,000
预付账款——M 公司	1,300,000
预付账款——N 公司	1,400,000
预付账款——O 公司	1,500,000
预付账款——P 公司	1,600,000
预付账款——Q 公司	1,700,000
预付账款——R 公司	1,800,000
预付账款——S 公司	1,900,000
预付账款——T 公司	2,000,000
预付账款——U 公司	2,100,000
预付账款——V 公司	2,200,000
预付账款——W 公司	2,300,000
预付账款——X 公司	2,400,000
预付账款——Y 公司	2,500,000
预付账款——Z 公司	2,600,000
预付账款——合计	27,000,000

5. 2019 年 12 月 31 日，甲公司“其他应收款”科目所属各明细科目期末借方余额如下表所示：

其他应收款明细科目	期末借方余额（元）
-----------	-----------

[illegible][illegible]



















[illegible][illegible]

1. 在下列各题中，用“ $\sqrt{\quad}$ ”表示“ $\sqrt{\quad}$ ”的平方根，用“ $\sqrt[3]{\quad}$ ”表示“ $\sqrt[3]{\quad}$ ”的立方根，用“ $\sqrt[n]{\quad}$ ”表示“ $\sqrt[n]{\quad}$ ”的 n 次方根。

1. 在下列各题中，选择你认为正确的答案，并填入括号内。
 () 1. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 2. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 3. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 4. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 5. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 6. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 7. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 8. 下列各数中，最大的数是 ()
 () 9. 下列各数中，最小的数是 ()
 () 10. 下列各数中，最大的数是 ()

4

1 4 41 41

የሚከተሉት የጥያቄዎች ቁጥሮች ለመግቢያ ወቅት የሚያስፈልጉትን የጥያቄዎች ቁጥሮች ይጠቀሙ፡

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 14 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 4 የጥያቄዎች ቁጥሮች

የጥያቄዎች ቁጥሮች ለጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች 1 የጥያቄዎች ቁጥሮች

DEVELOPPEMENT ET MISE EN ŒUVRE D'UNE METHODOLOGIE D'ANALYSE MULTI-ECHELLE DU PROCEDE DE RODAGE EN PRODUCTION DE SERIE

RESUME : Les fûts des carter-cylindre des moteurs jouent un rôle fondamental dans la fonctionnalité du moteur et conditionnent ses performances. La texture des surfaces des fûts de carter représente, en effet, une surface « originale » à micro-échelle structurée de façon à répondre aux caractéristiques d'aspect de la surface et à ses propriétés d'anisotropie. Elle comprend des stries plateaux (régions portantes) et des vallées profondes pour retenir et transporter le lubrifiant. Ces surfaces sont générées par le process de rodage. L'objectif de cette thèse est de développer une méthodologie robuste pour l'analyse des caractéristiques des surfaces rodées en tenant compte des relations entre les mécanismes d'usure abrasive pendant l'opération de rodage et les modifications multi-échelles des signatures topographiques inhérentes. Ces modifications multi-échelles de la surface sont, par ailleurs, reliées aux conditions opératoires définies pour le rodage des surfaces en harmonie avec le besoin fonctionnel. Cette thèse expose les bases d'utilisation des transformées en ondelettes continues pour étudier la nature multi-échelle de la génération de la topographie de la surface pendant le process de rodage utilisé pour finir les fûts de carter cylindres. La nature multi-échelle du process de rodage est clairement démontrée et constitue un traceur ex situ pouvant expliquer la superposition des signatures inhérentes aux opérations consécutives de rodage. L'implémentation de cette approche multi-échelle dans un environnement de production en série permet de corrélérer la qualité fonctionnelle du produit et le process de génération des surfaces rodées. Une cartographie de la topologie de la surface est ainsi définie via des spectres d'évolution de la texture de la surface. Elle permet d'analyser l'évolution des modifications texturales induites à chaque étape de rodage et de définir les relations exactes d'enchaînement causes/conséquences de l'intervention des variables process. Différentes applications sont, dès lors, exposées pour la conception process/produit permettant d'analyser l'efficacité du process en relation avec le produit et de définir de nouveaux paramètres process de productivité.

Mots clés : rodage, texture de surface, multi-échelle, abrasion, aspect de surface, coupe, topographie de surface, frottement.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A MULTISCALE ANALYSIS METHOD OF HONING PROCESS IN MASS PRODUCTION

ABSTRACT: A surface liner is a cylindrical part fitted into an engine block. It is the most important functional part of an engine and dominates engine functionality. The liner surface is in fact the "original" micro-scale structured surface; designed with a deterministic pattern of high aspect ratio features and anisotropy of surface properties. It comprises alternating flat plateaus (bearing regions) and deep valleys for lubricant, transportation. To manufacture such a functional surface, abrasive honing is the process of choice. The objective of this thesis is to establish a robust methodology that explores the required surface characteristics, based on the premise that an intimate connection exists between the abrasive wear mechanisms prevailing during honing and the multi-scale modification of topographical signatures formed as a result of those mechanisms. These multi-scale modifications of surface structure are connected to the process conditions that the surface has undergone during manufacture and in turn dominate the functional characteristics of the surface.

The thesis sets out the basis for using the continuous wavelet transform to investigate the multi-scale nature of the development of surface topography during the honing process used to machine automotive cylinder bores. The multi-scale nature of honing process is clearly demonstrated and appears to be very useful in understanding the development of the multistage surface topography. The implementation of this multiscale approach within a mass production environment allows to correlate the functional quality of the intolerance designed surface and the process of its generation. This implementation consists of computing the multi-scale modifications of the topographical signature, which highlight the essential changes of the surface structure produced on the original surface after the stages of honing. The different applications of this multiscale approach demonstrate also that the process signatures respond in a predictable fashion to changes in process variables, combinations of stage and functional quality of the product.

Keywords : honing, surface texture, multi-scale, abrasion, surface aspect, cutting, surface topography, friction.

