

Etude tribo-fonctionnelle des textures bas frottement des cylindres de moteurs générées par le procédé de rodage

Mohammed Yousfi

▶ **To cite this version:**

Mohammed Yousfi. Etude tribo-fonctionnelle des textures bas frottement des cylindres de moteurs générées par le procédé de rodage. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2014. Français. NNT : 2014ENAM0053 . tel-01148194

HAL Id: tel-01148194
https://pastel.hal.science/tel-01148194

Submitted on 4 May 2015

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.

2014-ENAM-0053

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 Génie Mécanique " Procédés de Fabrication "

présentée et soutenue publiquement par

Mohammed YOUSFI

le 11 décembre 2014

Etude tribo-fonctionnelle des textures bas frottement des cylindres de moteurs générées par le procédé de rodage

Directeur de thèse : **Mohamed EL MANSORI**
Co-encadrement de la thèse : **Ibrahim DEMIRCI, Sabeur MEZGHANI**

Jury

M. Hassan ZAHOUANI, Professeur, LTDS - UMR 5513, Ecole Centrale de Lyon	Président
M. Bengt-Göran ROSEN, Professeur, Université d'Halmstad (Suède)	Rapporteur
M. Benyebka BOU-SAÏD, Professeur, LAMCOS - UMR 5259, INSA de Lyon	Rapporteur
Mme Leila SABRI ZEMMAHI, Docteur - Pilote Synthèse Métier, Renault SAS	Examinateur
M. Mohamed EL MANSORI, Professeur, MSMP, Arts & Métiers ParisTech	Examinateur
M. Ibrahim DEMIRCI, Maître de conférences, MSMP, Arts & Métiers ParisTech	Examinateur
M. Sabeur MEZGHANI, Maître de conférences, MSMP, Arts & Métiers ParisTech	Examinateur
M. Thomas REMICHIUS, Chef de Service Ingénierie Process Pièces Prismatiques, Renault SAS	Invité
M. Olivier CHAMBERT, Pilote GSFA pièces fixes bas moteur, Renault SAS	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Centre de Châlons-en-Champagne
Mechanical, Surfaces & Materials Processing Laboratory

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de ces travaux de thèse.

J'aimerais tout d'abord adresser mes remerciements les plus chaleureux à mon directeur de thèse, Mohamed El Mansori ainsi qu'à mes co-encadrants, Sabeur Mezghani et Ibrahim Demirci, pour l'encadrement scientifique de qualité qu'ils m'ont fourni.

J'adresse mes plus sincères remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger mon travail et plus particulièrement aux rapporteurs pour le temps qu'ils ont consacré à lire et à commenter mon rapport de thèse.

Je suis reconnaissant envers mon entreprise d'accueil Renault qui a mis à ma disposition les moyens pour mener à bien mon projet de thèse. Un grand merci à mes tuteurs industriels, Leila Sabri pour ses conseils avisés ainsi que Patrice Carras pour son dynamisme et sa réactivité vis-à-vis des problèmes industriels. Je remercie également les différents managers que j'ai côtoyé tels que les chefs du service SMAP, Pierre Gilbert, Hatem Khanfir et Thomas Remichius pour leur confiance ainsi que les différents chefs d'unité, Patrice Duhaut, Edoardo Sura, Thierry Lesprier et Jean-Luc Plourdeau pour m'avoir accueilli et facilité mon intégration dans leur équipes. Je remercie également les différentes personnes de l'entreprise, en particulier Eric Isambard, concernant les rouages du procédé de rodage ainsi que les différents interlocuteurs de la DCT, concernant la partie fonctionnelle du projet, pour leur disponibilité, leur aide précieuse et la transmission de leur savoir-faire.

Je remercie chaleureusement l'ensemble du personnel administratif et technique du laboratoire MSMP. Un merci particulier à Julien Voisin pour son assistance technique tout le long de la thèse, Laurence Fouilland pour son aide aux observations microscopiques ainsi qu'au personnel technique (Joël Dlevaque, Cédric Person, Sébastien Leprêtre, Denis Colombi et Sébastien Soulas) pour leur contribution à la réalisation du protocole expérimental.

Enfin, un grand merci à ma famille et mes amis pour leur soutien tout le long de la thèse. Mes remerciements vont également aux doctorants, post-doctorant et stagiaires du laboratoire MSMP et de l'entreprise Renault pour leur aide scientifique et technique ainsi que pour la bonne ambiance de travail.

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre 1 Etude Bibliographique 4
1. Introduction 4
2. Recherche du lien entre process de génération de surface et fonctionnalités 4
   2.1. Contexte industriel 4
   2.2. Procédé de rodage 6
   2.3. Caractérisation des surfaces rodées 11
   2.4. Caractérisation fonctionnelle de surface 16
3. Effet de texture sur les performances fonctionnelles 27
   3.1. Effets sur le frottement 28
   3.2. Effet sur la lubrification 31
   3.3. Effet sur la pression hydrodynamique 34
   3.4. Discussion 36
4. Conclusions 37

Chapitre 2 Protocole expérimental : procédé de rodage, caractérisation de surface et tribométrie SPC 40
1. Introduction 40
2. Démarche expérimentale 40
3. Bancs de rodage instrumentés 42
   3.1. Machine de rodage conventionnel 42
   3.2. Démonstrateur de rodage flexible 45
4. Métrologie multiéchelle des surfaces rodées 51
   4.1. Mesure du diamètre des fûts 52
   4.2. Mesures de forme (Macro-échelles) 52
   4.3. Mesures de l'état de surface (Micro-échelles) 53
5. Banc d'essais de frottement SC 55
   5.1. Caractéristiques du tribomètre 56
   5.2. Validation du tribomètre 60
6. Conclusion 61

Chapitre 3 Méthodes numériques liant le procédé aux performances fonctionnelles 63
1 Introduction 63
2 Caractérisation de la texture des surfaces rodées 63
   2.1 Paramètres de caractérisation tridimensionnelle de surfaces rodées 65
   2.2 Décomposition fonctionnelle en plateaux et vallées 68
   2.3 Analyse multiéchelle des surfaces produites par rodage 73
3 Simulation des performances en frottement du contact SC 79
   3.1 Physique du problème 79
   3.2 Equations élastohydrodynamiques 80

3.3 Résolution numérique 81
4 Validation du modèle SC 83
4.1 Validation numérique 83
4.2 Validation expérimentale 85
5 Conclusion 87

Chapitre 4 Etude fonctionnelle et comparative des attributs texturaux issus des procédés de rodage industriels 88
1. Introduction 88
2. Comparaison des caractéristiques texturales issues de différents procédés de rodage classiques 89
3. Effets fonctionnels des caractéristiques texturales majeures 92
3.1. Effet de la largeur et de la profondeur des stries de lubrification 92
3.2. Comparaison de l'effet de l'amplitude et de la distribution de la rugosité 96
3.3. Effet de mutuel de la rugosité superficielle et de l'anisotropie 109
3.4. Etude de l'effet du mutuel de l'anisotropie et de la taille de stries sur le frottement Segment-Cylindre 115
4. Conclusions 123

Chapitre 5 Texturations anti-friction innovantes par rodage flexible 124
1 Introduction 124
2 Textures de surface générées par rodage assisté en trajectoire 125
2.1 Conditions de rodage 127
2.2 Analyse de la topographie 129
2.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement 129
3 Texture de surface à anisotropie variable 133
3.1 Conditions de rodage 133
3.2 Analyse de la topographie 134
3.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement 135
4 Textures de surface à striation curviligne 136
4.1 Conditions de rodage 137
4.2 Analyse de la topographie 138
4.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement 139
5 Textures de surfaces à striations ondulatoires 140
5.1 Conditions de rodage 141
5.2 Analyse de la topographie 142
5.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement 143
6 Comparatif des gains en frottement des différentes textures 144
7 Conclusions 146

Conclusion générale 148

Références bibliographiques 152

Liste des figures

Figure 1. 1. Pertes mécaniques par frottement d'un moteur à combustion [4] 5
Figure 1. 2. Interactions entre Procédé, Fonctionnalités et Caractérisation de Surface 6
Figure 1. 3. Outil de rodage et surface rodée par rodage plateau avec un angle de striation α . 7
Figure 1. 4. Aspect d'une surface finie par rodage glissant [10] 8
Figure 1. 5. Aspect d'une surface rodée par rodage Hélico-glissant [10] 8
Figure 1. 6. Comparaison de la consommation de lubrifiant de surfaces rodées par rodage Hélico-glissant (en rouge) et rodage plateau (en bleu) [10] 9
Figure 1. 7. Procédé de rodage Laser par Gehring et aspect des poches horizontales [13] 10
Figure 1. 8. Représentation des paramètres de portance ISO 13565 13
Figure 1. 9. (a) Décomposition et (b) spectre multiéchelle d'une surface rodée 14
Figure 1. 10. Paramètre ISO 13565 (a) et performances en frottement (b) de surfaces issues de différents procédés de rodage [29] 15
Figure 1. 11. Courbe de Stribeck représentant les différents régimes de lubrification ; a) : Régime mixte; b) Régime hydrodynamique [34] 16
Figure 1. 12. Représentation des régimes de lubrification en fonction de la position du segment le long d'un fût de cylindre de moteur 17
Figure 1. 13. Forces exercées sur chaque segment du piston [44] 20
Figure 1. 14. Représentation des forces sur le segment [34]. 20
Figure 1. 15. Représentation d'un contact lubrifié modélisé par l'équation de Reynolds [54] 23
Figure 1. 16. Profil rectangulaire et longueurs associées au nombre λ [56] 24
Figure 1. 17. Validité de l'équation de Reynolds pour différentes valeurs du couple (λ, Re) [56] 24
Figure 1. 18. Profils de cavités [84] 32
Figure 1. 19. Stries de formes sinusoïdales se propageant transversalement (a) et cavités réparties en arête de poisson (b) [90] 32
Figure 1. 20. Textures en (a) stries transversales, (b) cavités circulaires et (c) chevrons [91] 33
Figure 1. 21. Strie droite transversale (a) et sinusoïdales se propageant longitudinalement (b) [90] 35

Figure 2. 1. Illustration de la démarche d'optimisation du rodage 42
Figure 2. 2. Machine de rodage verticale NAGEL avec bloc moteur K9K et représentation schématique de la dynamique du rodoir 43
Figure 2. 3. Dimensions (en mm) d'un bloc moteur de type K9K (a) et d'un cylindre rodé ainsi que les zones fonctionnelles b) : le Point Mort Haut (PMH), le Point Milieu (PM) et le Point Mort Bas (PMB) 44
Figure 2. 4. Principaux éléments du démonstrateur de rodage flexible 45
Figure 2. 5.Type de chemises utilisées (à droite : chemise après pré-usinage ; à gauche : chemise brute de fonderie) 47
Figure 2. 6. Dimensions d'une chemise usinée et zones fonctionnelles : Point Mort Haut (PMH), Point Milieu (PM) et Point Mort Bas (PMB) 48

Figure 2. 7. (a) Contrainte (critère de Von Mises) et déformation (b) lors de la première passe de tournage d'une surface bi-matière (épaisseur 3mm) 49
Figure 2. 8. Chemises bi-matière issues de carter-cylindre H5 en aluminium 51
Figure 2. 9. (a) Vérificateur d'alésage, (b) micromètre d'intérieur à trois touches 52
Figure 2. 10. Dispositif de mesure de forme (a) et zones de palpage du fût (b) 53
Figure 2. 11. (a) rugosimètre tactile, (b) zones de mesure de rugosité 2D 54
Figure 2. 12. Interféromètre Veeco pour mesure de la topographie 3D 55
Figure 2. 13. (a) Réplique en silicone d'une surface rodée, (b) Topographie de surface obtenue après mesure sur interféromètre. 55
Figure 2. 14. Vue d'ensemble du tribomètre 56
Figure 2. 15. Principaux éléments du tribomètre. 56
Figure 2. 16. Partie frottante du tribomètre 57
Figure 2. 17. Photographies (a) d'une éprouvette de cylindre rodé issue d'un carter cylindre K9K et (b) d'une chemise H5 découpée 57
Figure 2. 18. (a) Photographie du porte-chemise, (b) Plan du porte-chemise. 58
Figure 2. 19. Relevés des efforts d'une jauge d'efforts (a) tangentiels, (b) normaux. 59
Figure 2. 20. Courbe de Stribeck des essais sur de frottement sur des éprouvettes H5 61

Figure 3. 1 (a) Topographie 3D d'une surface rodage Plateau (b) Profil 2D typique d'une surface rodée montrant les deux composante plateau et vallées 64
Figure 3. 2. Evolution des paramètres 2D et 3D de rugosité Ra (a) et Sa (b) pour différentes tailles de grains d'abrasifs et à différentes vitesse d'expansion 66
Figure 3. 3. Evolution des paramètres 2D de rugosité Ra (a), Rk (b), Rpk (c) et Rvk (d) pour différentes pressions de contact et durées lors de la phase de rodage plateau 67
Figure 3. 4. Représentation graphique de courbe de portance (a) ainsi que des paramètres Rpq et Rvq de la courbe de portance linéarisée (b) [102] 69
Figure 3. 5. Exemple de décomposition morphologique d'une surface plateau-rodée utilisant des filtres séquentiels alternés; (a) Topographie de surface plateau-rodée, (b) composante plateau et (c) composante vallées 70
Figure 3. 6. Evolution de la rugosité superficielle par la méthode standard (a) et la décomposition morphologique (b) ainsi que de la profondeur des vallées par méthode de la courbe d'Abbott (c) et la méthode morphologique (d) 71
Figure 3. 7. Evolution des composantes plateau et vallée pour des surfaces générées à différentes durées de rodage à une pression de contact de 5,5 bars (a) et morphologique (b) 72
Figure 3. 8. Représentation d'une surface décomposée par méthode multi-échelle 73
Figure 3. 9. Spectre Multi-échelle de surface montrant l'impact de la taille des grains lors de l'étape de rodage finition sur les différentes échelles à une vitesse d'expansion de 1,5 µm/s [27] 74
Figure 3. 10. Représentation de la corrélation globale process-fonctionnalité Cg pour une échelle a donnée 76
Figure 3. 11. (a) Corrélation entre le paramètre multiéchelle SMa, les variables process "cp" la fonctionnalité "cf" ainsi que (b) corrélation globale "cg" entre conditions process et performances fonctionnelles pour chaque échelle pour l'étape de rodage plateau 77

Figure 3. 12. Surface rodée à différentes limites inférieures d'échelles avec : (a) Surface rodée d'origine, obtenue après avoir ôté la composante d'échelle de 0,12 mm (b), 0,24mm (c), 0,48mm (d) et 0,96 mm (e) [105] 78
Figure 3. 13. Représentation simplifiée en 2D du contact segment-fût de type cylindre-plan (partie inférieure du segment de type cylindrique) 80
Figure 3. 14. Synoptique descriptif de la méthode de résolution 82
Figure 3. 15. (a) H et (b) P obtenus avec le modèle de Ren et al.[114] ainsi qu'avec le modèle développé en contact cylindre-plan lisse 84
Figure 3. 16. (a) H et (b) P obtenus avec le modèle de Hu et Zhu.[115] ainsi que du modèle développé en contact rugueux 85
Figure 3. 17. Courbe de Stribeck des essais sur tribomètre et frottement obtenu par le modèle numérique pour le cas du rodage plateau. 86

Figure 4. 1. Images des surfaces rodées (a)PH, (b) SH et (c) HSH [10] 89
Figure 4. 2. Représentation de profils de surfaces rodées par rodage (a) classique et (b) plateau 89
Figure 4. 3. Représentation d'un profil de surface dite « idéale » comparativement à un profil PH [10]. 90
Figure 4. 4. Topographie tridimensionnelles de surfaces rodées à Vexp=4µm/s avec des abrasifs de tailles différentes de (a) 40µm, (b) 110 µm et (c) 180 µm 93
Figure 4. 5. Topographie tridimensionnelles de surfaces rodées avec des abrasif à Dg=110µm à Vexp de (a) 1,5µm/s, (b) 4 µm/s et (c) 8 µm/s 94
Figure 4. 6. Cartographie de l'impact sur les performances fonctionnelles pour le cas de l'étape de rodage finition 95
Figure 4. 7. Energie spécifique de rodage en fonction de la taille de grains d'abrasifs ainsi que pour différents régimes process [1,99] 96
Figure 4. 8. Observation au MEB de différentes surfaces rodées à une pression de contact de 5,5 bar à Ra initial de 0,70 µm pour des durée de rodage plateau de (a) 3 battements, (b) 8 battements et (c) 17 battements 98
Figure 4. 9. Observation au MEB de différentes surfaces rodées pour des durées de rodage autour de 4 battements à Ra initial de 0,7 µm à des pressions de contact de (a) 2,3 bars, (b) 5,5 bars et (c) 10 bars 99
Figure 4. 10. Décomposition multi-échelle de surfaces rodées en fonction du temps de rodage (nombre de battements N) pour des pressions de contact de (a) 2,3 bars, (b) 5,5 bars et (c) 10 bars pour (Ra)i=0,70 µm 100
Figure 4. 11. Evolution des composantes plateaux et vallées en fonction du nombre de battements à des pressions de contact de 2,3 bars (a1 et a2), 5,5 bars (b1 et b2) et 12 bars (c1 et c2) pour des surfaces initiales de Ra_i=0,38 µm (a1, b1, c1) et Ra_i=0,70 µm (a2, b2, c2) . 102
Figure 4. 12. Evolution du rapport Spq/Svq en fonction de la pression de contact et de la durée de rodage pour des surfaces de rugosités initiales (a) Ra_i=0,38 µm et (b) Ra_i=0,70 µm 103
Figure 4. 13. Enlèvement de matière en fonction de la durée de rodage pour des surfaces initiales de (a) Ra_i=0,38 µm et (b) Ra_i=0,70 µm 106

Figure 4. 14. Energie spécifique en fonction de la durée de rodage pour des surfaces initiales de (a) Ra_i=0,38 µm et (b) Ra_i=0,70 µm 107
Figure 4. 15. Cartographie de l'impact du temps de rodage et de la pression de contact sur le frottement prédit pour (a) Ra_i=0,38 et (b)Ra_i=0,70 108
Figure 4. 16. Topographies tridimensionnelles de surfaces rodées (a) plateau à un angle de striation de 50° et (b) HSH à un angle de 135° 109
Figure 4. 17. Algorithme de reconstruction de surfaces numériques à différents ratios plateau/vallées, pour une amplitude de surface (Sz) donnée avec utilisation de surfaces PH et HSH initialement rodées 111
Figure 4. 18. Evolution du coefficient de frottement de fûts HSH et PH en fonction du ratio Spq/Svq et pour trois amplitudes des surfaces différentes de (a) Sz=2.5µm, (b) Sz=5µm et (c) Sz=10µm 112
Figure 4. 19. Taux de contact entre solides (a) et épaisseur moyenne de film (b) de surfaces de cylindres PH rodée HSH en fonction du ratio Spq/Svq et pour trois différentes amplitudes de surface (1) Sz=2,5 µm, (2) Sz=5 µm et (3) Sz=10µm 113
Figure 4. 20.Variation relative du coefficient de frottement des surfaces PH et HSH à différentes amplitudes de rugosité Sz pour Spq/Svq (a) compris entre 0 et 0,3et (b) compris entre 0,3 et 1 114
Figure 4. 21 Images obtenues par interféromètre de surfaces rodées par procédé finition-plateau (a) et double finition (b) pour des angles de striation obtenus lors de la 3ème étape de 30 (1), 50 (2), 80 (3), 110 (4) et 130° (5) 118
Figure 4. 22. Evolution du paramètre Svq en fonction de l'angle de rodage pour des surfaces générées par procédé finition-plateau et procédé double finition 119
Figure 4. 23. (a) Largeur et (b) profondeur des vallées générées lors de la seconde étape de rodage (étape finition) suite à des procédés finition-plateau et double finition 119
Figure 4. 24. Evolution de la (a) profondeur et (b) du ratio profondeur/largeur de stries en fonction de l'angle de striation pour des vallées générées lors de la troisième étape de rodage 120
Figure 4. 25. Frottement simulé en fonction de la profondeur de stries et de l'angle de stries générées lors de la troisième étape de rodage 121
Figure 4. 26. Frottement simulé en fonction du ratio profondeur/largeur de stries et de l'angle de stries générées lors de la troisième étape de rodage 122

Figure 5. 1. Aspect observé à l'interféromètre des textures issues du rodage HSH conventionnel aux (a) PMB, (b) PM et (c) PMH 125
Figure 5. 2. Trajectoires des textures issues (a) du rodage HSH conventionnel et (b) issues du rodage HSHAT [2] 126
Figure 5. 3. Photographies des textures (a) PH conventionnel, (b) PHAT, (c) HSH conventionnel, (d) HSHAT 126
Figure 5. 4. Aspect observé à l'interféromètre des textures issues du rodage HSH assisté en trajectoire HSH aux (a) PM, (b) PMH et (c) PMB 127
Figure 5. 5. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures classiques (HSH et PH) et issues du rodage assisté en trajectoire (HSHAT et PHAT). 129

Figure 5. 6. Effet de texture (en pointillés) sur le frottement aux différents régimes de lubrification [15] 130
Figure 5. 7. Coefficient de frottement de textures conventionnelles en fonction du nombre de Sommerfeld 130
Figure 5. 8. Courbe de Stribeck de textures issues du rodage asservi en trajectoire, comparativement aux textures issues du rodage conventionnel : (a) pour le cas du rodage plateau, (b) rodage HSH 132
Figure 5. 9. Cinématique de génération des textures mixtes de type (a) 45-130-45 et (b) . 130-45-130 133
Figure 5. 10. Représentation et photographie des textures mixtes (a) 45-130-45 et (b) 130-45-130 134
Figure 5. 11. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures mixtes de types 130-45-130 et 45-130-45 comparativement à celles générées par rodages conventionnels 134
Figure 5. 12. Coefficient de frottement en fonction du nombre de Sommerfeld d'une (a) texture mixte 45-130-45 comparativement à une texture HSH et (b) mixte 130-45-130 comparativement à une texture PH 135
Figure 5. 13. Zone de transition 45-130° au niveau du PMB pour une texture mixte 130-45-130 136
Figure 5. 14. (a) Schéma de génération de textures en cercles et (b) photographie d'une texture composée de cercles 137
Figure 5. 15. (a) Schéma de génération de textures en ellipses et (b) photographie d'une texture composée d'ellipses 138
Figure 5. 16. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures de types circulaires et elliptiques comparativement à celles générées par rodage HSH 138
Figure 5. 17. Courbes de Stribeck de textures circulaires et elliptiques 139
Figure 5. 18. Courbes de Stribeck des textures en cercles et ellipses comparativement à une texture HSH conventionnelle 140
Figure 5. 19. (a) Schéma de génération de textures sous formes d'ondulations parallèles [2] et (b) photographie de la texture obtenue 141
Figure 5. 20. (a) Schéma de génération de textures sous formes d'ondulations alternées [2] et (b) photographie de la texture obtenue 142
Figure 5. 21. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures à ondulations alternée et parallèles comparativement à celles générées par rodage HSH 142
Figure 5. 22. Courbes de Stribeck des différentes textures de type ondulation 143
Figure 5. 23. Courbes de Stribeck des différentes textures de type ondulation comparativement aux textures conventionnelles 144
Figure 5. 24. Amélioration du frottement (a) des textures rectilignes et (b) curvilignes par rapport à une texturation de type HSH conventionnel à $S=5.0x10^{-5}$ 145

Liste des tableaux

Table 1. 1. Propriétés de surfaces issues de différents procédés de rodage 10

Table 2. 1. Composants chimiques fonte GL04 (carter-cylindres K9K) 44
Table 2. 2. Type de pierrage rodeuse NAGEL 45
Table 2. 3. Type de pierres utilisées pour le démonstrateur de rodage flexible 47
Table 2. 4. Composants chimiques fonte GL16 (Chemises H5) 48
Table 2. 5. Résultats des simulations numériques des contraintes lors du tournage de différents types de chemises (Fonte, bi-matière fonte-aluminium à des épaisseurs d'aluminium de 3 et 5mm) 50

Table 3. 1. Corrélation linéaire entre variables process, paramètres de rugosité et fonctionnalité 68
Table 3. 2. Corrélation linéaire Process-Surface (CPS) et Surface-Fonctionnalité (CSF) entre les paramètres plateau et vallées issus des méthodes de linéarisation de la courbe d'Abbott (ISO 13565-3) de décomposition morphologique 72
Table 3. 3. Coefficients de corrélation process/surface et surface fonctionnalité 77

Table 4. 1. Paramètres de rugosité surfacique de surfaces issues de différents procédés de rodage industriels 91
Table 4. 2. Conditions d'essais de rodage finition 93
Table 4. 3. Conditions process de la campagne de rodage plateau 97
Table 4. 4. Paramètres du modèle d'usure 105
Table 4. 5. Conditions d'essais de rodage 116

Table 5. 1. Conditions de rodage des surfaces conventionnelles 128
Table 5. 2. Conditions de rodage des surfaces innovantes 128

Introduction générale

L'industrie automobile fait face à des restrictions environnementales de plus en plus strictes en particulier concernant les moteurs thermiques. Afin de répondre à ces exigences environnementales tout en restant compétitifs, produire des « moteurs propres », tout en gardant des coûts de production minimaux est un objectif majeur.

Face à ces enjeux d'ordre écologique et économique, le secteur automobile est aujourd'hui demandeur d'une optimisation plus poussée de contacts glissants ou roulants des pièces mécaniques au niveau fonctionnel (i.e. du Produit) mais aussi au niveau de l'enchainement des opérations de fabrication (i.e. du process).

Nous nous intéressons dans ce travail, au contact Segment/Piston/Chemise puisqu'il présente à lui seul près de la moitié des pertes mécaniques par frottement, jouant ainsi un rôle prépondérant sur le rendement et les émissions de gaz polluants d'un moteur à combustion interne.

Actuellement, différentes technologies de rodage (Plateau Honing (PH), Helical Slide Honing (HSH), Slide Honing (SH), etc.) sont utilisées par les différents constructeur automobiles et génèrent des textures de cylindres différentes au niveau de l'orientation des stries, la rugosité superficielle, les profondeurs de striation, etc. La texture de surface générée est la signature du procédé appliqué et influe directement sur les performances fonctionnelles du moteur. Ainsi, une méthodologie basée sur le triptyque Process-Surface-Produit devient un outil incontournable pour l'optimisation du process de rodage en lien avec les performances fonctionnelles du cylindre moteur. Elle nécessite simultanément :

Une caractérisation rigoureuse de la surface rodée permettant d'établir le lien entre les conditions process et la surface générée d'une part et entre la texture de surface rodée et les performances fonctionnelles du produit d'autre part.

Une caractérisation des performances fonctionnelles de la chemise rodée prenant en compte la texture réelle de la surface.

Pour ce faire, la démarche mise en œuvre dans ce travail de thèse suit donc les trois étapes suivantes :

Tout d'abord, l'étude des différentes approches de caractérisation des surfaces rodées est entreprise dans le but de sélectionner celles qui permettent d'assurer le lien process/produit et le développement de moyens expérimentaux et numériques pour la simulation des performances fonctionnelles de ces surfaces.

Ensuite, l'application du principe de l'ingénierie inverse (reverse engineering), dans l'idée d'une réévaluation des différentes variantes du procédé de rodage utilisées en industrie automobile (PH, HSH, SH…), est réalisée en s'appuyant sur les techniques de caractérisation texturale et fonctionnelle développées. Il s'agit, en effet, d'analyser ces différentes textures afin d'en déduire les caractéristiques de conception texturale optimales voire 'idéales' des chemises moteurs au niveau fonctionnel.

Enfin, sur la base de ces nouvelles connaissances, cette méthodologie a été élargie à la conception de nouveaux procédés innovants (nouvelle texture de surface, nouvelle cinématique process, etc.) aboutissant à un procédé économique (coût, temps de cycle, etc.) et générant une surface à bas frottement. Ceci s'appuie en particulier sur le démonstrateur de rodage flexible implanté dans le pôle process ECO² du laboratoire MSMP et développé en partenariat avec l'entreprise Renault.

Ainsi, l'organisation du présent mémoire s'articule de la manière suivante :

Le premier Chapitre est dédié à l'étude de l'état de l'art scientifique et technique des différents procédés de finition et de texturation des cylindres de moteurs, des méthodes de caractérisation des surfaces obtenues ainsi que les méthodes de qualification des performances fonctionnelles. Cette partie permettra d'introduire la problématique et la démarche scientifique qui consiste à améliorer le procédé de rodage par un lien robuste entre process et fonctionnalité moteur à travers la caractérisation de la texture de surface.

Le second Chapitre présente la démarche expérimentale ainsi que les moyens utilisés. Il s'agit des machines de rodage capables de générer des textures dites « industrielles » mais aussi innovantes, des moyens de caractérisation macroscopiques (géométrie, forme) et microscopiques (profil 2D et topographie 3D) des surfaces rodées et un tribomètre simulant le contact Segment/Chemise.

Le troisième Chapitre décrit les différentes méthodes numériques utilisées pour la caractérisation de surface ainsi que la qualification fonctionnelle des surfaces rodées. Par rapport à la caractérisation de surface, différentes méthodes sont présentées : méthodes standard 2D et 3D, décomposition morphologique plateaux/vallées et approche multiéchelle basées sur la décomposition par ondelettes. L'aptitude des différentes méthodes à lier process et fonctionnalité de surface sera comparée et discutée. La dernière partie du chapitre est consacrée à la description du modèle numérique déterministe du contact lubrifié segment-fût et sa validation et expérimentale.

Le quatrième Chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques texturales de surfaces issues de procédés industriels (rodage Plateau, Glissant et Hélico-Glissant). Lors de cette étude, la démarche scientifique sera directement appliquée avec l'utilisation des méthodes expérimentales et numériques en place. Ceci permettra d'identifier les caractéristiques texturales (rugosité superficielle des plateaux, tailles des vallées, anisotropie et couplage entre différentes caractéristiques) les plus pertinentes pour la réduction du frottement. Une analyse énergétique permettra d'identifier les méthodes les moins coûteuses pour la génération de ce type de textures.

Le cinquième Chapitre expose des améliorations de la cinématique de procédés existants de texturation par striations croisées ainsi que l'application de la démarche développée pour l'exploration de texturations originales (cercles, ellipses et ondulations) générées par de nouvelles cinématiques process. Par la suite un comparatif de ces différentes textures au niveau frottement sera effectué. Finalement des procédés innovants générant des textures à frottement réduit par rapport aux procédés industriel sont proposés.

Chapitre 1
Etude Bibliographique

1. Introduction

Le procédé de rodage vise à générer une texture de surface optimale améliorant les performances fonctionnelles (consommation d'huile, frottement et usure réduites) du système Segment/Piston/Cylindre (SPC) tout en maintenant une efficacité énergétique optimale (coûts de fabrication).

L'objectif de cette étude bibliographique est de faire un état des lieux des travaux de recherche qui permettraient d'optimiser le procédé de rodage en relation avec les performances fonctionnelles. Cette partie est consacrée à l'étude des travaux scientifiques qui se sont penchés sur la caractérisation de surfaces rodées, leurs fonctionnalités, les procédés de leur élaboration ainsi que le lien entre ces différentes parties. Les principales interrogations concernent l'établissement d'une corrélation forte entre le triptyque Procédé/Texture de Surface/Fonctionnalité et le choix de méthodes de caractérisation pertinentes au niveau fonctionnel. De ce fait, l'étude sera divisée en quatre parties. La première fera l'objet de l'introduction de la problématique dans un contexte industriel en mettant l'accent sur les méthodes courantes de caractérisation de surface et les verrous qui empêchent d'établir un lien fort entre génération de surfaces et leurs fonctionnalités. La deuxième partie permettra d'identifier les différentes techniques de caractérisation de surfaces. Par la suite, la troisième partie est consacrée à la qualification fonctionnelle de la surface du cylindre, et plus précisément à l'étude du tribo-système Segment/Piston/Cylindre (SPC). Enfin la dernière partie est consacrée à l'étude de l'effet de texturation sur les performances fonctionnelles de surfaces industrielles.

2. Recherche du lien entre process de génération de surface et fonctionnalités

2.1. Contexte industriel

Dans le passé, les industriels, lors de la fabrication de pièces, cherchaient uniquement à créer des surfaces qui répondent aux exigences fonctionnelles établies par le cahier des charges. A partir du moment où la surface générée est considérée comme conforme, le même procédé de

fabrication est repris sans qu'il y ait une réelle connaissance physique de l'impact des paramètres process [1]. Autrement dit, seul le lien entre caractérisation de surface et spécifications sur le plan existait réellement.

A l'époque actuelle, avec la recherche de surfaces finies de plus en plus performantes et de plus en plus fonctionnelles, la maîtrise du process de leur génération et la connaissance des paramètres mis en jeux est primordiale. Dans le cas de notre étude, par rapport au contexte actuel, où les enjeux sont à la fois économiques et écologiques, la finalité est de produire des moteurs moins polluants, tout en préservant leur rendement, leurs performances ainsi que leur durabilité. Il s'avère que le frottement généré dans le système Segment/Piston/Cylindre représente la plus grande part des pertes mécaniques par frottement d'un moteur avec environ 45% des pertes totales (voir Figure 1. 1) [2]. La texture de surface du Cylindre fait parties des causes majeures de ces pertes en frottements [3,4]. Ainsi, optimiser cette texture permettrait de réduire considérablement ces pertes par frottement.

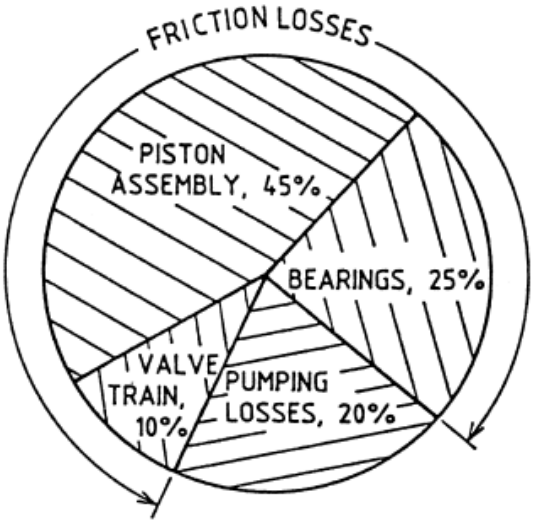


Figure 1. 1. Pertes mécaniques par frottement d'un moteur à combustion [2]

La Figure 1. 2. schématise le triptyque Procédé-Surface-Fonctionnalité et les interactions entre chaque partie. Le contrôle de la qualité permet d'évaluer les paramètres fonctionnels d'une surface alors que la caractérisation de surface permet d'évaluer les paramètres process à améliorer, ce qui permet l'optimisation du procédé. Les liens physiques entre surface-fonctionnalité et entre surface-procédé permettront par conséquent d'établir le lien direct entre procédé-fonctionnalité, qui fait l'objet de ce travail de thèse.

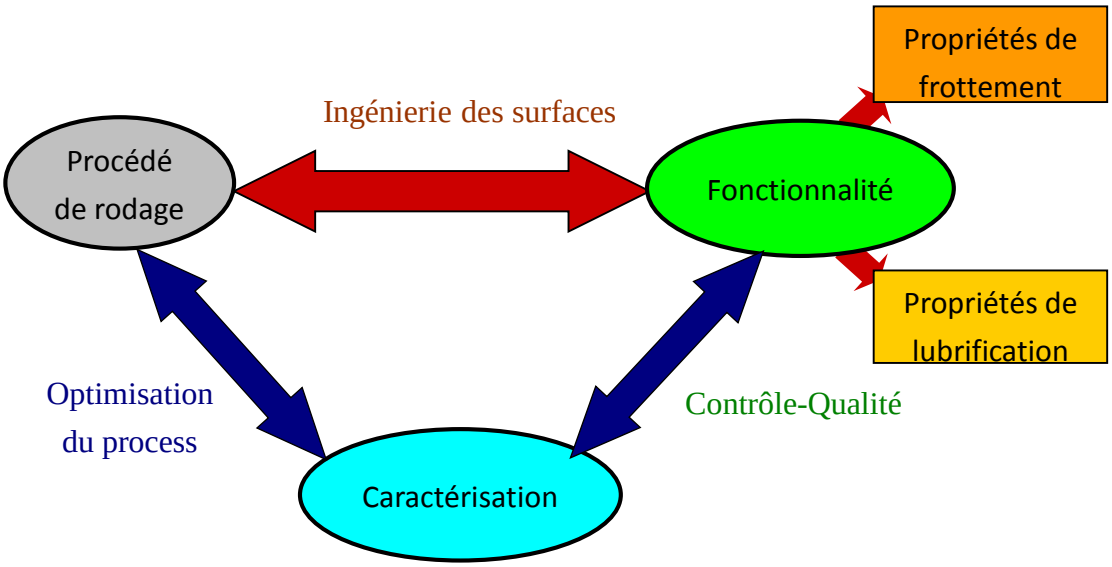


Figure 1. 2. Interactions entre Procédé, Fonctionnalités et Caractérisation de Surface

Les principales interrogations que l'on peut se poser concernent le choix de la démarche permettant de lier de façon robuste procédé et performances fonctionnelles. Certains verrous scientifiques et technologiques empêchent d'établir ce lien direct entre procédé et fonctionnalité et sont liés au procédé de rodage, à la méthode de caractérisation de surface adaptée ou encore aux performances fonctionnelles étudiées.

2.2. Procédé de rodage

Théoriquement, les idées ne manquent pas par rapport aux innovations qui peuvent exister pour l'obtention de surfaces fonctionnelles. Industriellement parlant la mise en place de tels procédés a un coût considérable, de même que le remplacement d'un procédé de fabrication par un autre plus innovant. L'utilisation du rodage plateau et du rodage multi-étapes par la plupart des constructeurs automobile montre cette prudence des constructeurs par rapport au coût de production malgré l'apparition de nouvelles technologies améliorant certaines performances fonctionnelles du moteur comme par exemple le rodage hélico-glissant ou le rodage avec texturation laser. Dans cette partie les différentes technologies de rodage existantes et les matériaux innovants des cylindres permettant l'amélioration de l'état des surfaces rodées seront discutées.

2.2.1. Rodage plateau

Le rodage plateau est une technique de finition par abrasion largement répandue dans le domaine de l'automobile qui est notamment utilisée par le constructeur Renault. Il est composé de la succession de 3 étapes :

- l'étape ébauche utilisant des pierres abrasives en diamant métallique à granulométrie élevée pour corriger la forme et imprimer la striation initiale (échelle macroscopique (mm)) ;
- l'étape finition utilisant des pierres abrasives en carbure de silicium (Renault par exemple) ou en diamant métallique (Volvo par exemple) et à granulométrie plus faible. Cette étape permet de générer la striation et d'obtenir l'aspect et la macrorugosité désirée (échelle mésoscopique) ;
- l'étape plateau consiste à écrêter les pics de rugosité (échelle microscopique). Les pierres abrasives sont composées de mêmes matériaux que celles pour l'étape finition mais à granulométrie encore plus fine. Cette étape est importante car elle permet de réduire considérablement le temps de rodage moteur en fonctionnement et par conséquent l'usure de surface du cylindre [5].

La particularité de cette technologie par rapport au rodage dit classique est l'ajout de l'étape plateau qui permet à la surface du cylindre d'avoir les propriétés d'une surface lisse en terme de glissement et les propriétés d'une surface poreuse pour le stockage de lubrifiant via la génération de stries croisées [6]. L'angle de striation pour une surface plateau est de 45° environ (Figure 1. 3).

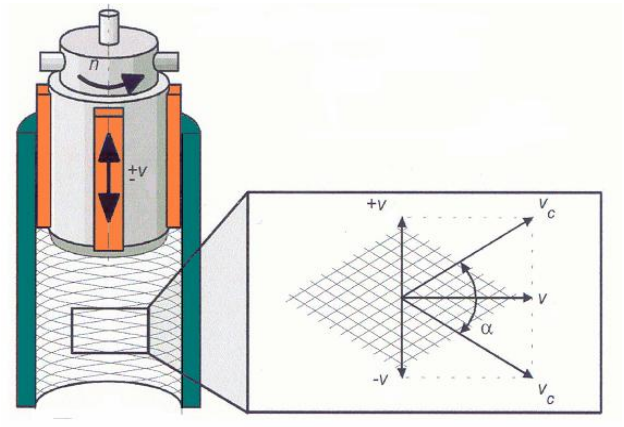


Figure 1. 3. Outil de rodage et surface rodée par rodage plateau avec un angle de striation α

2.2.2. Rodage Glissant

Il s'agit d'un procédé de rodage à l'abrasif composé également de trois étapes et avec des angles de striation quasi-identiques au rodage plateau. Les 3 phases de rodage sont exécutées avec exclusivement des pierres en diamant métallique. Cependant, la particularité par rapport au rodage plateau est l'obtention de vallées moins profondes [7–9] (Figure 1. 4). Ceci s'explique par le fait que la troisième phase de rodage ne se contente pas seulement d'écrêter les pics de rugosité élevée (cas du rodage plateau) mais va plus en profondeur en s'attaquant aux vallées. Ce procédé est plus robuste et présente moins de variabilité avec une productivité élevée (durée de vie d'outils supérieure). Les surfaces obtenues ont des meilleures performances en termes de consommation d'huile (jusqu'à 60% de consommation d'huile en moins par rapport au rodage plateau), de déformation et d'usure [7,9].

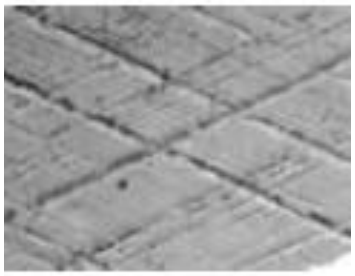


Figure 1. 4. Aspect d'une surface finie par rodage glissant [8]

2.2.3. Rodage Hélico-glissant

Le rodage hélico-glissant en revanche, est un procédé quasi-identique au rodage glissant mais avec la particularité de générer des stries avec un angle beaucoup plus élevé se situant entre 130 et 140° (Figure 1. 5).

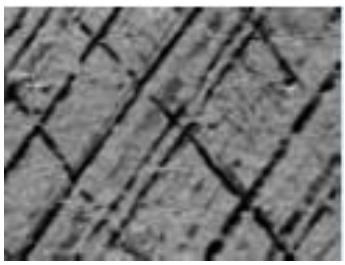


Figure 1. 5. Aspect d'une surface rodée par rodage Hélico-glissant [8]

Cela est obtenu en diminuant la vitesse de rotation de l'outil de rodage (n) illustrée en Figure 1. 3, tout en augmentant la vitesse de battement (v). Des tests sur moteurs ont permis de montrer une amélioration des surfaces rodées par rodage hélico-glissant en termes de consommation d'huile par rapport aux surface rodées par rodage glissant et plateau [8,9]

(Figure 1. 6). De plus, la tendance de ces surfaces à l'usure et au grippage est plus faible du fait de la présence de stries avec une inclinaison plus forte, ce qui permet plus facilement l'évacuation de débris et particules [7,9].

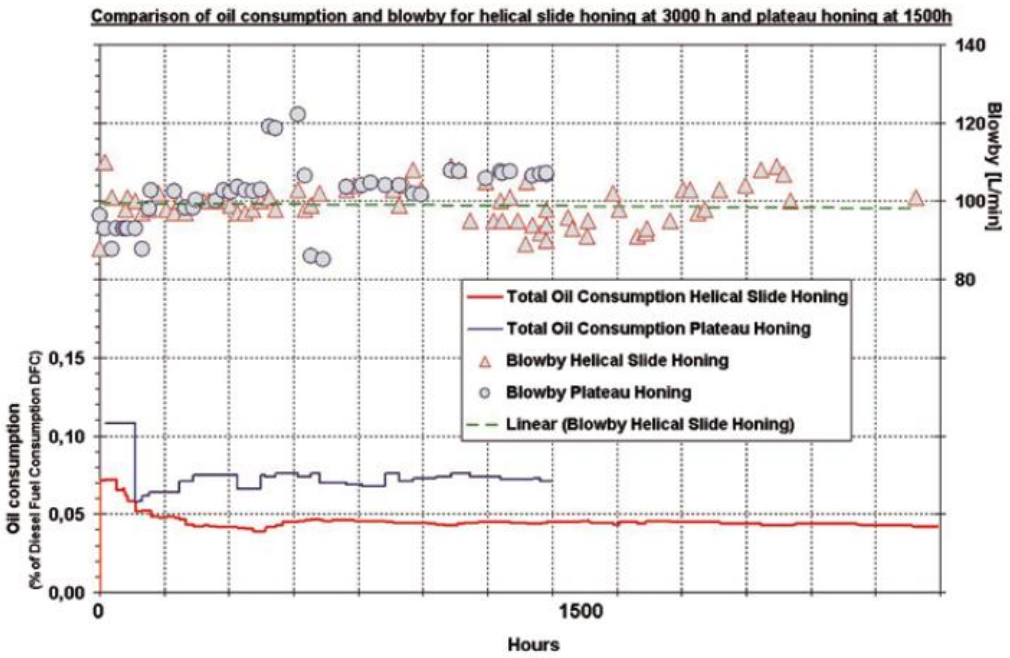


Figure 1. 6. Comparaison de la consommation de lubrifiant de surfaces rodées par rodage Hélico-glissant (en rouge) et rodage plateau (en bleu) [8]

2.2.4. Bilan des différents types de rodage

Cette partie a montré différentes technologies de rodage par abrasion pouvant générer différents types de textures avec différentes topographies, rugosités, angles de striation, états de surface, etc. Les caractéristiques de chacun des procédés sont résumées en Table 1. 1. Les paramètres de rugosité issus de la courbe de portance, décris dans la Section 2.3 du présent Chapitre, sont utilisés à titre comparatif. Ils montrent d'une part que les surfaces issues du rodage HSH et du rodage glissant sont plus fines que celle du rodage plateau. En revanche, le rodage HSH présente des stries à angle de striation plus élevés que les autres procédés de rodage.

Table 1. 1. Propriétés de surfaces issues de différents procédés de rodage

Type de rodage	Procédé par abrasion ?	Rugosité Rk (µm)	Rugosité Rpk (µm)	Rugosité Rvk (µm)	Angle de striation (°)
Plateau	Oui	0,8-2	0,3-0,7	1,5-2,5	45
Glissant	Oui	0,2-0,45	0,06-0,1	0,8-1,2	45
HSH	Oui	0,3-0,6	0,15-0,25	1-1,5	135

2.2.1. Traitements et texturations fonctionnelles

Il existe cependant d'autres procédés pour améliorer l'état de surface ou la texturation de cylindres de moteurs.

Concernant les techniques de texturation de surfaces de fûts, le rodage à texturation Laser (LST) est un procédé très prometteur. Il consiste à créer des cavités et stries par application d'un rayon laser sur la surface (Figure 1. 7). Ce procédé a l'avantage d'être très rapide et permet de réaliser des formes de stries et cavités plus contrôlées. De plus, les performances en lubrification hydrodynamique sont significativement améliorées par rapport à une surface non texturée [10]. Souvent, une dernière étape par rodage conventionnel est utilisée pour éliminer les débris de matière fondue par laser. La société Gehring, utilise ce type de rodage au niveau du Point Mort Haut en générant des bandes horizontales de stockage de lubrifiant [11]. Ceci permet de pallier les insuffisances en lubrification (régime limite) à ce niveau avec la création de poches de lubrification en complément des stries générées par rodage classique (Figure 1. 7).

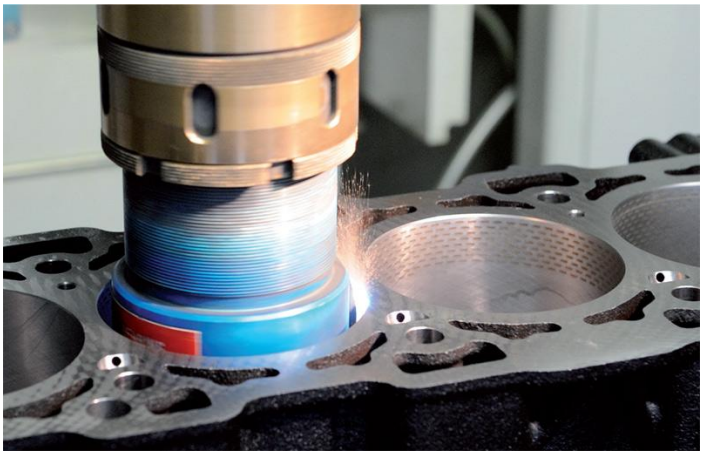


Figure 1. 7. Procédé de rodage Laser par Gehring et aspect des poches horizontales [11]

D'autres méthodes de texturation de surface de cylindres de moteurs comme les techniques d'indentation [12] ou de gravure électrochimique [13] peuvent être utilisées.

Par rapport aux techniques d'amélioration des états de surfaces de fûts, le dépôt de revêtement à base de d'alliages métalliques par pulvérisation (spraying) sur des cylindres pour blocs en aluminium permet non seulement d'augmenter la dureté de surface et par conséquent de réduire les déformations du cylindre mais aussi d'en améliorer les propriétés tribologiques par la présence de microcavités de rétention d'huile [14]. Un autre exemple de dépôt de revêtements, concerne le MOS_2 agissant comme un lubrifiant solide pour le cas de surfaces texturées au laser [15]. D'autres techniques d'amélioration de l'état de surfaces de cylindre sont utilisées comme l'UV laser ou le brossage (Brush honing) [8].

D'autres techniques de rodage permettent de prévenir des déformations lors du fonctionnement moteur par la génération d'une forme de cylindre spécifique (volontairement non cylindrique) [16].
Néanmoins, les procédés de rodage par abrasion sont les plus avantageux en termes et coût et fiabilité process parmi la plupart des procédé de traitement surface et texturation de cylindres de moteurs [8]. Il serait par conséquent plus judicieux d'explorer en priorité l'aspect fonctionnalisant de ces procédés. Pour cela, il est primordial, d'utiliser les méthodes de caractérisation de surfaces permettant d'établir un lien robuste entre process et fonctionnalité.

2.3. Caractérisation des surfaces rodées

Il existe une multitude de méthodologies permettant de caractériser certaines fonctionnalités de surfaces.
Les différents paramètres de caractérisation de surfaces ont été instaurés au fil du temps en fonction du développement des techniques de mesurage et de traitement de données [17,18]. Le choix du paramètre à utiliser pour la caractérisation différait d'une organisation à une autre et se faisait par conséquent de manière empirique [1,18].
Parmi la multitude de méthodes de caractérisation de surface développées, la question est de savoir quelles sont celles qui sont le plus adaptées au procédé du rodage en relation avec les performances fonctionnelles. Seront présentés ci-après les principaux paramètres et techniques utilisés pour la caractérisation de surfaces. Par la suite, une analyse critique de l'adéquation de ces paramètres au procédé de rodage sera ensuite réalisée.

La majeure partie des méthodes de caractérisation de surfaces se basent sur des formulations mathématiques ou statistiques. Premièrement, on distingue les méthodes normalisées (issues des normes ISO).

- Les paramètres de rugosité les plus connus sont ceux qui définissent l'altitude de rugosité et sont calculés statistiquement. Les plus utilisés sont R_a et R_z [19]. R_a est la rugosité arithmétique et permet d'évaluer la rugosité du profil en fonction d'une ligne moyenne tandis de R_z est l'amplitude maximale d'un profil. R_q, la rugosité quadratique est un paramètre plus pertinent que R_a mais moins utilisé que ce dernier dans l'industrie car plus sensible aux erreurs de mesure [5,19]. Ces paramètres font partie de la norme ISO 4287 [20].
- Les paramètres statistiques de forme permettent d'évaluer l'asymétrie R_{sk} (Skewness) et l'aplatissement R_{ku} (Kurtosis). Les surfaces de finition par rodage plateau sont asymétriques négativement ($R_{sk}<0$) et à aplatissement élevé ($R_{ku} \approx 10$) [5]. Ces paramètres font également partie de la norme ISO 4287 [19,20].
- Les paramètres de motifs issus de la norme ISO 12085 [19,21] permettent de caractériser l'amplitude (paramètres R et W) et l'espacement (paramètres AR et AW) du profil.
- Les paramètres issus de la courbe de portance ou courbe d'Abbott-Firestone (Figure 1. 8) des profils de rugosité, introduits à l'initiative des constructeurs automobile, sont issus de la norme ISO 13565-2 [6,19,22]:
    - R_{pk} caractérise les pics de rugosité qui sont éliminés rapidement lors du fonctionnement du moteur ;
    - R_k évalue la quantité de matière disponible pour la durée de vie du moteur ;
    - R_{vk} détermine la profondeur réduite des vallées disponibles pour la rétention du lubrifiant.

  En raison de la corrélation de ces 3 paramètres (dépendance de la pente équivalente de la courbe de portance), une simple modification d'un de ces paramètres entraînerait la modification de tous les paramètres. Il existe une autre famille de paramètres fonctionnels issus des normes CNOMO [23] qui restent encore utilisés par certains constructeurs.

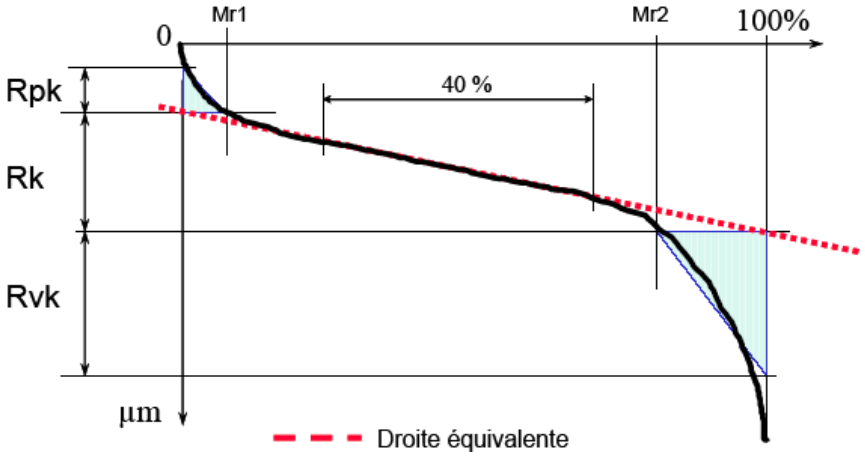


Figure 1. 8. Représentation des paramètres de portance ISO 13565

- La méthode de décomposition pics/vallées issue de la linéarisation de la courbe de portance, qui découle de la norme ISO 13565-3 permet l'obtention des paramètres Rpq (hauteur quadratique des plateau) et Rvq (hauteur quadratique des vallées) [7,19]. Ces paramètres sont intéressants de par leur représentativité des profils de surfaces rodées qui sont composés principalement de plateaux de faible amplitude (cas du rodage plateau) et de vallées.

D'autres techniques de caractérisation de surface basées sur des méthodes mathématiques permettent une représentation graphique mettant en avant certains paramètres de rugosité.

- La fonction de densité de probabilité des hauteurs donne des informations statistiques avec une représentation graphique de R_a, R_z, R_{sk}, R_k, etc. [1,5].
- La fonction d'autocorrélation (ACF) est la transformée inverse de Fourier de la fonction de densité spectrale. L'ACF semble bien adaptée pour les procédés périodiques comme le tournage, alors que la fonction de densité spectrale, de par son analyse dans le domaine fréquentiel, est plutôt meilleure pour les procédé à caractère aléatoire comme la rectification [1].
- La transformation en ondelettes permet de décomposer le signal d'un profil de surface à l'aide d'une transformation du même type que la transformée de Fourier mais avec une localisation Espace-Echelle. Cette méthode permet d'analyser des profils de surfaces non-stationnaires, contrairement à la transformée de Fourier qui indique seulement la localisation fréquentielle (échelles) sans indication spatiale associée [24]. Cela permet de décomposer la surface à différentes échelles et ainsi l'obtention d'un spectre multiéchelle d'un paramètre de rugosité donné tel que le Sma qui représente

l'amplitude arithmétique de surface (équivalent du paramètre Ra) pour chaque échelle (Figure 1. 9). C'est d'ailleurs la base de la décomposition multi-échelle [19]. Celle-ci permet la détection de l'effet d'échelle d'une surface de la rugosité aux ondulations. Cette méthode a notamment été appliquée par Sabri et al. [25,26] sur les surfaces rodées afin de lier procédé et surface, plus particulièrement pour observer l'effet des abrasifs (taille, nature) ou encore de la vitesse d'indentation dynamique (vitesse d'expansion) sur les différentes échelles topographiques.

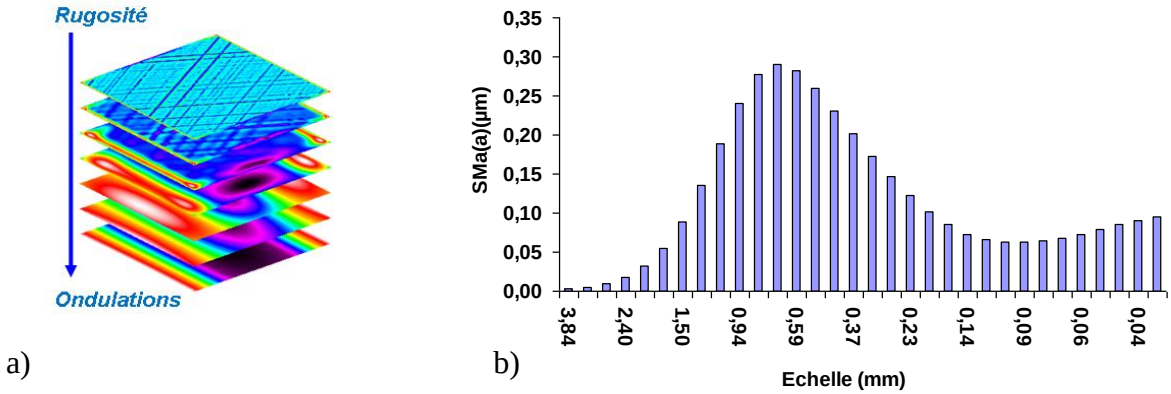


Figure 1. 9. (a) Décomposition et (b) spectre multiéchelle d'une surface rodée

Les méthodes normalisées de caractérisation de surface, notamment celles issues des normes ISO 4287 et ISO 13565-2, sont à l'heure actuelle largement utilisées dans l'industrie automobile. Toutefois, il a été montré que ces méthodes ne permettent pas de corréler de manière robuste le procédé et la fonctionnalité [27–29]. Tomanik [28] démontre cette défaillance au niveau des paramètres ISO 13565-2 sur des surfaces issues de différents procédés de texturation et finition de surface (Slide Honing, LST, UV Laser) où des valeurs identiques au niveau rugosité peuvent donner des performances en frottement complètement différentes (Figure 1. 10).

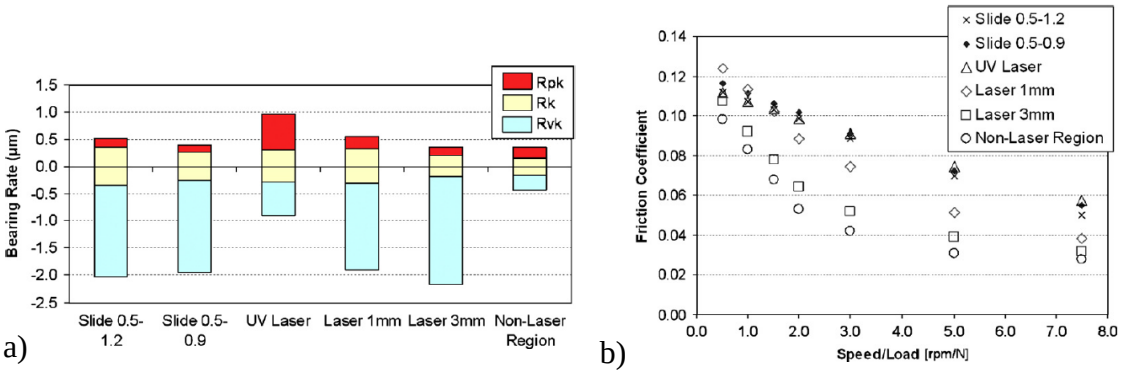


Figure 1. 10. Paramètre ISO 13565 (a) et performances en frottement (b) de surfaces issues de différents procédés de rodage [28]

Plusieurs raisons sont à l'origine de ces défaillances, comme l'absence d'informations sur les différentes échelles (une textures rodées par Slide Honing génère des rugosités à des échelles différentes de celles générées par du LST). En effet, les méthodes normalisées sont limitées par l'utilisation de longueurs d'ondes de coupure pour la séparation des écarts géométriques et de forme [19], ce qui ne s'adapte pas aux différentes échelles de génération de surface. En effet, il peut y avoir des décalages par rapport aux fenêtres des différentes gammes d'échelles. Une autre explication aux limites des méthodes normalisées concerne l'anisotropie (plus particulièrement l'orthotropie) des surfaces rodées qui est principalement due à la présence de stries croisées ou autres motifs de texturation. Les paramètres normalisés actuellement utilisés ne la prennent pas en compte, étant donné leur nature bidimensionnelle (déterminés à partir d'un profil). L'introduction de la norme ISO 25178 [30] relative à la caractérisation 3D de surfaces laisse entrevoir des progrès par rapport à cela. Enfin, les paramètres ISO 13565-2 et ISO 4287, largement utilisés dans l'industrie automobile, ne représentent pas tout à fait la morphologie des surfaces rodées qui sont composées de plateau fins et de vallées. D'autres méthodes permettent de décomposer la surface en seulement deux composantes telles que celle issue de la norme ISO 13565-3 [7] et celle utilisant un filtrage morphologique séquentiel [31]. Ces méthodes semblent être adaptées à la caractérisation des surfaces rodées puisqu'elles permettent d'évaluer séparément les composantes plateaux et les vallées avec un seul paramètre associé à chaque composante. Par ailleurs, les performances de ces deux techniques n'ont pas été comparées dans la littérature.

En résumé, l'approche multiéchelle, la caractérisation tridimensionnelle ainsi que la décomposition morphologique sont des techniques prometteuses de caractérisation des surfaces rodées. Néanmoins, il est important de tester leur capacité à lier process et fonctionnalité comparativement aux paramètres normalisés actuellement utilisés dans

l'industrie automobile. Pour cela, il faudra également identifier les méthodes d'analyse des performances fonctionnelles des surfaces rodées.

2.4. Caractérisation fonctionnelle de surface

2.4.1. Description du contact SPC

Le contact SPC est un contact lubrifié. Compte tenu de la variation de la vitesse et de l'accélération du piston ainsi que l'interaction de gaz au niveau du point mort haut, le contact SPC subit différents régimes de lubrification. Il existe en général quatre types de régimes pour les contacts lubrifiés comme illustré dans la Figure 1. 11 [32]:

- Régime limite (zone I) : il n'y a pas assez de fluide pour permettre la séparation des solides par un film d'huile, seul le contact solide-solide est prépondérant.
- Régime mixte (zone II) : les surfaces en contact sont partiellement séparées par un film d'huile avec des zones de contact solide-fluide et des zones de contact solide-solide.
- Régime hydrodynamique et élastohydrodynamique (zone III) : les surfaces en contact sont complètement séparées par un film d'huile.
- Régime de lubrification hydrodynamique en régime non laminaire (zone IV) : l'écoulement du fluide est instable et l'équation de Reynolds classique n'est plus applicable.

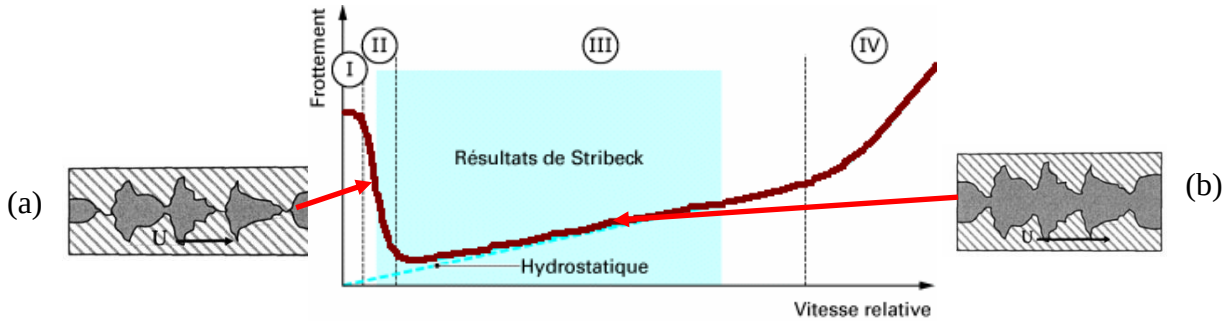


Figure 1. 11. Courbe de Stribeck représentant les différents régimes de lubrification ; a) : Régime mixte; b) Régime hydrodynamique [33]

Les régimes qui concernent le contact SPC sont le régime hydrodynamique ou élastohydrodynamique présent au niveau de la partie médiane de la course du cylindre au point milieu (PM) ainsi que le régime mixte situé à proximité des Points Morts Hauts (PMH) et Points Morts Bas (PMB) (Figure 1. 12).

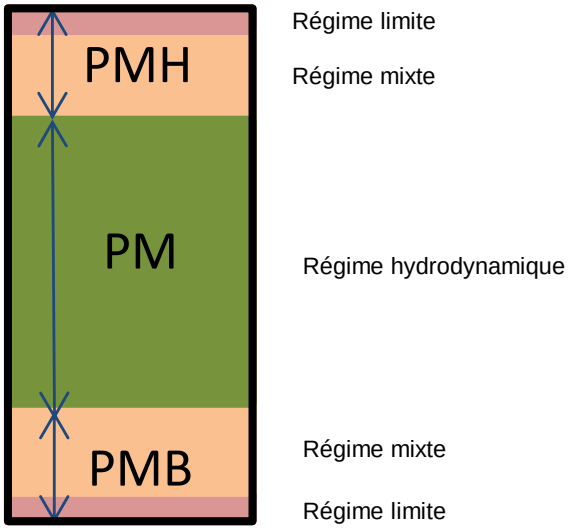


Figure 1. 12. Représentation des régimes de lubrification en fonction de la position du segment le long d'un fût de cylindre de moteur

La courbe de Stribeck qui met en évidence le frottement à chaque zone de fonctionnement est obtenue en fonction de la vitesse de glissement (si les paramètres environnants sont constants), ou bien des nombres adimensionnés dépendant de la vitesse, la largeur de contact, la viscosité ainsi que la charge. Pour le cas du contact Segment-fût, le nombre de Sommerfeld, S, est souvent utilisé [34]. Il est déterminé par la formule suivante :

$$S = \frac{\eta U}{F_N / l} \qquad (1.\ 1)$$

F_N (N), est la force normale du segment, U (m/s), la vitesse de glissement, η (Pa.s), la viscosité dynamique et l (m), la largeur de contact.

Le contact Segment/Piston/Cylindre peut être qualifié expérimentalement. On distingue deux façons de qualification expérimentale de ce contact : par tribomètre ou bien par essais moteur.

2.4.2. Essais moteur

Les essais moteur [8] permettent de qualifier au mieux les performances fonctionnelles des surfaces rodées puisque cela se fait dans les conditions réelles de fonctionnement du moteur. Les valeurs de sortie sont la consommation d'huile [8,9,35], le frottement [36] , l'épaisseur du film de lubrifiant [36] , les émissions de gaz et de particules polluants ainsi que l'usure [8,35].

En revanche ces essais sont très coûteux. En effet, les essais sont relativement longs comme par exemple avec une durée de fonctionnement équivalente à 15000 km [35].

2.4.3. Essais sur tribomètre

Les tribomètres permettent d'évaluer le frottement [28,34,37,38], l'épaisseur de film d'huile [34,37,39] ainsi que l'usure [28,40] de différentes textures de surfaces de cylindre.

Pour cela un nombre adimensionné, le nombre de Sommerfeld (présenté dans la section 2.4.1) - qui dépend de la charge normale appliquée, de la largeur de contact, de la vitesse de translation du segment et de la viscosité du lubrifiant - est utilisé pour différencier les différentes conditions de fonctionnement et par conséquent, faire la correspondance avec le fonctionnement moteur [34].

Il s'agit pour la plupart des tests tribométriques, de systèmes bielle-manivelle [34,37,38]. Le coefficient de frottement est obtenu par la mesure de forces tangentielles et (dans certains cas) de forces normales par des capteurs de forces montés au niveau du segment [34,37,38] ou de la partie fixe du système (système Cameron Plint) [36]. L'épaisseur de film est évaluée par mesure optique au niveau du cylindre (fibres optiques), [36] ou bien au niveau du segment par interférométrie [39] ou encore par fibres optiques [37]. Dans tous les cas un moyen d'acheminement de l'image du film est mis en place comme par exemple un système réfléchissant ou semi-transparent. Ajouté à cela, un système d'acquisition d'image haute fréquence, comme une caméra rapide doit être mis en place [39,41], ce qui rend l'option de mesure de film d'huile relativement coûteuse.

2.4.4. Modélisation numérique

Afin de modéliser le contact Segment/Piston/Cylindre (SPC) aux différentes phases de fonctionnement du moteur, il est nécessaire de considérer à la fois les approches microscopiques et macroscopiques. L'idéal est de coupler approche macroscopique et microscopique afin d'observer l'influence du comportement du contact Segment/Cylindre à différents régimes de lubrification ainsi qu'aux contraintes extérieures à l'interface de frottement.

2.4.4.1. Approche macroscopique

L'approche macroscopique considère le système SPC dans sa globalité. On se focalise surtout sur le mouvement du piston et les forces extérieures mises en jeu du système SPC.

Tout d'abord, durant le cycle moteur, le piston a une vitesse et une accélération variables même si celles du vilebrequin peuvent rester constantes. Pour une vitesse de rotation du vilebrequin donnée, la vitesse de glissement ainsi que l'accélération du piston peuvent être déterminées avec les paramètres géométriques (longueur de bielle, distance axe vilebrequin-axe bielle et excentricité entre l'axe du piston et l'axe du vilebrequin).

Concernant les forces agissant sur le système SPC, ce sont principalement celles issues des gaz lors du cycle de moteur (admission, compression, combustion et échappement), les forces d'inertie et les vibrations [42]. L'équation gouvernant ces forces est l'équation de Newton ((1. 2) qui s'exprime comme suit :

$$M\frac{d^2s}{dt^2} + D\frac{ds}{dt} + K \cdot s = \sum F_{ext} \qquad (1.\ 2)$$

Avec s la position du piston, $\frac{ds}{dt}$ sa vitesse et $\frac{d^2s}{dt^2}$ son accélération. $\sum F_{ext}$ représente la somme des forces extérieures. M étant la masse, K la raideur et D le coefficient d'amortissement du système.

Les forces exercées sur les segments sont considérées dans les directions axiales et radiales. Les forces suivant la direction radiale s'expriment comme suit :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = P_R + F + R_H - P_A - mg \qquad (1.\ 3)$$

Avec P_R la force d'inertie due à la rainure du piston, P_A la force axiale exercée par les gaz, R_H la force hydrodynamique axiale, mg le poids du segment et F la force de frottement (Figure 1. 13). Dans le cas d'une approche macroscopique, P_R et P_A sont beaucoup plus grandes que les autres forces, qui sont par conséquent négligeables.

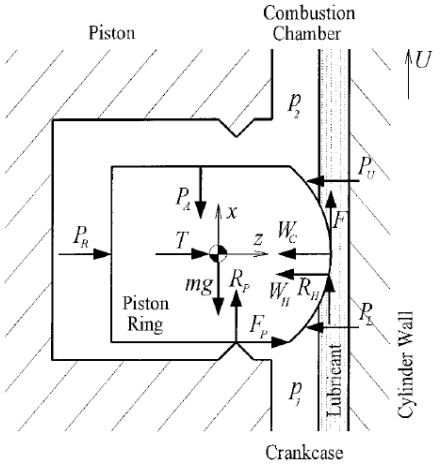


Figure 1. 13. Forces exercées sur chaque segment du piston [43]

Une autre approche macroscopique est présentée dans [44] qui considère localement l'accélération nulle (vitesse constante) et par conséquent la somme des forces sur le segment comme étant nulle dont l'expression est comme suit (Figure 1. 14) :

$$\sum F_r = 0$$

$$\Rightarrow \int_{x_1}^{x_2} P_{hyd}\,dx + \int_{-b_1}^{b_2} P_c\,dx + P_1(b_1 + x_1) + P_2(b_2 - x_2) - P_b(b_1 + b_2) - R_T(b_1 + b_2) = 0 \qquad (1.\ 4)$$

P_c représente la pression due à l'effet de la surface, P_{hyd} la pression hydrodynamique, P_1, P_2 et P_b la pression des gaz à différents endroits du segment, R_T la tension du segment, x_1 et x_2 respectivement les position de formation et de rupture du film d'huile et enfin b_1 et b_2 la largeur de chaque côté du segment (coté convergent et divergent).

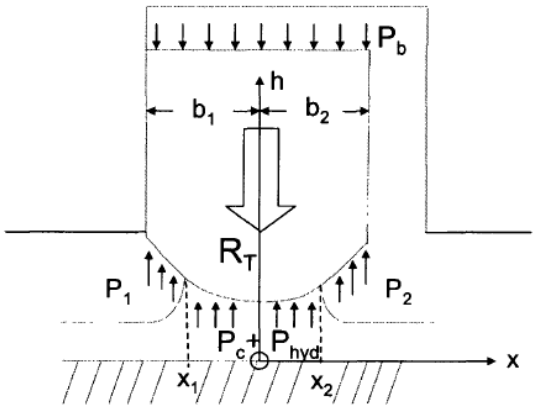


Figure 1. 14. Représentation des forces sur le segment [33]

Il s'agit de la représentation la plus simple à mettre en place, surtout s'il on étudie une zone de contact très réduite à des conditions de fonctionnement (vitesse, force normale) constantes.

2.4.4.2. Approche microscopique

L'approche microscopique se focalise uniquement sur le contact Segment/Cylindre et est appliquée pour un angle de vilebrequin donné. Cela permet d'étudier les petites échelles de rugosité et par conséquent l'effet de texture de la surface réelle. Les deux méthodes utilisées pour l'étude de contacts lubrifiés sont la CFD (Computational Fluid Dynamics ou Mécanique des Fluides Numérique) utilisant les équations de Navier-Stokes et la résolution par les équations de Reynolds. Concernant la prise en compte de la rugosité, plusieurs approches existent : l'approche stochastique [45,46] et l'approche déterministe [47,48] ou encore les méthodes d'homogénéisation pour le cas de textures à motifs réguliers [49] (nous nous focaliserons sur les deux premières approches en raison de leur utilisation pour les surfaces rodées). Concernant la discrétisation numérique, les méthodes par éléments finis, différences finies ou volumes finies sont utilisées. Néanmoins, il existe cependant des méthodes sans maillage [50] ou mixtes comme par exemple un couplage éléments finis pour la structure (approche macroscopique) et différences finies pour le fluide [42].

a) Equations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes sont les équations qui permettent de décrire le plus fidèlement la mécanique des fluides. Ces équations pour tous types de fluides sont comme suit :

- Equation d'incompressibilité :

$$\vec{\nabla}\vec{v} = 0 \tag{1. 5}$$

- Equation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla} p + \nu\Delta\vec{v} + \vec{f} \tag{1. 6}$$

Où $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ (m^2/s) est la viscosité cinématique, avec η (Pa.s) la viscosité dynamique et ρ (kg/m^3) la masse volumique. *P* (Pa) représente la pression, *v* (m/s) la vitesse et *f* (N/kg) la résultante des forces massiques dans le fluide.

Lorsque les forces massiques sont négligées et pour un écoulement stationnaire comme pour [51,52], les équations de Navier-Stokes prennent la forme suivante :

$$(v.\nabla)v + \frac{1}{\rho}\nabla p - \nu\Delta v = 0 \qquad (1.\ 7)$$

$$\nabla.v = 0 \qquad (1.\ 8)$$

Les équations de Navier-Stokes permettent de résoudre la plupart les problèmes faisant intervenir la mécanique des fluides comme pour le cas des contacts lubrifiés et pour tous types de fluides (compressibles, non-Newtoniens, Non-stationnaires, etc.) avec l'utilisation de la CFD. En revanche, bon nombre des études CFD sont limitées aux cas 2D [50,53] et la résolution numérique est très coûteuse en temps de calcul.

b) Equations de Reynolds

L'équation de Reynolds découle des équations de Navier-Stokes pour des films minces. Son application implique le respect des hypothèses suivantes :

1- Milieu continu ;
2- Ecoulement laminaire ;
3- Forces massiques extérieures négligeables ;
4- Epaisseur du film très faible devant les autres dimensions ;
5- Forces d'inertie dans le fluide négligeables ;
6- Pas de glissement entre le fluide et les parois du contact ;
7- La vitesse d'une des parois du contact est toujours tangente à cette paroi ;
8- Viscosité constante selon l'épaisseur du film ;
9- L'épaisseur de film est très faible devant la largeur et la longueur de contact ;
10- Fluide incompressible.

L'expression de l'équation est de la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_1}\left(\frac{\rho h^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x_1}\right) + \frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{\rho h^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right) = 6u_1\frac{\partial \rho h}{\partial x} + 12\frac{\partial \rho h}{\partial t} \qquad (1.\ 9)$$

Où η est la viscosité dynamique du lubrifiant, ρ la masse volumique du lubrifiant, p la pression hydrodynamique et h l'épaisseur du film d'huile (voir Figure 1. 15).

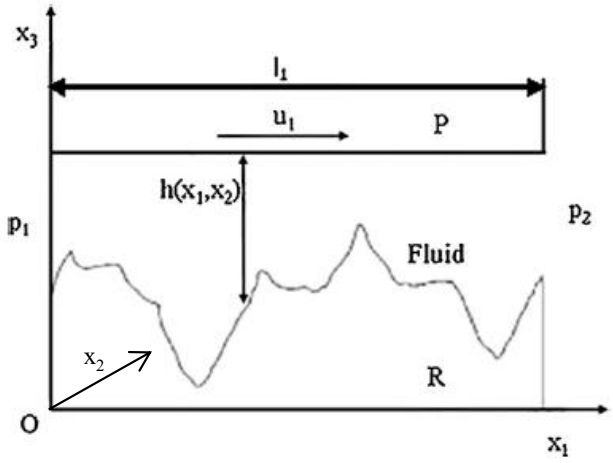


Figure 1. 15. Représentation d'un contact lubrifié modélisé par l'équation de Reynolds [54]

L'expression de l'épaisseur du film d'huile en régime élasto-hydrodynamique est de la forme suivante [55] :

$$h(x,y) \approx h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + d_e(x,y) \qquad (1.\ 10)$$

Où h_0 est une constante, R_x et R_y les rayons de courbure de contacts (paramètres géométriques) respectivement dans les directions longitudinales et transversales d'écoulement et $d_e(x,y)$ la déformation élastique des surfaces en contact. Dans cette équation il n'y a pas de prise en compte de la rugosité qui sera décrite dans la partie concernant l'approche déterministe.

Pour les surfaces texturées ou présentant quelques défauts, pour que l'équation de Reynolds soit valable, il faut respecter certaines limites en plus de l'hypothèse énoncées ci-dessus. Dobrica et al. [56] ont établi des paramètres géométriques qui permettraient de définir le domaine de validité de l'équation de Reynolds. Pour cela, en complément avec le nombre de Reynolds, un ratio pour des cavités de profils rectangulaires $\lambda = \frac{l_D}{h_D}$ (avec l_D et h_D respectivement les largeurs et profondeur de profil (Figure 1. 16)) a été utilisé.

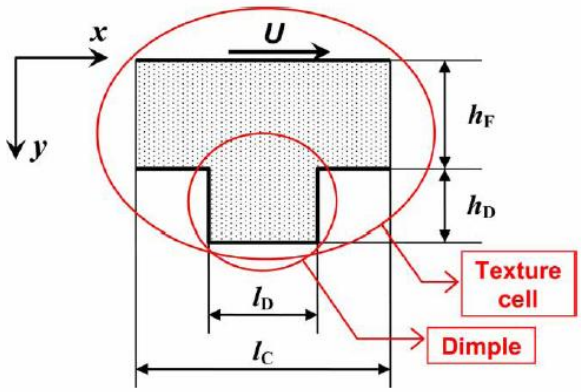


Figure 1. 16. Profil rectangulaire et longueurs associées au nombre λ [56]

Il a été démontré comparativement aux équations de Navier-Stokes qu'à partir d'une certaine valeur du couple (Re, λ**),** l'équation est valide pour le type de surface concerné. Pour λ=16, Re=4 est correct pour modéliser le contact en question (Figure 1. 17). Pour λ=100 des écoulements avec un nombre de Reynolds allant jusqu'à une valeur de 300 peuvent être modélisés avec l'équation de Reynolds. Il se trouve que pour le cas des simulations en régime mixte et début de régime hydrodynamique du contact segment fût, le nombre de Reynolds est de faible valeur, impliquant des textures composées de stries d'un ratio largeur/profondeur relativement faible, ce qui est le cas des surfaces rodées où il est autour de 15-25.

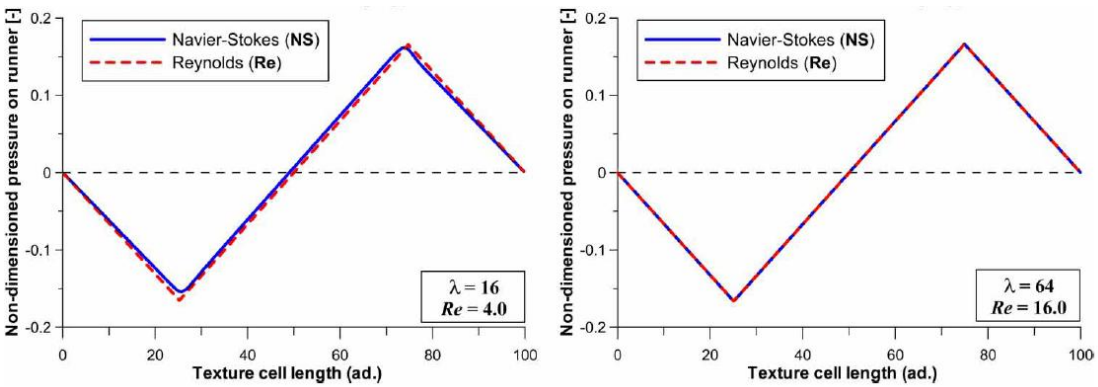


Figure 1. 17. Validité de l'équation de Reynolds pour différentes valeurs du couple (λ , Re) [56]

c) Approche Stochastique

L'approche stochastique permet de simuler les contacts lubrifiés de surfaces texturées ou rugueuses. Cette approche prend en compte la rugosité d'une surface par des coefficients pondérateurs et des facteurs d'écoulement, inclus dans l'équation de Reynolds. Ainsi, la simulation se fait sur des surfaces lisses où les fluctuations de pression et film hydrodynamique sont modélisées à partir de ces facteurs d'écoulement. La majorité des

travaux faisant appel à l'approche stochastique s'inspirent de la méthode mise en place par Patir et Cheng [45,46]. L'équation de Reynolds modifiée en 2D s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\phi_x \frac{h^3}{\mu}\frac{dp}{dx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\phi_y \frac{h^3}{\mu}\frac{dp}{dy}\right)=6u_1\frac{\partial}{\partial x}\left(h\cdot\phi_g+R_q\cdot\phi_s\right)+12\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1.\ 11)$$

Où ϕ_x et ϕ_y sont les facteurs d'écoulement en pression, u_1 la vitesse du piston, ϕ_g le facteur d'écoulement géométrique, ϕ_s le facteur d'écoulement en cisaillement, *h* l'épaisseur de film et *Rq* la rugosité quadratique.

Les facteurs d'écoulement sont déterminés par simulations numériques déterministes sur des surfaces rugueuses élémentaires.

En revanche, bien que cette méthode permette d'alléger le temps de calcul des contacts lubrifiés et qu'elle soit la plus répandue, elle a ses limites. D'une part, pour les problèmes de frottement SPC, elle est souvent limitée au cas 2D (profils de surface) comme dans [33]. D'autre part, les paramètres utilisés sont calculés statistiquement comme la rugosité quadratique *Rq* et les facteurs d'écoulements qui découlent de moyennes statistiques. Par conséquent, cette approche ne permettrait pas de reproduire le plus fidèlement possible les effets d'échelle, d'anisotropie ou de morphologie relatifs aux textures rodées.

d) Approche Déterministe

L'approche déterministe permet de prendre en compte la rugosité réelle des contacts lubrifiés. La prise en considération est incluse dans l'équation de l'épaisseur de film ((1. 12) avec l'ajout d'un terme pour la rugosité *Rg(x,y).*

$$h(x,y)\approx h_0+\frac{x^2}{2R_x}+\frac{y^2}{2R_y}+d_e(x,y)+Rg(x,y) \qquad (1.\ 12)$$

Cette méthode auparavant ne s'appliquait que pour des surfaces élémentaires mais désormais avec l'arrivée d'outils de calculs de plus en plus puissants plusieurs travaux ont vu le jour pour des surfaces plus complexes [47,48,57]. Cette méthode permet d'étudier les contacts lubrifiés de façon plus directe et réaliste. L'inconvénient majeur est la nécessité d'un maillage très fin qui augmenterait le temps de calcul. Un maillage trop grossier ne permettrait pas de couvrir toute la topographie de la surface et par conséquent entrainerait des pertes d'information par rapport à la surface réelle [58].

2.4.4.3. Méthodes numériques de résolution du contact SPC

a) Discrétisation par différences finies

La méthode par différences finies est la plus répandue concernant la modélisation des contacts lubrifiés et les problèmes de contact SPC comme par exemple dans [47,51,52,57,59]. Elle se base sur la discrétisation des séries de Taylor. Les maillages obtenus sont en général rectangulaires et régulier. Une grille composée de points reliés entre eux est ainsi obtenue. Afin d'alléger les temps de calculs une méthode multi-grille [48] est utilisée, qui permet le passage d'une grille à une autre avec un maillage de taille différente. Le principal inconvénient de cette méthode est la nature régulière du maillage qui ne permet pas un ajustement facile avec la géométrie. Cependant, il s'agit de la méthode la mieux adaptée pour le cas de surfaces rugueuses en raison de la simplicité de sa mise en place mais aussi en termes réduction de coût de calcul [32,51,60].

b) Discrétisation par volumes finis

La méthode des volumes finis est peu utilisée pour les problèmes de contacts lubrifiés. Le peu d'études concernent des travaux utilisant la CFD (Computational Fluid Dynamics) [56,61,62]. Comme pour les différences finies, cette méthode utilise pour la plupart des cas un maillage structuré composé d'une grille de volumes de contrôle. L'avantage de cette méthode est de modéliser des phénomènes physiques non-linéaires. En revanche, comme la méthode des différences finies la modélisation des géométries complexes est compliquée.

c) Discrétisation par éléments finis

Avec l'utilisation de moyens de calculs performants a permis, plusieurs études faisant appel à la méthode de modélisation par éléments finis ont été mis en œuvre [54,63,64]. Cette méthode n'utilise pas de grille, le maillage utilisé est dit non structuré. Cela permet de discrétiser des formes plus complexes avec précision vu la flexibilité du maillage. En revanche, le maillage n'est pas facile à réaliser surtout pour modéliser une texture de surface car la taille du maillage doit être adaptée afin de modéliser au maximum la fonctionnalité de surface sans trop alourdir le temps de calculs. Autrement dit, pour le cas de surfaces rugueuses, il semble que cette méthode soit trop coûteuse en termes de mémoire et temps de calcul [60].

3. Effet de texture sur les performances fonctionnelles

La texturation des surfaces rodées de cylindre de moteurs joue un rôle important, car elle génère des cavités qui permettront la rétention du lubrifiant, nécessaire à la réduction du frottement dans le système Segment-Piston-Cylindre (SPC). Il a été démontré dans plusieurs études que la texturation permet une réduction significative du frottement des surfaces fonctionnelles, au-delà de 35% par rapport à une surface non texturée [10,65].

Cette partie consiste à répertorier les caractéristiques influentes des textures de surfaces sur les performances fonctionnelles telles que le frottement, la lubrification et la pression hydrodynamique. Cela permettra de déterminer la surface fonctionnelle dite idéale qui génère un frottement minimal tout en assurant le minimum de consommation de lubrifiant.

Or, lubrification, frottement et pression hydrodynamique sont liés. Conformément à la courbe de Stribeck (Figure 1. 11), en régime mixte, le frottement a tendance à diminuer avec l'augmentation du nombre de Sommerfeld. Ceci s'accompagne naturellement par une augmentation de l'épaisseur de film (suite à une augmentation brève de la pression hydrodynamique), entraînant une diminution de la pression hydrodynamique. Dans le cas du régime hydrodynamique, l'augmentation du nombre de Sommerfeld, même si elle entraîne une augmentation de l'épaisseur de film d'huile suivie d'une diminution de la pression hydrodynamique, en revanche, s'accompagne d'une légère augmentation du frottement. Dans tous les cas de figures, afin de minimiser le coefficient de frottement, la texture doit permettre la génération d'un film d'huile et d'une pression hydrodynamique suffisamment élevés sans pour autant dépasser un certain seuil afin d'éviter une surconsommation d'huile et des émissions de polluants provoqués par la combustion du lubrifiant.

Par conséquent la surface fonctionnelle « idéale » doit à la fois présenter des performances de frottement et de lubrification minimales tout en générant suffisamment de pression hydrodynamique. Les paramètres de texturation influents sont nombreux tels que la géométrie, l'orientation des cavités ou stries, la rugosité, la profondeur des cavités, etc.

3.1. Effets sur le frottement

3.1.1. Géométries des cavités

La géométrie des cavités a une influence sur les performances en frottement. Des cavités à profil trapézoïdal et en forme de losange à 60° procurent moins de frottement comparées à des formes circulaires ou profils triangulaires [52]. Petterson et Jacobson [12] montrent que des stries croisées se comportent mieux en frottement dans des conditions de lubrification mixte sévères (proches du régime limite) que des stries parallèles. Cela est expliqué par une plus grande possibilité d'évacuation des débris [12,66], une meilleure lubrification (étant donné que les stries agissent comme des micro-réservoirs d'huile) [12,66,67], ainsi qu'une réduction de la déformation causée par les interruptions des stries [12].

3.1.2. Orientation des stries

Premièrement, des études se sont consacrées à l'étude de deux orientations : parallèle et perpendiculaire au mouvement. Plusieurs études, en régime mixte voire limite, montrent que des cavités orientées perpendiculairement au mouvement sont plus performantes en frottement [68,69] comparées à celles orientées parallèlement. Ceci s'explique par le phénomène de coin d'huile [32].

Deuxièmement, des études se sont portées sur des angles d'orientation plus définis. Ces dernières ont notamment permis de confirmer les orientations utilisées par les constructeurs automobiles pour les rodages plateau et hélico-glissant [54] avec l'identification d'angles de striation optimaux de l'ordre de 40-45° et 115-130°. En revanche d'autres études, où l'angle maximal testé n'excède pas 90°, ont permis d'identifier des valeurs d'angles de striation plus faibles [47,52]. Il ressort tout de même de que dans la majorité des études, l'angle de striation le plus néfaste au frottement est autour de 80°-100° [33,47,52,54].

Des paramètres peuvent modifier complètement l'influence sur le frottement d'une orientation donnée des cavités ou stries. Par exemple Yuan et al. [70], ont montré que la variation de la pression normale de contact permet la diminution du coefficient de frottement des textures suivant leur orientation par rapport à la direction de glissement. Une pression de contact élevée, permettant de se rapprocher des conditions de lubrification mixtes/limites conformément à la courbe de Stribeck (valeurs du nombre de Sommerfeld faibles (Figure 1. 11)), favorise un meilleur comportement en frottement des textures orientées parallèlement au

mouvement. En revanche, une pression de contact plus faible, se rapprochant des conditions de lubrification mixte/hydrodynamique (valeurs du nombre de Sommefeld plus élevées), favorise un frottement plus faible de la part des textures transversales au mouvement. Ceci s'explique par une meilleure rétention du lubrifiant en régime mixte/limite de la part des stries transversale et d'une meilleure circulation du lubrifiant en régime hydrodynamique de la part des stries longitudinales.

3.1.3. Densités de stries

3.1.3.1. Texturation complète

La densité de striation est un paramètre important. Toutefois, elle peut être très variable selon la géométrie utilisée. Dans plusieurs études une densité de striation dépassant un certain seuil permet d'obtenir les meilleures performances en frottement. C'est le cas des études numériques réalisées par Mezghani et al. [54] ou de Brunetière et Tournerie [71] où la densité de cavités doit dépasser respectivement 20 stries/mm² et 10% de la surface totale. Dans d'autres études comparatives c'est la texture avec la densité de stries la plus élevée parmi d'autres surfaces qui permet d'obtenir les faibles coefficients de frottement [72–74]. Ceci peut être expliqué par une plus grande capacité de rétention d'huile, le piégeage des débris ainsi que l'amélioration de la pression hydrodynamique [74]. Toutefois il a été montré qu'il ne faut pas dépasser une certaine valeur de densité de striation (autour de 75 %) pour les surfaces totalement texturées [75], ce qui n'est pas le cas pour certaines surfaces partiellement texturées [73]. Une autre grandeur dépendante de la densité de stries est l'espacement entre les stries qui a été énoncé par Caciu [52]. Dans le cadre de cette étude (simulation numérique de stries transversales au mouvement de largeur de 20 µm et longueur de 300 µm) un espacement longitudinal de 270 µm ainsi qu'un espacement transversal égal à l'espacement longitudinal sont considérés comme néfastes pour les performances en frottement. Le balancement des stries a également un lien avec la densité de stries. Il a été ainsi montré dans [54] que les stries parfaitement équilibrées sont les plus performantes en frottement.

3.1.3.2. Texturation partielle

La texturation partielle permet d'imprimer des motifs dans quelques zones seulement de la surface. Plusieurs études montrent que ce type de texturation partielle, pour une zone recouvrant 60% de la surface totale, permet d'obtenir de meilleures performances en

frottement par rapport à une texturation complète [73,76]. En revanche, Lu et Khonsari [77] montrent que ce sont les surfaces complètement texturées qui sont plus performantes en régime mixte par rapport à celle qui le sont partiellement à cause du phénomène de lubrification secondaire (lubrification additionnelle provoquée par les cavités de rétention d'huile).

3.1.4. Grandeurs géométriques

3.1.4.1. Largeur de stries

La largeur est en général liée à la profondeur de stries ainsi que sa densité. Elle dépend également des conditions de fonctionnement. Comme dans le cas de la densité de stries, une largeur de stries relativement élevée est recommandée dans plusieurs articles. Mezghani et al. [54] recommande une largeur de stries supérieure à 20 µm, Ma et Zhu [75] préconisent pour des cavités circulaires un diamètre allant au-delà de 200 µm et Wakuda et al. [78] considère un diamètre de 100 µm comme idéal.

3.1.4.2. Profondeur d'aspérités

La profondeur d'aspérités optimales est en général relativement faible par rapport à sa largeur. Elle est en général inférieure à 10µm comme le montrent les études suivantes : [75,78,79]. En revanche, il est admis dans plusieurs études qu'elle doit être relativement élevée par rapport à la rugosité superficielle (principe d'une surface plateau) [6,8].

3.1.4.3. Rapport profondeur/ largeur

Le rapport entre profondeur et largeur de cavités est un paramètre important. Il permet de déterminer les profondeurs par rapport aux largeurs de cavités pour permettre l'obtention des textures géométriquement « idéales ». Ce rapport est généralement inférieur à 10% (paramètre d'aspect $\lambda \geq 10$) [71,75,80].

3.1.4.4. Rapport profondeur de cavité/film d'huile

Pascovici et al. [73] dans le cadre d'une étude de paliers partiellement texturés montre qu'un rapport entre la profondeur de cavité et l'épaisseur minimale de film d'huile de 50% est optimal en termes de frottement. Autrement dit, le ratio optimal film d'huile/profondeur de cavité a une valeur située autour de 2. Ce ratio optimal a également été énoncé dans [81] pour des cavités générées numériquement. Il permet l'obtention d'une valeur de pression

hydrodynamique maximale et peut être obtenu mathématiquement par la résolution de l'équation de Reynolds et de l'équilibre des charges. Une étude simplifiée sur les coins d'huile des paliers hydrodynamiques a permis de montrer qu'une valeur du ratio film d'huile/profondeur de cavité égale à 2,2 permet au palier de résister aux charges maximale, tandis qu'un ratio égal à 1 (palier lisse) annule la pression hydrodynamique [32].

3.1.5. Effet d'échelle

L'échelle de grandeur des aspérités et rugosité peut influencer les performances fonctionnelles d'une surface texturée. Jackson [82], via une étude numérique, a montré que si l'on diminue l'échelle de texturation, pour le cas de stries avec un rapport profondeur/largeur identique, à l'ordre nanométrique (les textures sont généralement de l'ordre du micron), cela entraîne une diminution locale de la viscosité du lubrifiant. Ce qui a pour conséquence une réduction des forces de frottement et par conséquent celle du coefficient de frottement.

3.1.6. Rugosité

Plusieurs études ont montré que la réduction de la rugosité moyenne (arithmétique ou quadratique) contribue significativement à la réduction du frottement [64,83]. Il est admis, mais pas clairement prouvé, que c'est principalement la réduction la rugosité superficielle des plateaux comparativement à la profondeur des vallées qui contribue le plus à la baisse en frottement [6,8].

En revanche, Menezes et al. [84,85] ont montré, pour le cas des contacts secs métal/métal et métal/polypropylène, que le frottement est contrôlé par la surface en contact la plus dure mais dépend moins du paramètre Ra. Un paramètre traduisant la variation instantanée de rugosité (la pente de rugosité) appelé « Δa » a été introduit pour cette étude. Il a été observé que le frottement augmente avec « Δa ».

3.2. Effet sur la lubrification

3.2.1. Géométries des cavités

Siripuram et al. [86] ont montré que les fuites de lubrifiant ainsi que l'épaisseur du film d'huile dépendent de la taille des aspérités de texture, de leur forme, de la concavité du profil ainsi que de leur orientation. Nanbu et al. [81] a étudié l'effet sur la lubrification pour des

textures particulières. Celles-ci sont constituées de stries discontinues transversales au mouvement pour différents profils de cavités (Figure 1. 18).

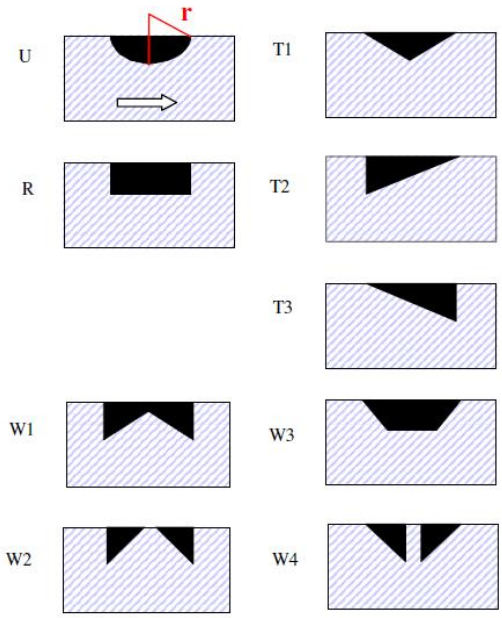


Figure 1. 18. Profils de cavités [81]

Comme indiqué dans la Figure 1. 18, dans le cas d'un mouvement unidirectionnel, les profils de types rectangulaire (R), triangle rectangle convergent (T3) et à double triangles rectangles (W2 et W4) sont préférés pour une épaisseur optimale du film de lubrification. Cela s'explique par le fait que ces profils favorisent la convergence du fluide à l'approche du corps en contact. Concernant les motifs qui régulent la lubrification, Ren et al. [87] montrent que des stries sinusoïdales perpendiculaires au mouvement ainsi que des cavités réparties en forme d'arête de poisson (Figure 1. 19) permettent d'obtenir de fines épaisseurs de film d'huile.

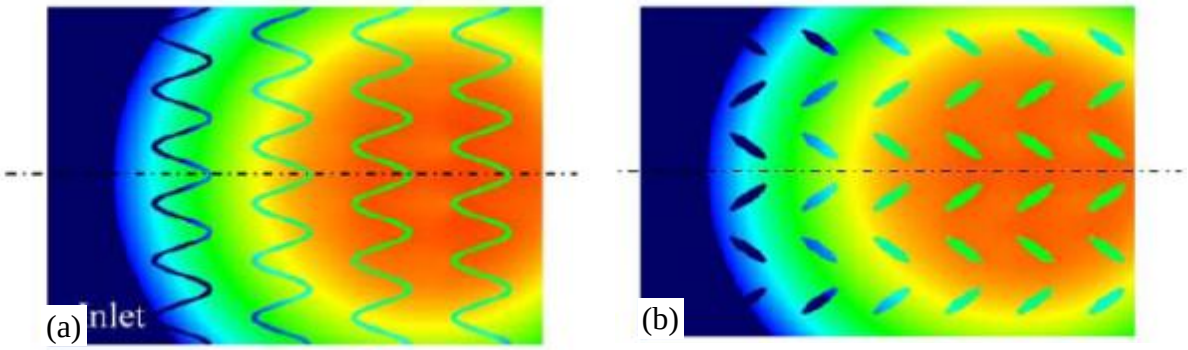


Figure 1. 19. Stries de formes sinusoïdales se propageant transversalement (a) et cavités réparties en arête de poisson (b) [87]

D'après Costa et Hutchings [88], des motifs en forme de chevrons pointant dans le sens du glissement, permettent une meilleure lubrification par rapport aux motifs circulaires ou sous forme de stries transverses (Figure 1. 20). Ce type de motif fait penser à une demi-zone de croisement de stries, ce qui montre l'intérêt du rodage en stries croisées sur l'amélioration de la lubrification.

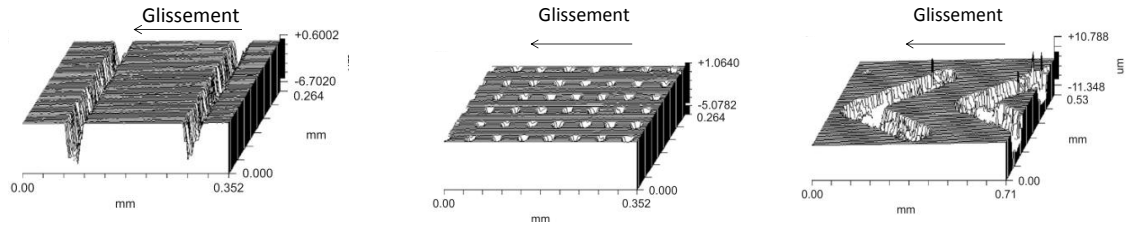


Figure 1. 20. Textures en (a) stries transversales, (b) cavités circulaires et (c) chevrons [88]

3.2.2. Orientation des cavités

Concernant l'orientation des motifs de textures par rapport au mouvement, il a été montré que de faibles orientations (30° selon [52]) permettent d'obtenir des films de lubrifiants plus épais [52,81]. En revanche, Costa et Hutchings [88] montrent que l'effet de l'orientation des stries sur la lubrification dépend de la contrainte normale exercée sur la zone de contact à de faibles vitesses de glissement (de 0 à 0,04 m/s). Pour des forces normales relativement grandes (de 22 et 61 N), les stries transversales permettent d'obtenir des films plus épais, tandis que pour des contraintes relativement faibles (12N), ce sont les stries parallèles au glissement qui augmentent l'épaisseur de film. Autrement dit, l'orientation des cavités dépend des conditions d'utilisation, l'idéal serait de choisir des stries avec des orientations intermédiaires bien déterminées de façon à pouvoir utiliser des plages de fonctionnement plus larges.

3.2.3. Densité de striation

Souvent, la densité optimale en termes de lubrification est de l'ordre de 5-10% [88–90]. Cette valeur doit respecter la zone d'influence minimale des cavités minimisant le chevauchement des différentes zones d'influence du lubrifiant [89]. Comme indiqué par Zhu et al. [90] des textures très denses (d'une densité au-delà de 20-30%) peuvent être la cause de ruptures de films.

3.2.4. Grandeurs géométriques

3.2.4.1. Profondeur d'aspérités

En règle générale, une cavité assez profonde permettrait d'améliorer la lubrification et par conséquent d'élargir la zone d'influence de lubrification de la cavité [89]. D'après Tala-Ighil et al. [76], pour une texture profonde (où la profondeur de cavité est supérieure à l'épaisseur de film), la meilleure amélioration des performances du palier est observée dans la zone de déclinaison du champ de pression (zone de profil divergent où le champ de pression chute). Cela affecte positivement la cavitation (zone de rupture de film due à une dépression) en augmentant la zone de contact entièrement séparée par un film d'huile. De plus, la profondeur de cavité s'ajuste en fonction de l'épaisseur de film désirée. Des profondeurs inférieures à 0,2-0,3% du rayon Hertzien (typiquement quelques microns ou moins) contribuent à des films fins tandis que des cavités trop profondes pourraient avoir des impacts négatifs sur la formation de film et l'endommagement de surface dus à la fatigue du contact [90]. Il a été suggéré par Kovalchenko et al. [74] d'utiliser des profondeurs suffisamment petites : aux alentours de 3µm selon Nanbu et al. [81], 0,9µm selon Křupka et al. [91]. Concernant le rapport de la profondeur de cavité par rapport à la largeur, il est situé aux alentours de 7-8 % pour une bonne lubrification [88,91]), de 3 à 6% pour obtenir pour obtenir des films minces [87].

3.2.4.2. Défauts géométriques

Il a été révélé que les défauts des textures réelles peuvent causer 10 à 20% d'écarts des performances fonctionnelles par exemple en termes de lubrification pour les textures à cavité triangulaires [90]. L'usure en revanche a un effet positif sur la lubrification dû à l'accommodation des surfaces frottantes, puisqu'elle permet dans certains cas, par exemple, de passer d'un régime de lubrification limite à un régime de lubrification mixte [74].

3.3. Effet sur la pression hydrodynamique

Une cavité permet de générer de la microportance qui est une force permettant la séparation de deux surfaces en contact par le lubrifiant [74]. Ainsi, les textures de surfaces agissent comme des micro-paliers comme il l'a été mis en évidence dans une étude de Tomanik [59] où les cavités générée par texturation laser permettent de générer une pression hydrodynamique significative.

3.3.1. Géométrie des cavités

Il a été montré que des stries fines rectilignes orientées perpendiculairement au glissement ou sinusoïdales à amplitude élevée par rapport à la période et orientées dans le sens du mouvement permettent d'obtenir les pressions hydrodynamiques les plus élevées [81,87]. Concernant, l'effet du profil de cavité (voir Figure 1. 18), il a été montré que les profils T3 convergents (pour une surface en contact unidirectionnel), W2 et W4 (pour des contacts à directions alternées) permettent de réguler la pression hydrodynamique et de permettre une zone de maintien de film d'huile plus large [81].

3.3.2. Densité de texturation

Selon Wang et al. [92], une densité de texturation de 5-10% maximise la pression hydrodynamique. Pour des surfaces partiellement texturées, une densité de la zone texturée optimal peut tendre vers 100% [73]. Dans plusieurs études sur des paliers la texturation partielle, elle apparait comme plus efficace pour générer de la pression hydrodynamique [73,77] permettant de mieux résister aux charges [59] notamment en zones de cavitation [76].

3.3.3. Orientation de textures

D'après Ren et al. [87] et Zhu et al. [90], ce sont les stries transversales et en forme sinusoïdales se propageant dans le sens du mouvement qui offrent la pression hydrodynamique la plus élevée parmi une multitude de motifs (arête de poisson, stries discontinues, sinusoïdales orientées verticalement, etc.) (Figure 1. 21).

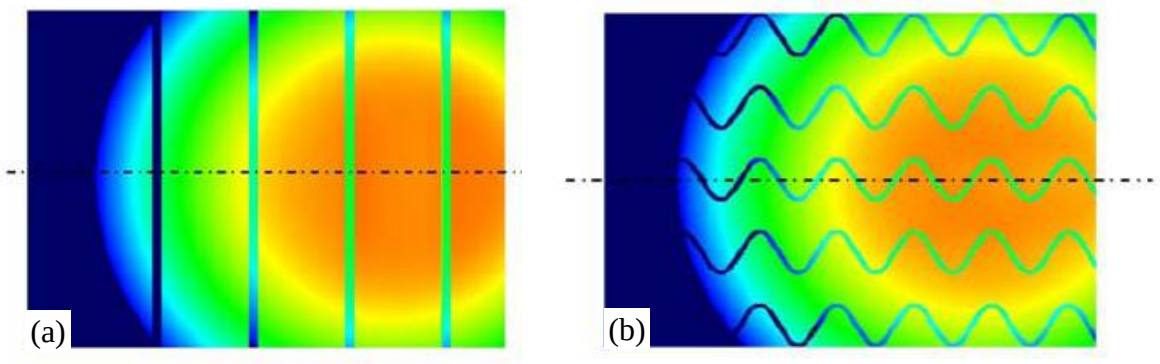


Figure 1. 21. Strie droite transversale (a) et sinusoïdales se propageant longitudinalement (b) [87]

3.3.4. Effet d'échelle

Jackson [82] montre qu'une diminution d'échelle vers l'échelle nanométrique entraine un changement de viscosité qui contribue à une diminution de la capacité à résister aux charges. Ceci montre que la rugosité (taille de stries et plateaux), réduite à une certaine échelle est néfaste sur les performances fonctionnelles.

3.4. Discussion

La lubrification est importante pour la réduction du frottement dans les systèmes mécaniques et la résistance aux charges grâce à la pression hydrodynamique. Cependant, dans l'industrie on cherche à la réduire notamment au niveau du système SPC (Segment-Piston-Cylindre) des moteurs thermiques puisque l'huile brûlée a un impact néfaste à l'environnement. Il est donc important de trouver un compromis entre réduction du frottement avec une consommation d'huile limitée et avec une capacité de charge correcte afin d'utiliser les systèmes mécaniques à un meilleur rendement. Un indicateur important est l'épaisseur du film d'huile. Un film d'huile trop fin est peu recommandé car risque d'engendrer des contacts entre solides générant un frottement et une usure élevés tandis qu'un film trop épais est synonyme de surconsommation de lubrifiant. Cette revue bibliographique a permis de déterminer les paramètres de texturation influents sur les performances fonctionnelles de frottement, de lubrification et pression hydrodynamique. Il ressort de cette étude les points suivants :

- Au niveau de la géométrie, des cavités en forme de losange affiné (à 60°) à profil trapézoïdal, de stries fines croisées ou en forme de chevrons pointant dans le sens de glissement semblent intéressantes pour la réduction du frottement. Des stries de formes sinusoïdales se propageant transversalement ainsi que des motifs de stries en arête de poisson sont considérés comme favorables à l'obtention de films d'huile fins. En revanche, des stries à motif sinusoïdal se propageant dans le sens de glissement sont intéressantes en termes d'augmentation de la pression hydrodynamique.

- Concernant l'orientation des stries, il ressort en règle générale que celle-ci dépend des conditions de vitesses et forces, interagissant directement avec les différents régimes de lubrification. Ainsi des stries transversales sont intéressantes en termes de frottement en régimes mixte/limite (forces normales élevées et/ou vitesses faibles) puisqu'elles ont tendance à augmenter l'épaisseur de film ainsi que la pression hydrodynamique. En revanche, pour des conditions de lubrification mixte/hydrodynamique (forces normales faibles et/ou

vitesse de glissement élevée), des stries longitudinales sont les plus intéressantes puisqu'elles permettent une réduction du frottement tout en évitant la génération de film d'huile trop épais. Des angles intermédiaires permettent l'obtention de films d'huile minces avec de bonnes performances en frottement. Des angles de 45°, ou bien 135° permettent de répondre à cela. Toutefois, afin d'optimiser le frottement, de faibles angles de striation pourraient être plus adaptés pour du régime mixte (à proximité des points d'inversion du piston) tandis que des angles de striation élevés pourraient l'être en régime purement hydrodynamique (à proximité du milieu de course du piston).

- Un autre critère important est le rapport entre la profondeur et la largeur d'une cavité. Ce rapport permettra de dimensionner la géométrie des textures. La profondeur des cavités est à déterminer avec soin sachant que c'est un paramètre majeur pour la rétention de lubrifiant et influence l'épaisseur de film d'huile. Une augmentation de la profondeur de stries pour une largeur de stries quasi-constante serait propice à l'augmentation de l'épaisseur de film d'huile. Afin de réguler l'épaisseur de film en fonction des performances tribologiques, il serait important d'agir sur la taille de striation. Il ressort qu'un rapport largeur/profondeur de stries de 1 à 15% (selon les études) permet d'obtenir de bonnes performances en frottement. Ce rapport est 3 à 6% pour assurer un film d'huile fin [87].

- Concernant la rugosité, il s'avère que la réduction de celle-ci influe significativement sur la réduction du frottement et de l'épaisseur de film. Toutefois, des valeurs trop faibles de rugosité ne permettraient pas la génération de la pression hydrodynamique nécessaire pour garantir de bonnes performances tribologiques. Néanmoins, la contribution des plateaux et vallées dans la rugosité (souvent la rugosité est exprimée par le paramètre Ra) n'a pas été clairement définie dans la littérature pour la réduction de frottement.

4. Conclusions

Cette étude bibliographique a permis de situer le sujet dans son contexte industriel et académique notamment en ce qui concerne les différentes procédés de rodage et de texturation de surfaces anti-friction, les méthodes de caractérisation de textures de surfaces rodées et les techniques d'évaluation des performances fonctionnelles.

En ce qui concerne le procédé, différentes technologies existent. On distingue les procédés par abrasion, par texturation laser (LST), gravure, injection de revêtements poreux et anti-friction, etc. Ces procédés permettent de générer une large gamme de textures et états de

surface. Toutefois, leur mise en place et utilisation, hormis les procédé par abrasion, demande un coût considérable. Pour ces raisons, nous privilégierons les différentes possibilités de rodage par abrasion.

Par rapport aux méthodes de caractérisation de surface, il a été montré que les méthodes standard, utilisées actuellement dans l'industrie automobile, sont inefficaces pour la corrélation process-fonctionnalité puisqu'elles ne donnent pas assez d'informations sur l'effet d'échelle, la morphologie de surface ainsi que l'anisotropie de surface. Des techniques prometteuses sont proposées comme l'approche multiéchelle par ondelettes, pour une analyse fine des différentes échelles de surface, la décomposition morphologique en plateau et vallées, pour une caractérisation fonctionnelle de la morphologie de surfaces rodées ainsi que les paramètres tridimensionnel issus de la norme ISO 25178 pour une meilleure prise en compte de l'anisotropie de surface. Néanmoins, la capacité de ces techniques à lier process et fonctionnalité reste à prouver comparativement aux techniques usuelles, avant toute utilisation.

Au niveau de l'évaluation des performances fonctionnelles des surfaces rodées, différentes techniques existent telles que les essais moteurs, les essais sur tribomètre et les modèles numériques du contact SPC. Bien entendu, les essais moteur représentent le plus fidèlement les performances fonctionnelles du système SPC mais ont un coût considérable. Des essais sur tribomètre, avec système bielle-manivelles se focalisant uniquement sur les performances en frottement sont plus abordables. La modélisation numérique peut être un complément, qui permettrait l'observation des phénomènes physique en jeu au niveau du contact segment-fût. Afin de réduire les coûts de calcul tout en prenant en compte le plus fidèlement possible la topographie réelle de surface, des modèles déterministes de frottement utilisant la méthode par différences finis sont plus appropriés.

Enfin, la littérature a montré que les performances fonctionnelles dépendent de la texture des surfaces, notamment de la topographie (amplitude des plateaux, taille des stries, échelle de surface) et de l'anisotropie (orientations et géométries des motifs de striation). Ainsi, les performances fonctionnelles de différentes caractéristiques de surfaces rodées pourront être observées via un couplage entre techniques de caractérisation de surface et méthodes de caractérisation fonctionnelles (principalement le coefficient de frottement dû à son impact sur l'efficacité énergétique des moteurs). L'objectif étant de fabriquer une surface idéale qui

permettrait d'obtenir les meilleures performances fonctionnelles et surtout de déterminer le procédé le plus robuste et flexible pour la générer.

Chapitre 2
Protocole expérimental : procédé de rodage, caractérisation de surface et tribométrie SPC

1. *Introduction*

Ce chapitre est consacré à la présentation des moyens mis en place pour l'élaboration d'une démarche expérimentale permettant de corréler le procédé de rodage avec la caractérisation de surface et les performances fonctionnelles de textures rodées. La plupart des moyens expérimentaux présentés sont mis en place dans une plateforme de recherche collaborative entre Renault et le laboratoire MSMP, le Pôle Process Eco². Dans un premier temps, sont présentées les deux machines de rodage présentes dans ce pôle, une machine de rodage industrielle de type NAGEL et un démonstrateur de rodage flexible permettant de générer des textures innovantes. Dans une seconde partie, sont présentés les différents moyens en place pour la mesure des états de surfaces de l'échelle macroscopique (mesure de forme) à l'échelle microscopique (mesure topographique). Une dernière partie est consacrée à un banc d'essais tribométriques caractérisant le contact Segment-Chemise (SC) pour l'évaluation des performances en frottement des textures rodées.

2. *Démarche expérimentale*

La démarche entreprise pour la définition de textures optimales de surfaces rodées au niveau fonctionnel consiste à corréler process-surface-fonctionnalité (Figure 2. 1). Cette corrélation pourra se faire par le couplage entre caractérisation de surface et évaluation des performances fonctionnelles suivant les étapes ci-dessous :

1) Générer différentes textures par la variation des paramètres process comme la granulométrie des pierres de rodage, la pression de contact pierre-fût, le temps de rodage, etc.
2) Faire un analyse multiéchelle fine de surfaces rodées pour extraire les paramètres géométriques, les écarts de forme, les topographies 2D et 3D ainsi que les paramètres texturaux.
3) Etude et comparatif des performances en frottement des différentes surfaces générées.

4) Etude de la corrélation process-produit et recherche des paramètres process et texturaux optimaux.

Une démarche itérative est ainsi effectuée jusqu'à l'obtention d'une surface performante au niveau fonctionnel.
Dans un premier temps, cette démarche sera appliquée sur les différents procédés de rodage industriel (Helical Slide Honing (HSH), rodage plateau ou Plateau Honing (PH) et Slide Honing (SH)) afin de comprendre l'influence des différences texturales générées par ces procédés sur les performances fonctionnelles au niveau frottement. Dans un deuxième temps, la même démarche expérimentale sera appliquée pour l'exploration des procédés de rodage innovants en prenant en considération les conclusions obtenues suite à l'étude des procédés existants.
Dans ce chapitre, une description détaillée est faite sur les moyens expérimentaux nécessaires à l'étude et l'optimisation du rodage de cylindres de moteurs du process à la mesure du frottement SC en passant par la caractérisation multiéchelle de surfaces rodées. Ainsi, cette présentation s'articule comme ceci :

- Au niveau process, une machine de rodage industrielle de type NAGEL sera utilisée pour le rodage conventionnel ainsi qu'une machine de rodage flexible pour le rodage innovant.
- Au niveau surface, différents moyens métrologiques seront utilisés de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique pour la caractérisation des textures rodées.
- Au niveau fonctionnel, un banc d'essais tribométrique sera utilisé pour l'évaluation des performances fonctionnelles.

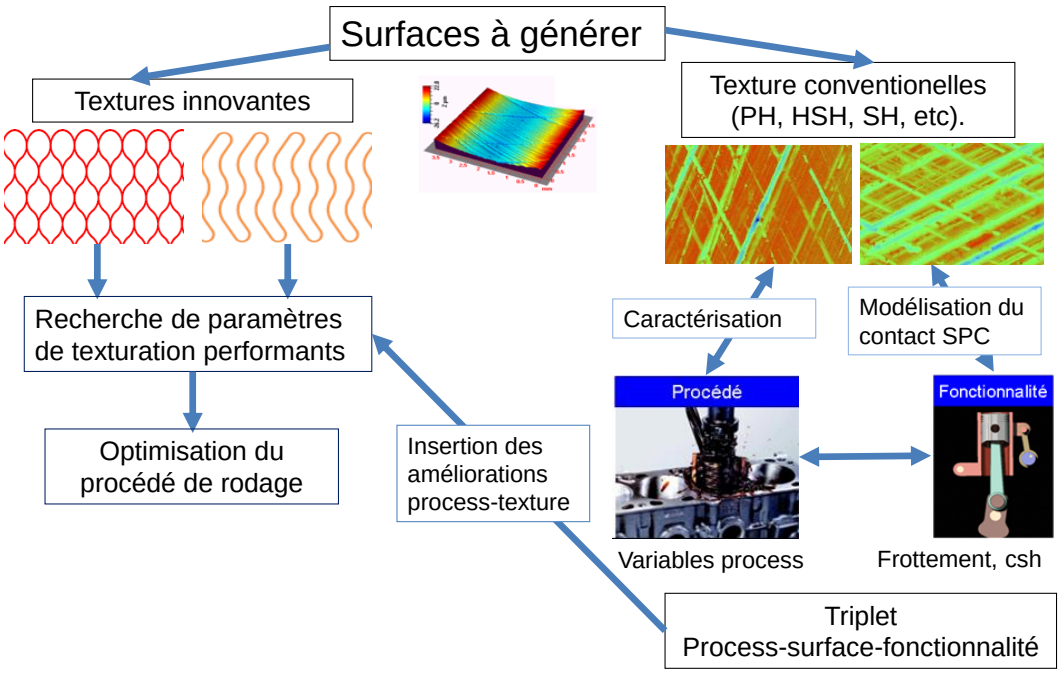


Figure 2. 1. Illustration de la démarche d'optimisation du rodage

3. *Bancs de rodage instrumentés*

3.1. Machine de rodage conventionnel

Une machine de rodage de production de type NAGEL (Figure 2. 2) est utilisée pour étudier les technologies de rodage générant des stries croisées [25,26]. Cette machine est plus adaptée pour générer des textures à faible angle de rodage (en dessous de 70°) en raison de ses limitations en termes de vitesses et accélérations axiales [93]. Elle est dotée deux types de rodoirs : un rodoir ébauche à simple expansion et un rodoir finition à double expansion (une expansion électromécanique pour enlèvement de matière en profondeur (supérieure à 20 µm) lors des étapes ébauche et finition et une expansion hydraulique pour l'écrêtage de surface). Cette machine instrumentée, permet d'étudier plusieurs variables du procédé de rodage (positions de la broche, efforts de contact, couple de rodage, temps de cycle…). Les différents signaux enregistrés sont traités par la suite. En revanche, l'instrumentation machine ne permet pas l'étude des efforts suivant l'axe de la broche. A cet effet, un montage composé d'un capteur de force piézoélectrique (Table Kistler) est réalisé pour l'évaluation des différentes composantes de l'effort au cours du process et par conséquent l'analyse énergétique du process de rodage par le calcul de l'énergie spécifique consommée.

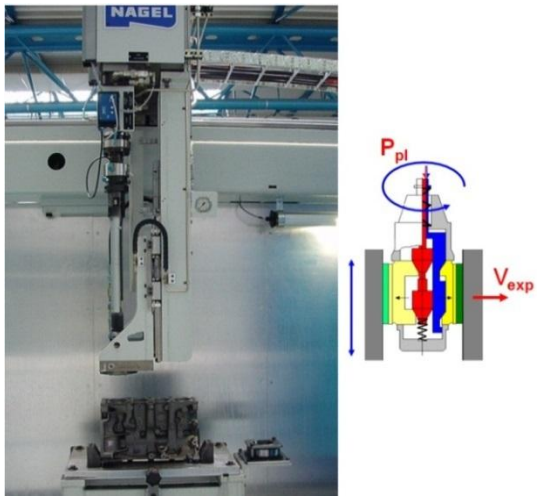


Figure 2. 2. Machine de rodage verticale NAGEL avec bloc moteur K9K et représentation schématique de la dynamique du rodoir

Cette dernière est utilisée comme un paramètre fondamental pour la caractérisation du procédé de rodage. Elle est définie comme étant l'énergie dépensée par unité de volume de matière enlevée. L'énergie spécifique du procédé de rodage définit le mécanisme d'enlèvement de matière de la pièce usinée. Elle est calculée par la relation suivante :

$$E_{sp} = \frac{P_m \times t_{honing}}{Q_w} \qquad (2.\ 1)$$

Où t_{honing} est la durée effective du rodage, P_m est la puissance moyenne utilisée par le procédé de rodage, calculé comme étant la différence entre la puissance sous contrainte enregistrée durant la finition et la puissance sans contrainte enregistrée avant et après le test, et Q_w est l'enlèvement de matière volumique donné par l'équation suivante :

$$Q_w = \pi H_C (D^2 - d^2) \qquad (2.\ 2)$$

Où H_C est la longueur du fût, D et d sont respectivement les diamètres de cylindre avant et après opération de rodage finition.

Ainsi, le mécanisme d'abrasion, l'efficacité énergétique du rodage ainsi que le taux d'usure des pierres peuvent être évalués en fonction de la valeur de l'énergie spécifique. Une valeur très élevée de cette énergie suggérerait un faible pouvoir de coupe, une usure plus prononcée

des pierres par volume de matière enlevée accompagnée d'une surconsommation énergétique du procédé [25].

Des essais de rodage conventionnel (PH, HSH et SH) ont été réalisés sur cette machine instrumentée de production série pour la compréhension de l'influence des différences texturales entre ces différents procédés sur les performances fonctionnelles du système SC. Les essais sont réalisés sur des blocs-moteur de type K9K (Figure 2. 3) équipant des véhicules à moteur diesel.

La composition des carters-cylindre est donnée dans la Table 2. 1, il s'agit de la fonte graphite lamellaire de type (GL04) pour ses performances en terme d'usinabilité [94], de coulabilité et de dureté comparativement à l'aluminium qui nécessite un traitement de surface avant rodage [14].

Table 2. 1. Composants chimiques fonte GL04 (carter-cylindres K9K)

Unité	C	S	Si	Mn	P	Cu	Sn	Cr	Ni	Mo	Ti
%	3,10 / 3,50	>0,15	1,90 / 2,40	0,50 / 0,90	>0,12	>0,60	>0,15	0,25 / 0,35	>0,20	>0,10	-

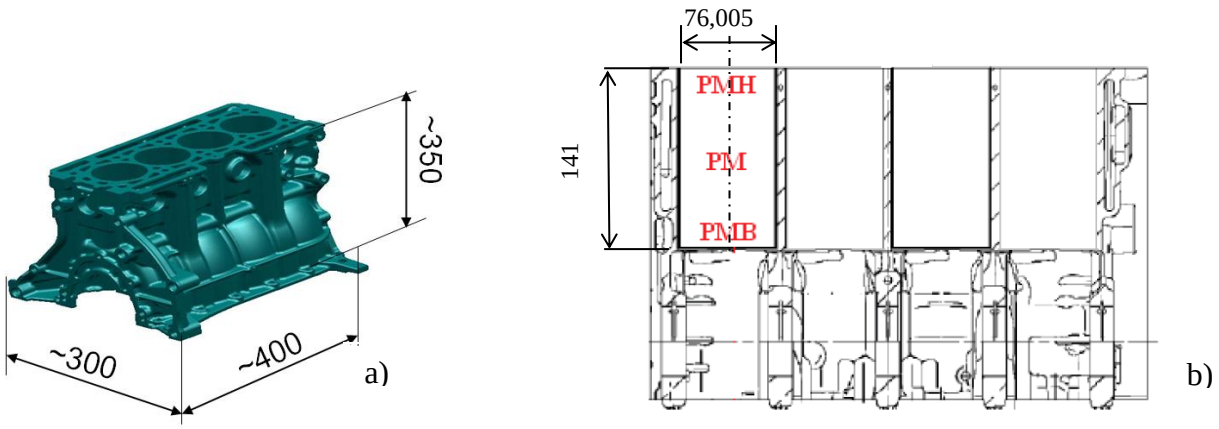


Figure 2. 3. Dimensions (en mm) d'un bloc moteur de type K9K (a) et d'un cylindre rodé ainsi que les zones fonctionnelles b) : le Point Mort Haut (PMH), le Point Milieu (PM) et le Point Mort Bas (PMB)

Concernant le type de pierres abrasives utilisées, des pierres en diamant à matrice métallique sont montées sur le rodoir ébauche, tandis que des pierres en carbure de silicium sont utilisées sur le rodoir finition-plateau (Table 2. 1).

Table 2. 2. Type de pierrage rodeuse NAGEL

Etape de rodage	Type de pierres	Dimensions (L(mm)xl(mm)xh(mm))	Taille de grains (µm)
Ebauche	Diamant métallique	70x2x5	107 à 250
Finition	Carbure de Silicium + Diamant métallique	70x6x6	50 à 330
Plateau	Carbure de Silicium	70x6x6	30

En revanche, au vu des limitations de ce moyen de rodage en termes de performances dynamique et de flexibilité process, un démonstrateur de rodage flexible sera utilisé pour générer des textures innovantes [93].

3.2. Démonstrateur de rodage flexible

Une machine de rodage flexible (Figure 2. 4) est utilisée pour la génération de textures innovantes. Elle est le fruit de travaux de recherche collaborative entre Renault et le laboratoire MSMP [93,95].

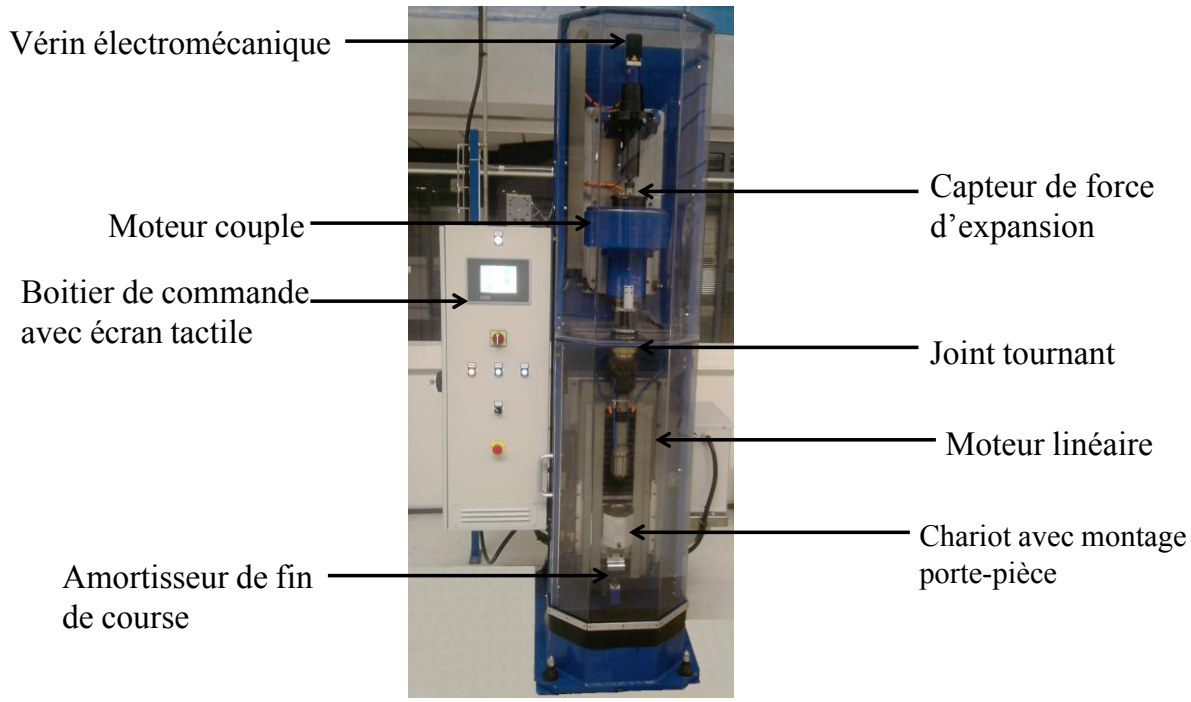


Figure 2. 4. Principaux éléments du démonstrateur de rodage flexible

Les principales caractéristiques de la machine sont les suivantes :

- Contrairement aux machines industrielles qui sont bridées par les fabricants, cette dernière est complètement ouverte à la programmation (Commande Numérique ISO). Elle permet par conséquent d'explorer de nouvelles pistes de procédés de rodage.
- Au niveau de la dynamique, à la différence des machines industrielles où les mouvements de battement axial et de rotation sous tous deux effectués par l'outil de rodage, pour le cas de cette machine, le mouvement de rotation est embarqué uniquement au niveau de l'outil de rodage tandis que le mouvement de battement est effectué par le porte-chemise (Figure 2. 4).
- A la différence des procédés actuels de rodage par abrasion qui permettent de générer que des textures en stries droites croisées, cette machine permet également la génération de textures curvilignes (cercles, ellipses, ondulations, etc.) avec la prise en compte d'une dynamique non linéaire des battements et une vitesse de rotation variable.
- Au niveau des performances dynamiques, cette machine permet l'étude des procédés à grandes vitesses et accélérations axiales tout en respectant la conformité des surfaces.
- Elle est dotée de deux types de rodoirs à simple expansion (toutes électromécaniques), pour l'étape ébauche et l'étape finition-plateau. Un asservissement en vitesse d'expansion peut être utilisé pour l'étape finition, tandis qu'une régulation en force de contact peut être effectuée pour l'étape plateau. Les dimensions des pierres sont flexibles (Table 2. 3) et offrent plus de possibilités au niveau de la cinématique process et sont adaptées par conséquent à la génération de texturation innovantes (rodage à anisotropie variable, cercles, etc.).

Table 2. 3. Type de pierres utilisées pour le démonstrateur de rodage flexible

Etape de rodage	Type de pierres	Dimensions (L(mm)xl(mm)xh(mm))	Taille de grains (µm)
Ebauche	Diamant métallique	80x3x(5 à 6)	107 à 250
Finition	Carbure de Silicium + Diamant métallique	(35 à 80)x(4 à 6)x6	80 à 330
Plateau ou superfinition	Carbure de Silicium + Diamant métallique	(35 à 80)x(4 à 6)x6	12 à 30

- Elle est destinée au rodage de chemises seules (sans bloc moteur) pour des moteurs à essence type H5 (Figure 2. 5 et Figure 2. 6). Les avantage de l'utilisation de telles chemises, sont l'amélioration des performances dynamique du procédé de part une masse embarquée beaucoup plus faible qu'un bloc moteur ainsi qu'une facilité d'utilisation dans des bancs d'essais de frottement monocylindre.



Figure 2. 5. Type de chemises utilisées (à droite : chemise après pré-usinage ; à gauche : chemise brute de fonderie)

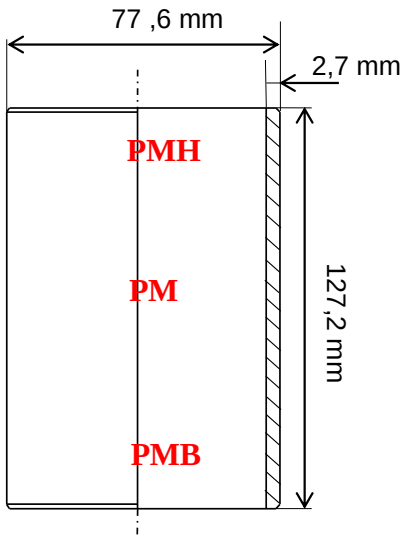


Figure 2. 6. Dimensions d'une chemise usinée et zones fonctionnelles : Point Mort Haut (PMH), Point Milieu (PM) et Point Mort Bas (PMB)

Concernant le type de matériau utilisé pour les chemises à roder, il s'agit de la fonte graphite lamellaire de type GL16 (Table 2. 4). Sa composition chimique est proche de la fonte GL04 des carters cylindre K9K présentés antérieurement.

Table 2. 4. Composants chimiques fonte GL16 (Chemises H5).

Unité	C	S	Si	Mn	P	Cu	Sn	Cr	Ni	Mo	Ti
%	3,20 — 3,50	>0,15	2,20 — 2,80	0,80 — 1,00	0,35 — 0,45	>0,60	>0,10	0,40 — 0,60	>0,20	>0,10	-

La fonte graphite lamellaire est un matériau fragile avec un niveau élevé de déformation lorsque l'on est confronté à un problème d'épaisseurs minces, ce qui est le cas pour les chemises utilisées où l'épaisseur après tournage n'excède pas de 2,5 mm. Il est donc nécessaire de trouver un système de pré-usinage de chemises minimisant les déformations induites par l'effet du serrage des mors du tour et de l'action de l'outil de coupe. Une étude numérique simplifiée en statique sous CATIA V5 a permis de comprendre l'effet de déformation pour une chemise en fonte seule et bi-matière avec une couche d'aluminium plus ou moins épaisse (Figure 2. 7).

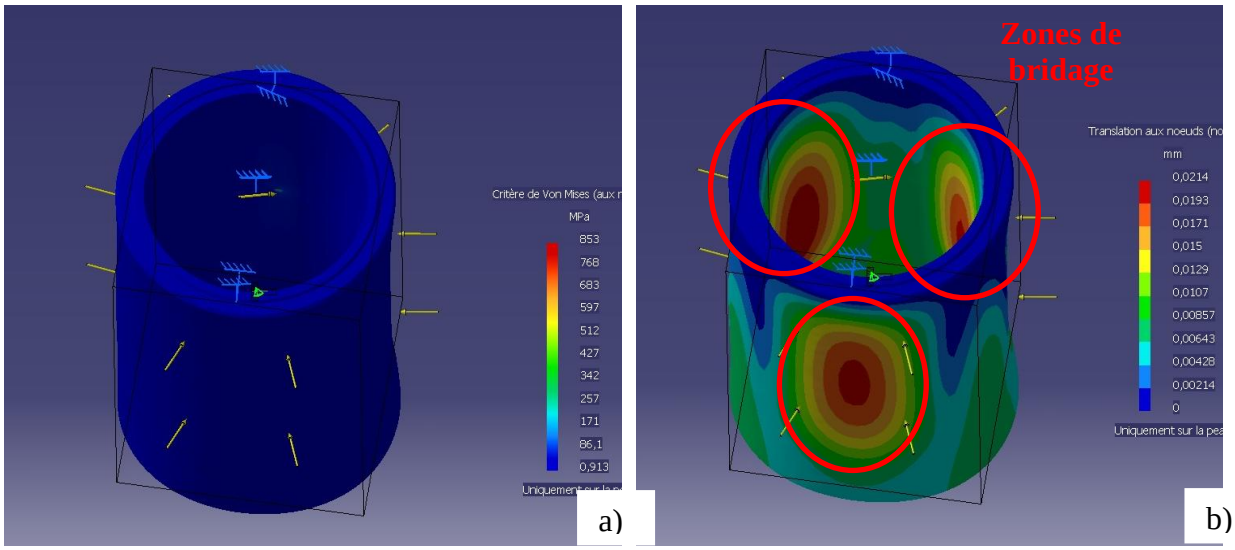


Figure 2. 7. (a) Contrainte (critère de Von Mises) et déformation (b) lors de la première passe de tournage d'une surface bi-matière (épaisseur 3mm)

Pour cette étude les conditions de calcul sont les suivantes :

- Matériaux :
  - Fonte : Module d'Young E=124 GPa, coefficient de poisson de 0,291, limite élastique de 310 MPa et déformation élastique maximale de 0,2%.
  - Aluminium : Module d'Young E=70 GPa, coefficient de poisson de 0,346, limite élastique de 95 MPa et déformation élastique maximale de 0,2 %.
- Conditions de coupe :
  - Pression spécifique de coupe, Kc=2900 N/mm²
  - 3 passes : Ebauche avec profondeur de passe (ap) au rayon=0,85 mm et Force de coupe Fc=247,5 N ; demi-finition avec ap au rayon=0,85 mm et Fc=187,5 N ; finition avec ap au rayon=0,45 mm et Fc=100 N.
  - Angle de projection des composantes normales et tangentielles de Fc de 75°.
  - Surface d'application de Fc de 0,17 mm².
- Conditions de bridage : sur 3 zones au niveau de la partie basse de la chemise espacées les unes des autres de 120° et d'une surface de 69cm² (aire totale bridage de 207cm²), la pression appliquée au niveau de ces mors est imposée à 5MPa.
- Maillage : élément de type tétraédrique linéaire, maillage global de $3mm^3$ et local (au niveau de la surface d'application de Fc) de $0,2mm^3$.

Les résultats de cette étude, précisant notamment les contraintes maximales ainsi que les déformations pour les différentes configurations à chaque opération de tournage, sont

documentés dans la Table 2. 5. Ces résultats montrent que l'ajout d'une couche d'aluminium permet de rigidifier la chemise et par conséquent mieux résister à la pression des mors lors des différentes étapes de tournage. Cependant, cette couche d'aluminium doit être supérieure à 3 mm d'épaisseur afin de s'affranchir des déformations plastiques et par conséquent ne pas dépasser la limite de déformation élastique de 0,2 % lors du tournage.

Table 2. 5. Résultats des simulations numériques des contraintes lors du tournage de différents types de chemises (Fonte, bi-matière fonte-aluminium à des épaisseurs d'aluminium de 3 et 5mm)

Opération	Matériau	Effort d'usinage (N)	Contrainte maximale (MPa)	Déformation maximale (µm)	Déformation (%) (limite élastique à 0,2%)
Tournage Ebauche	Bi-matière 5mm	247,5	853	21,4	0,12
	Bi-matière 3mm		845	28,7	0,21
	Fonte		845	83	1,08
Tournage Demi-Finition	Bi-matière 5mm	187,5	673	25	0,15
	Bi-matière 3mm		679	34,6	0,28
	Fonte		449	134	2,09
Tournage Finition	Bi-matière 5mm	100	373	28,4	0,18
	Bi-matière 3mm		386	41	0,36
	Fonte		353	198	3,60

En résumé, cette simulation a montré qu'avec des moyens de tournage classique, il n'était pas possible d'obtenir avec les chemises actuelles des défauts de forme convenables pour l'utilisation en rodage. Pour cela, deux possibilités se présentent ici :

- utiliser des chemises avec une couche additionnelle d'aluminium ;
- trouver une solution de tournage minimisant les déformations plastiques des chemises.

Dans un premier temps pour un besoin court terme (pour la validation fonctionnelle de la machine de rodage flexible) des chemises bi-matière issues de carter cylindres en aluminium (dont la surface des fûts est en fonte avec autour une couche d'aluminium) découpé ont été utilisées (Figure 2. 8). Le principal inconvénient de cette solution est le relâchement de contraintes après découpe des carter-cylindres, ce qui un induit un niveau de déformation non

négligeable (80-90µm de défaut de cylindricité) pour les futs centraux (futs 2 et 3) mais une déformation moindre (60µm) pour les futs latéraux (futs 1 et 4).



Figure 2. 8. Chemises bi-matière issues de carter-cylindre H5 en aluminium

Une autre alternative, serait de fabriquer un module de fonderie qui permettrait l'insertion d'une couche d'aluminium directement sur des chemises en fonte. Le principal inconvénient de cette solution est le coût de sa mise en place.

D'autres solutions ont été explorées dans le but de minimiser la déformation de chemises lors du pré-usinage comme celle qui consiste à insérer un bouchon à la demi- partie de la chemise qui subit le serrage des mors. Cette solution, malgré une amélioration du niveau de déformations des chemises, ne permet pas d'atteindre les niveaux de conformités nécessaires avant les opérations de rodage. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il existe un jeu, par endroits, assez important entre le bouchon et la chemise. Une dernière solution, consiste à utiliser une bague expansible de l'intérieur, au niveau d'une extrémité de la chemise, évitant le serrage de la chemise par mandrin et supprimant tout jeu entre le moyen de bridage et la chemise. C'est cette solution qui a été retenue pour le pré-usinage des chemises à roder.

Par la suite, les chemises une fois pré-usinées pourront être rodées et contrôlées à différentes échelles par les moyens métrologiques décris ci-après.

4. *Métrologie multiéchelle des surfaces rodées*

Dans cette partie sont présentés l'ensemble des moyens métrologique utilisés pour caractériser au mieux une surface rodée à différentes échelles et par conséquent analyser l'impact des variables process sur le fini de surface. Tout d'abord, seront décrits les différents moyens de contrôle dimensionnels du fût suivis des moyens de contrôle de surface à l'échelle macroscopique (écarts de forme) puis à l'échelle microscopique (rugosité).

4.1. Mesure du diamètre des fûts

Le diamètre est une donnée importante en rodage permettant l'évaluation de l'épaisseur de matière enlevée lors des étapes ébauche et finition où un mode d'expansion électromécanique est utilisé. Cette donnée permet d'évaluer l'efficacité du procédé en termes d'enlèvement de matière mais donne également une idée sur le fini de surface et par conséquent l'évaluation de la présence de rugosité résiduelle issue de l'étape antérieure de rodage.

Ici, deux types de moyens de contrôle sont utilisés (Figure 2. 9). Le premier est un vérificateur d'alésage de marque Mitutoyo pour les cylindres de de type K9K pour un diamètre de référence de 76,005 mm. Le second est un micromètre d'intérieur à trois touches de marque Mitutoyo utilisé pour les chemises H5 pour un diamètre fini de 72,207mm. Dans les deux cas le contrôle se fait sur trois niveaux, le Point Mort Haut (PMH), le Point Milieu (PM) et le point Mort Bas (PMB). La précision de ces moyens est de +/- 3 µm.



a)



b)

Figure 2. 9. (a) Vérificateur d'alésage, (b) micromètre d'intérieur à trois touches

4.2. Mesures de forme (Macro-échelles)

La mesure de forme est primordiale afin de conformer au mieux le segment à la chemise pour assurer un contact SPC (Segment-Piston-Cylindre) optimal en termes d'étanchéité, de lubrification et de frottement. Dans le cadre de notre étude, le défaut de forme doit être maîtrisé et minimal pour ne se focaliser que sur l'effet de texturation (rugosité, aspect de surface) sur les performances fonctionnelles.

A cet effet, un dispositif de contrôle de forme de type Mahr-MMQ 400 (Figure 2. 10) doté d'une bille de palpage d'un diamètre de 5mm est utilisé. L'erreur de mesure maximale de ce moyen est de 1 µm pour la cylindricité et de 0,7 mm pour la circularité. Pour les surfaces rodées, les écarts de circularité et de cylindricité sur trois niveaux (PMB, PM, PMH) du cylindre (Figure 2. 10) sont contrôlés.

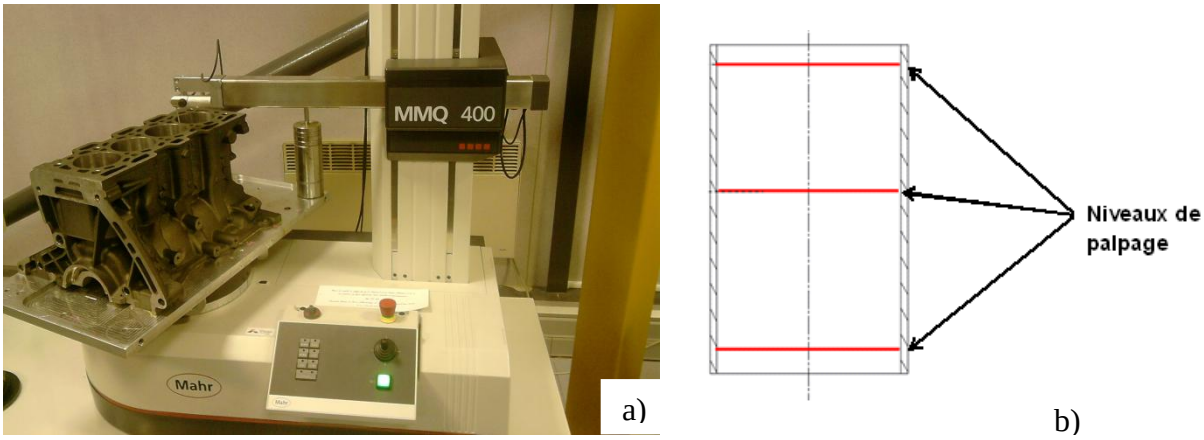


Figure 2. 10. Dispositif de mesure de forme (a) et zones de palpage du fût (b)

Par la suite, les surfaces dont les écarts de forme sont jugés acceptables seront sélectionnées pour une analyse fine des paramètres texturaux (rugosité, anisotropie).

4.3. Mesures de l'état de surface (Micro-échelles)

La topographie qui regroupe la rugosité et l'anisotropie de texture est un paramètre primordial sur les performances de frottement et de lubrification. Pour cela, des mesures bidimensionnelles (2D) pour l'analyse du profil et tridimensionnelles (3D) pour l'analyse topographique sont réalisées.

En ce qui concerne la mesure 2D, un rugosimètre tactile Surfascan doté d'un stylet avec une pointe en diamant de rayon de courbure 2 µm à un angle de 90° est utilisé (Figure 2. 11. (a)). La résolution verticale de cet appareil est de 0,01 µm. Sa résolution latérale est de 2 µm tandis que son amplitude de mesure verticale maximale est de 6 mm. La mesure se fait sur les 3 zones de frottement segment-cylindre (PMB, PM, PMH) d'une longueur de palpage de 16,8 mm (Figure 2. 11. (b)). Le profil 2D obtenu permettra via un filtrage standard (suivant les normes par rapport aux paramètres de profil), avec notamment une longueur d'onde

coupure λc=0,8 mm, d'obtenir les paramètres de rugosité 2D. Le traitement de ce profil par la transformée par ondelette permettra faire une décomposition multiéchelle.

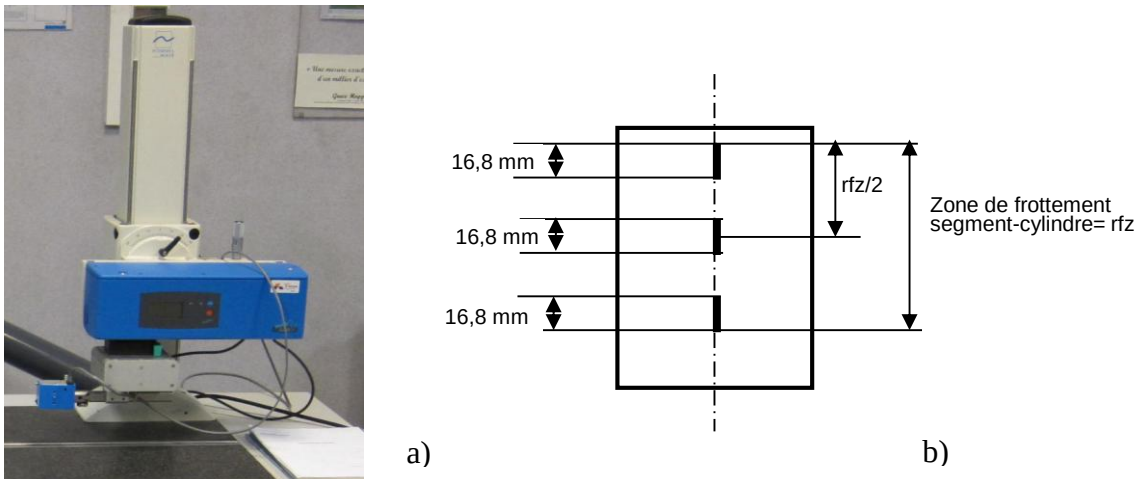


Figure 2. 11. (a) rugosimètre tactile, (b) zones de mesure de rugosité 2D

Pour la mesure 3D, des répliques de surfaces en silicone (Struers, Repliset F5) ont été réalisées afin d'analyser la texture de surface après l'étape de rodage plateau (Figure 2. 13. (a)). Les caractéristiques topographiques de ces répliques sont mesurées à différents endroits (PMB, PM, PMH) avec un interféromètre à lumière blanche, WYKO 3300 NT (Figure 2. 12). Les caractéristiques de mesure sont les suivantes :

- Filtre de type « PSI high mag » ou Phase Shifting Interferometry (interférométrie à décalage de phase à haut grossissement qui est adapté aux surfaces de faible rugosité) ;
- Objectif x20 ;
- Amplitude de mesure maximale de 500 µm ;
- Résolution verticale (en z) de 10 nm ;
- Résolution latérale (en x, y) de 2 µm.

L'image de la surface a été discrétisée en 640x480 points espacés d'un pas constant de 1,94µm (Figure 2. 13. (b)). La composante de forme est éliminée des données 3D par la méthode des moindres carrés suivant la fonction Spline cubique. La topographie 3D obtenue permettra via un filtrage standard afin d'extraire les paramètres de rugosité 3D. La topographie 3D obtenue est analysée par différentes méthodes : la décomposition

multiéchelle et la décomposition morphologique en plateaux/vallées (cf. Chapitre 3). Elle est également introduite dans un modèle déterministe de simulation de frottement du contact segment-piston-cylindre (cf. Chapitre 3).



Figure 2. 12. Interféromètre Veeco pour mesure de la topographie 3D

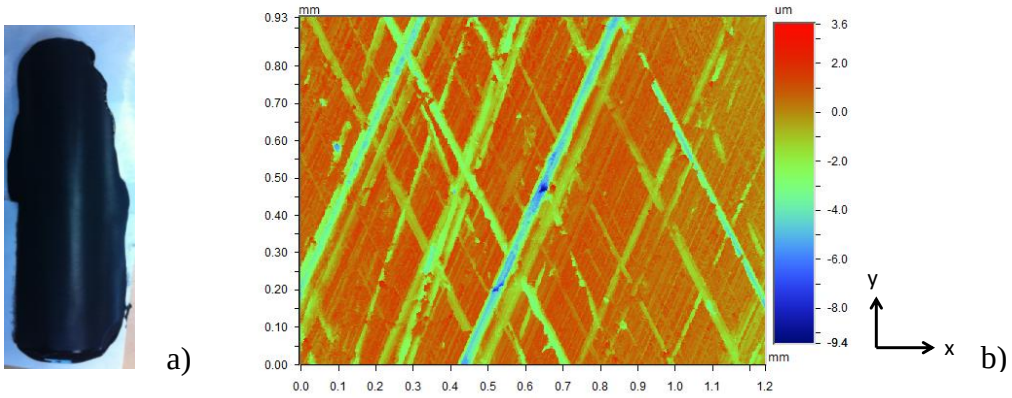


Figure 2. 13. (a) Réplique en silicone d'une surface rodée, (b) Topographie de surface obtenue après mesure sur interféromètre.

Il est important de noter que la métrologie de surface doit être réalisée en amont des essais tribométriques puisque ces derniers sont à caractère destructif.

5. *Banc d'essais de frottement SC*

Afin d'évaluer l'impact du fini surface sur le frottement, un banc d'essais tribométriques (Figure 2. 14) a été conçu au laboratoire MSMP pour l'étude du contact Segment-Cylindre. Ce tribomètre a pour finalité de discriminer les différents types de texturations suivant leurs performances en frottement.

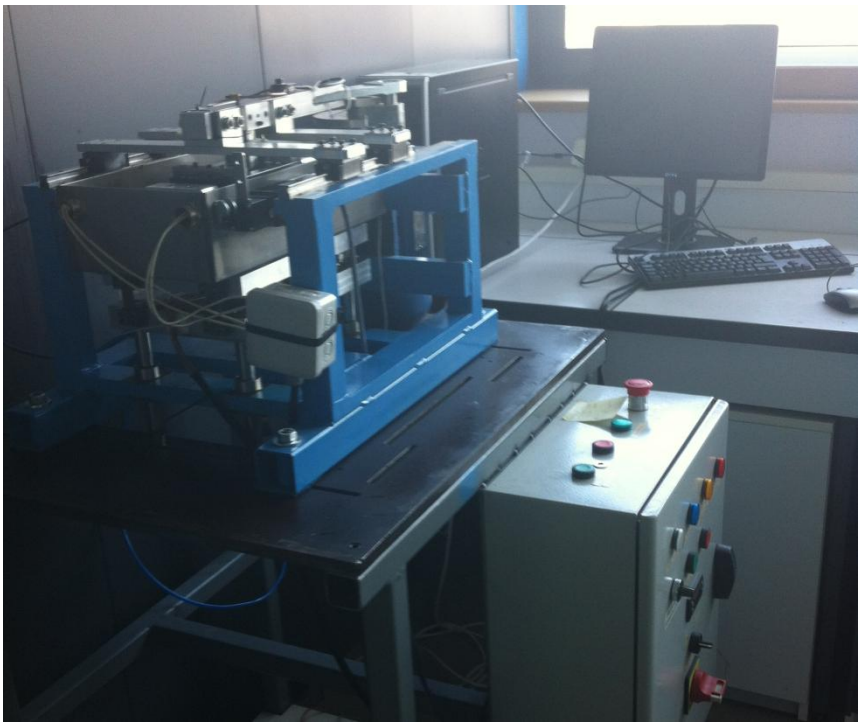


Figure 2. 14. Vue d'ensemble du tribomètre

5.1. Caractéristiques du tribomètre

Le tribomètre est composé de trois grands ensembles (Figure 2. 15) :

- la partie frottante où réside le porte segment en contact lubrifié avec la pièce rodée ;
- la table où sont implantés les capteurs
- le système de réglage de la force normale.

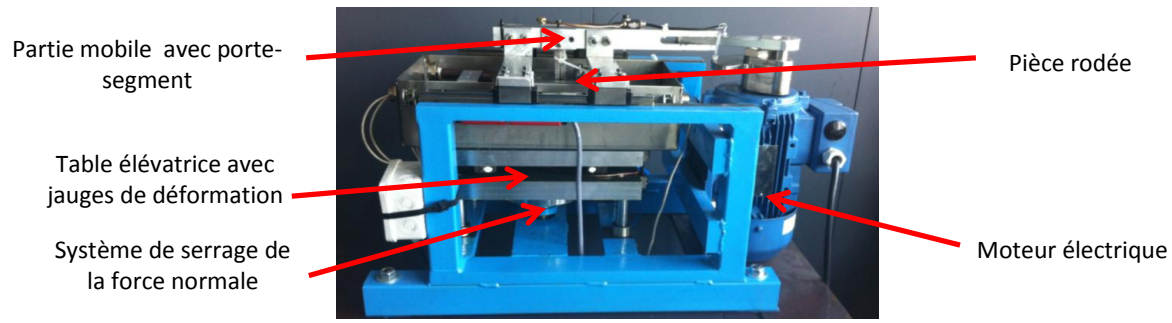


Figure 2. 15. Principaux éléments du tribomètre.

5.1.1. Partie frottante

La partie mobile comprend un système mono-segment utilisant un segment d'étanchéité pour moteurs H5. Le système d'entraînement du segment est de type bielle-manivelle avec moteur

électrique (Figure 2. 15). La plage de vitesse de translation moyenne de cet ensemble est comprise entre 0,14 m/s et 0,8 m/s. La course du porte-segment est de 80 mm.

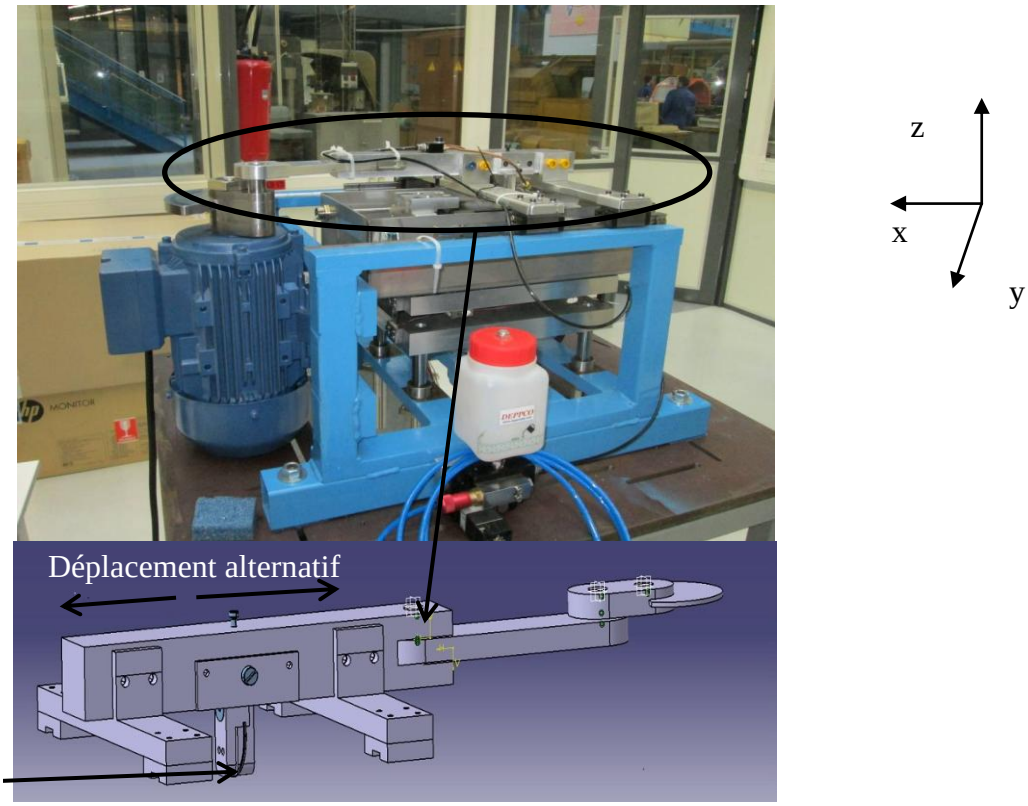


Figure 2. 16. Partie frottante du tribomètre.

Pour la partie fixe, des éprouvettes découpées des carter-cylindres rodés (Figure 2. 17. b) ou bien des chemises H5 rodées et insérées dans un support spécifique sont utilisées (Figure 2. 17. a et Figure 2. 18).



Figure 2. 17. Photographies (a) d'une éprouvette de cylindre rodé issue d'un carter cylindre K9K et (b) d'une chemise H5 découpée

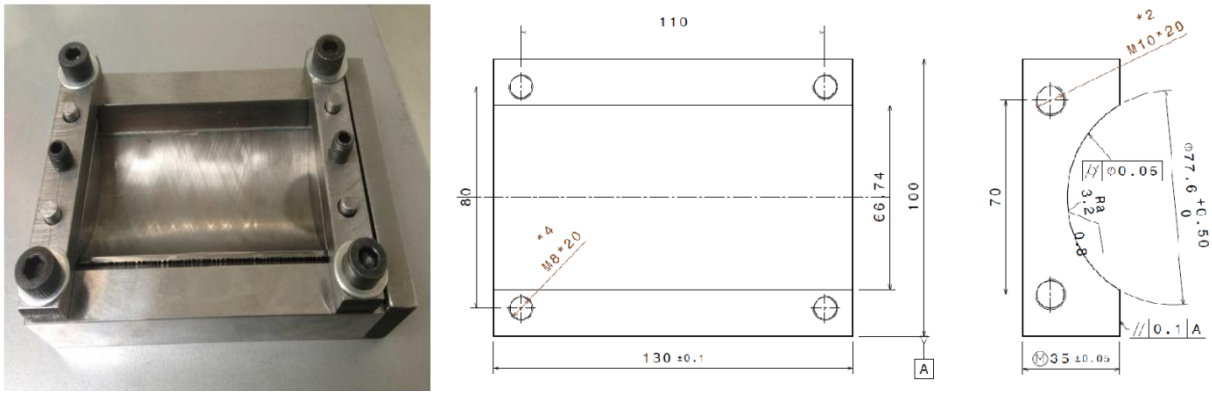


Figure 2. 18. (a) Photographie du porte-chemise, (b) Plan du porte-chemise.

Concernant la lubrification du contact segment-fut, un système de lubrification par pulvérisation par microgouttelettes a été prévu à cet effet. Les lubrifiants utilisés sont de l'huile de moteur semi-synthétique de type 10W40 ainsi que de l'huile minérale à forte viscosité de type Total BSS.

Les caractéristiques de l'huile 10W40 sont les suivantes :

- Densité de 865 kg/m^3 ;
- Viscosité de 97 centistokes à 40°C ;
- Viscosité de 15 centistokes à 100°C.

Concernant l'huile Total BSS ses caractéristiques sont les suivantes :

- Densité de 960 kg/m^3 ;
- Viscosité de 800 centistokes à 25°C.

5.1.2. Système d'acquisition des efforts

Le coefficient de frottement est défini par le rapport des efforts normaux sur les efforts tangentiels. Afin d'évaluer ces efforts, 8 jauges de déformation sont utilisées (Figure 2. 15), quatre pour évaluer les efforts normaux et quatre pour déterminer les efforts tangentiels. Pour chaque catégorie d'effort un montage en quart de pont à trois fils est utilisé. Le traitement des valeurs d'efforts se fait via une carte d'acquisition de marque National Instruments reliée à un ordinateur à une fréquence d'acquisition de 50 000 points par minute. L'ensemble du système d'acquisition des efforts a été calibré à l'aide de poids normalisés. Un exemple de relevés d'efforts normaux et tangentiels est présenté en Figure 2. 19. Pour le cas de ce tribomètre, le calcul du coefficient de frottement pour une charge normale et vitesse de translation données

se calcule par le ratio de la valeur moyenne des signaux des efforts tangentiels sur les efforts normaux relevés sur les différentes jauges, sur une plage d'acquisition donnée.

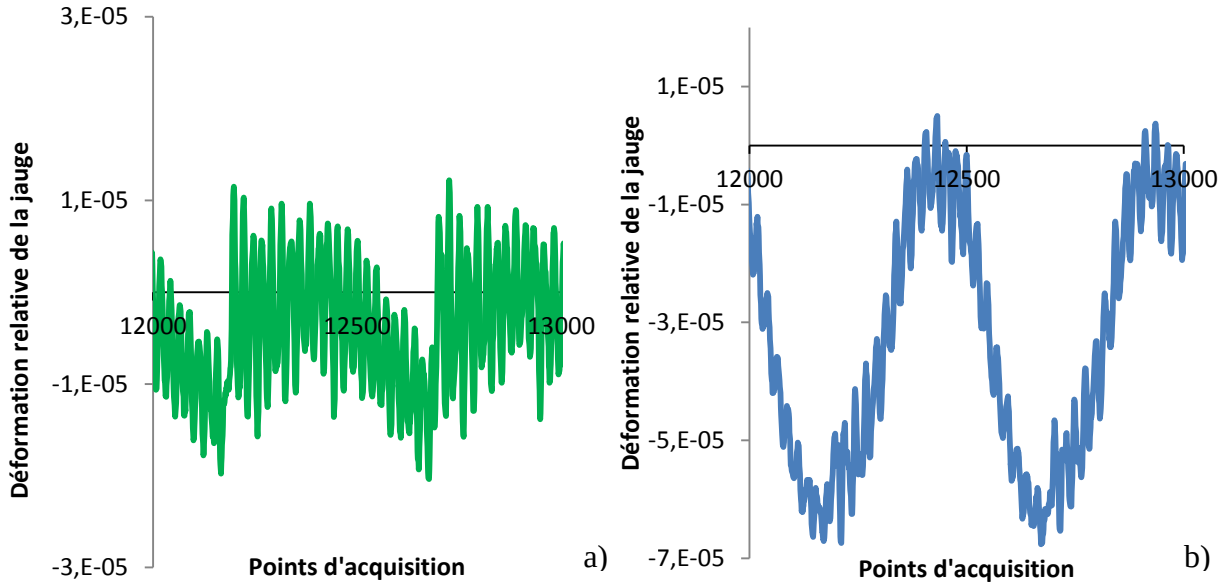


Figure 2. 19. Relevés des efforts d'une jauge d'efforts (a) tangentiels, (b) normaux.

Ces relevés montrent qu'aux points d'inversion, l'effort tangentiel change brusquement de sens. L'effort normal varie également mais manière quasi-sinusoïdale car l'ensemble du tribomètre est monté en balancier. Ceci n'est pas problématique puisqu'au final seront calculés les efforts moyens issus des jauges normales et tangentielles pour le calcul du coefficient de frottement (ratio des efforts tangentiel/efforts normaux).

5.1.3. Système d'ajustement de la force normale

Pour le réglage de la force normale, un système vis-écrou est utilisé à cet effet. Le serrage de la vis de commande (Figure 2. 15) permettra la montée de la table et par conséquent la pièce à tester (éprouvette ou chemise) qui s'appuiera sur le segment à une force donnée. Dans nos essais la force normale varie de 50 à 200N mais elle peut atteindre 800N en utilisant ce système d'ajustement.

5.2. Validation du tribomètre

5.2.1. Introduction du plan d'essai

Des essais de validation ont été réalisés sur des éprouvettes H5 rodées par rodage plateau en usine afin de faire le comparatif entre ce tribomètre et les moyens tribométriques existants chez Renault. Deux paramètres sont étudiés, la répétabilité ainsi que la justesse du moyen. Les essais sont répétés 5 fois. Une courbe de Stribeck est réalisée et est comparée à celle des essais tribométriques de Renault.

5.2.2. Précision des régions de lubrification testées

Les différentes surfaces sont comparées dans les régimes limite, mixte et hydrodynamique. Des huiles de type 10W40 (huile classique de moteur) et Total BSS (huile à forte viscosité) sont utilisées respectivement dans des conditions de lubrification mixte/limite et hydrodynamique (Figure 2. 20). Dans les conditions de régime limite et mixte, une huile de type 10W40 est utilisée tandis que dans des conditions de lubrification hydrodynamique, une huile de type Total BSS A ce sujet, a plage du nombre de Sommerfeld est située entre $1{,}0 \times 10^{-6}$ et $1{,}0 \times 10^{-3}$. Le nombre de Sommerfeld, S, est un nombre sans dimension utilisé comme variable à l'axe des abscisses de la courbe de Stribeck et est défini par la formule suivante :

$$S = \frac{P_{visqueuse}}{P_{diamètrale}} = \frac{\mu_D \times v}{F_N / l_y} \qquad (2.\ 3)$$

Où μ_D est la viscosité dynamique (Pa.s) du fluide utilisé, v la vitesse linéaire (m/s) de translation du segment, F_N la force normale (N) d'appui du segment sur la chemise et l_y la largeur de contact (m).

v s'exprime par la formule suivante :

$$v = \frac{N \times 2C}{60} \qquad (2.\ 4)$$

Où N est la vitesse de rotation (tr/min) du moteur électrique dont la plage d'utilisation est située entre 60 et 300 tr/min ainsi que C la course du segment qui est égale à 80mm.

5.2.3. Validation et conclusion

La courbe de Stribeck moyenne avec les écart-types des différentes chemises testées sont représentés dans la Figure 2. 20.

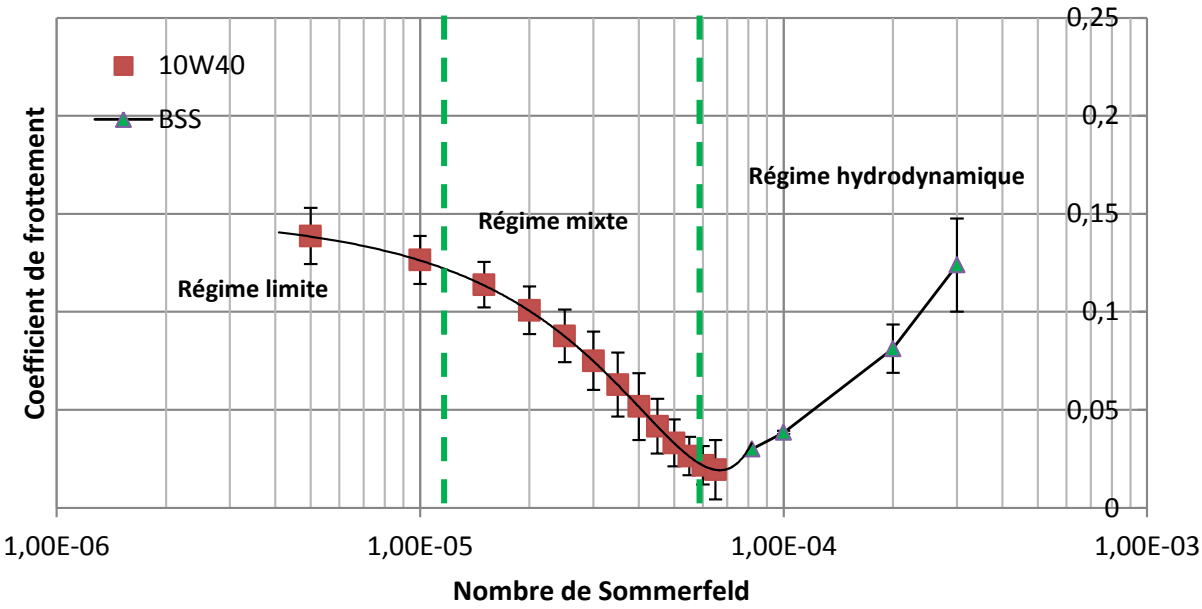


Figure 2. 20. Courbe de Stribeck des essais sur de frottement sur des éprouvettes H5.

De ces courbes, l'incertitude relative de répétabilité a été évaluée à 9 % ainsi que l'erreur de justesse moyenne pour les régimes limite, mixte et début de régime hydrodynamique à 8 %. L'erreur totale, qui est la somme quadratique des erreurs de justesse et de répétabilité, est estimée à 12 %. Ces résultats permettent de valider le tribomètre en termes d'évaluation du frottement de chemises rodées en régime de lubrification mixte et début de régime hydrodynamique.

6. *Conclusion*

L'étude du procédé de rodage est réalisée par l'utilisation de deux types de machines :

- Une machine de production permettant de réaliser des textures conventionnelles dans des conditions de rodage industriel ;
- Une machine de rodage flexible, permettant la modification de la cinématique process et la génération de textures innovantes aux motifs originaux.

Une méthodologie expérimentale rigoureuse a été mise en place pour établir le lien entre process et fonctionnalité et par conséquent améliorer le procédé de rodage. Elle est organisée de façon à lier le triptyque process-surface-fonctionnalité de la manière suivante:

- l'impact du process sur la surface se fait par des moyens expérimentaux capables de caractériser la surface de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique ;

- les performances fonctionnelles des surfaces rodées sont évaluées par le biais d'un tribomètre permettant de caractériser le contact segment fût adaptée à différentes géométries et configurations de surfaces.

Chapitre 3
Méthodes numériques liant le procédé aux performances fonctionnelles

1 Introduction

Dans ce chapitre seront présentées les différentes méthodes numériques de caractérisation et de simulation utilisées pour établir le lien process-surface (caractérisation de surface) ainsi que le lien surface-produit (évaluation des performances fonctionnelles).

Au niveau de la caractérisation de surface, il est important de choisir les méthodes de traitement de surface ainsi que les paramètres associés les plus pertinents afin d'expliquer au mieux l'impact des paramètres process ainsi que l'effet des paramètres texturaux sur les performances fonctionnelles. Cette partie expliquera le choix des méthodes de caractérisation de surface jugées les plus adaptées pour le procédé de rodage et son impact sur la fonctionnalité des surfaces générées.

Au niveau de l'évaluation des performances fonctionnelles, un modèle numérique du contact Segment-Cylindre (SC) a été développé. Ce modèle, permettra d'évaluer le frottement issu de surfaces mesurées expérimentalement ou générées numériquement. Il donnera également des informations complémentaires sur les phénomènes physiques mis en jeu comme la pression hydrodynamique, l'aire de contact ou l'épaisseur de film d'huile qui est directement liée à la consommation de lubrifiant. Dans cette partie, sera décrite la méthodologie de modélisation du contact SC ainsi que sa validation expérimentale.

2 Caractérisation de la texture des surfaces rodées

La texture d'une surface rodée doit à la fois expliquer l'impact du procédé sur le fini de surface et l'influence de sa topographie sur les performances fonctionnelles du système SC. Pour cela, la topographie de la surface rodée, mesurée à l'échelle microscopique, doit être analysée finement de façon à extraire les paramètres les plus pertinents permettant le lien process-produit.

Les principales caractéristiques d'une surface rodée (Figure 3. 1) sont les suivantes :

- la nature multiéchelle de la topographie issue du caractère multiétape du procédé de rodage générant des striations larges (étape rodage finition) et des striations fines (étape rodage plateau) ;
- la présence de deux principales composantes topographiques fonctionnelles qui sont les plateaux (rugosité superficielle) et les vallées (réservoirs de lubrification) ;
- l'anisotropie texturale caractérisée par des stries parallèles dans deux directions différentes séparées d'un angle donnée dans la direction perpendiculaire à l'axe du cylindre appelé angle de rodage.

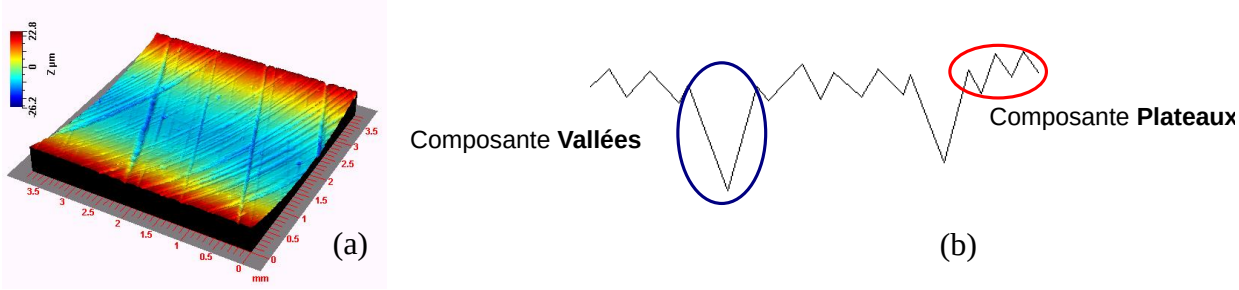


Figure 3. 1 (a) Topographie 3D d'une surface rodage Plateau (b) Profil 2D typique d'une surface rodée montrant les deux composante plateau et vallées

Dans cette partie, nous nous intéresserons à trois méthodologies avancées de caractérisation permettant de prendre en compte un pour plusieurs aspects, caractéristiques d'une surface rodée cités ci-dessus. Les approches adoptées sont respectivement:

- la caractérisation tridimensionnelle issue de la nouvelle norme de caractérisation ISO 25178 [30];
- la décomposition morphologique en composantes plateau et vallées (décomposition PV) [31];
- l'analyse multiéchelle par ondelettes continues [25,26].

La pertinence de chacune des méthodes dans la corrélation process-produit sera étudiée dans le cas spécifique du rodage Plateau.

2.1 Paramètres de caractérisation tridimensionnelle de surfaces rodées

2.1.1 Paramètres standard 2D

Actuellement, dans l'industrie automobile, les paramètres de rugosité issus du contrôle de surfaces rodées, dérivent des normes bidimensionnelles (2D) ISO 13565-2 et ISO 4287. Ces paramètres sont issus de profils 2D de surface obtenus par mesure au rugosimètre tactile. Dans plusieurs cas de figures le lien process-produit n'est pas établi avec ces paramètres [27–29]. Cela est dû principalement à la non prise en compte de l'anisotropie et aussi de l'aspect multiéchelle des surfaces rodées [27].

2.1.2 Paramètres standard 3D

Afin de caractériser au mieux l'anisotropie de surface, l'utilisation des paramètres tridimensionnels (3D) issus de la norme ISO 25187 pourrait être une alternative. Ces paramètres sont issus de la topographie 3D de surfaces mesurées par interférométrie. La mesure 3D a pour inconvénient d'être moins rapide que la mesure 2D (quelques minutes d'acquisition comparées aux quelques secondes pour une mesure 1D de longueur similaire).

2.1.3 Comparaison des performances des paramètres 2D et 3D

Afin de comparer la robustesse de ces paramètres de surface 3D par rapports aux paramètres 2D, une étude comparative [96] sur des surfaces rodées a été réalisée en faisant varier les paramètres process influents:

- à l'étape finition : la taille des grains d'abrasifs « Dg » (de 30 à 180µm), la vitesse d'expansion de l'outil « Vexp» (de 1,5 à 8µm/s) ;
- à la phase plateau : les variables process considérées sont la pression de contact « P_{pl} » (de 2,3 à 10 bars) et le temps de rodage « t_{pl} » (de 2 à 20 battements). Le détail des autres conditions process sont présentés dans [27,97,98].

Par la suite, les surfaces générées sont caractérisées par les différentes méthodes 2D et 3D pour en extraire, au moyens de filtres standards, respectivement les paramètres ISO 4287 (Ra), ISO 13565-2 (Rk, Rpk, Rvk) et ISO 25187 (Sa, Sk, Spk, Svk).

Les évolutions de rugosité arithmétique 2D (Ra) et 3D (Sa) en fonction des variables process "Df" et "Vexp" lors de la phase finition sont présentées respectivement en Figure 3. 2. Les paramètres de profils et de surface montrent tous deux que la rugosité augmente avec les

paramètres process “Df” et “Vexp”. En revanche, pour des granulométries faibles, une sous-évaluation de la rugosité de surface en utilisant le paramètre Ra est observée. Les paramètres surfaciques traduisent mieux l’effet de l’augmentation de la vitesse d’expansion sur la rugosité comme démontré dans [26,27].

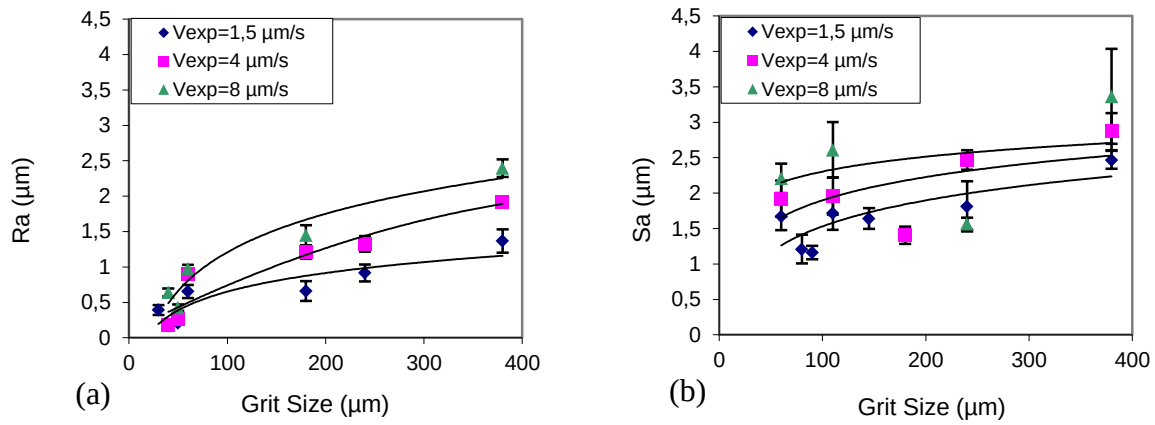


Figure 3. 2. Evolution des paramètres 2D et 3D de rugosité Ra (a) et Sa (b) pour différentes tailles de grains d’abrasifs et à différentes vitesse d’expansion

La Figure 3. 3 présente respectivement l’évolution des paramètres de profils (Rpk, Rvk) et de surfaces (Spk, Svk) en fonction des variables de rodage de la phase plateau. L’effet de la pression de contact pierre/fût sur la réduction de la rugosité est mieux évalué par les paramètres 3D que par leurs équivalent 2D. La Figure 3. 3 (d) montre en particulier qu’au-dessus d’une pression de 5.5 bar, la hauteur des vallées de la surface, générées à l’étape finition, est réduite aux premiers instants de l’opération plateau. A cette valeur de pression critique et pendant un durée allant jusqu’à 12s, seule la rugosité des plateaux est modifiée par écrêtage.

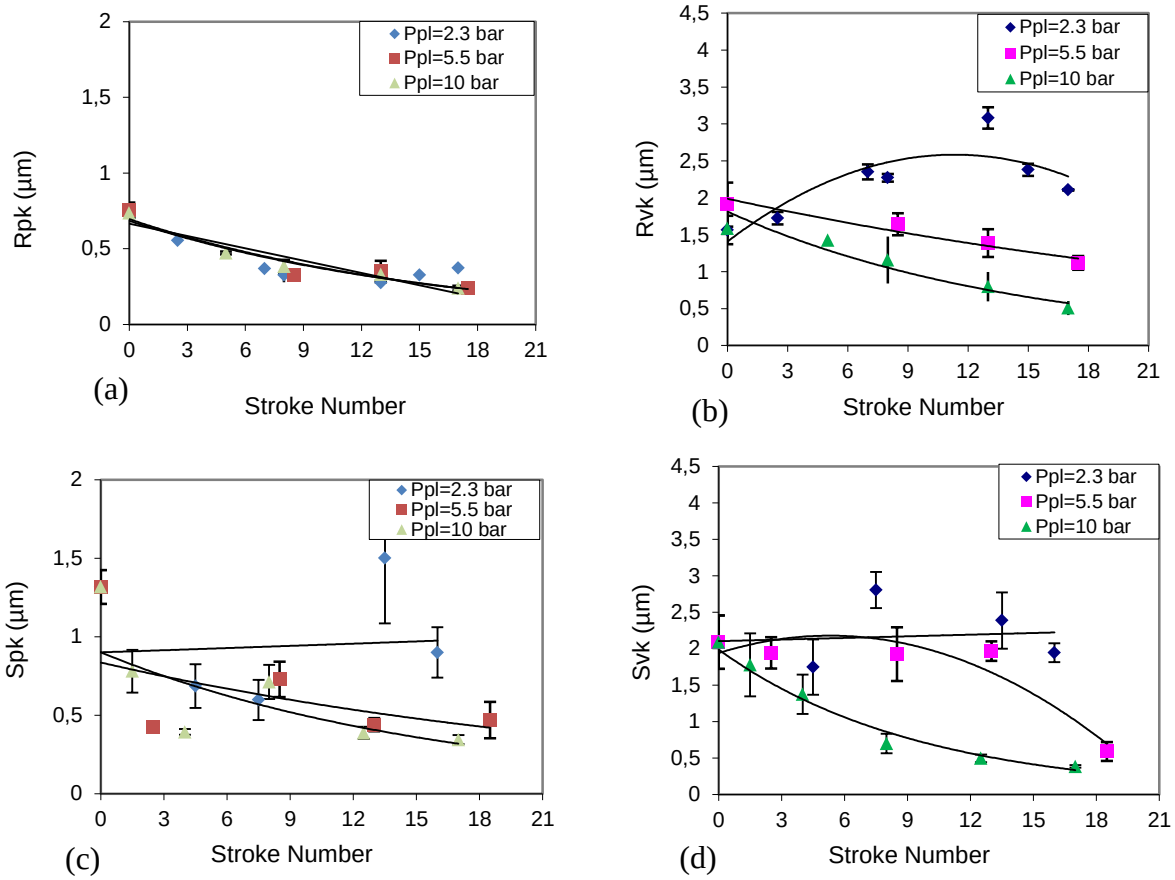


Figure 3. 3. Evolution des paramètres 2D de rugosité Ra (a), Rk (b), Rpk (c) et Rvk (d) pour différentes pressions de contact et durées lors de la phase de rodage plateau

Les coefficients de corrélation linéaire entre les paramètres process, les paramètres de rugosité de profils (2D) et de surface (3D) ainsi que la fonctionnalité (coefficient de frottement prédit suivant le modèle décrit en section 3) sont résumés dans la Table 3. 1. La corrélation process-produit est considérée comme forte dès que le coefficient de corrélation linéaire est supérieur à 0,7. Les valeurs obtenues confirment clairement la robustesse des paramètres 3D par rapport aux paramètres 2D en phase plateau mais aussi en phase finition.

Les paramètres 3D sont plus représentatifs de l'impact du procédé sur la taille des pics supérieurs et des vallées profondes. En effet lors de l'étape de rodage plateau, pour un procédé industriel, (Ppl=5,5 bars et temps de rodage inférieur à 8 battements), seul les pics sont écrêtés, les vallées profondes restent intactes. Ceci est clairement représenté par les paramètres 3D, Spk et Svk.

Table 3. 1. Corrélation linéaire entre variables process, paramètres de rugosité et fonctionnalité

Corrélation process-surface				Paramètres de rugosité	Corrélation surface-fonctionnalité			
Df	**Vexp**	**tpl**	**P_{pl}**		**Df**	**Vexp**	**tpl**	**P_{pl}**
0,67	0,37	0,72	0,65	**Ra**	0,52	0,30	0,95	0,96
0,65	0,36	0,59	0,79	**Rpk**	0,49	0,29	0,85	0,22
0,64	0,42	0,70	0,61	**Rk**	0,48	0,34	0,96	0,92
0,60	0,31	0,65	0,73	**Rvk**	0,43	0,22	0,69	0,94
0,86	0,93	0,79	0,85	**Sa**	0,90	0,57	0,99	0,97
0,92	0,89	0,73	0,73	**Spk**	0,71	0,35	0,91	0,50
0,82	0,92	0,73	0,78	**Sk**	0,89	0,49	0,97	0,93
0,63	0,49	0,95	0,98	**Svk**	0,85	0,74	0,93	0,99

Pour conclure, cette étude a démontré qu'une analyse tridimensionnelle utilisant des paramètres fonctionnels issus de la courbe de portance prend mieux en compte la texture des surfaces rodées et permet d'établir un lien process-surface plus représentatif des mécanismes du procédé de rodage.

2.2 Décomposition fonctionnelle en plateaux et vallées

Les plateaux et vallées sont les deux composantes principales du profil de surfaces rodées. Dans l'industrie automobile, les 3 paramètres de la courbe d'Abbott (Rk, Rpk et Rvk) sont utilisés pour donner une idée sur la taille des plateaux et vallées. La linéarisation de la courbe d'Abbott permet de réduire la description de ces caractéristiques à deux paramètres qui sont Rpq et Rvq. Or, une corrélation forte entre les paramètres Rpk, Rk et Rpq a été remarquée sur la description des surfaces plateau-rodée [29,99], ce qui permet de réduire la description de la rugosité surperficielle à un seul paramètre. Par conséquent, la description des plateaux et vallées peut être décrites par seulement deux paramètres qui sont Rpq et Rvq pour une mesure 2D ou Spq et Svq par extension pour une mesure 3D. Pour cela, deux méthodes peuvent être utilisées pour déterminer ces deux composantes : la méthode de linéarisation de la courbe d'Abbot [7] ainsi que l'approche par filtrage morphologique [31].

2.2.1 Méthode de décomposition PV par linéarisation de la courbe de portance

Cette méthode est issue de la norme ISO 13565-3 et est basée sur la linéarisation de la courbe de portance (Figure 3. 4. (a)). Elle considère la surface rodée comme la superposition de deux distributions gaussiennes correspondant aux deux composantes plateaux et vallées [100]. La

linéarisation s'effectue par la détermination de la courbe de probabilité de la distribution cumulative des taux de portances (Figure 3. 4. (b)) de la surface en question. La courbe obtenue peut être approximée par deux tangentes dont le point d'intersection, Rmq, donne le taux de portance permettant la séparation des composantes plateaux et vallées. Les pentes de ces deux droites permettent d'accéder aux paramètres Rpq (moyenne quadratique de l'altitude de la composante plateau) et Rvq (moyenne quadratique de la profondeur des vallées de la composante des vallées). Il a été démontré par Pawlus dans [7] que ces paramètres se corrèlent avec les conditions process pour le cas du rodage plateau.

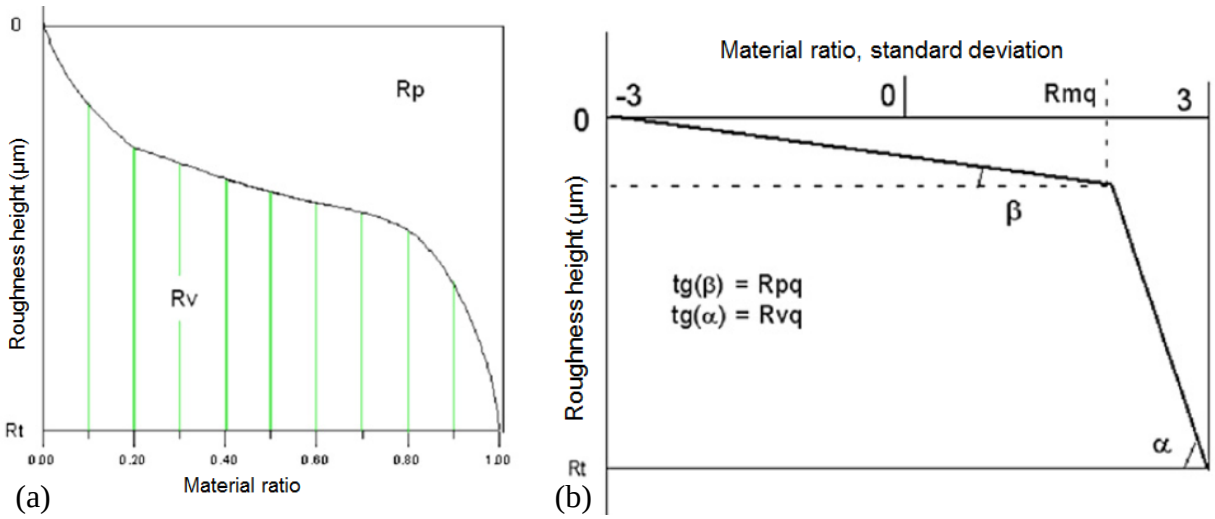


Figure 3. 4. Représentation graphique de courbe de portance (a) ainsi que des paramètres Rpq et Rvq de la courbe de portance linéarisée (b) [100]

2.2.2 Méthode de décomposition PV par filtrage alternée séquentiels

La seconde méthode, inspirée des travaux de Decencière et al. [31], est basée sur des opérateurs non-linéaires de traitement d'image issus de la morphologie mathématique. Elle permet la décomposition de la surface en trois composantes (Figure 3. 5) : la rugosité superficielle (rugosité des plateaux), les vallées ainsi que la surface de référence (qui comprend la forme et l'ondulation). Elle repose sur l'utilisation de filtres alternés séquentiels basés sur les transformations morphologiques d'ouverture et de fermeture de l'image analysée. La surface est ainsi filtrée récursivement jusqu'à atteindre la plus petite taille de l'élément structurant (forme géométrique élémentaire, qui est de type « carré » dans notre étude, utilisée en entrée pour le filtrage). Au final, les ouvertures et fermetures morphologiques permettront d'obtenir respectivement les composantes plateaux et vallées (Figure 3. 5. (b) et (c)) ainsi que leurs rugosités quadratiques, Spq et Svq. Cette technique

permet notamment une caractérisation précise de l'usure et plus particulièrement de la rugosité superficielle (Spq) [31,98].

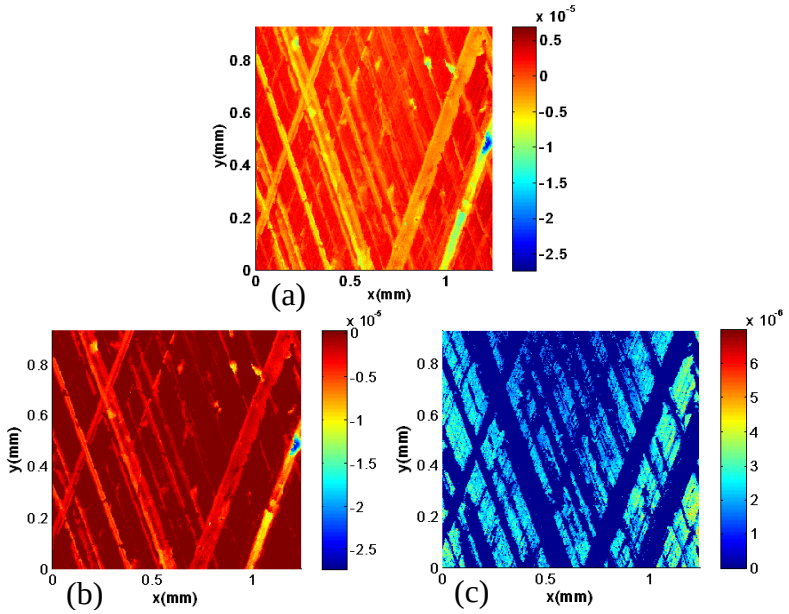


Figure 3. 5. Exemple de décomposition morphologique d'une surface plateau-rodée utilisant des filtres séquentiels alternés; (a) Topographie de surface plateau-rodée, (b) composante plateau et (c) composante vallées

2.2.3 Comparaison des performances des deux approches

La validité et la robustesse de la décomposition morphologique a été étudiée comparativement à la méthode de linéarisation de la courbe d'Abbott en faisant varier les paramètres process lors des étapes finition et plateau comme présentés en section 2.1.

Dans un premier temps, les deux méthodes ont été testées dans le cas de profils 2D au niveau de l'étape de rodage finition. L'impact des variables process « Dg » et « Vexp » sur la topographie de surface est représenté en Figure 3. 6 à travers les paramètres plateau (Rpq) et vallées (Rvq). Les deux méthodes donnent quasiment les mêmes résultats et montrent correctement l'impact de la variation taille des grains et de la vitesse d'expansion sur la topographie de surface. Ces résultats démontrent la validité de la méthode morphologique, qui est une méthode non normalisée comparativement à la méthode de linéarisation de la courbe d'Abbott, qui est en revanche normalisée. De plus, la méthode morphologique est plus simple à manipuler que la méthode standard. Cette méthode calcule automatiquement les paramètres Spq et Svq contrairement à la méthode standard où les tangentes de la courbe d'Abbott linéarisée sont déterminées « manuellement » (intervention de l'utilisateur sur le choix des points tangents), ce qui est moins précis et moins rapide.

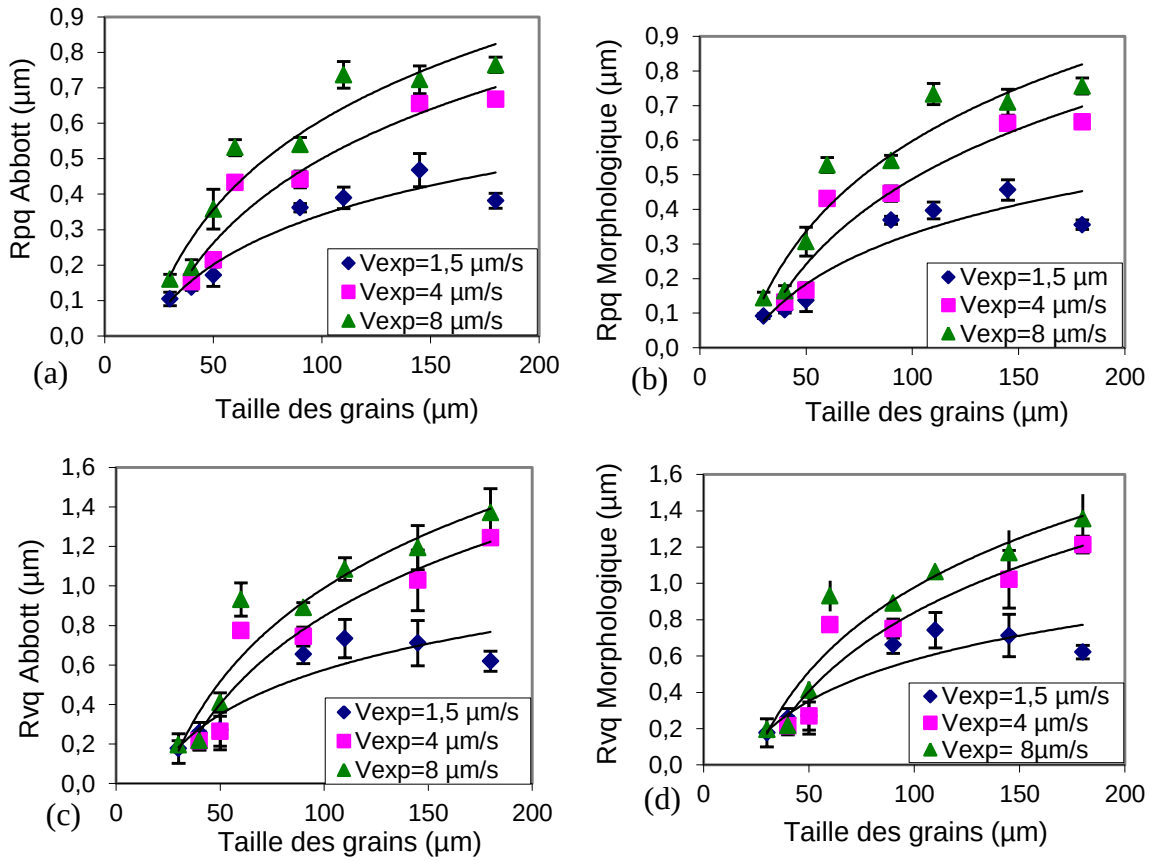


Figure 3. 6. Evolution de la rugosité superficielle par la méthode standard (a) et la décomposition morphologique (b) ainsi que de la profondeur des vallées par méthode de la courbe d'Abbott (c) et la méthode morphologique (d)

Dans un second temps, la robustesse de la méthode morphologique est évaluée pour une topographie de surface 3D, comparativement à la méthode standard issue d'un profil 2D, lors de l'étape de rodage plateau (Figure 3. 7). Les surfaces évaluée sont rodées à différentes durées de rodage pour une pression de contact « Ppl » de rodage industriel de 5,5 bars ainsi que pour des surfaces avec des rugosités initiales fines (Ra de 0,38 µm après la phase finition). Seuls les paramètres morphologiques Spq et Svq (Figure 3. 7 (b)) représentent fidèlement l'impact du procédé industriel avec un écrêtage des plateaux avec stabilisation des vallées lors des 8 premiers battements. La faiblesse de la méthode de linéarisation de la courbe de portance réside en partie des difficultés numériques existantes pour la recherche du point d'intersection qui différencie les deux tangentes relatives aux composantes plateaux et vallées [7] mais aussi de l'anisotropie de la surface rodée qui, comme expliqué dans la section 2.1, est mieux évaluée par des paramètres 3D.

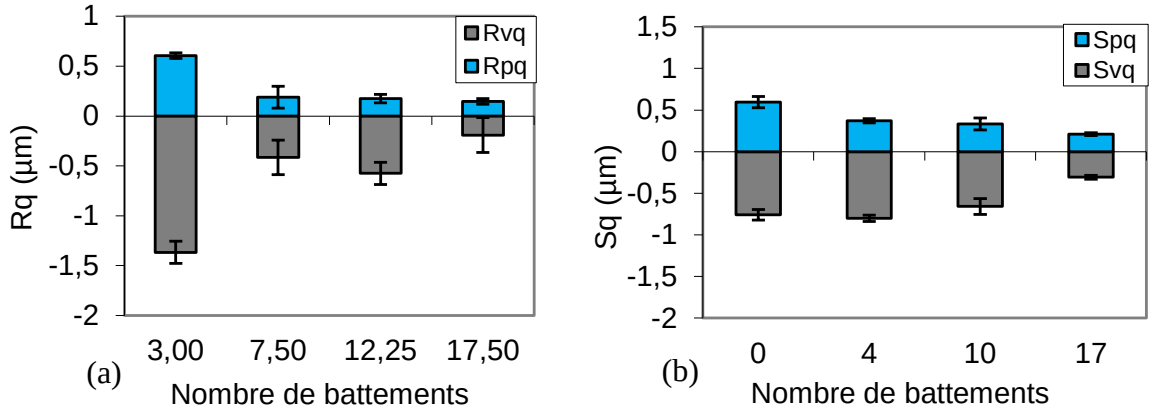


Figure 3. 7. Evolution des composantes plateau et vallée pour des surfaces générées à différentes durées de rodage à une pression de contact de 5,5 bars (a) et morphologique (b)

Par la suite, l'étude des corrélations linéaires process-surface et surface fonctionnalité (comme précédemment, ici une corrrélation est considérée comme forte si le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7) a permis de confirmer la pertinence et la robustesse de la méthode morphologique, notamment lors de la phase de rodage plateau, vis-à-vis de la méthode de linéarisation de la courbe d'Abbott même si, hormis le paramètre Rpq, les valeurs des corrélations linéaires issues de la méthodes standard sont globalement correctes (Table 3. 2).

Table 3. 2. Corrélation linéaire Process-Surface (CPS) et Surface-Fonctionnalité (CSF) entre les paramètres plateau et vallées issus des méthodes de linéarisation de la courbe d'Abbott (ISO 13565-3) de décomposition morphologique

Corrélation Process/Surface (C_{PS})				***Paramètres de surface***	***Corrélation Surface/Fonctionnalité (C_{SF})***			
D_f	*Vexp*	t_{pl}	p_{pl}		D_f	*Vexp*	t_{pl}	p_{pl}
0.84	**0.73**	0.47	0.55	**Rpq (ISO 13565-3)**	**0.72**	0.64	0.46	**0.90**
0.76	0.51	**0.72**	0.66	**Rvq (ISO 13565-3)**	**0.72**	0.47	**0.72**	**0.87**
0.79	0.66	**0.78**	0.62	**Spq (Morphologique)**	**0.7**	0.58	**0.97**	**0.91**
0.75	0.51	**0.86**	**0.82**	**Svq (Morphologique)**	**0.72**	0.47	**0.94**	**0.95**

Pour conclure, la robustesse ainsi que la validité au niveau de la représentativité process ont pu être démontrées pour la méthode de décomposition morphologique en plateaux et vallées. Une autre qualité de la méthode est sa simplicité d'utilisation par rapport à la méthode standard. Le principal avantage de cette approche est la quantification des paramètres texturaux, que sont les plateaux et vallées, qui sont directement liés aux performances en frottement et lubrification des surfaces rodées. En revanche, une approche multiéchelle est nécessaire afin d'observer l'impact du procédé sur les différentes échelles de la surface rodée.

2.3 Analyse multiéchelle des surfaces produites par rodage

2.3.1 Analyse par transformée en ondelettes continues

La méthode multiéchelle par ondelettes continues est une méthode fine qui, par la décomposition de la surface à différentes échelles, permet de lier la texture de surfaces rodées aux paramètres process comme la taille de grains d'abrasifs ou la vitesse d'expansion [26]. Elle permet également d'analyser scrupuleusement la variation de la topographie de surface pour chaque étape du procédé par l'intermédiaire de la signature process multiéchelle (SPM) [26,101].

En règle générale l'approche multi-échelle permet de décomposer une surface à différentes longueurs d'ondes des échelles de rugosité aux ondulations (Figure 3. 8).

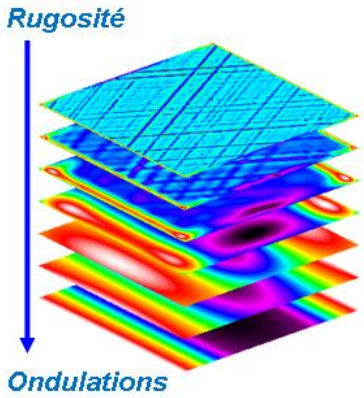


Figure 3. 8. Représentation d'une surface décomposée par méthode multi-échelle

Sa méthode utilise la transformation par ondelettes qui est exprimée par la formule suivante [102] :

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}^{*}(x) dx \qquad (3.\ 1)$$

Avec : *f(x)* la représentation du profil de surface ; $\psi_{a,b}^{*}(x)$ le nombre complexe conjugué de la fonction ondelettes $\psi_{a,b}(x)$, qui est exprimée par la relation [102]:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \qquad (3.\ 2)$$

$\psi_{a,b}(x)$ représente en réalité une famille de fonction ondelettes générées par translation avec le paramètre b et agrandissement/réduction d'échelle avec le paramètre a [102]. La famille d'ondelettes utilisée ici est de type Morlet en raison de ses bonnes performances en termes de détection d'amplitude de rugosité aux petites échelles [25]. Elle est de la forme :

$$\psi(r) = \pi^{-1/4} e^{iw_0 r} e^{-r^2/2} \qquad (3.\ 3)$$

Il est donc possible d'adapter la fenêtre d'analyse pour une surface donnée par translation et compression des fonctions ondelettes. Le résultat de cette analyse permettra de calculer finalement les paramètres de la surface en question pour chaque échelle d'analyse.

De ceci, peut être calculé l'écart absolu moyen SMa(a) pour chaque échelle par analogie à la rugosité moyenne Ra qui concerne tout le profil de rugosité (Figure 3. 9) :

$$SMa(a) = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^{N} \left| f_a(x) \right| \qquad (3.\ 4)$$

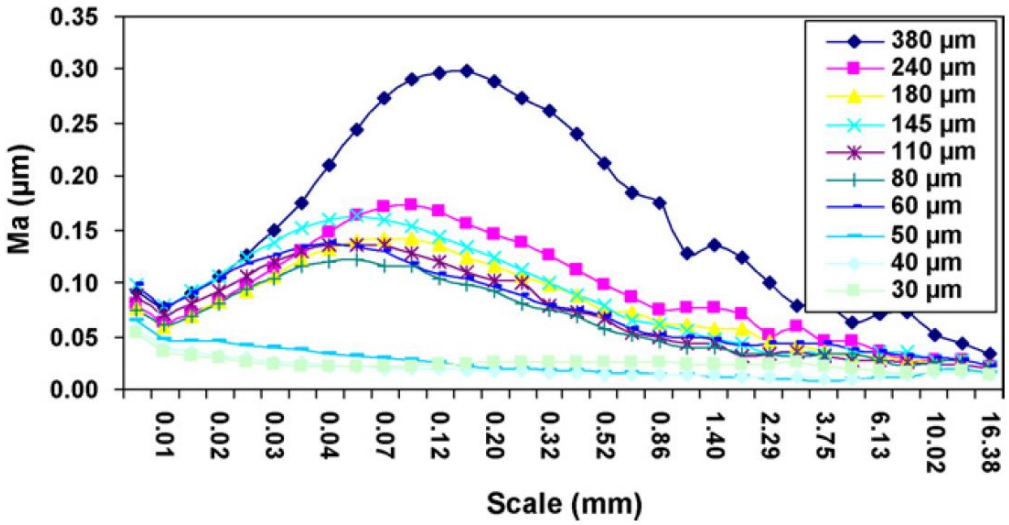


Figure 3. 9. Spectre Multi-échelle de surface montrant l'impact de la taille des grains lors de l'étape de rodage finition sur les différentes échelles à une vitesse d'expansion de 1,5 µm/s [26]

Il est également possible avec cette méthode de déterminer l'empreinte du procédé de rodage sur les différentes échelles de surface est appelée signature process par l'intermédiaire de la fonction de transfert du process (FT_P) qui est l'écart relatif du spectre de surface avant et après l'étape de rodage concernée et est défini par la relation suivante :

$$FT_P(\%) = \frac{SMa^F(a) - SMa^I(a)}{SMa^I(a)}.100 \quad (3.\ 5)$$

SMa^I et SMa^F sont respectivement les spectres de surface initiaux et finaux (après étape de rodage).

Cette méthode a été appliquée pour les différentes étapes dur rodage et donné des résultats concluants [101]. Elle a montré notamment que lors de l'étape finition toutes les échelles de surface sont modifiées alors que lors de l'étape plateau seules les petites échelles sont affectées. Ceci s'explique par le fait que lors de l'étape finition une nouvelle surface est générée tandis que lors de l'étape plateau ne fait qu'écrêter les pics de rugosité.

Néanmoins, cette méthode présente l'inconvénient que les ondelettes détectent plus facilement les structures isotropes et s'appâtent difficilement aux motifs de surface présentant des structures linéaires tels que les surfaces rodées. Afin de pallier cet inconvénient, la méthode de transformation par ridgelettes peut être une alternative.

2.3.2 Analyse par transformée en ridgelettes

Cette approche a été notamment utilisée pour l'évaluation de l'impact des échelles de rugosité sur les performances fonctionnelles [103]. Elle associe la transformation par ondelettes continues 1D d'une fonction *f(x)* avec la projection de la tranformée de Radon, R_f appliquée à la surface analysée définie par la relation suivante :

$$R_f(a,b,\theta) = \int_{\Re^2} \psi_{a,b,\theta}(r) f(r) dr \quad (3.\ 6)$$

Où, la ridgelette $\psi_{a,b,\theta}(r)$ est définie à partir d'une fonction ondelette $\psi(r)$ de la forme :

$$\psi_{a,b,\theta}(r) = a^{-1/2}\psi\left((x\cos\theta + y\sin\theta - b)/a\right) \quad (3.\ 7)$$

Dans cette étude, la famille d'ondelettes de type "Morlet 1D" a été utilisée pour les même raisons évoquées dans 2.3.1.

La décomposition par ondelettes de type Morlet d'un signal contenant la projection des données d'une surface via la transformée de Radon permet d'identifier les caractéristiques

multiéchelles d'une topographie de surface rodée la transformation inverse par ridgelettes effectuée. La reconstruction de la surface pour chaque échelle f_a est effectuée suivant la formule suivante:

$$f_a(r) = \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_f(a,b,\theta) \psi_{a,b,\theta}(r) \frac{1}{a^3} db \frac{d\theta}{4\pi} \quad (3.\ 8)$$

2.3.3 Impact de l'effet d'échelle des surfaces rodées sur leurs performances fonctionnelles

Afin d'évaluer la pertinence de l'approche multiéchelle par ondelettes et des différentes échelles pour la corrélation process-fonctionnalité, les corrélations linéaires entre process-surface ainsi qu'entre surface-fonctionnalité ont été évaluées en fonction de la variation du paramètre SMa pour différentes échelles de surface [104]. Les conditions process sont identiques à celles présentées en section 2.1. Quant aux performances fonctionnelles, il s'agit du coefficient de frottement SC prédit de chaque surface générée (voir section 3). La corrélation globale, « cg » (3. 9), permettant une corrélation directe process-fonctionnalité a été également évaluée par la relation suivante :

$$cg = \frac{c(P_{process}, SMa(a)) \times c(\mu, SMa(a))}{Max\left[c(P_{process}, SMa(a)); c(\mu, SMa(a))\right]} \quad (3.\ 9)$$

Où $c(P_{process}, SMa(a))$ et $c(\mu, SMa(a))$ représentent respectivement la corrélation linéaire entre une variable process et le paramètre multiéchelle SMa ainsi que celle entre le paramètre SMa et le coefficient de frottement prédit pour une échelle « *a*» donnée (Figure 3. 10).

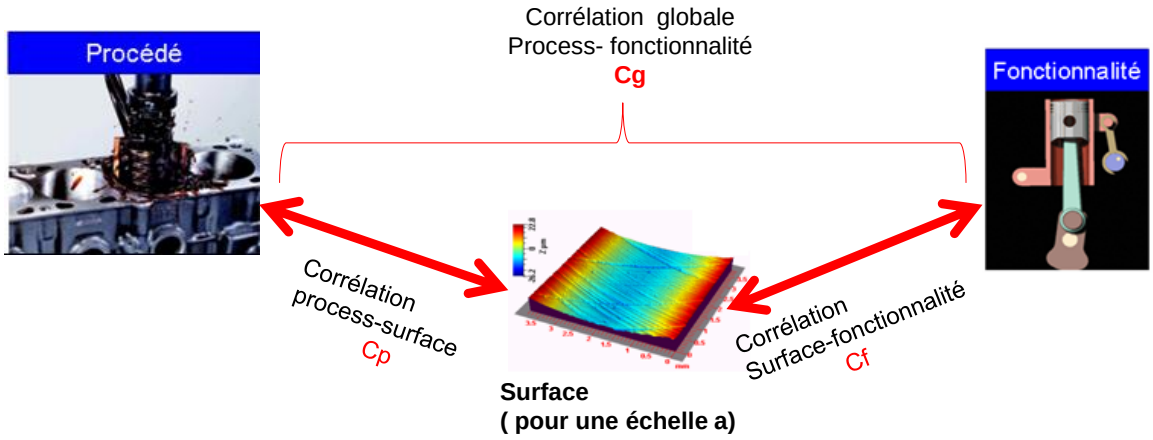


Figure 3. 10. Représentation de la corrélation globale process-fonctionnalité Cg pour une échelle a donnée

En Figure 3. 11 sont représentées, les corrélations process-surface, « cp », et surface-fonctionnalité, « cf » ainsi que la corrélation globale, « cg » à différentes échelles, lors de la phase plateau en variant la pressions « P_{pl} » et la durées de rodage plateau « t_{pl} ». Cette figure montre clairement une plage d'échelle comprise entre 0,05 et 0,3 mm où cg est forte (supérieur à 0,7).

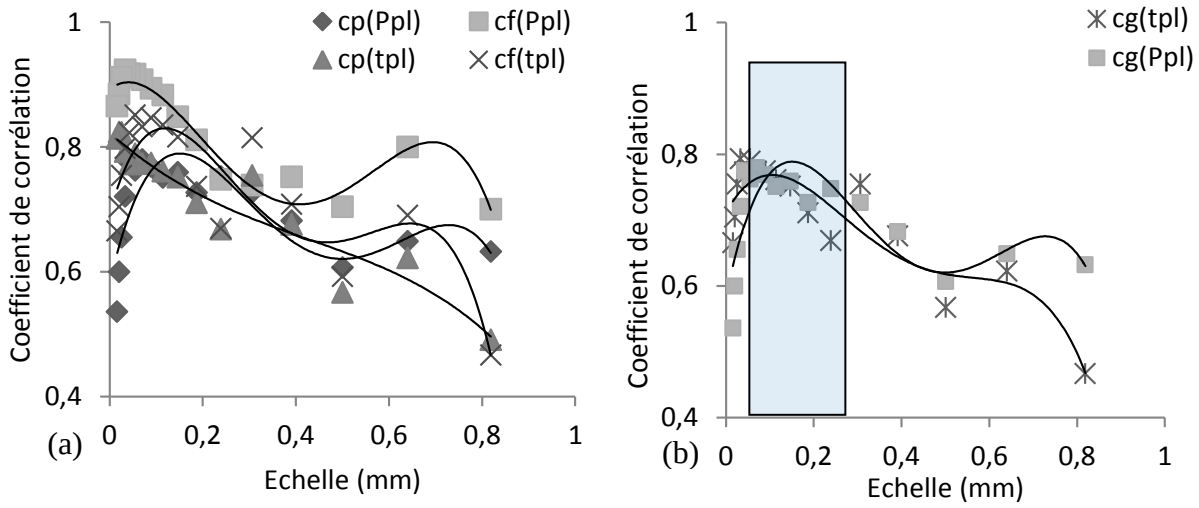


Figure 3. 11. (a) Corrélation entre le paramètre multiéchelle SMa, les variables process "cp" la fonctionnalité "cf" ainsi que (b) corrélation globale "cg" entre conditions process et performances fonctionnelles pour chaque échelle pour l'étape de rodage plateau

Ensuite, les coefficients de corrélation ont été évalués, à une échelle a=0,24 mm située dans la bande identifiée précédemment, pour différentes variables influentes du procédé de rodage plateau (Table 3. 3). Ceci montre que pour cette échelle de rugosité, la corrélation process-surface s'établit correctement pour tous les paramètres process utilisés alors que la corrélation process-fonctionnalité n'est forte que pour les variables process lors de la phase plateau (t_{pl}, P_{pl}). Il est donc important de bien choisir la plage d'échelle la plus pertinente de façon à corréler au mieux process et fonctionnalité.

Table 3. 3. Coefficients de corrélation process/surface et surface fonctionnalité

Corrélation Process/Surface				***Paramètre de surface***	***Corrélation Surface/Fonctionnalité***			
D_f	*Vexp*	t_{pl}	p_{pl}		D_f	*Vexp*	t_{pl}	p_{pl}
0,94	**0,95**	**0.73**	**0.75**	**SMa(a=0.24mm)**	0.65	0.29	**0.77**	**0.95**

Quant à la méthode de transformation par ridgelettes, elle a été appliquée par Demrici et al. [103] à la place de la transformation par ondelettes continues 2D, afin d'évaluer l'effet des différentes échelles sur le frottement SPC. La surface utilisée pour la décomposition en

ridgelettes est rodée dans les conditions de production série de surface par rodage plateau. Elle est décomposée en 5 composantes de surface à différentes échelles centrales, a_{cc} de : 1,92, 0,96, 0,48, 0,24 et 0,12 mm.

Afin d'étudier l'effet d'échelle de la topographie de surface, les différentes composantes d'échelle ont été successivement, par ordre croissant, ôtées de la surface analysée afin de générer des surfaces à différentes limites inférieures d'échelles respectivement de 1,92, 0,96, 0,48, 0,24 et 0,12 mm (Figure 3. 12).

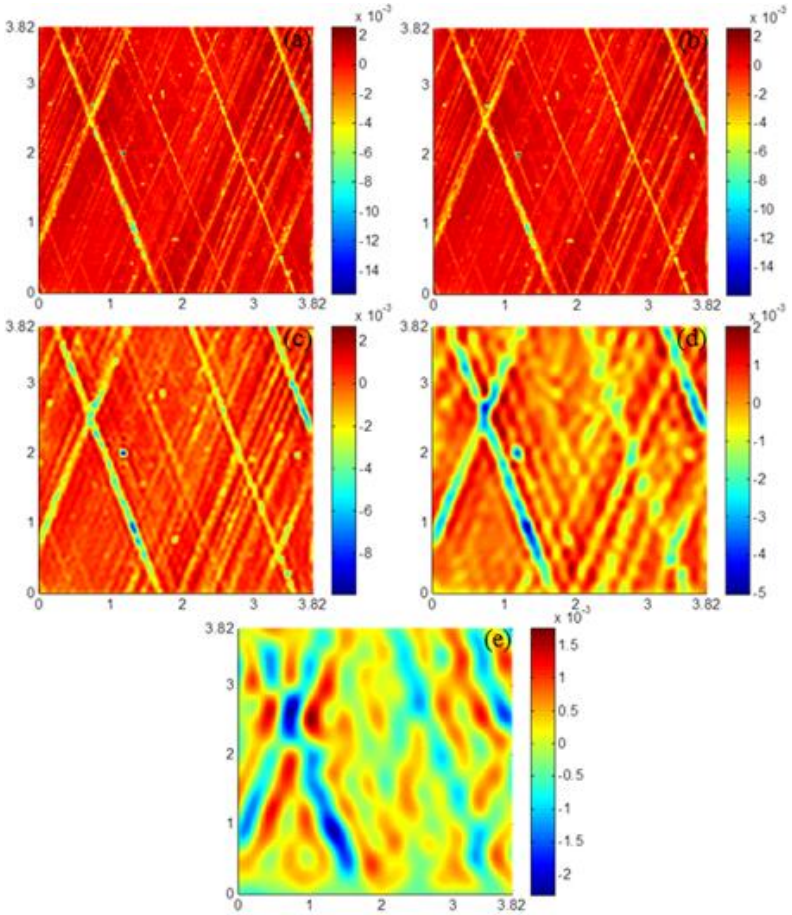


Figure 3. 12. Surface rodée à différentes limites inférieures d'échelles avec : (a) Surface rodée d'origine, obtenue après avoir ôté la composante d'échelle de 0,12 mm (b), 0,24mm (c), 0,48mm (d) et 0,96 mm (e) [103]

Cette approche a permis notamment d'évaluer efficacement l'effet des échelles ainsi que l'irrégularité de surface sur le frottement ainsi que sur les différents régimes de lubrification. La rugosité de surface aux échelles fines permet une réduction significative du coefficient de frottement tout en restant dans un régime majoritaire hydrodynamique du contact SPC contrairement à une surface rugueuse dans une bande d'échelle plus limitée [103].

Pour conclure, dans cette partie, nous avons pu démontrer la pertinence des méthodes de caractérisation avancées permettant de caractériser l'anisotropie de surface, la rugosité superficielle, les vallées nécessaires à la lubrification ainsi que la nature multiéchelle d'une surface rodées. Ces méthodes, permettent dans la plupart des cas une corrélation robuste process-produit et représentent bien l'impact du procédé sur le fini de surface. Elles constituent la première étape liant le procédé aux performances fonctionnelles qui seront en partie étudiées via un modèle numérique du contact SC présenté dans la section suivante.

3 Simulation des performances en frottement du contact SC

L'étude du contact SC est complémentaire à la caractérisation de surface pour lier de façon robuste process et fonctionnalité. La simulation numérique permettra d'extraire des informations supplémentaires sur les mécanismes physiques du contact Segment-Fut. Un modèle de simulation du contact SC a été utilisé, pour le calcul du coefficient de frottement, de l'épaisseur de film d'huile, directement liée à la consommation de lubrifiant, ainsi que de la pression hydrodynamique liée à la résistance aux charges d'une texture donnée. Il s'agit d'un modèle déterministe où la texture mesurée par interférométrie est prise en compte.

3.1 Physique du problème

Le contact segment-fût est modélisé par un contact cylindre-plan où la partie inférieure du segment est représentée par une forme cylindrique tandis que le fût est modélisé par un plan rugueux (surface rodée où les formes et ondulations ont été filtrées) (Figure 3. 13). C'est une approximation plus proche de la réalité physique que le contact sphère-plan auparavant utilisé [54], surtout si l'on considère le contact segment-fût comme purement glissant. Le segment, considéré comme lisse et entrainé à une vitesse u_1 en glissement est plus ou moins séparé par un film lubrifiant, d'une épaisseur *h* et une pression hydrodynamique *p*, d'une surface rugueuse entraînée à une vitesse u_2 (Figure 3. 13). La vitesse moyenne des surfaces en contact est $U_m= (u_1+u_2)/2$ (m/s). F_N est la force normale appliquée au segment tandis que P_1 et P_2 (Pa) sont les pressions aux limites qui sont égales à la pression atmosphérique.

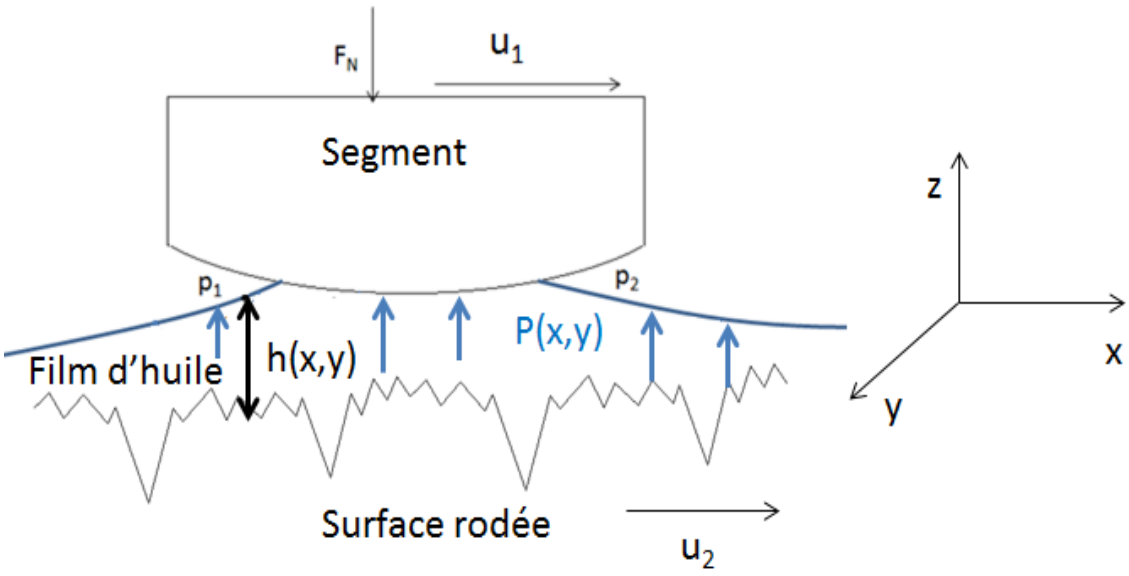


Figure 3. 13. Représentation simplifiée en 2D du contact segment-fût de type cylindre-plan (partie inférieure du segment de type cylindrique)

3.2 Equations élastohydrodynamiques

L'équation de Reynolds sous sa forme adimensionnée été utilisée pour déterminer la distribution de pression hydrodynamique, *p*, l'épaisseur de film d'huile ainsi que le coefficient de frottement μ_f, en prenant en compte le comportement non-Newtonien du fluide qui est de la forme :

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\overline{\rho}H^3}{\lambda\overline{\eta_X}}\frac{\partial P}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\overline{\rho}H^3}{\lambda\overline{\eta_Y}}\frac{\partial P}{\partial Y}\right)=\frac{\partial\overline{\rho}H}{\partial X}+\frac{\partial\overline{\rho}H}{\partial T} \qquad (3.\ 10)$$

Les variables adimensionnées sont les suivantes :

$$X=\frac{x}{a},\qquad Y=\frac{y}{a},\qquad Z_h=\frac{z}{h_0},\qquad \overline{\delta}=\frac{\delta}{h_0},\qquad \overline{\eta}=\frac{\eta}{\eta_0},\qquad P=\frac{p}{p_h},$$

$$\overline{\rho}=\frac{\rho}{\rho_0},\qquad T=\frac{t\times U_m}{a}\qquad \lambda=\frac{12\mu_0\times a\times U_m}{h_0^2\times p_h}$$

$\overline{\eta_X}$ et $\overline{\eta_Y}$ sont les viscosités effectives suivant les directions X et Y selon le modèle d'Eyring [105,106].

La condition aux limites P=0 et la condition de cavitation (ou condition sans frontière) $P(X,Y)\geq 0\ \ \forall X,Y$ doivent être satisfaites durant la simulation.

La viscosité et la masse volumique du lubrifiant sont considérées comme dépendantes de la pression selon la relation de Dowson et Higginson [107] (Eq.(3. 11)) et l'équation de Roelands [108] (Eq.(3. 12)) :

$$\overline{\rho}(P) = \left[1 + \frac{0.6\times10^{-9}P}{1+1.7\times10^{-9}P}\right] \tag{3. 11}$$

$$\overline{\eta}(P) = \exp\left(\left(\ln(\eta_0)+9.67\right)\left(-1+\left(1+\frac{P}{p_r}\right)^{z_r}\right)\right) \tag{3. 12}$$

Où p_r est une constante égale à 1,96 x 10^8, et z l'index pression viscosité (z = 0,65).
L'équation de l'épaisseur de film sous forme adimensionnée est donnée par l'équation suivante :

$$H(X,Y) = H_0 + \frac{X^2}{2} + \overline{\delta}(X,Y) - \overline{Z_h}(X,Y) \tag{3. 13}$$

La déformation élastique des solides en contact, $\overline{\delta}$ est donnée par :

$$\overline{\delta}(X,Y) = \frac{2}{\pi^2}\iint_{\Omega_C}\frac{P(X,Y)dX'dY'}{\sqrt{(X-X')^2+(Y-Y')^2}} \tag{3. 14}$$

(X', Y') est le point autour du point d'application de la contrainte (X, Y). La déformation est observée au point (X', Y') selon le théorème de Saint Venant. Le module d'Young combiné des matériaux en contact (fonte-fonte chromée) est E' = 219,78 GPa.

La constante inconnue H_0 dans le domaine Ω_C est déterminée par l'équation d'équilibre des forces :

$$\overline{W} = \iint_{\Omega_C} P(X,Y)dXdY \tag{3. 15}$$

Où $\overline{W}$ est la force normale adimensionnée.

3.3 Résolution numérique

L'équation de Reynolds, les équations d'élasticité linéaire et l'équilibre des forces sont simultanément résolues par l'utilisation de la procédure de Newton-Raphson suivant le synoptique en Figure 3. 14. L'équation de Reynolds est résolue par la méthode des différences finies afin d'obtenir la distribution de pression du film d'huile, P. Un schéma de différenciation de second ordre décentré à gauche ("backward") est utilisé pour sa robustesse [109]. L'équation une fois discrétisée est résolue par la méthode de relaxation par ligne distributive de Jacobi [110]. Le domaine de résolution a été déterminé pour $-3 \leq X \leq 3$ et

$-4.5 \leq Y \leq 4.5$. La grille de calcul couvre un domaine constitué de 512x512 nœuds équitablement espacés.

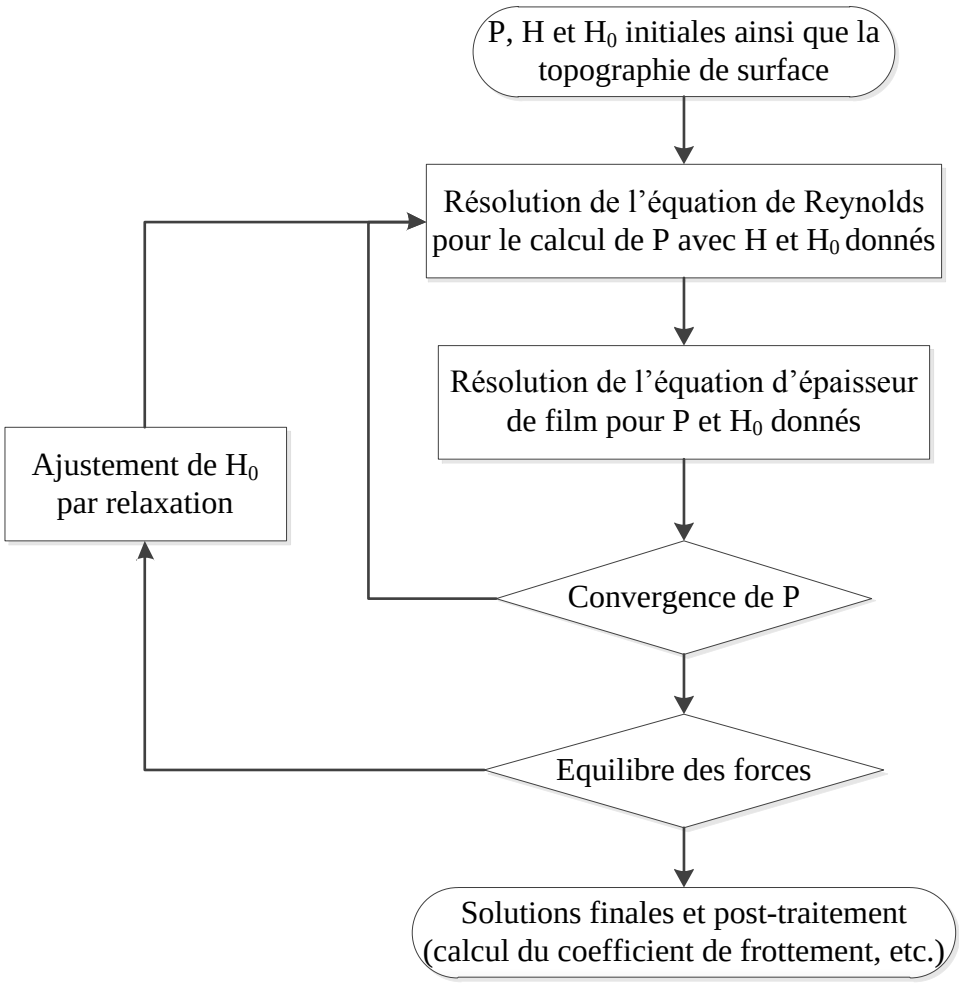


Figure 3. 14. Synoptique descriptif de la méthode de résolution

Pour le post-traitement, le coefficient de frottement total, μf, en régime mixte est obtenu par la somme du frottement limite dans les zones de contacts rugueux et du frottement dans les régions hydrodynamiques suivant la formule suivante :

$$\mu_f = \frac{\iint_{\Omega_C} \tau_c dxdy + \iint_{\Omega_C} \tau_e dxdy}{w \times Ly_{1p}} \tag{3. 16}$$

Où, τ_c est la contrainte de cisaillement entre aspérités dans la zone de contact Ω_c et τ_e est la contrainte de cisaillement du film hydrodynamique dans la zone lubrifiée de Ω_c. Le contact entre aspérités à un point donné est considéré comme tel lorsque l'épaisseur de film est inférieure à 1 nm. τ_c peut être déterminé par la formule de Rabinowicz [111]:

$$\tau_c = \sqrt{\tau_{S0}^2 + (\gamma_s p)^2} \tag{3. 17}$$

Où, τ_{s0} est la résistance au cisaillement initiale à la lubrification limite et γ_s est le coefficient de pression dont la valeur est égale au coefficient de frottement en lubrification limite. Dans notre cadre de notre étude γ_s =0,15 et τ_{s0} =2 MPa. γ_s est déterminé par des essais tribométriques à la zone de Stribeck de contact limite (asymptote horizontale) tandis τ_{s0} est issu de la littérature [68].

4 Validation du modèle SC

Afin de s'assurer de la justesse du modèle, une validation numérique et expérimentale a été réalisée. La validation numérique pour la géométrie cylindre-plan a été réalisée comparativement à un modèle de la littérature [112] pour le cas du contact lisse. Une validation du contact rugueux a également été réalisée. Concernant la validation expérimentale, les valeurs de frottement obtenues sont comparées à celles issues des essais tribométriques sur des surfaces rodées en plateau.

4.1 Validation numérique

4.1.1 Contact cylindre-plan lisse

Les données d'entrée du modèle de Ren et al. [112] ont été utilisées pour comparaison avec notre modèle. Ce modèle a été utilisé, d'une part, pour sa représentativité géométrique, vu qu'il s'agit d'un contact cylindre-plan et d'autre part, pour sa fiabilité numérique, étant donné que le modèle donne des résultats conformes à de précédentes études numériques.

La validation numérique a été effectuée pour un contact lisse (Z_h=0), le but étant d'observer le comportement de la pression hydrodynamique et de l'épaisseur de film d'huile dans la zone de contact pour le cas de la géométrie de contact cylindre-plan.

Les données d'entrée utilisée sont les suivantes :

- *Force linéique, w* = 2500 N/mm^2
- *Module d'Young équivalent des surfaces en contact, E'* = 226,37 GPa
- *Viscosité dynamique,* η_0 = 0,01119 Pa.s
- *Pression Hertzienne,* p_h = 1,883 GPa
- *Rayon de contatc a* = 0,845 mm
- *Rayon de courbure du contact R* = 25,4 mm
- *Vitesse équivalente,* U_m = 50 m/s

Par la suite, les courbes de variation de *H* et *P* (adimensionnés) ont été tracé pour une valeur *Y* médiane et à différentes positions *X* (adimensionné) et sont comparées avec celles obtenues avec le modèle de Ren et al. [112](Figure 3. 15).

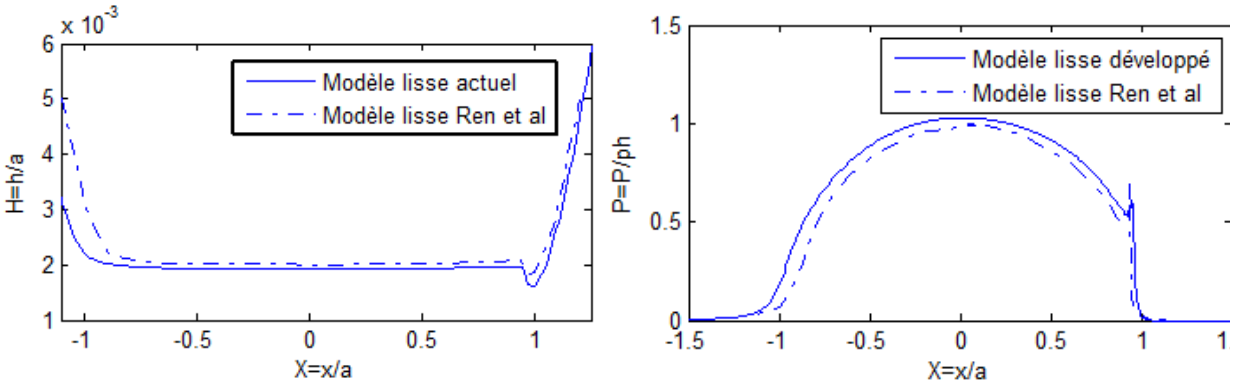


Figure 3. 15. (a) H et (b) P obtenus avec le modèle de Ren et al.[112] ainsi qu'avec le modèle développé en contact cylindre-plan lisse

La variation du film d'huile adimensionné, H, du modèle développé suit bien celui du modèle de Ren et al. [112] avec une réduction de film au niveau de la sortie du contact (autour de X=1) dû à la déformation élastique du contact élastohydrodynamique (EHD) [63], même si on note une différence au niveau de l'entrée du contact (autour de X= -1).

Concernant la variation de la pression hydrodynamique adimensionnée P du modèle développé, elle suit bien celle du modèle de Ren et al. [112] avec la présence d'un pic de pression au niveau de la sortie du contact (autour de X=1) dû à la déformation du contact EHD [63].

Les valeurs obtenues montrent une bonne corrélation aussi bien de H et P, ce qui valide numériquement ce modèle en régime élastohydrodynamique à surface lisse pour le cas d'une géométrie de contact cylindre-plan. Par la suite le modèle été validé en contact rugueux en régime mixte.

4.1.1 Contact rugueux

Le modèle de Hu et Zhu [113] a été utilisé dans le cas d'une surface rugueuse sinusoïdale pour valider le modèle actuel en contact rugueux. Les paramètres d'entrée pour ce modèle sont comme suit :

- *Force normale FN=800N*
- *Module d'Young équivalent des surfaces en contact, E'* = 219,78 GPa
- *Viscosité dynamique,* η_0 = 0,096 Pa.s

- *Rayon de contact a* = 0,23625 mm
- *Rayon de courbure du contact R* = 18,2 mm
- *Pression Hertzienne,* p_h = 1,711 GPa
- *Vitesse équivalente,* U_m = 312,15 mm/s

Les variations de P et H du modèle développé comparativement au modèle de Hu et Zhu [113] sont présentées en Figure 3. 16.

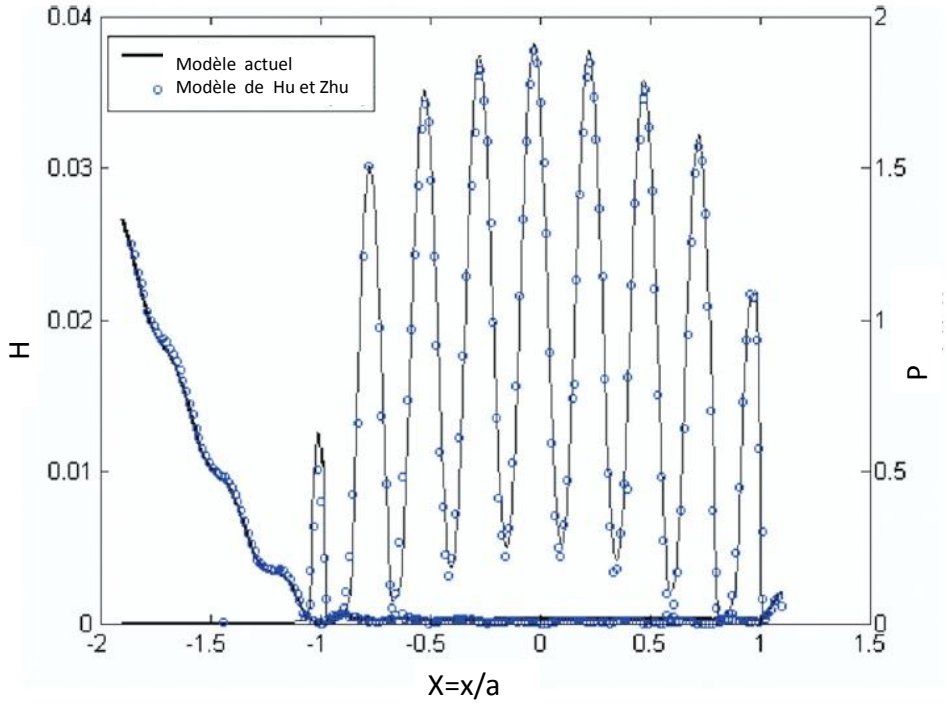


Figure 3. 16. (a) H et (b) P obtenus avec le modèle de Hu et Zhu.[113] ainsi que du modèle développé en contact rugueux

Les variations de H et P du modèle actuel sont très similaires à celui de Hu et Zhu [113] avec la présence de pics de pression dus à la présence de rugosité. Le film d'huile dans le contact est très fin, voir nul par endroits (contacts solide-solide). Ceci valide le modèle le cas d'un contact rugueux.

4.2 Validation expérimentale

Pour la validation expérimentale, le coefficient de frottement prédit a été comparé à celui obtenu par des essais tribométriques (Chapitre 2, Section 5.2) d'une surface rodée plateau série. Les simulations ont utilisé les données géométriques se rapprochant de celles du segment utilisé sur le tribomètre, des valeurs du nombre de Sommerfeld comprises dans les

plages de valeurs du tribomètre, un lubrifiant (viscosité), ainsi que des vitesses et forces normales comparables. Bien entendu, la texture étudiée, issue du process de production, est identique à celle utilisée sur tribomètre. La courbe de Stribeck obtenue par tribomètre est les différentes valeurs de frottement prédit sont présentées dans la Figure 3. 17.

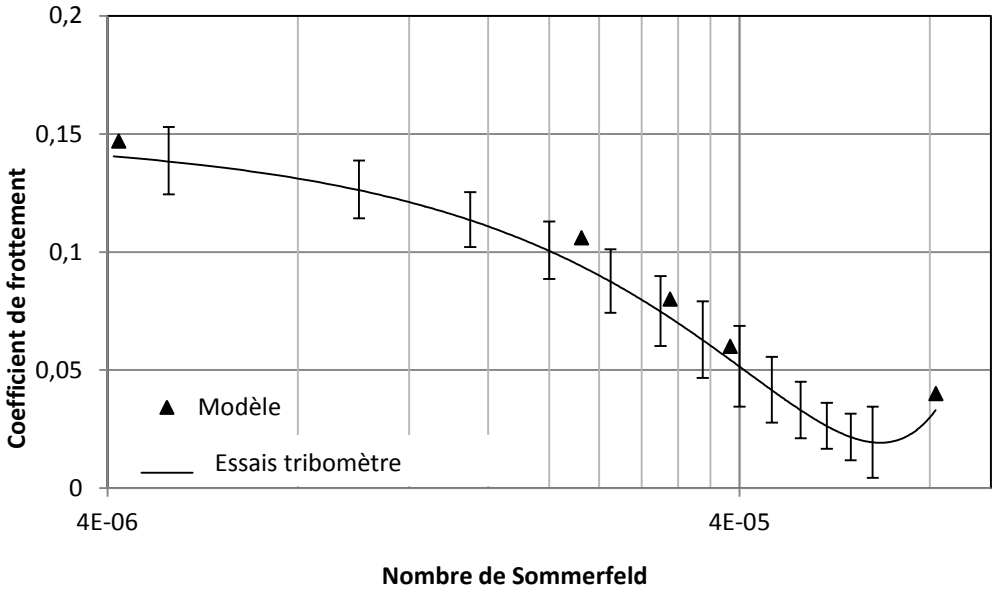


Figure 3. 17. Courbe de Stribeck des essais sur tribomètre et frottement obtenu par le modèle numérique pour le cas du rodage plateau.

Cette courbe montre que les valeurs de frottements obtenus par le modèle numérique suivent bien la tendance de la courbe de frottement issue des essais sur tribomètre et sont incluses dans les intervalles d'incertitude de celle-ci dans les régimes de lubrification limite, mixte et début de régime élastohydrodynamique. Ceci per Par conséquent, ceci valide expérimentalement le modèle de simulation SC. Cette validation montre la sensibilité de ce modèle déterministe aux caractéristiques des texturales (topographie, anisotropie, etc.) de surfaces rodées avec des résultats physiquement cohérents. Cela va permettre de boucler la démarche corrélative process-surface-fonctionnalité.

Pour conclure, le modèle numérique est un outil intéressant et complémentaire au tribomètre pour une étude plus complète du modèle SC ainsi que des mécanismes physiques associés. Sa fiabilité et robustesse ont pu être démontrées à l'aide de modèles issus de la littérature ainsi que par des essais tribométriques. L'inconvénient de ce modèle, ou plus généralement de la simulation du contact SC, reste le temps de calcul qui peut aller de plusieurs heures à quelques jours selon les paramètres étudiés (vitesse, force normale, type de surface, etc.).

5 Conclusion

Cette partie a été consacrée aux différentes méthodes numériques de caractérisation de surfaces rodées et de modélisation de leurs performances fonctionnelles.

Concernant les méthodes de caractérisation de surfaces, ont été montrées tout d'abord les limites des méthodes classiques utilisées en industrie, comme les paramètres de profils issus des normes ISO 13565-2 ou ISO 4287. D'une part, ces méthodes ne donnent pas assez d'informations sur les caractéristiques texturales de surfaces rodées. D'autre part, la corrélation process-produit via ces paramètres n'est pas établie. Afin, de pallier ces faiblesses, des approches innovantes ont été utilisées et leur pertinence a été évaluée sur le procédé de rodage plateau. Dans la plupart des paramètres process utilisés, la corrélation linéaire process-produit s'est correctement établie. De plus, l'utilisation de ces méthodes innovantes est complémentaire et permettront de balayer toutes les caractéristiques texturales d'une surface rodée telles que l'anisotropie, la nature multiéchelle ainsi que la présence de plateau et vallées de lubrification.

Par rapport à la modélisation numérique du contact SC, l'approche déterministe a été privilégiée car il s'agit de quantifier l'effet de la topographie 3D sur les performances fonctionnelles. Le modèle utilisé nous permettra d'étudier les mécanismes physiques du contact SC et d'extraire des informations supplémentaires au coefficient de frottement telles que la pression hydrodynamique ou l'épaisseur du film d'huile. Il a également l'avantage d'explorer, l'impact des différentes caractéristiques (l'effet d'échelle, anisotropie, etc) sur des surfaces synthétisées numériquement sur les performances fonctionnelles en termes de frottement et de lubrification. Enfin, une validation aussi bien numérique qu'expérimentale a pu être établie sur ce modèle.

Pour conclure, ce chapitre montre que les méthodes numériques ont été clairement définies par rapport à leur pertinence vis-à-vis du procédé rodage afin de permettre une corrélation robuste entre process, surface et fonctionnalité.

Chapitre 4
Etude fonctionnelle et comparative des attributs texturaux issus des procédés de rodage industriels

1. *Introduction*

Dans l'industrie automobile, différentes techniques de rodage sont utilisées par les constructeurs. Parmi les procédés les plus utilisés à l'heure actuelle, on distingue le rodage plateau ou « Plateau Honing » (PH), le rodage glissant ou « Slide Honing » (SH) ainsi que le rodage hélico-glissant ou « Helical Slide Honing » (HSH).

Ces différents procédés permettent de générer des surfaces avec différentes caractéristiques texturales. Le PH consiste à générer une surface dite « plateau » composée de plateaux de faible amplitude et de vallées relativement profondes à un angle de striation de 50°. Le SH a la particularité de générer une surface encore plus fine que celle obtenue lors du PH, avec des plateaux et vallées de plus faible taille. Quant au rodage HSH, sa principale caractéristique résulte de l'anisotropie de surface avec des stries croisées à 130° même si la texture générée est également plus fine que celle obtenue par PH. Par conséquent les différences texturales de chacun de ces procédés industriels résultent des caractéristiques suivantes :

- la rugosité globale ;
- la rugosité superficielle ou morphologie plateau ;
- la taille de striation ou morphologie vallée ;
- la proportion plateau/vallées ;
- l'anisotropie.

La compréhension de l'effet de ces différentes caractéristiques sur le frottement Segment-Cylindre (SC) est primordiale pour la recherche de la texture optimale au niveau fonctionnel.

L'objectif principal de ce chapitre est consacré, à travers des études comparatives sur le PH et SH, à l'effet de la réduction de rugosité superficielle sur le frottement SC. Un autre objectif

important traite, à travers des études comparatives entre le rodage PH et HSH, de l'effet combiné de la rugosité (amplitude des plateaux et/ou vallées) et de l'anisotropie. Il s'agit de mieux comprendre les effets positifs d'une anisotropie à 130° sur la fonctionnalité. Bien entendu, pour chaque étude, l'effet de la taille de stries sera observé. Enfin, l'idée est de pouvoir identifier, à partir de l'étude des procédés de rodage en place dans l'industrie, l'influence des caractéristiques texturales sur le frottement en vue de proposition de nouvelles textures.

2. *Comparaison des caractéristiques texturales issues de différents procédés de rodage classiques*

Les différentes technologies de rodage industriel permettent de générer des textures avec différentes topographies. Parmi les différences topographiques de ces procédés (Figure 4. 1), on distingue la rugosité, la morphologie ainsi que l'anisotropie (angle de rodage).

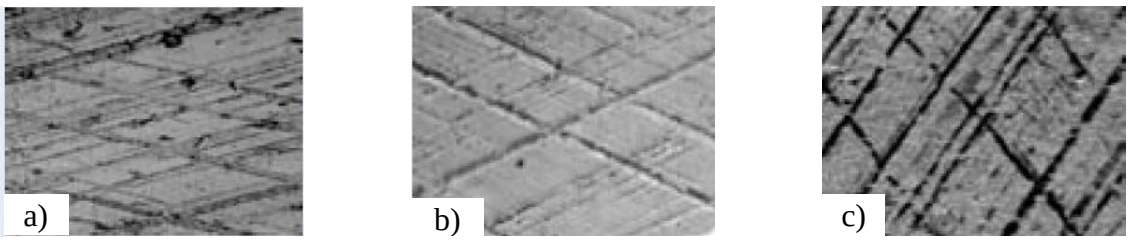


Figure 4. 1. Images des surfaces rodées (a)PH, (b) SH et (c) HSH [8]

Dans le cas du PH, la surface générée est de type « plateau » qui est composée de plateaux de faible amplitude de rugosité et de vallées relativement profondes à un angle de striation de 50°. Le but de ce rodage est de s'approcher, via l'écrêtage des pics de rugosité, d'une texture proche de celle obtenue après rodage moteur ou « running-in ». Les profils de surfaces issues du PH et du rodage classique (sans étape plateau) sont représentés sur la Figure 4.2.

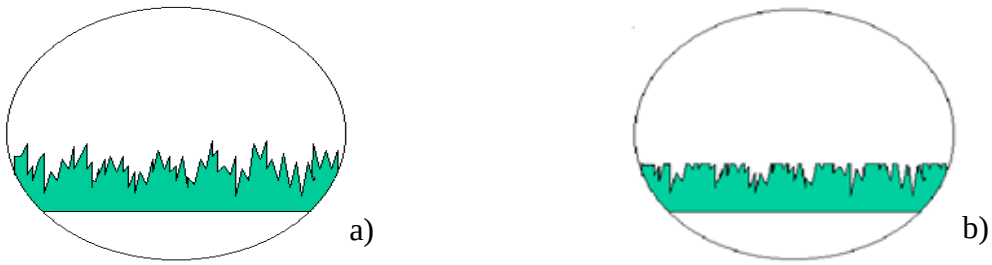


Figure 4. 2. Représentation de profils de surfaces rodées par rodage (a) classique et (b) plateau

Concernant le SH, la surface générée est encore plus fine que celle obtenue lors du PH, avec des plateaux et vallées d'amplitude plus faible. Ceci est principalement obtenu par une étape plateau de durée plus élevée mais aussi par des abrasifs de taille plus faible comparativement au PH (70-80 µm au lieu 100-120 µm lors de la finition et 12-18 µm au lieu de 30 µm de l'étape plateau) [7]. L'angle de rodage reste quasiment identique à celui obtenu par PH. Ce procédé vise principalement, par la génération d'une topographie de surface s'approchant de celle dite « idéale » (avec une absence de rugosité de plateau et des vallées relativement profondes comme illustré en Figure 4. 3), la réduction du frottement SPC et la consommation d'huile [8,9].

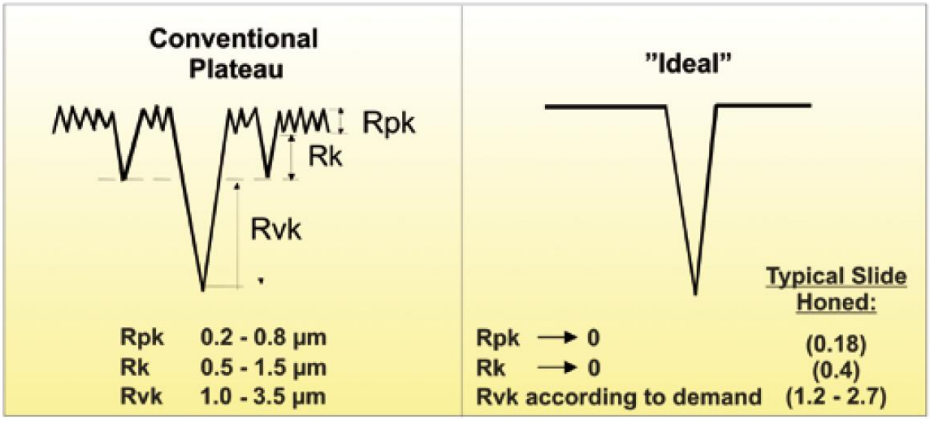


Figure 4. 3. Représentation d'un profil de surface dite « idéale » comparativement à un profil PH [8].

Comme nous pouvons le voir en Table 4. 1, la principale différence texturale entre surfaces plateau et SH est la rugosité (l'anisotropie étant quasiment identique). Le terme Slide Honing ou « Gleithonung » en allemand a été défini comme tel pour les surfaces rodée à 40-50° ayant une amplitude de rugosité de surface au moins trois fois inférieure aux surfaces rodées par rodage plateau [114].

Quant au rodage HSH, sa principale caractéristique résulte de son anisotropie avec un angle de striation de 120-140° qui est obtenu par une augmentation de la vitesse axiale de battement combinée à une vitesse de rotation réduite. La topographie de surface obtenue est quasiment identique à celle obtenue par SH. Ce procédé a été mis en place en industrie pour sa capacité à produire des cylindres moteurs performants au niveau consommation d'huile mais aussi au niveau usure [8,9]. Comme le PH et SH, il est composé de trois étapes mais avec une étape

plateau de durée relativement élevée. Ainsi, la texture obtenue présente, par rapport à une texture PH, à la fois une anisotropie différente ainsi qu'une amplitude de rugosité réduite.

Table 4. 1. Paramètres de rugosité surfacique de surfaces issues de différents procédés de rodage industriels

Type de rodage	Sk	Spk	Svk	Angle de rodage
SH [7,8,28]	0,4 - 0,5	0,15 - 0,25	1 - 1,5	40 – 50°
PH [8,115]	2 - 2,5	0,2 - 1	2 - 3,5	40 – 50°
HSH [8,115]	0,5 - 0,8	0,25 - 0,5	1,4 - 1,8	120 – 140°

Pour résumer, les différences texturales de chacun des procédés industriels, telles que la rugosité superficielle, la taille des stries et l'anisotropie ont été montrées. Chacune de ces caractéristiques texturales jouent un rôle important sur les performances fonctionnelles des surfaces rodées.

Il a été montré dans plusieurs études que la réduction de la rugosité globale influe sur la réduction du frottement [40,114]. En revanche l'influence de chacune des caractéristiques texturales comme les plateaux et vallées sur les performances fonctionnelles n'a pas été complétement établie.

Concernant l'influence de l'anisotropie, une étude numérique menée par Mezghani et al.[54] a montré que des angles de rodage de type HSH (120-140°) et PH (30-60°) permettent une réduction significative du frottement comparativement à d'autres angles de striation. Il a également été montré par des essais moteur, qu'une anisotropie de 120° contribue grandement à la réduction de la consommation d'huile [83]. Néanmoins, l'influence combinée de la rugosité et de l'anisotropie n'a pas été totalement démontrée.

Ainsi, cette partie se focalisera sur l'effet des caractéristiques texturales majeures des surfaces rodées industriellement sur les performances fonctionnelles. Il s'agit d'étudier l'effet des caractéristiques suivantes :

- la taille (largeur et profondeur) des stries ;
- la rugosité superficielle des plateaux ainsi que le ratio rugosité superficielle/profondeur des vallées ;

- la combinaison entre l'anisotropie (angle de rodage), l'amplitude de la rugosité superficielle et/ou la taille (largeur, profondeur) des vallées.

3. *Effets fonctionnels des caractéristiques texturales majeures*

3.1. Effet de la largeur et de la profondeur des stries de lubrification

La texture rodée composée de stries croisées est générée principalement lors de l'étape de rodage finition. La taille des stries dépend, lors de cette étape, majoritairement de deux variables process qui sont la vitesse d'expansion et la taille des grains d'abrasifs. Cette dernière influe sur la largeur de stries (plus la taille des grains est grande, plus les stries sont larges) tandis que l'augmentation de la vitesse d'expansion génère des stries plus profondes [25,26]. Par conséquent, un choix adéquat de ces variables process permettrait de générer une texture proche des surfaces plateau ou SH.

Dans cette étude, nous nous proposons d'étudier l'influence de la taille de stries générées à différentes conditions process lors de l'étape de rodage finition sur les performances en frottement.

3.1.1. Etude expérimentale et numérique

Des surfaces de cylindres issues de blocs moteurs K9K ont été rodées suivant le plan d'essais décrit en Table 4. 2. Des tests de rodage finition instrumentés ont été réalisés sur la machine de rodage industrielle de type NAGEL avec des abrasifs en Carbure de Silicium Vitrifié (VBSC), dont la taille moyenne des grains varie de 30 µm à 180 µm. La vitesse d'expansion de l'outil de rodage varie de 1,5 à 8 µm/s. Toutes les autres variables machine sont maintenues constantes. Les détails des conditions process sont disponibles dans [26,27,97].

Table 4. 2. Conditions d'essais de rodage finition

Variables process	Etape ébauche	Etape finition	Etape plateau
Vitesse de battements (m/min)	28	28	28
Vitesse de rotation (tr/min)	230	230	230
Durée de rodage (s)	20	15	5
Type d'expansion	Mécanique	Mécanique	Hydraulique
Vitesse d'expansion (µm/s)	5	1,5, 4 et 8	-
Pression de contact (bar)	-	-	6
Taille de grains (µm)	125	30 à 180	30

Les différentes topographies de surfaces obtenues, une fois analysées par interférométrie, ont pu montrer l'effet des variables process sur la taille des stries. En effet, la Figure 4. 4 montre clairement qu'une augmentation de granulométrie des abrasifs (Dg) influe significativement sur la largeur des stries et à moindre mesure sur leur profondeur. A une vitesse d'expansion intermédiaire (Vexp=4µm/s), une granulométrie fine contribue à la génération de stries étroites alors qu'une granulométrie élevée permet la production de stries larges et à moindre mesure de stries plus profondes.

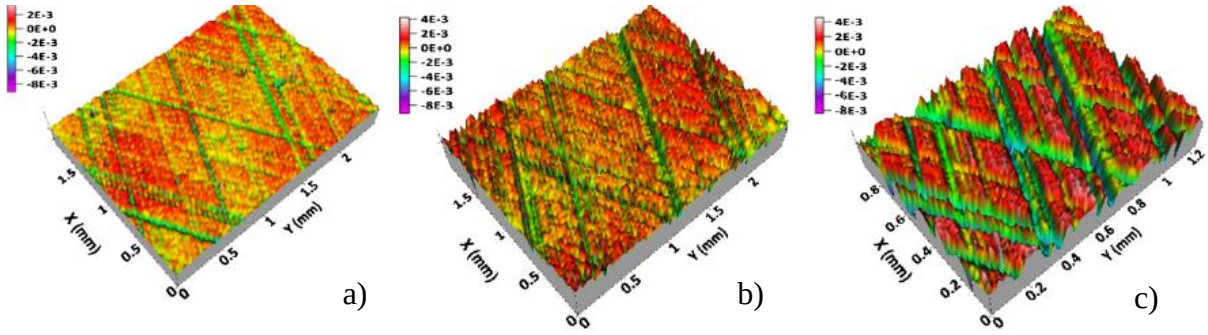


Figure 4. 4. Topographie tridimensionnelles de surfaces rodées à Vexp=4µm/s avec des abrasifs de tailles différentes de (a) 40µm, (b) 110 µm et (c) 180 µm

De plus, la Figure 4. 5 montre que la variation de la vitesse d'expansion influe sur la profondeur des stries. Pour une taille de grain donnée (Dg= 110µm), une augmentation de la vitesse d'expansion contribue à une augmentation de la profondeur des stries. Les effets de ces paramètres process (Vexp, Dg) sur la topographie de surface sont confirmés par analyse multiéchelle dans [25,26].

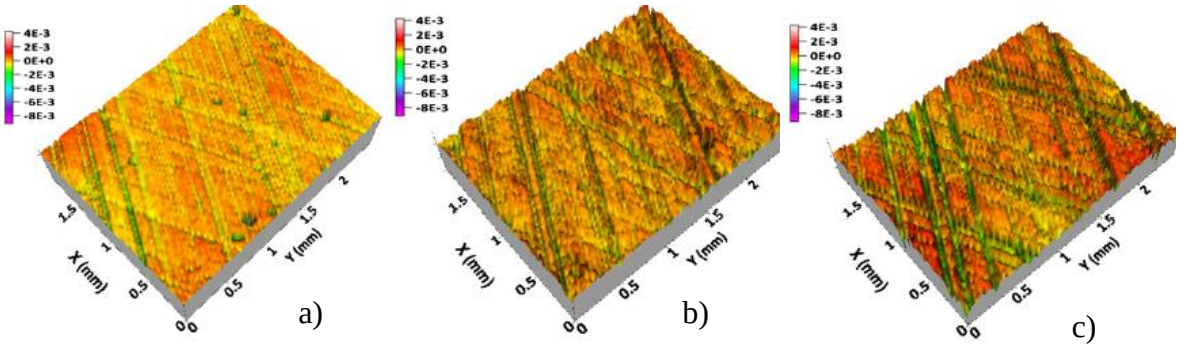


Figure 4. 5. Topographie tridimensionnelles de surfaces rodées avec des abrasif à Dg=110µm à Vexp de (a) 1,5µm/s, (b) 4 µm/s et (c) 8 µm/s

Par la suite, les différentes topographies de surface mesurées par interférométrie ont été introduites dans le modèle de simulation segment-chemise à une vitesse Um=10 m/s ainsi qu'une force normale FN=500 N de façon à se situer dans des conditions de lubrification hydrodynamique.

3.1.2. Résultats

Les résultats de frottement calculé en régime hydrodynamique ont permis notamment d'établir la cartographie de l'impact des paramètres process sur les performances en frottement (Figure 4. 6). Le frottement est représenté sous forme d'isovaleurs en fonction de la vitesse d'expansion et de la taille des grains d'abrasifs. L'augmentation de la vitesse d'expansion et de la taille des grains contribuent à une augmentation du frottement au niveau du contact segment-cylindre (SC). Autrement dit, une texture composée de stries fines (de faible largeur et profondeur) est propice à la réduction du frottement SC, même si l'impact de la largeur des stries est plus important.

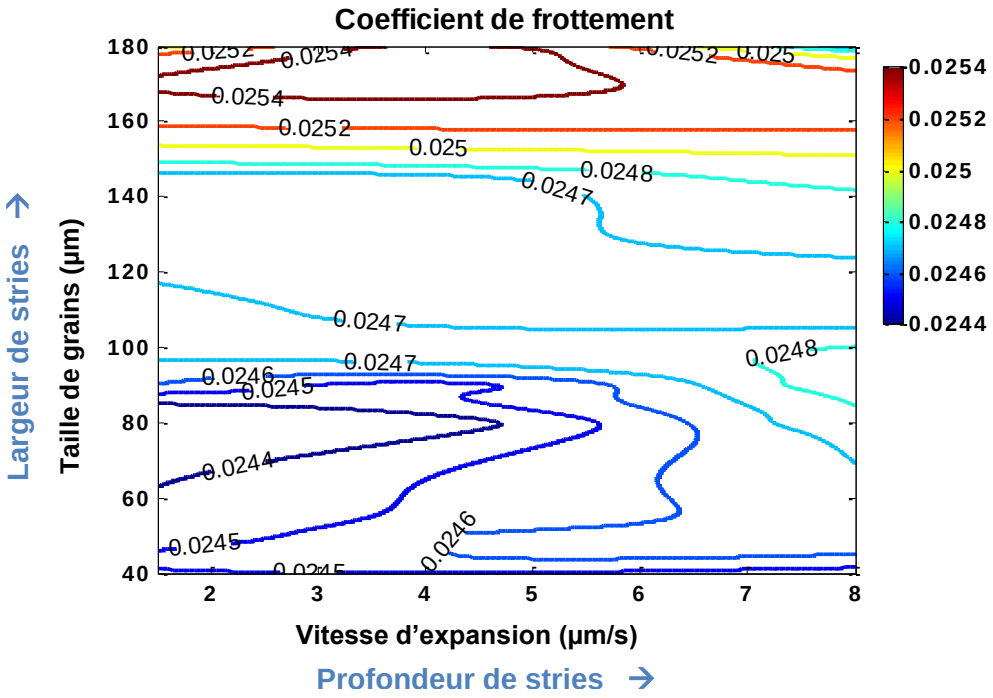


Figure 4. 6. Cartographie de l'impact sur les performances fonctionnelles pour le cas de l'étape de rodage finition

Néanmoins, l'utilisation de grains d'abrasifs de faible taille, diminuerait l'efficacité énergétique du procédé [25]. Une étude de l'énergie spécifique du procédé (Figure 4. 7) a permis de montrer, que pour obtenir un procédé efficace, l'idéal serait d'utiliser des grains d'abrasifs de taille suffisamment élevée (à partir de 80µm) de façon à se situer à un régime de coupe plutôt qu'en régime de labourage [25,97].

Il est cependant possible de réduire encore la taille des stries, tout en restant en régime de coupe et par conséquent garder une efficacité process optimale. Pour cela, il suffit d'augmenter le nombre d'étapes de rodage, tout en diminuant graduellement la taille des grains d'abrasifs. Néanmoins, ces méthodes risquent d'allonger le temps de cycle et par conséquent le coût de production ainsi que la consommation globale d'énergie.

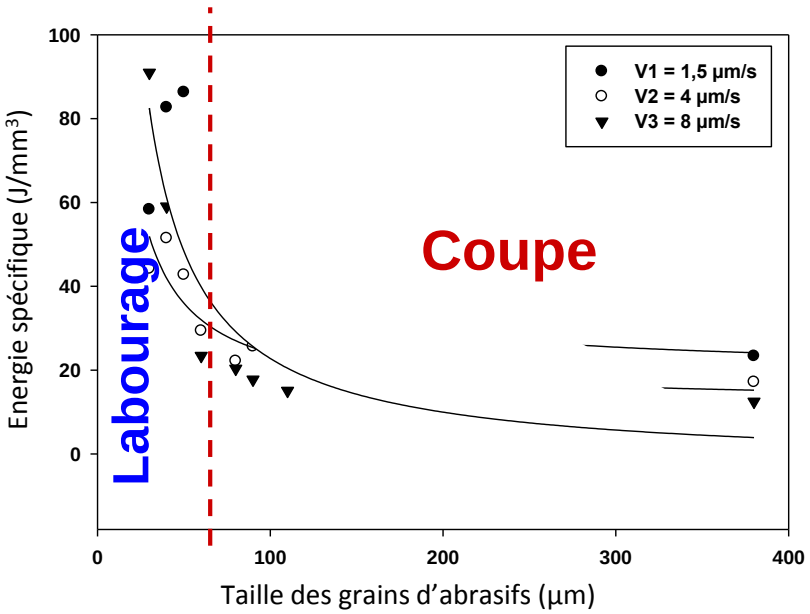


Figure 4. 7. Energie spécifique de rodage en fonction de la taille de grains d'abrasifs ainsi que pour différents régimes process [25,97]

Pour conclure, cette étude a permis de montrer qu'une surface fine, composée de stries étroites et peu profondes, contribue à la réduction du frottement en régime hydrodynamique. Notons tout de même que la largeur de stries, conditionnée par la taille de grain d'abrasifs utilisée est plus sensible au frottement que la profondeur de stries. Néanmoins, il serait intéressant d'observer l'effet sur le frottement de la rugosité superficielle qui est contrôlée lors de l'étape de rodage plateau.

3.2. Comparaison de l'effet de l'amplitude et de la distribution de la rugosité

L'amplitude de la rugosité superficielle, qui peut être évaluée par le paramètre de rugosité surfacique Spq, est contrôlée lors de l'étape de rodage plateau. Cette étape vise à écrêter les pics de rugosité de façon à réduire significativement l'amplitude de la rugosité superficielle. La réduction de cette dernière contribuerait grandement à la réduction du frottement SC [116]. Jusqu'à présent, plusieurs interrogations comme la taille optimale de la composante plateau ainsi que l'existence ou non d'une relation de proportionnalité entre l'amplitude de la rugosité superficielle et la profondeur des vallées n'ont pas tout à fait été levées. La réponse à ces différentes questions nous aidera à la compréhension de l'effet de la texture de surface sur

les performances en frottement et par la suite la proposition d'une spécification de texture optimale des surfaces de cylindre de moteurs.

3.2.1. Etude expérimentale et numérique

Pour cela, une campagne d'essais de rodage plateau instrumentés a été réalisée. Les variables process considérées sont le temps de rodage effectif exprimé en nombre de battements (t_{pl} de 0 à 20 battements) et la pression de contact (P_{pl} de 2 bars, 5,5 bars et 10 bars). Deux rugosité initiales différentes (Ra= 0,38 µm et Ra = 0,70 µm en moyenne) avec des profondeurs de stries différentes, obtenues via une étape de rodage finition à deux différentes vitesses d'expansion (respectivement 1,5 et 6µm/s), sont considérées. La rugosité initiale est un paramètre influent de l'évolution de l'usure des surfaces rodées et par conséquent joue un rôle important sur l'évolution de la rugosité superficielle lors de l'étape plateau [6]. Chaque condition process est répétée deux fois. L'ensemble des essais sont résumés en Table 4. 3. et détaillés dans [98].

Table 4. 3. Conditions process de la campagne de rodage plateau

Paramètre process	***Rodage ébauche***	***Rodage finition***	***Rodage plateau***
Vitesse de battements (m/min)	*28*	*28*	*23*
Vitesse de rotation (tr/min)	*230*	*230*	*230*
Durée de rodage(sec)	*20*	*15*	*2*
Type d'expansion	*Mécanique*	*Mécanique*	*Hydraulique*
Vitesse d'expansion (µm/s)	*5*	*3*	
Pression de contact (bar)	*8*	*1,5, 6*	*2,3, 5,5, 10*
Nombre de pierres	*6*	*6*	*6*
Type d'abrasifs	*Diamant*	*Carbure de Silicium*	*Carbure de Silicium*
Taille de grains (µm)	*125*	*107*	*30*
Liant	*Metallique*	*Vitrifié*	*Vitrifié*
Taille des pierres abrasives (mm x mm x mm)	*2x5x70*	*6x6x70*	*6x6x70*

L'impact des deux variables process (t_{pl} et P_{pl}) sur la texture et les performances fonctionnelles de la surface générée ont été étudiés. Différentes méthodes d'analyse ont été appliquées :

- analyse multi-échelle par ondelettes continues ;
- décomposition Plateaux/Vallées utilisant les filtres séquentiels alternés ;
- analyse des efforts et puissance consommées au cours du rodage plateau ;

- simulation numérique des performances en frottement des surfaces rodées.

L'analyse numérique des performances en frottement a été réalisée via le modèle de simulation Segment-Chemise (SC) en régime mixte. La vitesse utilisée est égale 0,5 m/s tandis que la force normale est de 100 N de façon à se situer dans des conditions de lubrification mixte.

3.2.2. Résultats

3.2.2.1. Observation au MEB de l'aspect de surface

Dans un premier temps, l'aspect de surfaces générées aux différents paramètres process a été analysé au Microscope Electronique à Balayage (MEB) à un grossissement ×1500. L'effet de la durée de rodage à pression de contact proche de celle utilisée industriellement (P_{pl}=5,5 bars) sur l'aspect topographique pour des surfaces à rugosité initiale Ra=0,70 µm a pu être observé (Figure 4. 8).

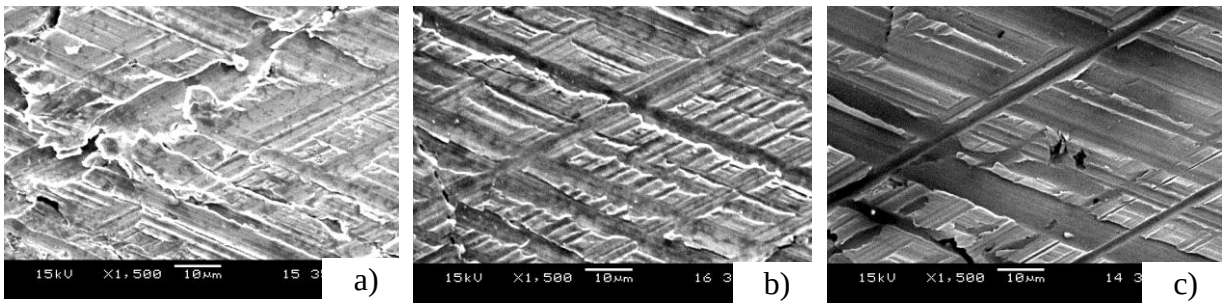


Figure 4. 8. Observation au MEB de différentes surfaces rodées à une pression de contact de 5,5 bar à Ra initial de 0,70 µm pour des durée de rodage plateau de (a) 3 battements, (b) 8 battements et (c) 17 battements

L'observation montre qu'une faible durée de rodage (Nombre de battements N=3) n'est pas suffisante pour l'obtention d'une surface plateau régulière sans présence de microbavures. En revanche, une surface rodée à durée de production industrielle (N=8), présente des plateaux assez réguliers et relativement fins ainsi que des vallées relativement profondes. Pour une surface rodée au-delà du temps de production (N=17), des plateaux fins sont observés mais également des vallées dont la hauteur semble inférieure à celle des plateaux. Ceci suggère qu'une durée de rodage élevée va au-delà de l'écrêtage des pics de rugosité plateau avec une réduction significative de la profondeur des vallées.

En ce qui concerne l'effet de la pression de contact plateau (P_{pl}), l'impact de celle-ci sur le fini de surface a été observé à travers l'aspect de texture pour des surfaces générées à des pressions de 2,3, 5,5 et 10 bars pour des durées de rodages faibles (4 battements en moyenne) (Figure 4. 9). Ceci montre qu'avec l'augmentation de P_{pl} l'aspect des plateaux devient de plus en plus régulier avec moins de bourrelets.

Ainsi, les observations au MEB ont pu montrer l'effet des variables process, lors de l'étape plateau, sur l'aspect topographique de surface. Néanmoins, il s'agit d'une analyse qualitative. Ces résultats restent donc à confirmer par des méthodes quantitatives aussi bien au niveau process que topographie de surface.

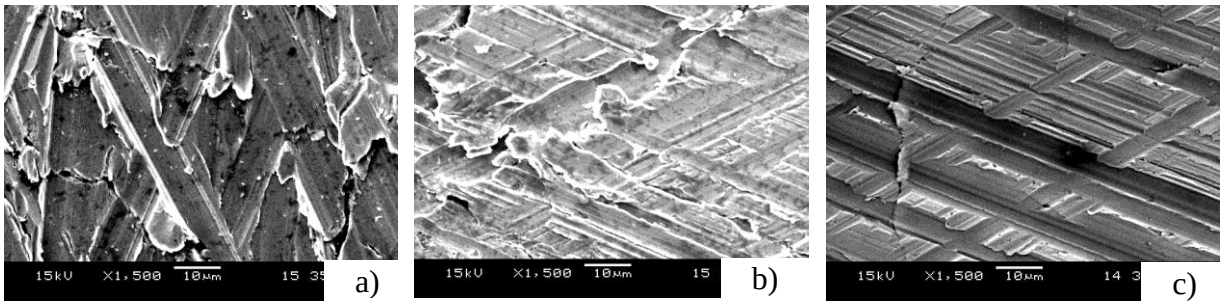


Figure 4. 9. Observation au MEB de différentes surfaces rodées pour des durées de rodage autour de 4 battements à Ra initial de 0,7 µm à des pressions de contact de (a) 2,3 bars, (b) 5,5 bars et (c) 10 bars

3.2.2.2. Signature multiéchelle de l'étape de rodage plateau

L'analyse multiéchelle et plus particulièrement la Signature Multiéchelle du Process (SMP) ou Fonction de transfert du Process (FT_P) est très utile pour la détection de l'écrêtage des pics, qui se fait à une bande réduite de petites échelles [101]. Elle se définit comme la différence relative, à une échelle, de l'amplitude SMa de la surface d'une étape de rodage à une autre (ici on calcule la variation du paramètre SMa entre l'étape finition et plateau). Ici, la SMP (Figure 4. 10) entre surfaces finition et plateau est obtenue en fonction de l'échelle, à un nombre de battement de rodage plateau N donné, à l'aide de la formule suivante :

$$FT_P(\%) = \frac{SMa^F(a) - SMa^I(a)}{SMa^I(a)}.100 \qquad (4.\ 1)$$

Où SMa^F est le spectre multiéchelle final après l'étape plateau et SMa^I le spectre mutiéchelle initial juste après finition à une échelle donnée des surfaces à rugosité initiale avant rodage plateau.

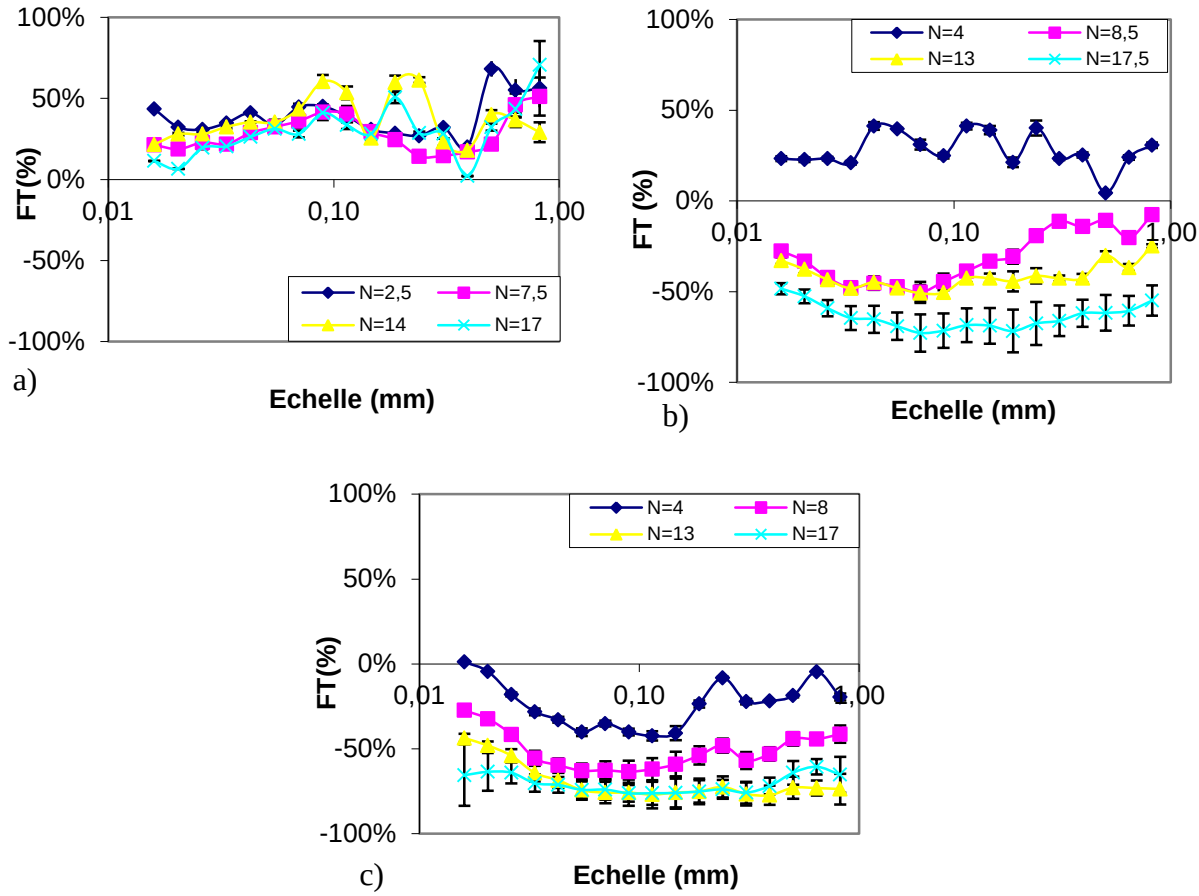


Figure 4. 10. Décomposition multi-échelle de surfaces rodées en fonction du temps de rodage (nombre de battements N) pour des pressions de contact de (a) 2,3 bars, (b) 5,5 bars et (c) 10 bars pour (Ra)i=0,70 µm

Les différentes SMP obtenues ont permis de dresser les remarques suivantes:

- A une faible pression de contact (2,3 bars), le temps de rodage a peu d'influence sur le fini de surface. De plus, à cette pression de contact, nous obtenons une SMP positive, ce qui veut dire que l'on génère de la rugosité au lieu de la réduire. Cela suggère que le contact pierre-fût n'est pas correctement établi pour enlever de matière. Le régime prédominant est alors le labourage.
- A une pression moyenne (5,5 bars), il faut un temps de rodage suffisamment élevé pour commencer à écrêter les pics. A 4 battements, le contact pierre fût est transitoire, les pierres ne touchent pas encore suffisamment le fut pour enlever de

la matière. Ici la FT est positive, ce qui veut dire que la rugosité augmente au lieu de diminuer. Pour un nombre de battements de 8,5, seules les très faibles échelles de rugosité sont vraiment affectées (autour de 0,1 mm). Dans ces conditions, les pics de rugosité ne sont qu'écrêtés. En revanche plus on augmente le temps de rodage, plus les autres échelles de rugosité sont affectées. Autrement dit, l'opération de rodage plateau dans ces cas de figure va au-delà de l'écrêtage de pics et cela s'accentue avec l'augmentation du temps de rodage.

- A une pression de contact élevée (10 bars), on observe quasiment les mêmes tendances qu'à une pression moyenne (5,5 bars) sauf qu'un nombre de battement de 4 est suffisant pour pouvoir écrêter les pics de rugosité et qu'à partir de 8 battements toutes les échelles sont affectées (on va au-delà de l'écrêtage des pics de rugosité). Ceci contredit les conclusions faites par Pawlus et al. [7] concernant la faible influence de la pression de contact en phase de rodage plateau sur le fini de surfaces rodées.

Par conséquent, l'approche multiéchelle via la SMP a permis de décrire l'influence des paramètres process par la physique qui pilote l'enlèvement de matière et en particulier de savoir si les plateaux sont écrêtés. En revanche, l'évolution de la hauteur des plateaux et de la profondeur des vallées sera décrite via la méthode de décomposition morphologique.

3.2.2.3. Décomposition en composantes plateau et vallées

La décomposition morphologique par filtres séquentiels alternés permet des quantifier les hauteurs quadratiques des plateaux et vallées, Spq et Svq. L'évolution de ces paramètres en fonction du temps de rodage pour chaque pression de contact et pour une rugosité initial donnée (Ra_i=0,70 ou 0,38 µm) est décrite en Figure 4. 11.

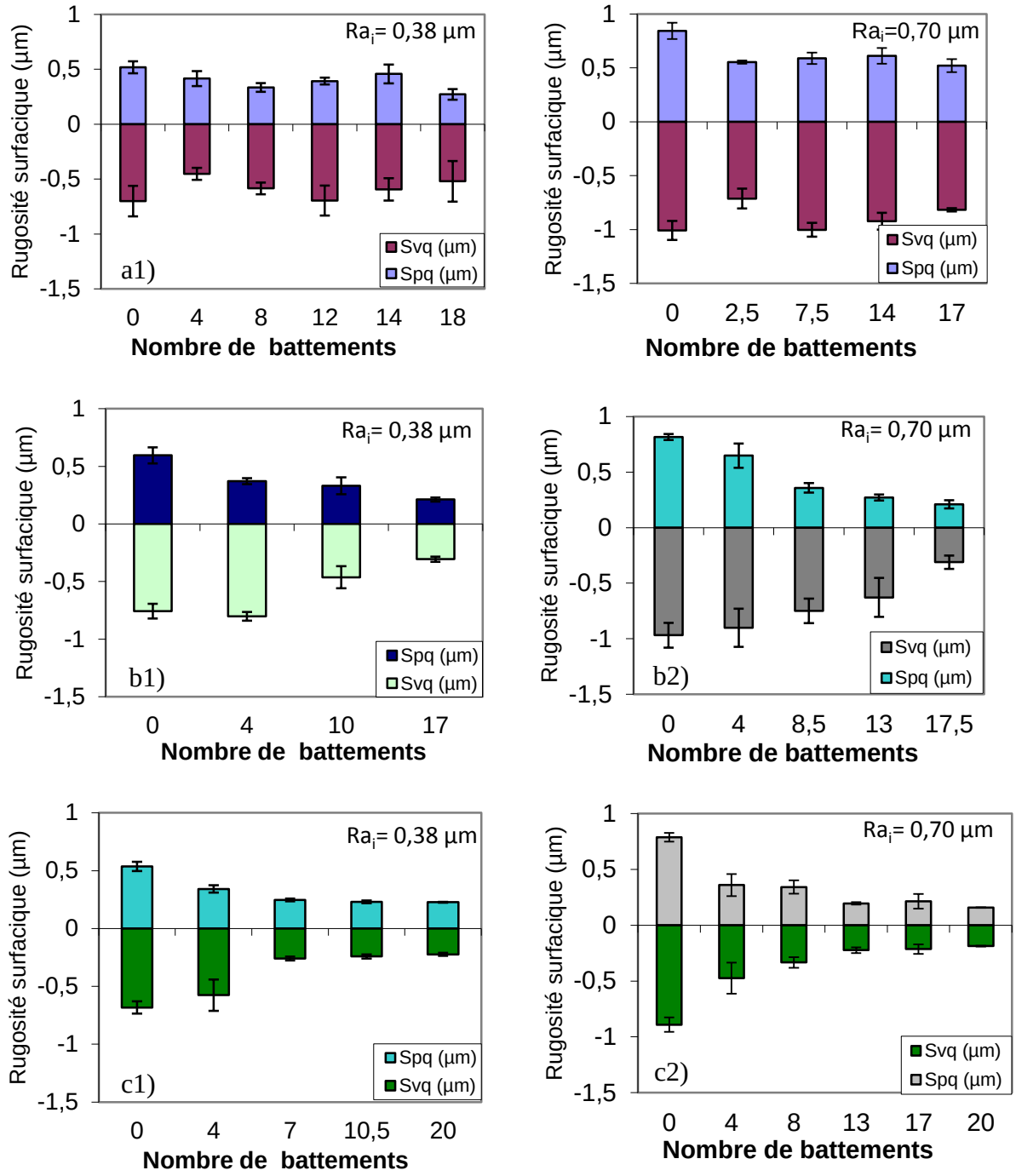


Figure 4. 11. Evolution des composantes plateaux et vallées en fonction du nombre de battements à des pressions de contact de 2,3 bars (a1 et a2), 5,5 bars (b1 et b2) et 12 bars (c1 et c2) pour des surfaces initiales de Ra_i=0,38 µm (a1, b1, c1) et Ra_i=0,70 µm (a2, b2, c2)

A travers cette figure nous remarquons qu'avec l'utilisation d'une faible pression de contact (2,3 bars), l'amplitude des paramètres Spq et Svq varie peu en fonction de la durée de rodage plateau. L'augmentation de la pression de contact à 5,5 bars engendre directement une diminution du paramètre Spq. Le paramètre Svq ne commence à diminuer qu'au bout de 8

battements. Avec l'utilisation d'une pression de contact élevée (de 10 bars), les paramètres Spq et Svq diminuent plus rapidement que pour les pressions de contact plus faibles. On remarque également que les valeurs de Spq et Svq se stabilisent au bout d'un nombre de battement élevé. Enfin, la rugosité initiale n'a pas d'influence sur l'évolution de Spq et Svq, sauf que ceux-ci mettront plus de temps à se stabiliser pour une rugosité initiale élevée.

En résumé, l'évolution de Spq et Svq montre que :

- plus on augmente la pression de contact, plus l'influence du temps de rodage sur l'usure des fûts est grande. Néanmoins, pour un nombre de battements élevés, Spq et Svq convergent vers une valeur limite (ici autour de 0,2 µm) qui dépend du type d'abrasif utilisé ;
- pour une pression de contact similaire au procédé industriel (5,5 bars), à un nombre de battements inférieur à 8, seul Spq est réduit (Svq reste quasiment constant). Ceci explique le choix des paramètres process au niveau du procédé de rodage plateau industriel où l'on cherche uniquement à écrêter les pics de rugosité.

Afin de mieux visualiser la proportion de la rugosité superficielle par rapport aux vallées et par conséquent de quantifier la distribution des deux composantes de rugosité, le rapport Spq/Svq a été représenté sous forme d'isovaleurs en fonction des paramètres process (Figure 4. 12).

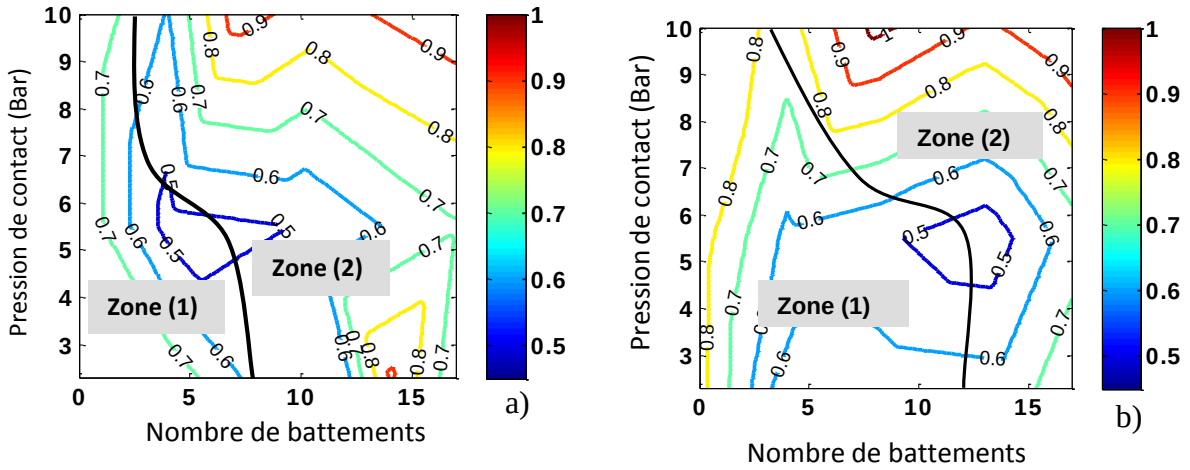


Figure 4. 12. Evolution du rapport Spq/Svq en fonction de la pression de contact et de la durée de rodage pour des surfaces de rugosités initiales (a) Ra_i=0,38 µm et (b) Ra_i=0,70 µm

Dans un premier temps (zone 1), le rapport Spq/Svq diminue jusqu'à une valeur minimale proche de 0,5 (pour Ppl=5,5 bar et N=10 avec Rai=0,38 µm ; pour Ppl=5,5 bar et N=13 avec Rai=0,70 µm) qui est atteinte plus rapidement avec une surface fine (Rai=0,38 µm). Il s'agit de la phase d'écrêtage ou « plateauing » ciblée pour le rodage plateau industriel. La valeur minimale est considérée comme optimale pour les performances de lubrification, usure et anti-grippage [6].

Dans un second temps (zone 2), après une augmentation significative du nombre des battements et de la pression de contact, le ratio Spq /Svq augmente progressivement pour converger vers une valeur proche de 1. Il s'agit de la phase de lissage ou « smoothing » qui est une diminution globale de la rugosité avec une réduction significative de la profondeur des vallées.

De ces résultats, un modèle mathématique prédictif de l'usure des plateaux et vallées a été déterminé:

$$\frac{S_{pq}}{(S_{pq})_i} = 0{,}49e^{-\alpha_p t_{pl}} - \beta_p P_{pl} + 0{,}4 \tag{4. 2}$$

$$\frac{S_{vq}}{(S_{vq})_i} = 0{,}70e^{-\alpha_v t_{pl}} - \beta_v P_{pl} + 0{,}4 \tag{4. 3}$$

Les coefficients α et β déterminent l'impact respectif du temps de rodage ainsi que de la pression de contact.

Ce modèle se corrèle bien avec les valeurs expérimentales, avec des erreurs quadratiques SSE (Sum of Squares Error) et erreurs type RMSE (Root Mean Square Error) faibles ainsi des coefficients de détermination R^2 proches de 1. Toutefois la corrélation est meilleure pour le cas de l'évolution des plateaux. Les coefficients propres au modèle ainsi que les paramètres de précision correspondants sont présentés en Table 4. 4.

Table 4. 4. Paramètres du modèle d'usure

Paramètre de rugosité	Paramètres du modèle prédictif		Précision du modèle		
	A	B	SSE	R^2	RMSE
$\frac{S_{pq}}{(S_{pq})_i}$	0,2912 (± 0,039)	0,02 (± 0,009)	0,03	0,97	0,03
$\frac{S_{vq}}{(S_{vq})_i}$	0,0658 (± 0.026)	0,04164 (± 0,015)	0,27	0,84	0,13

Ce modèle d'usure pourra servir à l'optimisation de l'étape de rodage plateau en fonction de la topographie de surface désirée mais aussi pour un paramètre process donné. En revanche, il est important d'évaluer l'efficacité énergétique des différents paramètres process afin d'identifier les mécanismes d'abrasion en jeu. Ceci pourra se faire par le biais de l'analyse de l'énergie spécifique.

3.2.2.4. Analyse de l'énergie spécifique du rodage plateau

L'analyse de l'efficacité énergétique du procédé, par l'intermédiaire du calcul de l'énergie spécifique permet d'évaluer l'influence des paramètres process que sont la durée de rodage ainsi que la pression de contact sur les mécanismes d'abrasion fondamentaux tels que la coupe, le labourage ou le glissement. Elle permettra également de déterminer quels paramètres conduisent à un enlèvement de matière rapide avec un minimum d'énergie consommée. Les Figure 4. 13 et Figure 4. 14 présentent respectivement l'enlèvement de matière ainsi que l'énergie spécifique en fonction des paramètres process pour chaque surface initiale étudiée.

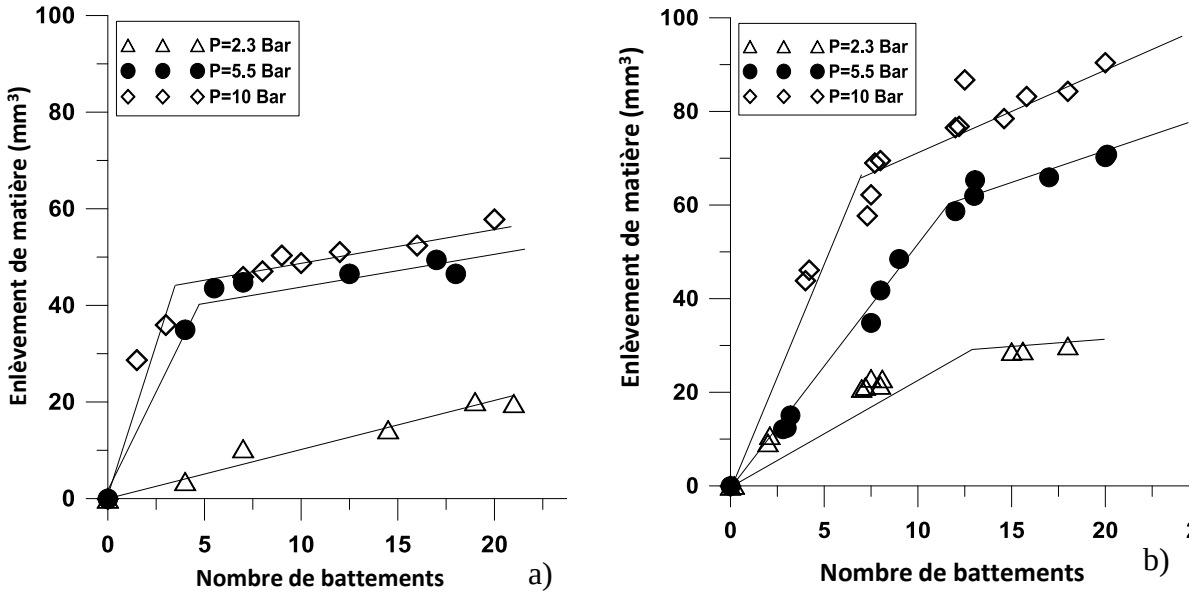


Figure 4. 13. Enlèvement de matière en fonction de la durée de rodage pour des surfaces initiales de (a) Ra_i=0,38 µm et (b) Ra_i=0,70 µm

Concernant l'évolution de l'enlèvement de la matière, deux zones sont clairement distinguées. Dans la première zone, pour de faibles valeurs de battements, l'enlèvement de matière augmente très rapidement. A partir d'un certain nombre de battements, il augmente beaucoup moins rapidement. Par conséquent, dans la seconde zone, le taux d'enlèvement de matière diminue significativement. De plus, une augmentation de la pression de contact entraîne une réduction de la durée de la première zone tandis qu'une augmentation de la rugosité initiale l'augmente.

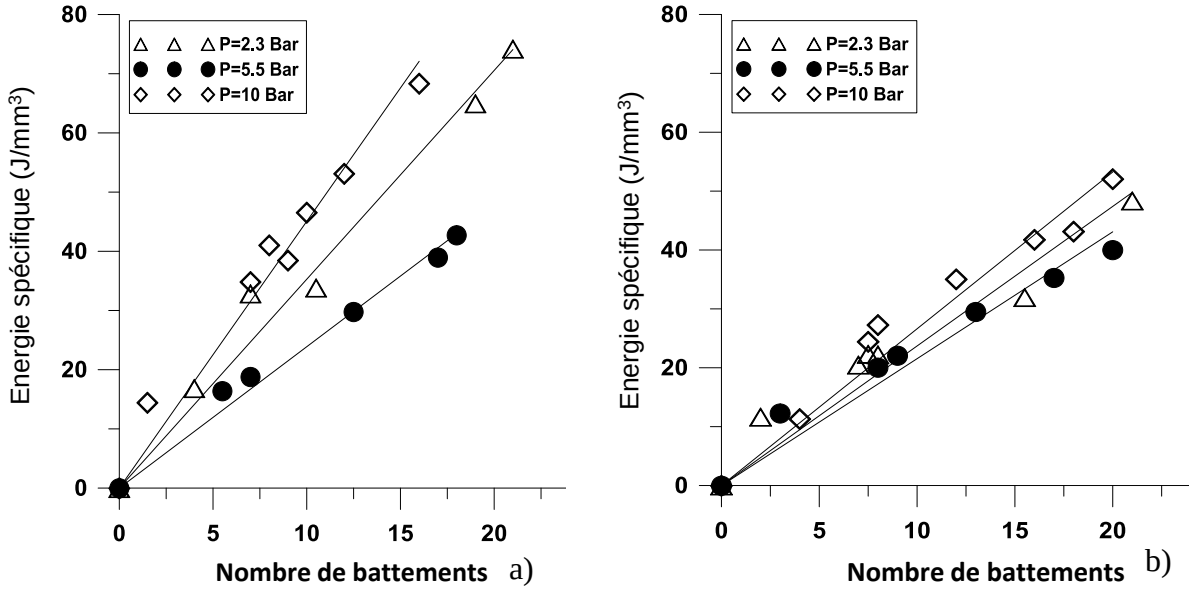


Figure 4. 14. Energie spécifique en fonction de la durée de rodage pour des surfaces initiales de (a) Ra_i=0,38 µm et (b) Ra_i=0,70 µm

En ce qui concerne la variation de l'énergie spécifique, celle-ci augmente linéairement de la même manière durant toute la durée du rodage. De plus, elle augmente avec la pression de contact mais diminue avec la rugosité initiale. Si l'on fait le parallèle avec l'évolution de l'enlèvement de matière, on remarque que l'énergie spécifique augmente considérablement lors de la première zone d'enlèvement de matière alors que l'enlèvement de matière l'est beaucoup moins.Ceci montre la présence de deux régimes énergétiques lors de l'étape de rodage plateau :

- un régime d'écrêtage similaire au rodage moteur ou « running-in » qui se traduit par un taux d'enlèvement de matière élevé lors de la période initiale de l'étape plateau. Ceci confèrera à la surface une structure plateau permettant une meilleure résistance aux charges ;
- un régime de lissage qui se traduit par une diminution du taux d'enlèvement matière après un certain nombre de battements. Cette diminution est due principalement à une augmentation de la zone à usiner (lors de la première phase seuls les pics de rugosité étaient usinés alors que lors de la seconde phase les vallées le sont également). La surface usinée subit alors un enlèvement de matière accompagné d'une déformation plastique.

De manière générale, les deux régimes montrent que lors de l'étape plateau, le mécanisme prédominant est la coupe. La variation de l'énergie en fonction du temps de rodage est

également identique pour les deux régimes. La pression de contact influe sur la variation de l'enlèvement de matière mais aussi sur l'énergie spécifique. Une pression de contact élevée permet plus d'enlèvement de matière alors qu'une pression de contact intermédiaire (5,5 bars) est plus efficace énergétiquement.

Une fois que l'évolution de la topographie de surface et les mécanismes physiques activés lors de la phase de rodage plateau sont décrits, il est important de les associer à la fonctionnalité de surface.

3.2.2.5. Cartographie de l'impact sur les performances fonctionnelles

Une cartographie de l'impact des conditions process (temps de rodage et pression de contact) sur le frottement déterminé par le modèle numérique a pu être établie en Figure 4. 15.

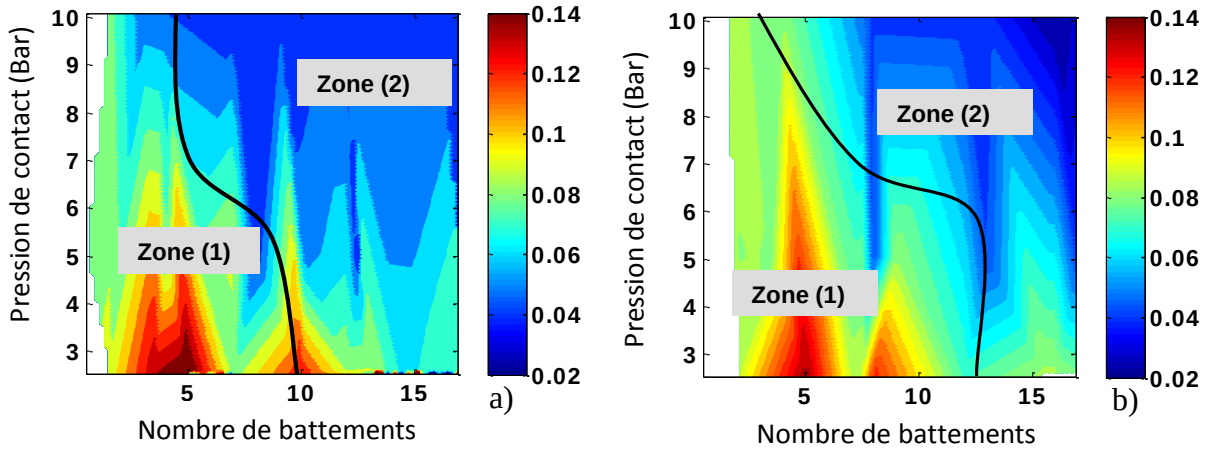


Figure 4. 15. Cartographie de l'impact du temps de rodage et de la pression de contact sur le frottement prédit pour (a) Ra_i=0,38 et (b)Ra_i=0,70

Elle montre que le coefficient de frottement diminue globalement avec l'augmentation des pressions de contact et du temps de rodage. Cependant, à la fin de l'écrêtage (fin de zone 1 si l'on se réfère aux Figure 4. 12 et Figure 4. 15), le frottement n'est pas minimal. Lors de la phase de lissage (zone 2), le frottement continue de diminuer jusqu'à une valeur limite de frottement (proche de 0,02). Autrement dit, le simple écrêtage des plateaux n'est pas suffisant pour l'obtention d'une surface optimale au niveau frottement et qu'un lissage de la topographie avec des plateaux et vallées de faibles amplitudes est plus adéquat.

Pour conclure, ces résultats remettent en cause l'idée généralement admise qu'une surface de type « plateau », avec des plateaux de faible amplitude combinés à des vallées de taille

relativement élevée, est optimale au niveau fonctionnel [6,8]. Autrement dit, au niveau frottement, une texture est optimale avec une rugosité globale minimale et ceci malgré une amplitude de rugosité superficielle égale à la profondeur de stries. Ceci montre que l'amplitude de rugosité de surface est plus sensible au frottement que la distribution des composantes plateaux et vallées. Pour le moment, seule une orientation des stries autour de 50° a été étudiée. Pour le cas du rodage HSH, dont les stries sont orientées autour de 130°, l'impact de l'amplitude des plateaux et vallées comparativement au rodage plateau sera détaillé dans la section suivante.

3.3. Effet de mutuel de la rugosité superficielle et de l'anisotropie

Une texture HSH diffère des textures PH et SH en raison de l'anisotropie mais également au niveau de l'amplitude de rugosité. Les principales différences texturales entre une texture PH et HSH sont présentées en Figure 4. 16.

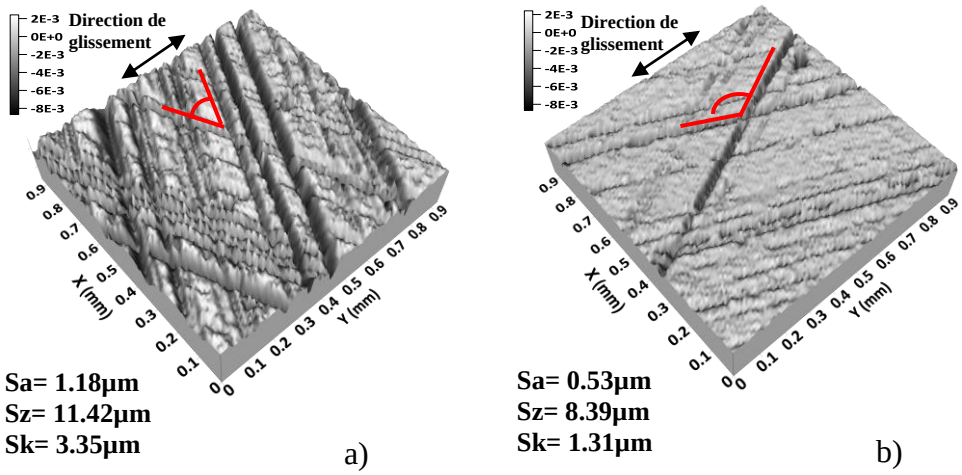


Figure 4. 16. Topographies tridimensionnelles de surfaces rodées (a) plateau à un angle de striation de 50° et (b) HSH à un angle de 135°

Outre un angle de rodage élevé (autour de 135° au lieu de 50°), la texture HSH, par rapport au PH, présente, à travers les paramètres ISO 25178-2 (Sa, Sz et Sk), une rugosité plus fine.

Par conséquent, il est important de savoir si les améliorations fonctionnelles entre une texture PH et HSH sont dues à l'anisotropie, la rugosité (amplitude de rugosité superficielle et/ou distribution de rugosité) ou bien à la combinaison des deux. Afin de répondre à ces interrogations, des surfaces HSH et PH ont été générées numériquement

avec différentes rugosités (amplitudes et distributions de rugosité) de façon à observer leur effet sur les performances fonctionnelles.

3.3.1. Etude numérique

A partir des topographies HSH et PH initialement mesurées par interférométrie (Figure 4. 16), des surfaces présentant différents rapports plateaux/vallées avec des hauteurs de surface totale (Sz) données ont été générées numériquement. L'algorithme de génération de ces surfaces est décrit en Figure 4. 17. Avec cette méthodologie, la comparaison entre textures générée par PH et HSH est réalisée à amplitude totale de surface (Sz) fixée. De plus, toutes les autres caractéristiques telles que la densité de striation ou bien la largeur de striation restent identiques aux surfaces initialement mesurées. Par conséquent, les seules variations concernent le rapport d'amplitudes plateaux/vallées pour une amplitude Sz considérée.

Trois hauteurs de surfaces (Sz=2,5 µm, Sz=5 µm et Sz=10 µm) et six rapports d'amplitudes plateaux/vallées allant de 0,1 à 0,8 sont étudiés. Un rapport plateaux/vallées nul correspond à une surface plateau « idéale » tandis qu'un rapport égal à 1 représente une texture sans plateaux (sans pics écrêtés).

Pour le calcul du ratio plateaux/vallées, une décomposition morphologique par filtres alternés a été utilisée (Chapitre 3). Les paramètres d'amplitudes quadratiques Spq et Svq pour respectivement les composantes plateaux et vallées ainsi que leur ratio Spq/Svq ont pu ainsi être déterminés.

Notons que les textures PH et HSH initiales ont respectivement un ratio de 0,62 et 0,54. Les détails de la démarche sont documentés dans [115].

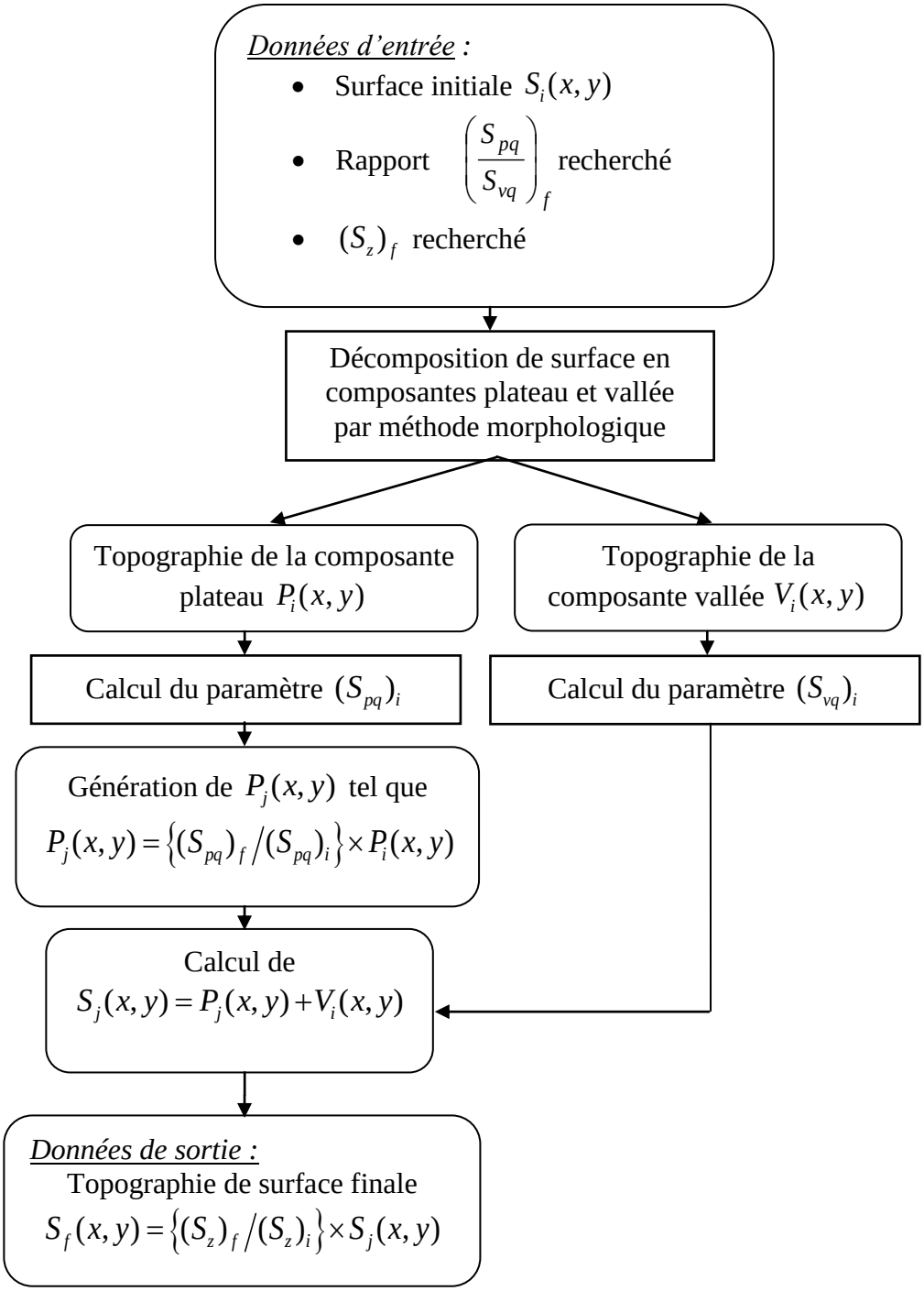


Figure 4. 17. Algorithme de reconstruction de surfaces numériques à différents ratios plateau/vallées, pour une amplitude de surface (Sz) donnée avec utilisation de surfaces PH et HSH initialement rodées

Par la suite les performances fonctionnelles de chacune des surfaces obtenues sont évaluées grâce au modèle de contact Segment Chemise en régime mixte.

3.3.2. Résultats

Le calcul des performances fonctionnelles (frottement, épaisseur de film d'huile) des surfaces générées, elles ont été calculées à l'aide du modèle segment-cylindre décrit dans le Chapitre 3. Concernant les conditions de simulation, la force normale utilisée est F_N=50N tandis que la vitesse de glissement est U_m=1,5 m/s de façon à se situer en fin de régime de lubrification mixte. Celles-ci entrent dans les gammes d'utilisation du tribomètre segment-fût (Chapitre 2) en termes de force normale et de de vitesses maximales au niveau du point milieu.

L'évolution du frottement en fonction du ratio Spq/Svq pour les trois niveaux de rugosité Sz choisis est représentée en Figure 4. 18.

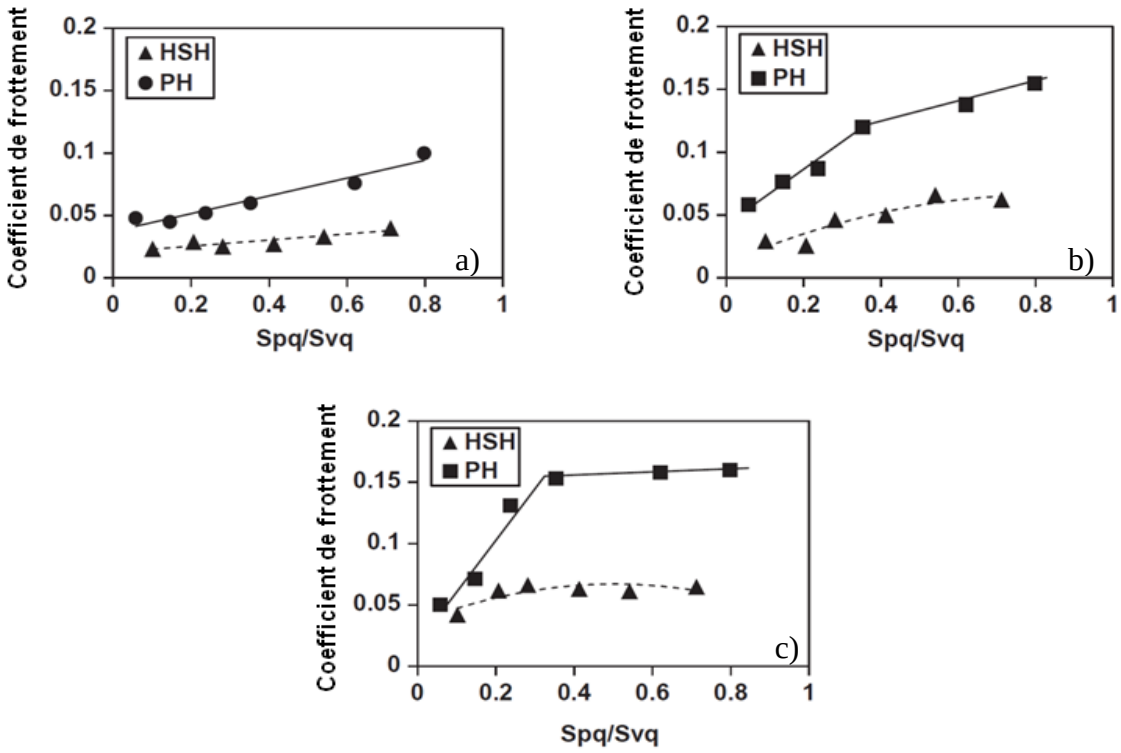


Figure 4. 18. Evolution du coefficient de frottement de fûts HSH et PH en fonction du ratio Spq/Svq et pour trois amplitudes des surfaces différentes de (a) Sz=2.5µm, (b) Sz=5µm et (c) Sz=10µm

Cette figure montre tout d'abord qu'en régime de lubrification mixte sévère (frottement supérieur à 0.1), aussi bien pour les surfaces PH que HSH, le coefficient de frottement augmente avec le niveau de rugosité Sz. De plus, une différence significative du frottement est observée pour une surface HSH par rapport à une surface PH. Cette différence s'accroît avec l'augmentation de l'amplitude de surface Sz. Concernant l'évolution du frottement en fonction du ratio Spq/Svq, une surface PH est beaucoup plus sensible à l'évolution du

frottement en fonction du ratio Spq/Svq comparativement à une surface HSH surtout pour des plages de valeurs de $\frac{S_{pq}}{S_{vq}} \leq 0{,}3$ et pour les surfaces d'amplitude Sz élevée (5 et 10µm). Ce qui veut dire que l'écrêtage des pics ou « plateauing » pour une surface avec une anisotropie à 130° est beaucoup moins important pour la réduction du frottement SC que pour une texture à une anisotropie de 50°.

La Figure 4. 19 donne des informations complémentaires concernant l'influence du ratio plateaux/vallées et de la rugosité de surface des textures HSH et PH sur les performances fonctionnelles comme le taux de contact rugueux et l'épaisseur de film d'huile.

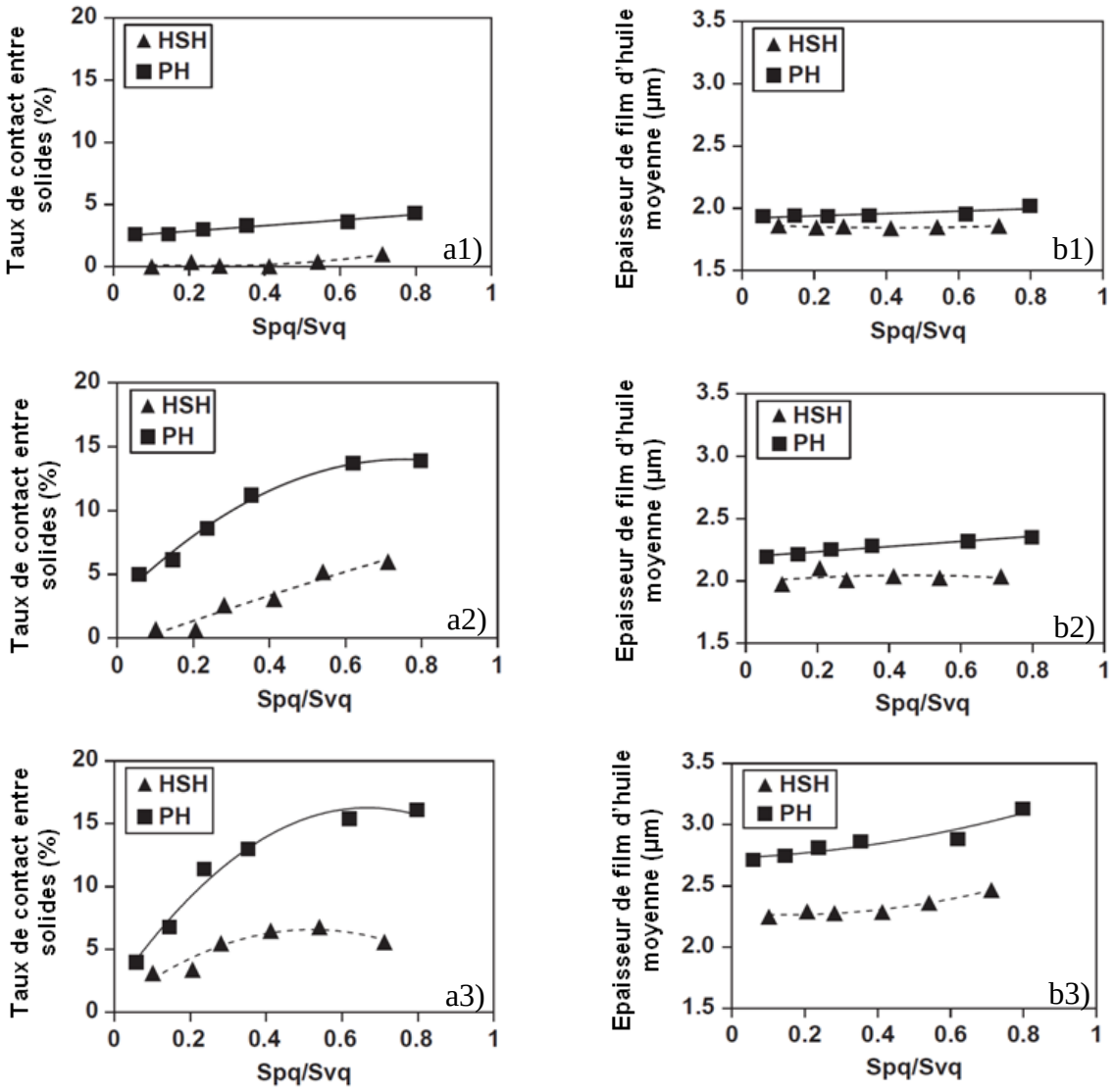


Figure 4. 19. Taux de contact entre solides (a) et épaisseur moyenne de film (b) de surfaces de cylindres PH rodée HSH en fonction du ratio Spq/Svq et pour trois différentes amplitudes de surface (1) Sz=2,5 µm, (2) Sz=5 µm et (3) Sz=10µm

Cette figure montre premièrement que l'augmentation de la rugosité Sz influe grandement sur l'augmentation des aires de contact solide-solide et l'épaisseur de film d'huile. Deuxièmement, on remarque aussi qu'une texture de type HSH (à un angle de striation de 130°) minimise les contacts solide-solide mais aussi l'épaisseur de film d'huile par rapport à une texture PH en régime mixte. Ce dernier résultat explique notamment la baisse de la consommation d'huile d'une surface HSH par rapport à une surface plateau.

Le taux variation totale du frottement (HSH et PH) pour les différentes plages d'évolution du ratio plateaux/vallées à une amplitude de rugosité donnée est présenté en Figure 4. 20.

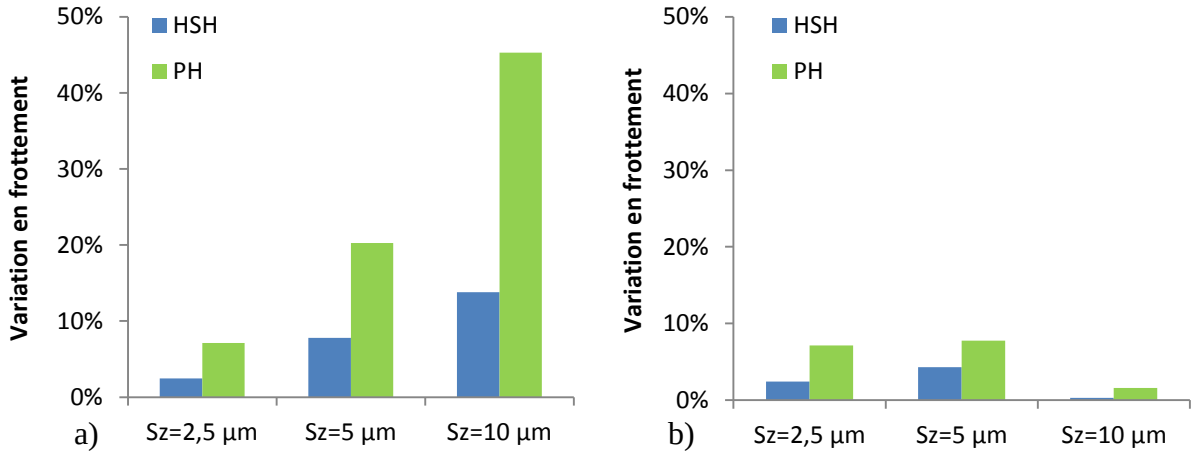


Figure 4. 20. Variation relative du coefficient de frottement des surfaces PH et HSH à différentes amplitudes de rugosité Sz pour Spq/Svq (a) compris entre 0 et 0,3et (b) compris entre 0,3 et 1

Cette table confirme tout d'abord que pour une surface plateau le frottement est plus sensible à la rugosité superficielle que pour une surface de type HSH. Cette différence de sensibilité est d'autant plus grande entre les deux types de texturations lorsque $\frac{S_{pq}}{S_{vq}} \leq 0.3$ pour $Sz \geq 5\mu m$.

De plus, pour une surface HSH, cette sensibilité est très faible pour une surface de faible rugosité (Sz ≤ 2,5 µm).

3.3.3. Conclusions

Ces résultats montrent que la phase d'écrêtage qui implique la réduction de l'amplitude des plateaux par rapport aux vallées, autrement dit la réduction du rapport Spq/Svq, est beaucoup moins bénéfique au niveau performances fonctionnelles pour une surface HSH contrairement à une surface PH. Ceci suggère que cette étape de rodage peut être fortement réduite voire

supprimée pour le cas du rodage HSH, sans pour autant altérer les performances fonctionnelles. Ainsi, une texture à anisotropie de 130° combinée à de faibles amplitudes de rugosité serait optimale quel que soit la distribution des amplitudes plateaux et vallées. Toutefois, il est important de confirmer ces résultats via des essais de rodage et également d'évaluer les performances en termes d'usure de telles surfaces à un faible niveau d'écrêtage. Pour le moment, seules deux anisotropies (45 et 130°) ont été testées. Il serait intéressant d'observer l'effet de différents angles de rodage combiné à la rugosité, en particulier la taille de stries (profondeur, largeur).

3.4. Etude de l'effet du mutuel de l'anisotropie et de la taille de stries sur le frottement Segment-Cylindre

L'anisotropie de surface [54,115] ainsi que la taille de striation [27,97,98] jouent un rôle prépondérant sur la réduction du frottement dans le système Segment-Chemise. A une configuration de stries croisées à 50°, des stries étroites et peu profondes sont favorables à une diminution de frottement Segment-Chemise. Concernant, l'anisotropie, il a été montré que des textures à stries de 130° sont plus performantes en frottement que celles à un angle de rodage de 50°. Néanmoins, seulement deux angles de rodage ont été étudiés. Il serait donc intéressant d'explorer différents angles de striation mais également de voir l'effet de la taille striation sur la fonctionnalité sur une plus large plage d'angles de rodage. Un autre paramètre intéressant à observer serait le ratio profondeur/largeur de stries qui, selon plusieurs études sur le contact lubrifié, serait inférieur ou égal à 10% pour la réduction du coefficient de frottement [75,117]. En résumé, il a été montré dans la littérature que la taille, la morphologie de stries et leur orientation ont une grande influence sur le frottement de contacts lubrifiés. En revanche, leur effet mutuel n'a pas été totalement exploré. Par conséquent, cette étude permettra d'observer l'effet mutuel de la taille, la morphologie et l'orientation de stries générées lors de la dernière étape de rodage.

3.4.1. Démarche expérimentale

3.4.1.1. Génération des textures rodées

Des surfaces de cylindres issues de blocs moteurs K9K ont été rodées au moyen de la machine de rodage industrielle de type NAGEL suivant le plan d'essais décrit en Table 4. 5. Des stries de taille et orientations différentes (30 à 130°) sont générées lors de la troisième

étape de rodage. D'une part, des textures à stries fines sont générées au moyen d'un mode d'expansion hydraulique (étape plateau) à une pression de contact de 6 bars et des abrasifs de taille de grains de 30 µm. D'autre part, des textures composées de stries larges et profondes sont générées au moyen d'un mode d'expansion mécanique (étape finition supplémentaire) à une vitesse d'expansion de 1,7 µm/s et des abrasifs de taille de grains de 110 µm/s. Les conditions en étapes d'ébauches et de finitions sont identiques et proches de celles du rodage plateau industriel avec la génération de stries croisées à 50° de taille relativement élevée comparativement à celles générées lors des étapes de superfinition. Le détail des conditions process sont présentés dans [118].

Table 4. 5. Conditions d'essais de rodage

. **Paramètres de rodage**	**Etape finition**	**Etape de super-finition**	
		Expansion mécanique (seconde étape finition)	**Expansion hydraulique (étape plateau)**
Vitesse axiale (m/min)	18	11 à 29	11 à 29
Vitesse de rotation (tr/min)	160	58 à 170	58 à 170
Durée de rodage (s)	20	12	7
Type d'expansion	Mécanique	Mécanique	Hydraulique
Vitesse d'expansion (µm/s)	4	1,7	-
Pression de contact (bar)	-	-	6
Nombre de pierres	6	6	6
Type de grains d'abrasifs	Carbure de silicium	Carbure de silicium	Carbure de silicium
Taille de grain (µm)	107	107	30
Type de liant	Vitrifié	Vitrifié	Vitrifié
Tailles des pierres abrasives (mm.mm.mm)	6x6x70	6x6x70	6x6x70

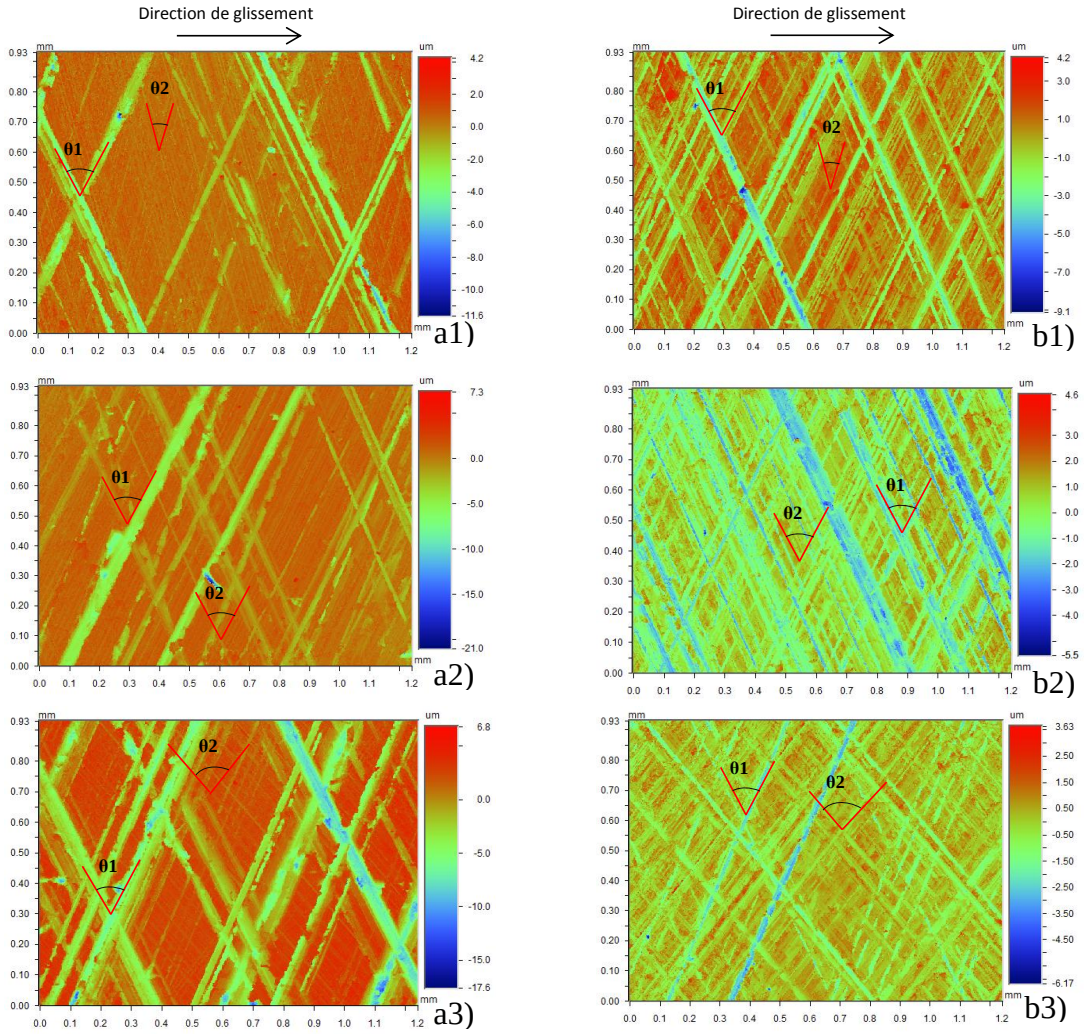
3.4.1.2. Caractérisation topographique et fonctionnelle

Une fois rodées, les surfaces des cylindres de moteurs sont découpées en éprouvettes et analysées par interférométrie pour l'analyse de la topographie tridimensionnelle. Les topographies obtenues pour les différentes conditions process sont représentées en Figure 4. 21. Notons à partir de cette figure, que des surfaces texturées en deux phases de finition à expansion mécanique comportent des stries plus larges, comparativement à celles générées en finition-plateau. Ceci s'explique, d'une part par l'utilisation de grains d'abrasifs de taille plus élevée (110 µm au lieu de 30 µm en phase plateau) et, d'autre part, d'une pression de contact plus élevée avec ce mode d'expansion. θ_1 and θ_2 sont les angles de striation obtenus respectivement après la seconde et troisième étape de rodage. Une fois numérisées, afin de

minimiser l'influence de l'amplitude de surface (qui influe significativement sur le frottement comme démontré dans le Chapitre 4, partie 3.3) et de se focaliser sur l'effet mutuel de l'anisotropie et de la taille des stries, les topographies sont toutes mise à une amplitude moyenne Sa égale à 1 µm à l'aide de la formule suivante :

$$Z_f(x,y) = \frac{Z_i(x,y) \times 1.0 \times 10^{-6}}{Sa_i} \qquad \textbf{(4. 4)}$$

Z_f est la topographie de surface ajustée à Sa=1µm. Z_i est la topographie de surface initiale et Sa_i l'amplitude moyenne correspondante.



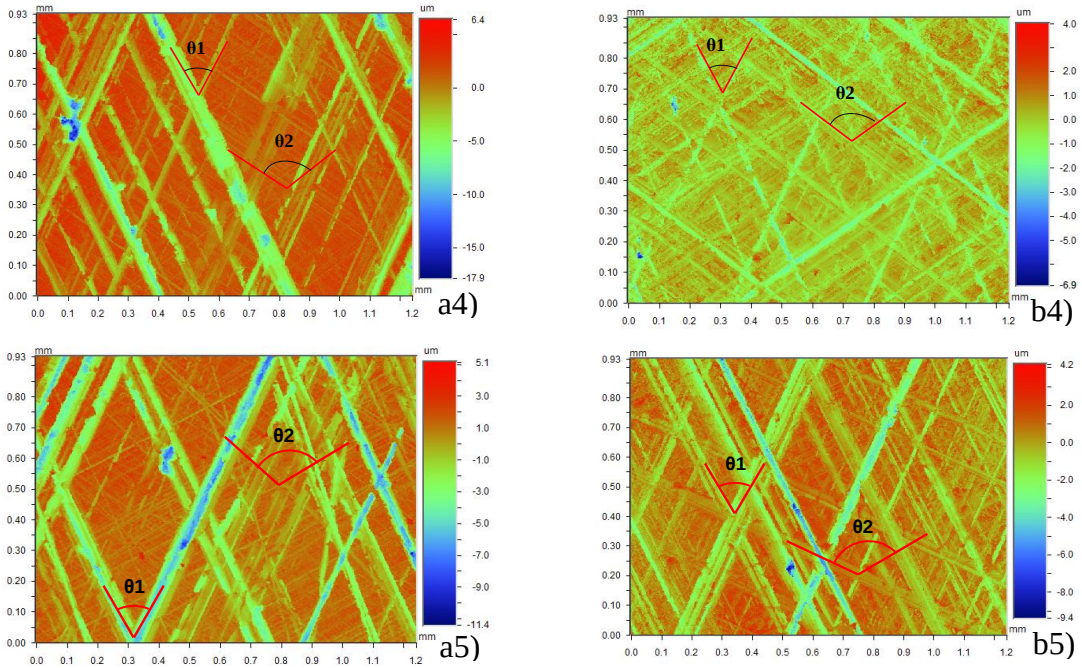


Figure 4. 21 Images obtenues par interféromètre de surfaces rodées par procédé finition-plateau (a) et double finition (b) pour des angles de striation obtenus lors de la 3ème étape de 30 (1), 50 (2), 80 (3), 110 (4) et 130° (5)

Par la suite, les surfaces sont analysées au niveau de la topographie et ensuite introduites dans le modèle de simulation Segment-Chemise afin de lier le triplet process-surface-fonctionnalité. Afin de se situer en régime mixte, les conditions de calcul sont une charge linéique *w* de 200 N/mm ainsi qu'une vitesse de glissement de 0.05 $m.s^{-1}$.

3.4.2. Evolution de la topographie de surface

3.4.2.1. Analyse des stries dans leur globalité

Dans un premier temps, pour les surfaces mises à une amplitude moyenne identique de 1 µm, une décomposition morphologique est appliquée afin de déterminer l'amplitude globale des vallées via le paramètre Svq (voir Chapitre 3). La Figure 4. 22 illustre l'évolution de ce paramètre en fonction de l'orientation des stries et pour chaque type d'expansion utilisée lors de la troisième étape de rodage.

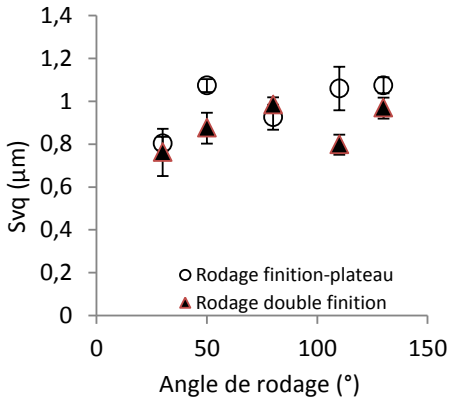


Figure 4. 22. Evolution du paramètre Svq en fonction de l'angle de rodage pour des surfaces générées par procédé finition-plateau et procédé double finition

Elle montre que la profondeur quadratique de stries, englobant celles générées à la seconde et troisième étape de rodage, est relativement constante pour les différentes orientations et modes d'expansion. Notons, tout de même une légère différence entre celles générée en finition-plateau et double finition aux orientations de 50° et 110°. Ceci est dû, lors de la troisième étape de rodage de type « double finition », à une réduction des stries issues de l'étape finition. La stabilité du paramètre Svq s'explique par une contribution plus grande des stries générées en finition qui sont d'amplitude plus élevée. Afin d'évaluer, l'impact sur le frottement Segment-Chemise de chacune des familles de stries générées en seconde et troisième phase de rodage, leur taille (profondeur largeur) sera directement évaluée sur les topographies numérisées.

3.4.2.2. Analyse des stries issues de l'étape finition

La mesure tridimensionnelle des stries générées lors de l'étape finition a permis d'évaluer la taille de ces dernières pour chacun des types de rodage utilisés (Figure 4. 23).

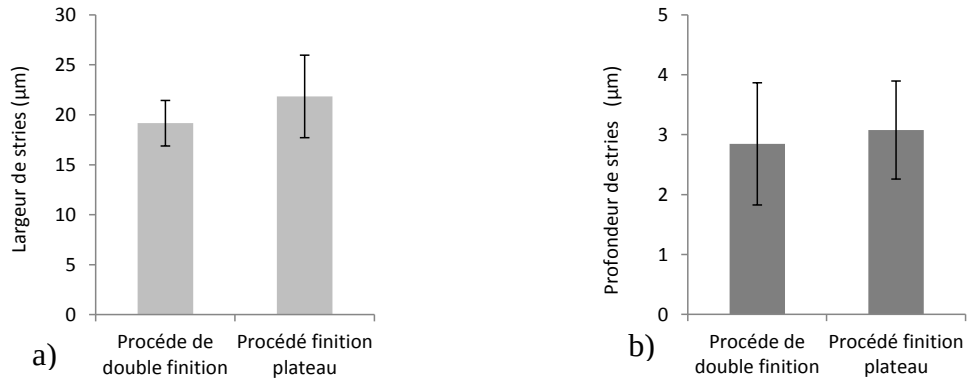


Figure 4. 23. (a) Largeur et (b) profondeur des vallées générées lors de la seconde étape de rodage (étape finition) suite à des procédés finition-plateau et double finition

Ceci montre qu'en moyenne, les profondeurs et largeurs de stries sont identiques pour les différents types de rodage. Autrement dit, la taille de ce type de strie ne devrait, à priori, pas influer sur la fonctionnalité de surface.

3.4.2.3. Analyse des stries issues de la troisième étape de rodage

Concernant l'évolution de la taille des stries générées lors de la troisième étape de rodage, présentée dans la Figure 4. 24, une différence significative entre les stries issues des étapes plateau et seconde finition est observée. Ces dernières sont plus profondes que celles générée par un procédé finition-plateau, plus particulièrement pour des angles de rodage θ_2 de 80 à 130° (Figure 4. 24. (a)). La même tendance est remarquée pour le ratio profondeur/largeur de stries (Figure 4. 24.(b)), qui est, d'après la littérature [75,117] un facteur influent sur le frottement SC. Ces résultats, permettent, par les similarités des stries issues de l'étape finition, d'affirmer que les différences fonctionnelles des surfaces seront principalement dues aux striations générées lors de la troisième étape de rodage.

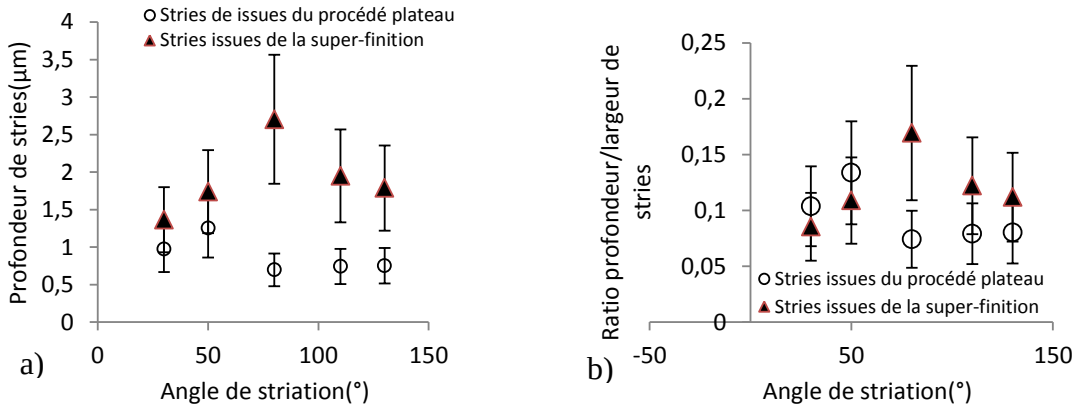


Figure 4. 24. Evolution de la (a) profondeur et (b) du ratio profondeur/largeur de stries en fonction de l'angle de striation pour des vallées générées lors de la troisième étape de rodage

3.4.3. Evolution du frottement Segment-Chemise

3.4.3.1. Effet mutuel de la profondeur et orientation de stries

Par la suite, le calcul des performances en frottement des surfaces générées a permis d'évaluer l'effet mutuel de la taille et orientation des stries issues de la troisième étape de rodage. La cartographie de l'effet mutuel de l'orientation ainsi que de la profondeur des stries sur le frottement SC est représentée en Figure 4. 25.

Elle montre que le coefficient de frottement diminue principalement avec la réduction de la profondeur de stries. Néanmoins, les faibles orientations de [30-60°] et les orientations élevées de [120-130°] contribuent le plus à l'amélioration des performances en frottement. Les orientations de stries dans l'intervalle [80-100] sont les moins bénéfiques en termes de frottement. Notons tout de même qu'un angle de rodage de 130° permet l'obtention des plus faibles valeurs en frottement (inférieur à 0,045) pour des stries d'une profondeur totale allant jusqu'à 1,8 µm, ce qui n'est pas le cas pour des angles de striation de [30-45°] où la profondeur n'excède pas 1,3 µm. Autrement dit, avec des striations de 130°, il est possible de générer des stries relativement élevées sans pour autant affecter les performances en frottement.

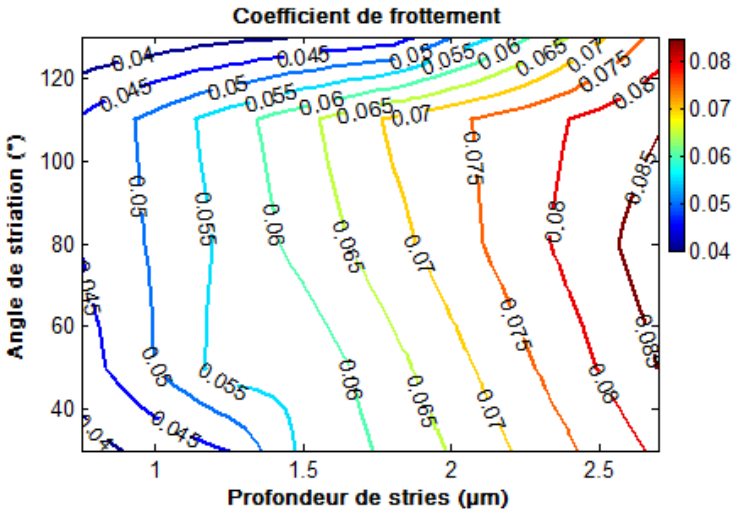


Figure 4. 25. Frottement simulé en fonction de la profondeur de stries et de l'angle de stries générées lors de la troisième étape de rodage

3.4.3.2. Effet mutuel du ratio profondeur/largeur et orientation de stries

Concernant le ratio profondeur/largeur ($1/\lambda_D$, λ_D étant le paramètre d'aspect) de stries, son effet combiné à l'angle de striation sur le frottement Segment-Chemsie est représenté dans la Figure 4. 26. Comme pour le cas de la profondeur de stries, une réduction de ce ratio contribue fortement à la diminution du frottement SC. Les orientations de stries réduisant le plus le frottement se situent dans les intervalles [40-60°] et [120-130°]. Notons, tout de même que le frottement est moins sensible au ratio profondeur/largeur pour des stries orientée à 130°. Ici, ce ratio peut augmenter jusqu'à 11% ($\lambda_D = 9,1$) sans altérer les performances en frottement (frottement inférieur à 0,045). Pour d'autres orientations, il ne peut excéder 9% ($\lambda_D = 11,1$).

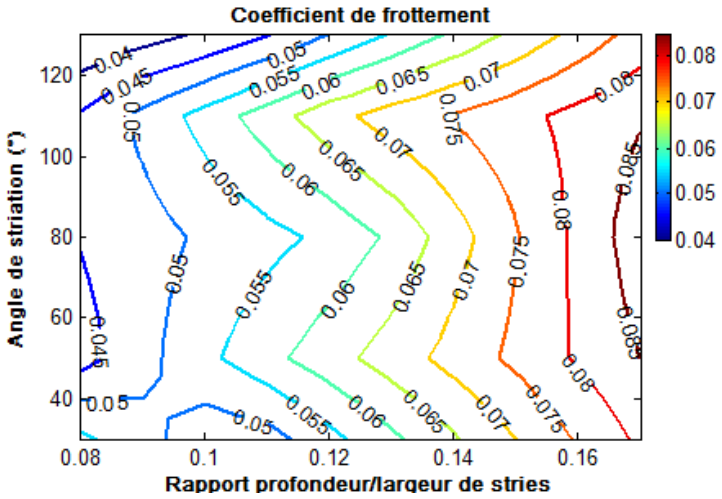


Figure 4. 26. Frottement simulé en fonction du ratio profondeur/largeur de stries et de l'angle de stries générées lors de la troisième étape de rodage

3.4.4. Bilan des résultats

Les stries générées lors de la dernière étape de rodage ont une importante influence sur les performances en frottement en régime mixte. L'étude a permis de décrire les principales caractéristiques de taille et morphologie de stries associées à l'anisotropie de surface qui permettent la réduction du frottement du système segment-fût. Elle a montré d'une part que la profondeur de stries ainsi que le ratio profondeur/largeur de stries sont des paramètres très influents sur le frottement. Une réduction significative de ces paramètres permettrait d'améliorer les performances en frottement des surfaces rodées, quel que soit l'angle de striation. L'étude confirme que les angles de rodage les plus performants se situent dans les intervalles [30 - 50°] et [120 -130°]. Toutefois, un angle de striation de 130° est moins sensible aux variations de taille et morphologie de stries. Notons que la technologie de rodage utilisée, composé d'un angle de striation différent entre l'étape finition et plateau, est facilement réalisable par les machines industrielles.

Cependant, ces résultats n'ont été étudiés que sur des surfaces de faible longueur de glissement relativement, homogènes (pas de stries d'inversion) en régime mixte et ne concernant que les textures composées de stries rectilignes croisées. Par conséquent, il serait intéressant d'étudier l'effet de texture sur l'ensemble de la course du segment sur large variété de surfaces (rectilignes et curvilignes). Pour cela, des textures innovantes seront testées sur tribomètre à différentes positions du segment mais aussi à différents nombres de Sommerfeld (S).

4. *Conclusions*

L'effet des caractéristiques texturales majeures sur les performances fonctionnelles des surfaces générées par des procédés industriels (PH, SH, HSH) a été étudié. Ceci a permis de déterminer les paramètres topographiques majeurs d'une surface optimale au niveau frottement. Cette surface dite « idéale » possède les caractéristiques suivantes :

- topographie fine composée de stries étroites et peu profondes ;
- surface lisse d'une rugosité superficielle minimale, pas nécessairement de type « plateau » ;
- texture à anisotropie de surface de 130° combinée à une amplitude de rugosité faible, indépendamment du ratio des amplitudes plateaux et vallées ;
- Texture à anisotropie de 130° combinée à des stries de faibles profondeur et ratio profondeur/largeur.

Néanmoins, seulement des anisotropies homogènes sous forme de stries croisées (générées par les machines de production actuelles) ont été étudiées. Il serait donc intéressant d'étudier l'effet sur la fonctionnalité de surface d'une plus large gamme d'anisotropies.

Chapitre 5
Texturations anti-friction innovantes par rodage flexible

1 Introduction

L'anisotropie, comme présentée dans le précédent chapitre pour le cas de textures par rodage plateau (PH) et par rodage hélico-glissant (HSH), influe significativement sur les performances fonctionnelles. Elle se distingue par l'angle rodage pour le cas de textures rectiligne à stries croisées mais aussi par des motifs d'anisotropie différents (sinusoïdes, cercles, etc.). Des angles bien précis peuvent améliorer les performances fonctionnelles dans certaines conditions de fonctionnement, comme par exemple un angle de 130° ou 45° permettant une réduction en frottement significative par rapport à d'autres orientations de stries [1, 2]. D'autres motifs de stries sortant de la configuration « stries croisées » peuvent être intéressants comme par exemple des sinusoïdes ou des cercles [3, 4]. Il s'agit, dans cette partie, de déterminer une texture en rupture technologique pour les moteurs de demain. Pour cela, des textures composées de stries à anisotropie originale sont générées via le démonstrateur technologique de rodage flexible (voir Chapitre 2). Les performances en frottement de chacune des textures seront testées à l'aide du tribomètre segment-cylindre (SC) présenté dans le chapitre 2 en régime de lubrification mixte.

Deux familles de striations seront testées, les stries rectilignes ainsi que les stries curvilignes. Pour le cas des stries rectilignes, il s'agit de la génération de textures avec suppression de stries d'inversion ou encore à anisotropie adaptive, autrement dit, avec un angle de rodage différent sur la longueur du cylindre. Pour le cas des textures curvilignes, des cercles, ellipses ou sinusoïdes seront testés.

Bien entendu, l'ensemble des texturations sera comparé aux anisotropies propres aux rodages industriels comme le rodage Hélico-Glissant (HSH) ou le rodage plateau (PH). Au final, une discussion sur la recherche de l'anisotropie optimale sera entreprise.

2 Textures de surface générées par rodage assisté en trajectoire

Les textures rodées par rodage conventionnel présentent des stries horizontales d'inversion plus ou moins importantes au niveau du point mort bas (PMB) et point mort haut (PMH). La raison de leur apparition est due à la cinématique des procédés de rodage conventionnel. En effet, ces types de rodage utilisent une vitesse de rotation constante combinée à une vitesse de battement oscillatoire qui est maximale au point milieu (PM) mais qui est réduite à l'approche des PMB et PMH jusqu'à s'annuler, changer de sens et augmenter [93,95]. Les images issues de l'interféromètre (Figure 5. 1) montrent l'aspect des stries d'inversion issues du rodage HSH conventionnel et le comparent à celui des stries générées au point milieu.

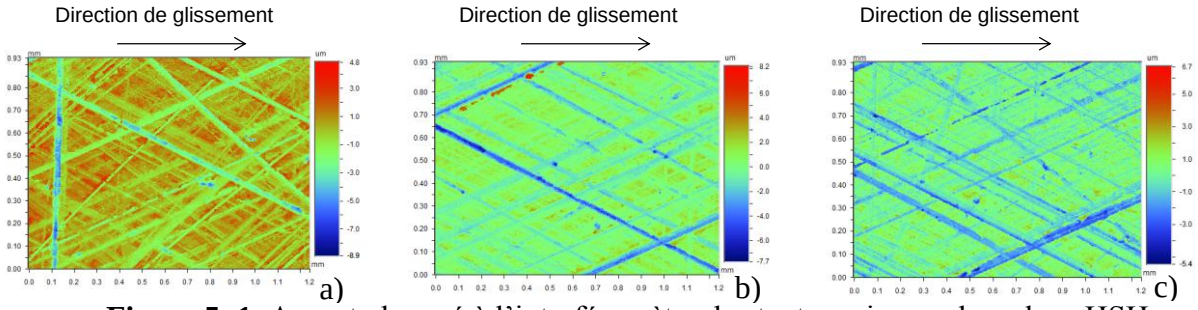


Figure 5. 1. Aspect observé à l'interféromètre des textures issues du rodage HSH conventionnel aux (a) PMB, (b) PM et (c) PMH

Une solution permet de supprimer ce type de striation est le rodage assisté en trajectoire où les vitesses de battement sont synchronisées pour générer la géométrie de striation désirée [5, 6]. Cette synchronisation est réalisée par un système maître/esclave où l'axe le moins dynamique (l'axe de battements) doit être le maître. Ainsi, la vitesse de rotation (esclave) diminue momentanément à chaque ralentissement de la vitesse axiale [93]. Les trajectoires du rodage HSH conventionnel et HSH Assisté en Trajectoire (HSHAT) sont comparées dans la Figure 5. 2.

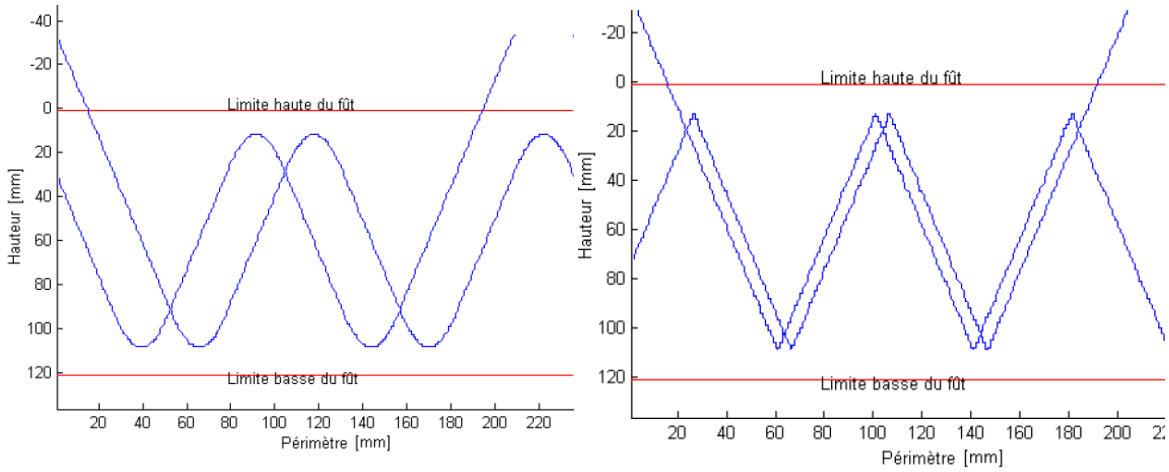


Figure 5. 2. Trajectoires des textures issues (a) du rodage HSH conventionnel et (b) issues du rodage HSHAT [93]

Les photographies des textures issues des rodages HSHAT et PH assisté en trajectoire (PHAT) comparativement à celle générées par procédés HSH et PH conventionnels sont représentées en Figure 5. 3.

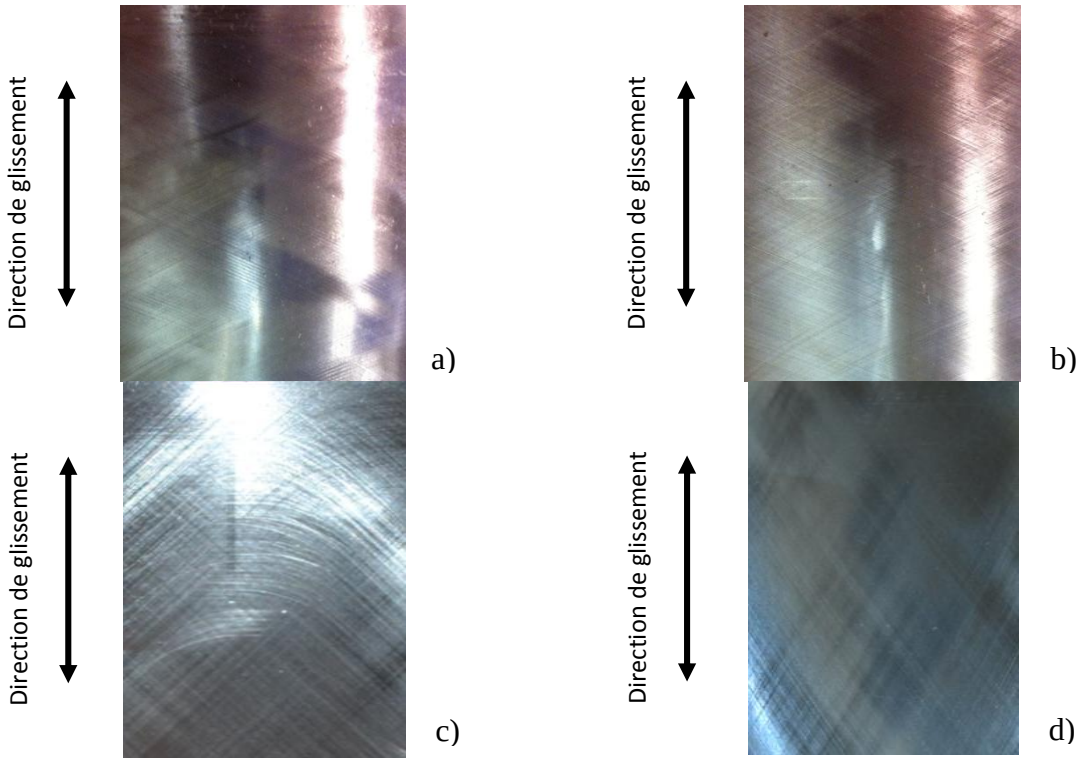


Figure 5. 3. Photographies des textures (a) PH conventionnel, (b) PHAT, (c) HSH conventionnel, (d) HSHAT

Elles montrent que les textures générées par rodage assisté en trajectoire présentent un aspect significativement plus homogène tout le long du fût, comparativement aux textures conventionnelles HSH et plateau. Notons, tout de même que les textures HSH conventionnel

présentent des traces d'inversion plus marquées que les textures plateau conventionnelles. Ceci s'explique par le fait qu'une texture HSH dont l'angle de striation est élevé (130°) nécessite une vitesse de battement plus élevée. Le ralentissement de la vitesse de battement à l'approche de l'extrémité du fût génère des stries d'inversion sur une longueur plus importante. Les images issues de l'interféromètre (Figure 5. 4) montrent l'aspect de ces stries à chaque point de fonctionnement du fût. Elles confirment clairement l'homogénéité des textures obtenues par rodage HSH assisté en trajectoire à toutes les zones fonctionnelles du fût, contrairement à celles générées par rodage HSH conventionnel (Figure 5. 1).

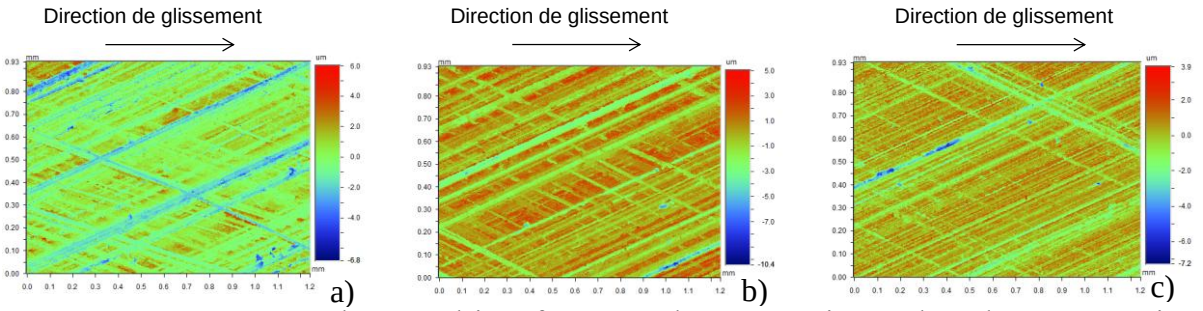


Figure 5. 4. Aspect observé à l'interféromètre des textures issues du rodage HSH assisté en trajectoire HSH aux (a) PM, (b) PMH et (c) PMB

2.1 Conditions de rodage

Les textures sont générées via le démonstrateur de rodage flexible. Afin de détecter au mieux l'effet de l'anisotropie de textures, les tailles de stries seront relativement élevées (proches des caractéristiques topographiques du rodage plateau) [118]. Les conditions d'expansion, les durées de rodage, le type de pierres sont identiques pour toutes les surfaces générées.

Afin de faire le comparatif avec les textures issues du rodage industriel, la machine de rodage flexible est utilisée en mode classique (à vitesse de rotation constante et vitesse de battement oscillatoire) afin de générer des textures HSH et PH conventionnelles. Les conditions de rodage de ces textures sont présentées dans la Table 5. 1.

Table 5. 1. Conditions de rodage des surfaces conventionnelles

Paramètres de rodage	Etape Ebauche	Etape finition	Etape plateau
Vitesse de rotation PH (tr/min)	196	196	196
Vitesse de rotation HSH (tr/min)	70	70	70
Vitesse de battement PH (m/min)	22	22	22
Vitesse de rotation battement (m/min)	38	38	38
Vitesse d'expansion (µm/s)	5	4	-
Pression de contact (N)	-	-	250
Nombre de pierres	8	8	8
Type de grains d'abrasifs	Diamant	Carbure de silicium	Carbure de silicium
Taille de grain (µm)	149	107	30
Type de liant	Metallique	Vitrifié	Vitrifié
Tailles des pierres abrasives (mm x mm x mm)	3x5x80	6x6x35	6x6x35

Concernant la génération de textures innovantes, la machine de rodage flexible est utilisée en mode de rodage innovant. A cet effet un programme ISO pour machines à commandes numériques (CNC) est utilisé. Il s'agit d'un rodage par interpolation qui consister à roder le fût grâce à l'interaction des axes de rotation et de battement qui sont nécessairement reliés entre eux. Dans le cas de textures rectilignes, une interpolation de type linéaire est utilisée. De plus, pour générer une texture assistée en trajectoire une loi de pilotage « d'asservissement hélicoïdal » est utilisée [93]. Les conditions de rodage innovant sont présentées dans la Table 5. 2.

Table 5. 2. Conditions de rodage des surfaces innovantes

Paramètres de rodage	Etape Ebauche	Etape finition	Etape plateau
Vitesse de coupe (m/min)	49	22	22
Vitesse d'expansion (µm/s)	5	4	-
Pression de contact (N)	-	-	250
Nombre de pierres	8	8	8
Type de grains d'abrasifs	Diamant	Carbure de silicium	Carbure de silicium
Taille de grain (µm)	149	107	30
Type de liant	Metallique	Vitrifié	Vitrifié
Tailles des pierres abrasives (mm x mm x mm)	3x5x80	6x6x35	6x6x35

Par la suite, les surfaces générées sont analysées par interférométrie pour en déterminer la topographie via les paramètres de rugosité tridimensionnels.

2.2 Analyse de la topographie

Les topographies des différentes surfaces rodées sont analysées par interférométrie, le long des éprouvettes, à différents points aux PMB, PM et PMH. Par la suite, les paramètres de rugosité surfacique issus de la norme ISO 25178-6, tels que Sa, Sk, Spk et Svk ont pu être déterminés. Les valeurs de rugosité surfacique pour chaque type d'anisotropie sont présentées dans la Figure 5. 5.

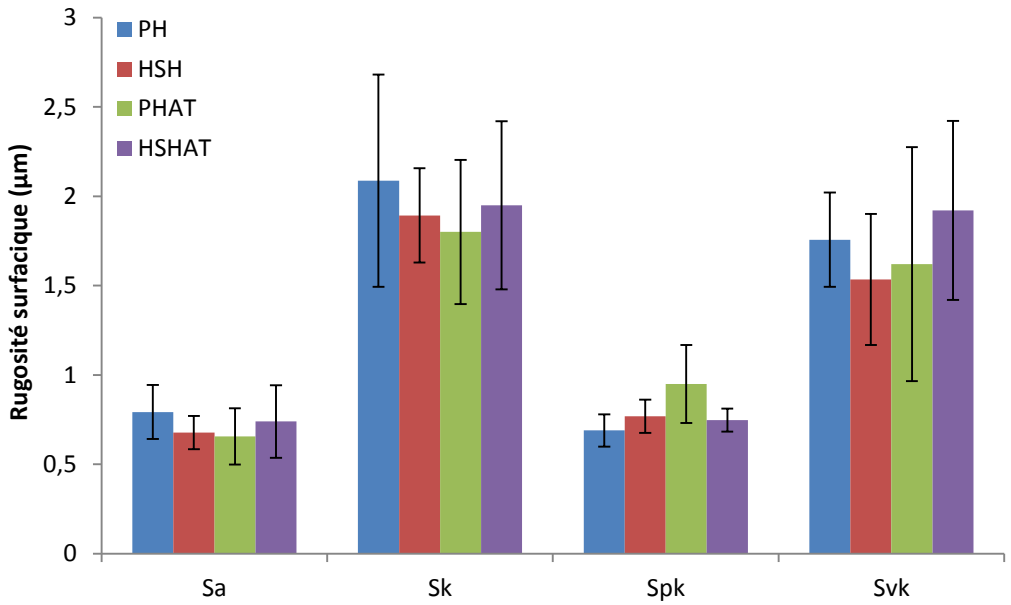


Figure 5. 5. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures classiques (HSH et PH) et issues du rodage assisté en trajectoire (HSHAT et PHAT).

Les valeurs moyennes de rugosité surfacique de Sa, Sk, Spk et Svk sont sensiblement similaires pour les différentes textures générées. De ceci, on peut considérer que les variations en frottement d'une texture à une autre seront majoritairement dues à l'anisotropie de surface. Le comportement en frottement de ces textures sera évalué par tribomètre.

2.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement

Une fois la topographie analysée, les textures aux différentes anisotropies sont testées sur le tribomètre linéaire à mouvement alternatif afin d'en déterminer le frottement sur toute la course du segment. Les vitesse et charges utilisées sont choisies de manière à se situer en régime mixte où l'effet de texturation est le mieux observé, comme illustré dans la Figure 5. 6 [13,77].

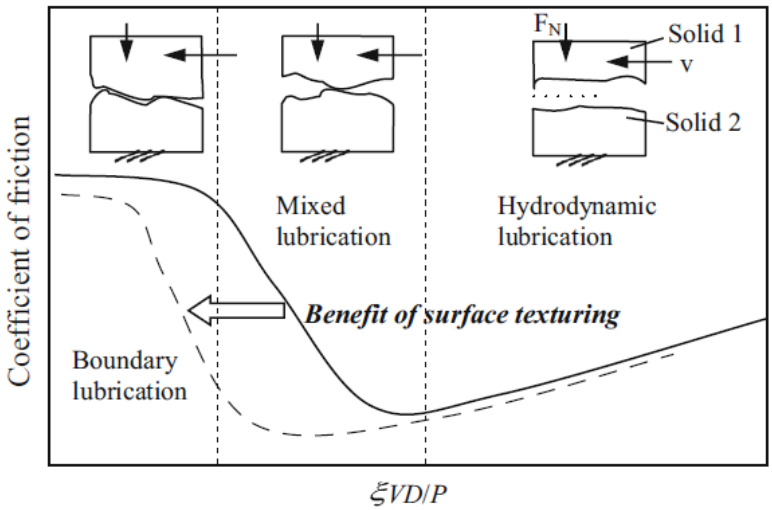


Figure 5. 6. Effet de texture (en pointillés) sur le frottement aux différents régimes de lubrification [13]

Ce régime est obtenu avec le tribomètre utilisé dans les conditions suivantes : la vitesse de rotation et la charge variant respectivement de 100 à 300 tr/min et de 40 à 120 N. Le type de lubrifiant utilisé est de type 10W40 avec une viscosité dynamique de 0,08 Pa.s à une température de 40°C. Les courbes de Stribeck moyennes à différentes conditions sur toute la course du segment sont comparées pour les différentes anisotropies de textures.

Afin d'évaluer les améliorations en frottement des textures optimisées en trajectoire par rapport à des textures conventionnelles, dans un premier temps, l'évolution des courbes de Stribeck des textures PH et HSH conventionnelles sera observée. Elles sont comparées dans la Figure 5. 7.

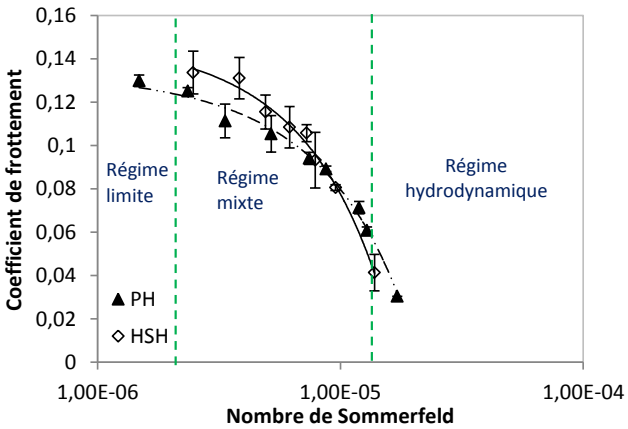


Figure 5. 7. Coefficient de frottement de textures conventionnelles en fonction du nombre de Sommerfeld

Cette figure montre d'une part, qu'une texture plateau à un angle de striation de 45° se comporte mieux en frottement pour de faibles valeurs de Sommerfeld (S), correspondant au régime limite. D'autre part, une texture de type HSH, à un angle de striation de 130°, confère de meilleures performances en frottement pour des valeurs de S plus élevées, en régime mixte à proximité du régime hydrodynamique. A noter que les conditions réelles de fonctionnement d'un moteur se situent majoritairement en régime hydrodynamique au niveau du PM avec une zone plus réduite en régime mixte et une zone très faible voire inexistante en régime limite. Ceci confère un intérêt fonctionnel plus important du HSH par rapport au PH dans des conditions réelles de fonctionnement moteur.

Ceci peut être expliqué par :

1) Des striations à 45° se rapprochant plus à des stries transversales au mouvement tandis que des vallées orientées à 130° sont plus proches des stries longitudinales. Ceci confirme les résultats obtenus par Costa et al. [88] où des stries transversales à la direction de glissement sont plus adaptées à des conditions où S est faible tandis que des stries longitudinales au glissement sont plus adaptées pour des valeurs de S supérieures. De ce fait, une striation mixte orientée à 45° aux PMB et PMH ainsi que de 130° au PM pourrait être intéressante.
2) La présence de stries non conformes, des stries d'inversion (Figure 5. 4) qui sont dues à la cinématique du rodage HSH (vitesse d'oscillation axiale plus élevée que pour du PH). Le régime de lubrification du contact segment-fût varie suivant la position du segment. En effet, suivant la vitesse de rotation, le régime de lubrification au PM, où la vitesse de translation du segment est maximale, est plutôt, suivant la vitesse de rotation du moteur, mixte ou hydrodynamique. En revanche aux PMH et PMB, où sont présentes les stries d'inversion, étant donné que la vitesse de translation s'annule pour changer de sens, le régime de lubrification est plutôt mixte ou limite. Par conséquent, la présence accrue de stries non conformes à bas régime peut être néfaste au frottement et augmenter les risques de grippage.

L'effet de textures avec suppression de stries d'inversion, comparativement aux textures issues du rodage industriel, sur le frottement est représenté sous forme de courbes de Stribeck dans la Figure 5. 8.

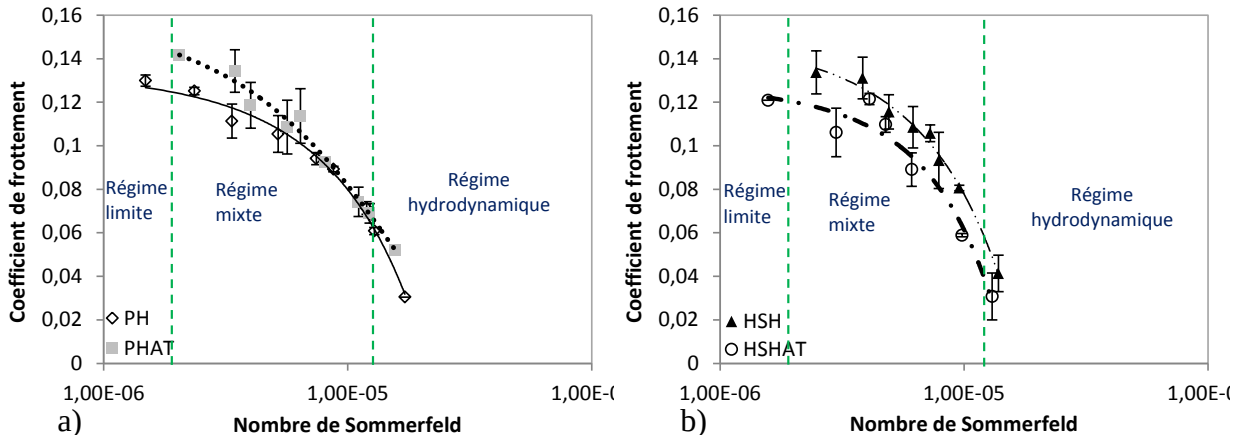


Figure 5. 8. Courbe de Stribeck de textures issues du rodage asservi en trajectoire, comparativement aux textures issues du rodage conventionnel : (a) pour le cas du rodage plateau, (b) rodage HSH

Cette courbe de Stribeck montre clairement une amélioration du frottement sur toute la plage de Sommerfeld étudiée du rodage HSH assisté en trajectoire par rapport aux textures issues du rodage conventionnel, plus particulièrement du HSH conventionnel.

On note tout de même une variation de cette amélioration suivant le régime de fonctionnement. A proximité du régime limite, elle est relativement importante par rapport au rodage HSH conventionnel. Cette amélioration diminue à l'approche du régime hydrodynamique.

La principale explication à cela est la suppression des stries d'inversion situées dans les zones à vitesse de glissement segment-fût réduite (par rapport au milieu du fût) qui permet une réduction significative du frottement. De plus, même pour des vitesses de glissement plus élevées, où S est relativement élevé, la différence en frottement est significative entre textures issues du rodage HSH assisté en trajectoire et celles issues du rodage HSH classique. Ce qui nous amène à dire que le rodage HSH assisté en trajectoire permet la génération d'une texture composée de stries à 130° plus homogène tout le long du fût, par rapport à une texture rodée par rodage HSH conventionnel.

En revanche, le rodage PH assisté en trajectoire ne donne aucune amélioration. Au contraire, le frottement est même dégradé pour de faibles valeurs de S, à l'approche du régime limite, où l'effet des zones proches de l'extrémité du fût est le plus important.

De manière générale, nous avons vu pour le cas du rodage HSH assisté en trajectoire, que la suppression des stries d'inversion était une solution d'amélioration fonctionnelle par rapport au rodage conventionnel. Cette amélioration est variable suivant le régime de fonctionnement, qui dépend de S. Une autre alternative serait d'adapter l'anisotropie en fonction de la position du fût où la vitesse du segment varie et par conséquent le régime de lubrification.

3 Texture de surface à anisotropie variable

Des textures mixtes faisant varier l'angle à chaque position du cylindre présentent une solution adaptative aux changements des conditions de contact induisant le passage d'un régime hydrodynamique au PM à un régime mixte aux PMB et PMH. Pour cela, différentes textures mixtes ont été générées par machine de rodage flexible pour comparer leurs performances fonctionnelles par rapport à celles obtenues par rodage classique.

3.1 Conditions de rodage

Deux types de texturations mixtes suivant la position du fût sont rodées via le démonstrateur de rodage flexible :

- à 45° au PM et 130° aux PMB et PMH (textures de type 130-45-130) ;
- à 130° au PMB et 45° aux PMB et PMH (textures de type 45-130-45).

La cinématique de rodage de ces textures est représentée dans la Figure 5. 9.

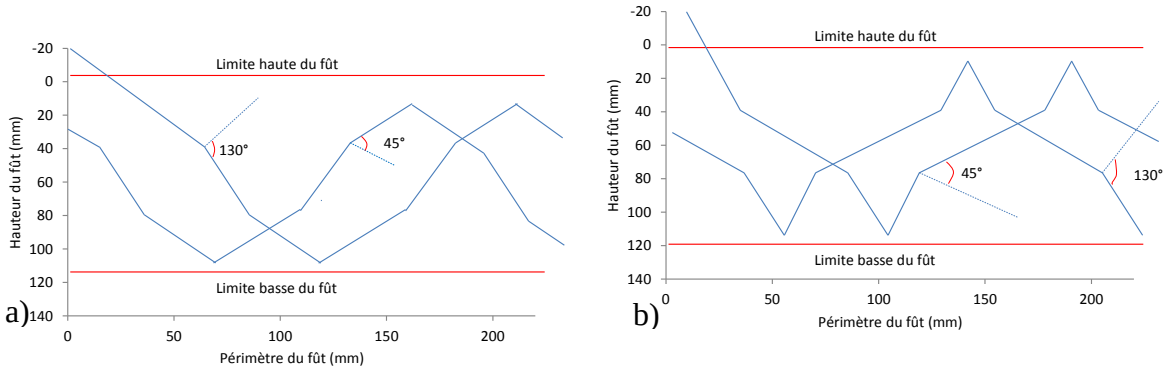


Figure 5. 9. Cinématique de génération des textures mixtes de type (a) 45-130-45 et (b) 130-45-130

Concernant les aires rodées par zone, 25% de la longueur du fût est texturée à orientation donnée au PMB, 50% au PM et 25% au PMH (Figure 5. 10). Les détails des conditions de rodage sont documentés dans la Table 5. 2 dans la section 2.1 du présent chapitre. Comme

pour le cas des textures assistées en trajectoire, une interpolation linéaire est utilisée pour la cinématique de rodage.

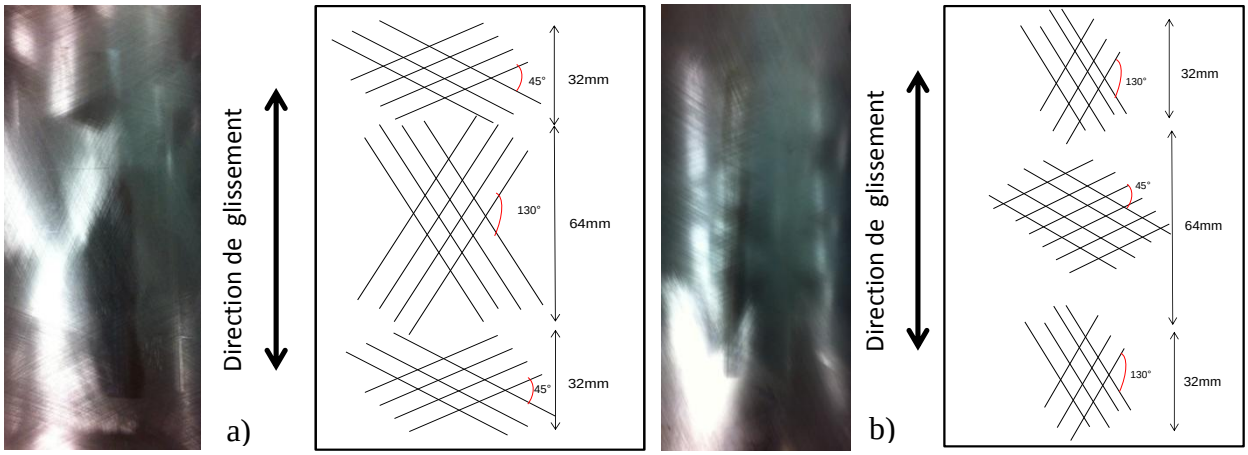


Figure 5. 10. Représentation et photographie des textures mixtes (a) 45-130-45 et (b) 130-45-130

3.2 Analyse de la topographie

Les valeurs de rugosité surfacique (Sa, Sk, Spk et Svk) pour les textures à anisotropie adaptative comparativement aux textures conventionnelles sont présentées dans la Figure 5. 11.

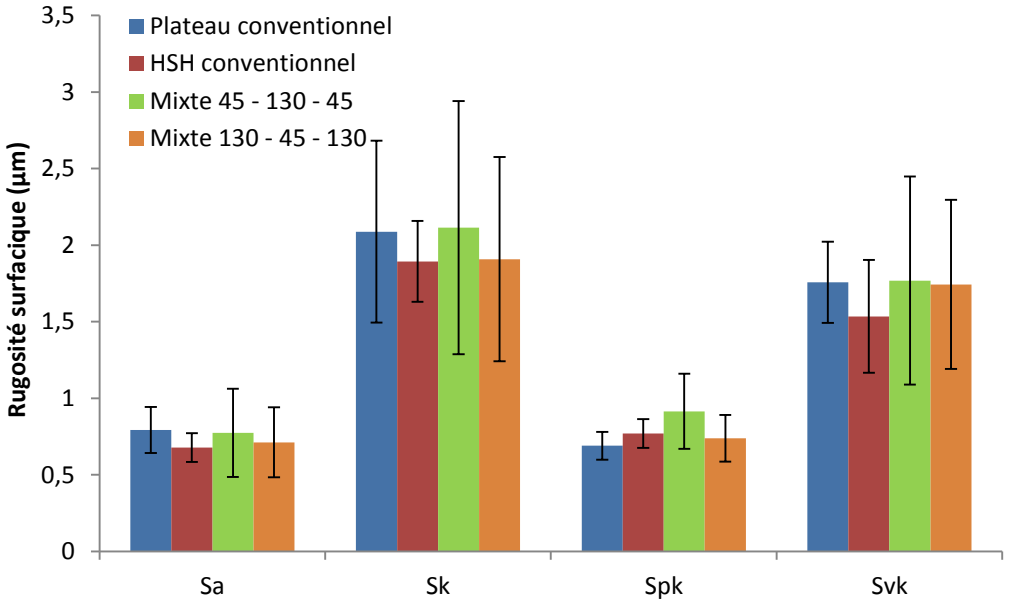


Figure 5. 11. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures mixtes de types 130-45-130 et 45-130-45 comparativement à celles générées par rodages conventionnels

Les valeurs moyennes (à différente positions du fût) des rugosités surfaciques sont sensiblement similaires pour les textures différentes générées. On peut considérer donc que les variations en frottement d'une texture à une autre seront dues à l'anisotropie de surface. Le comportement en frottement de ces textures sera également évalué par des essais de frottement sur tribomètre.

3.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement

Le comportement en frottement obtenu par tribomètre des textures mixtes par rapport aux textures conventionnelles est présenté sous forme de courbes de Stribeck dans la Figure 5. 12 pour des vitesses de glissement de 0,3 à 0,9 m/s et des charges normales de 40 à 100 N. Les conditions d'essais tribométriques sont décrites dans la Section 2.3.

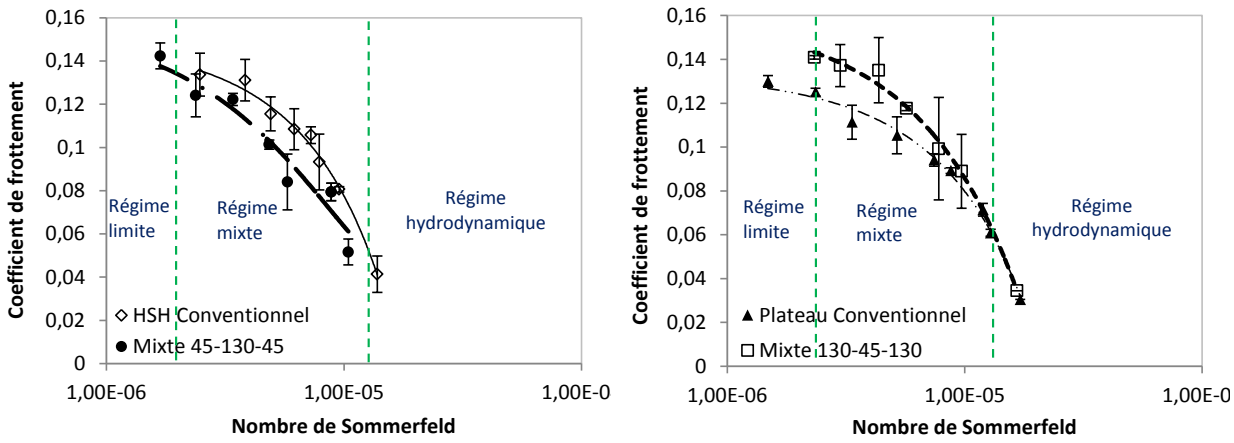


Figure 5. 12. Coefficient de frottement en fonction du nombre de Sommerfeld d'une (a) texture mixte 45-130-45 comparativement à une texture HSH et (b) mixte 130-45-130 comparativement à une texture PH

Ces courbes montrent d'une part que les textures de type 45-130-45 permettent d'améliorer le frottement par rapport aux textures HSH conventionnelles principalement en régime mixte. Cette amélioration est réduite autour du régime hydrodynamique et du régime limite. Autrement dit une texture HSH au PM composée de motifs orientés à 45° aux PMB et PMH, permet la réduction en frottement dans quasiment toute la plage de régime mixte. En revanche, pour le cas d'une texture 130-45-130, les performances sont dégradées en régime mixte à proximité du régime limite par rapport à une texture PH. Elles sont identiques en régime mixte à proximité du régime hydrodynamique. Il n'y a donc aucun intérêt fonctionnel à introduire une anisotropie de 130° aux PMB et PMH pour une texture PH au PM.

Ces résultats montrent un intérêt fonctionnel conséquent de textures de type 45-130-45 Néanmoins, ce type de texturation est perfectible avec un réajustement de la longueur des zones de fonctionnement à texturer de façon à améliorer le frottement à tous les régimes de lubrification. Un autre point d'amélioration des textures mixtes est la zone de transition 45-130° (zone où les striations à 130 et 45° se croisent, Figure 5. 13) qui peut être ajustée par l'utilisation de pierres abrasives de taille différente.

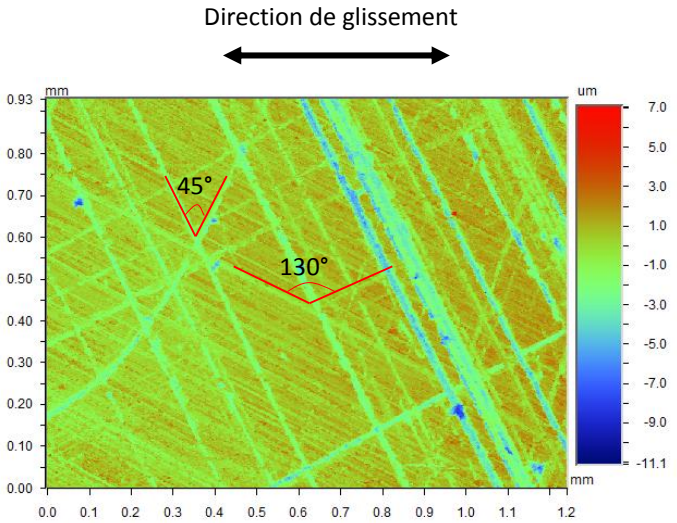


Figure 5. 13. Zone de transition 45-130° au niveau du PMB pour une texture mixte 130-45-130

Enfin, l'anisotropie adaptative est une solution d'amélioration au niveau fonctionnel des textures rectilignes. Il serait également intéressant d'étudier des textures de type curvilignes comme notamment des textures circulaire et ondulatoires.

4 Textures de surface à striation curviligne

Dans la littérature, des cavités de type circulaire ou elliptiques présentent des performances intéressantes en termes de frottement ou lubrification [52,119]. Même si dans la plupart des études, il s'agit de cavités creuses, il serait intéressant d'évaluer les performances de tels motifs anisotropes sous forme de stries fines. Il serait donc pertinent de tester cette famille de textures expérimentalement à différents points de fonctionnement. Ainsi, dans cette partie nous comparons les performances en frottement entre textures sous forme de cercles et ellipses.

4.1 Conditions de rodage

Les texturations de types circulaires sont générées via la machine de rodage flexible par une succession d'arcs de cercles (avec les fonctions d'interpolation circulaire de la machine de rodage flexible) tangents de rayons de courbure identiques (Figure 5. 14). Le rayon de courbure dans notre étude est égal 7,25 mm. Les détails des conditions de rodage sont documentés dans la Table 5. 2 dans la section 2.1 du présent chapitre

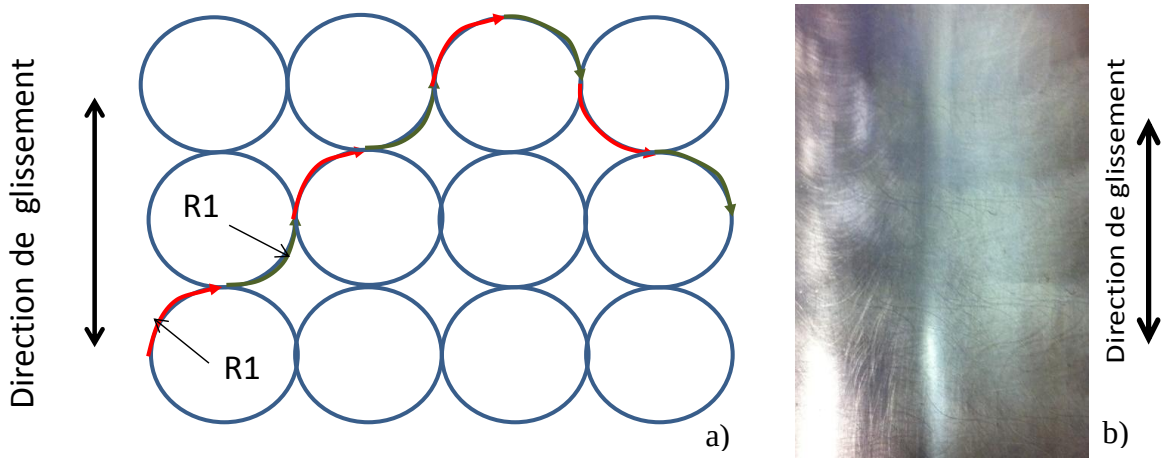


Figure 5. 14. (a) Schéma de génération de textures en cercles et (b) photographie d'une texture composée de cercles

Les textures de type elliptiques sont générées par une succession d'arcs de cercles tangents de rayons de courbure R1 et R2 différents (Figure 5. 15.(a)). Dans cette étude, R1=11,2 mm tandis que R2=22,4 mm, ce qui donne une ellipse de demi-grand axe a=16,2 mm et de demi-petit axe b=11,66 mm. La texture obtenue présente beaucoup plus des stries orientée transversalement au sens de glissement segment-fût qu'une texture par cercles (Figure 5. 15.(b)). Les détails concernant la dynamique de génération de ce type de textures sont disponibles dans [5, 6]. Les conditions de rodage, comme pour le cas de toutes les autres texturations, sont présentées dans la Table 5. 2 de la Section 2.1.

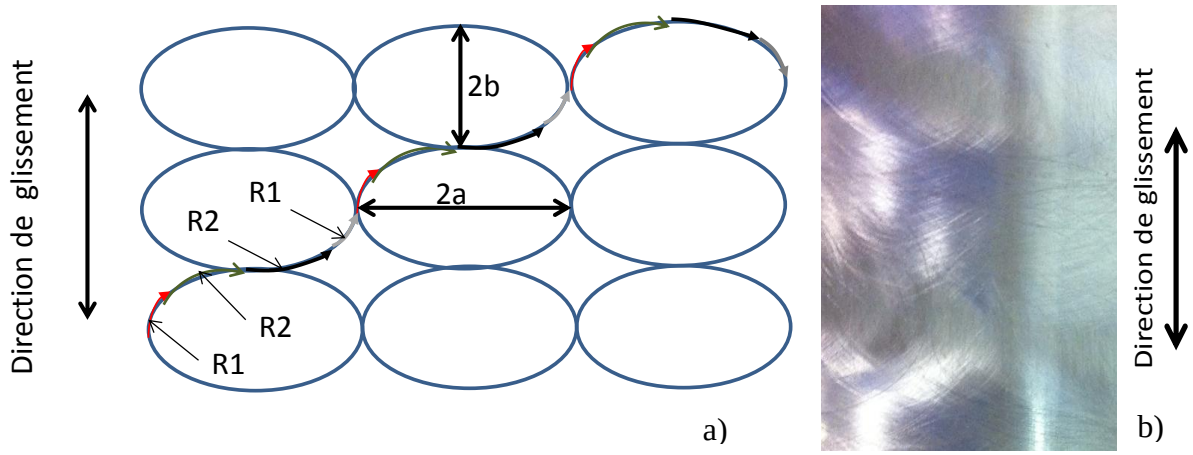


Figure 5. 15. (a) Schéma de génération de textures en ellipses et (b) photographie d'une texture composée d'ellipses

4.2 Analyse de la topographie

Les valeurs de rugosité surfacique (Sa, Sk, Spk et Svk) pour les textures de type circulaires et elliptiques comparativement à une texture HSH conventionnelle (dont les performances en frottement sont meilleures que pour le rodage PH aux conditions réelles de fonctionnement moteur) sont présentées dans la Figure 5. 16.

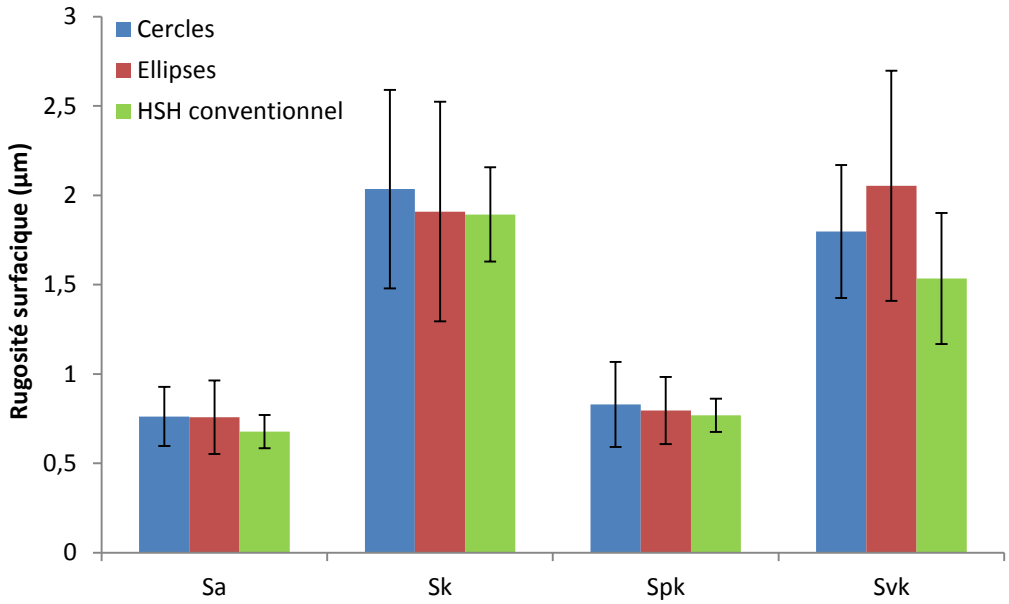


Figure 5. 16. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures de types circulaires et elliptiques comparativement à celles générées par rodage HSH

Les valeurs moyennes (à différente positions du fût) des rugosités surfaciques sont sensiblement similaires pour les textures différentes générées. De ceci, on peut considérer que les variations en frottement d'une texture à une autre seront majoritairement dues à

l'anisotropie de surface. Le comportement en frottement de ces textures sera également évalué par essais de frottement sur tribomètre.

4.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement

Les performances en frottement des textures circulaires et elliptiques sont présentées sous forme de courbes de Stribeck dans la Figure 5. 17. pour des vitesses de glissement variant de 0,3 à 0,9 m/s et pour des charges de 40 à 100 N. Les conditions d'essais de frottement sont détaillées dans la Section 2.3.

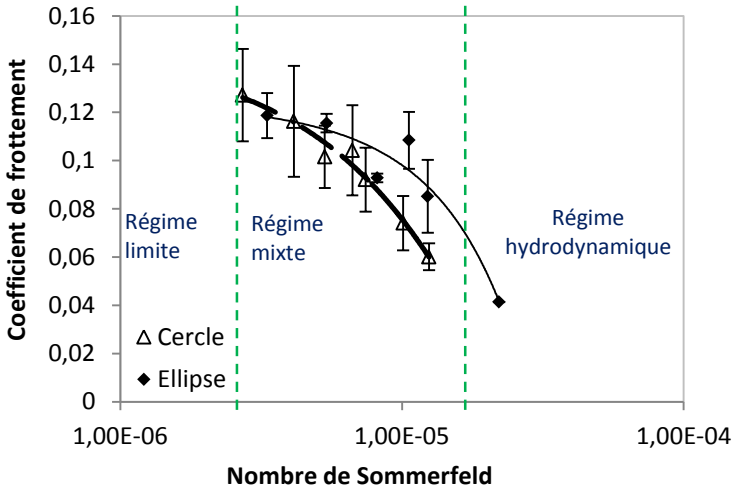


Figure 5. 17. Courbes de Stribeck de textures circulaires et elliptiques

Ces courbes montrent clairement que les textures circulaires sont plus performantes en frottement, par rapport aux textures en ellipses (de grand axe transversal au mouvement), sur quasiment toute la plage de Stribeck, hormis pour de très faibles de valeurs du nombre de Sommerfeld à proximité du régime limite. Cela s'explique par le fait qu'une texture sous forme d'ellipses aplaties perpendiculairement au glissement présente majoritairement des stries de faible inclinaison (quasiment horizontales) qui, d'après l'étude de Yuan et al. [70] pour le cas de stries horizontales, sont performantes en frottement en régime limite mais défaillantes à l'approche du régime hydrodynamique.

Les performances fonctionnelles en frottement de ces textures sont comparées à celles d'une texture HSH conventionnelle en Figure 5. 18, sous forme de courbes de Stribeck. Ces dernières montrent d'une part qu'hormis pour le cas du régime limite, les textures en ellipses orientées perpendiculairement au mouvement dégradent le frottement par rapport à une

texture HSH. D'autre part, pour le cas des textures en cercles, l'évolution en frottement est quasiment similaire à une texture HSH conventionnelle.

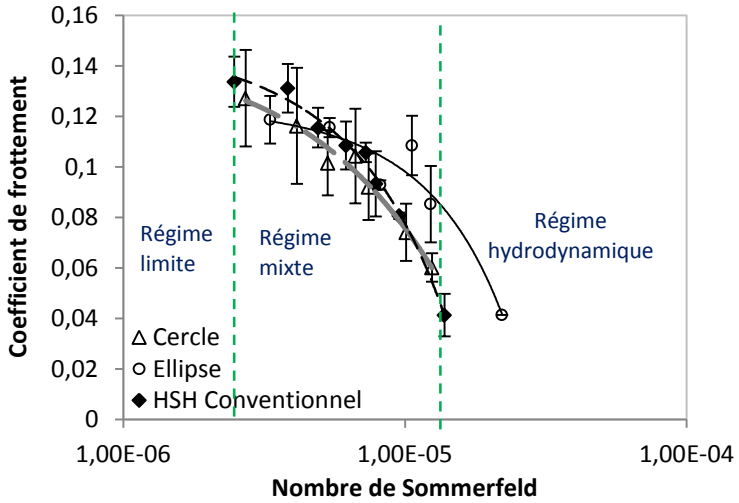


Figure 5. 18. Courbes de Stribeck des textures en cercles et ellipses comparativement à une texture HSH conventionnelle

En résumé, peu d'améliorations en frottement ont été notées pour le cas de textures circulaires et elliptiques. Néanmoins, il est possible d'optimiser la taille des cercles et ellipses en relation avec les performances en frottement. Pour le cas des textures en ellipses, la génération de formes plus longitudinales suivant la direction du glissement pourrait améliorer le frottement par l'amélioration des conditions de glissement. Pour cela, il suffit d'utiliser un rayon de courbure R2 (dans le sens longitudinal) plus élevé le rayon de courbure R1 (dans le sens perpendiculaire au glissement).

5 Textures de surfaces à striations ondulatoires

Avec les fonctions d'interpolation circulaire de la machine de rodage, il est également possible de générer des textures ondulatoires proches des sinusoïdes, dont les performances fonctionnelles ont été montrées notamment à travers des études numériques en termes de réduction de l'épaisseur de film d'huile et d'augmentation de la portance hydrodynamique [87,90]. Dans le cadre de notre étude, deux texturations ondulatoires sont proposées, à savoir les « ondulations parallèles » et les « ondulations alternées ».

5.1 Conditions de rodage

Les textures à ondulations parallèles sont générées par une succession d'arcs de cercles tangents de façon synchronisée d'une position périphérique à une autre (Figure 5. 19). Ici, les ondulations ont une amplitude de 3 mm et une période de 40 mm. Les informations concernant la dynamique de génération de ce type de texture sont détaillées dans [93]. Les détails des conditions de rodage sont documentés dans la Table 5. 2 dans la section 2.1 du présent chapitre.

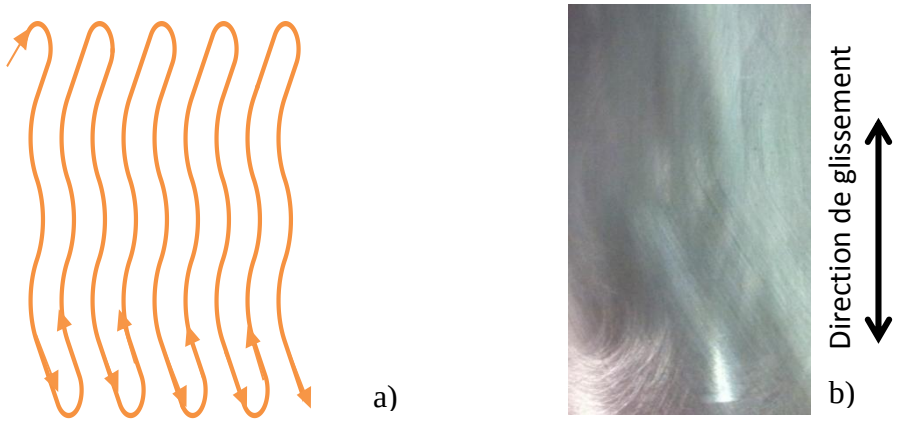


Figure 5. 19. (a) Schéma de génération de textures sous formes d'ondulations parallèles [93] et (b) photographie de la texture obtenue

Concernant les textures à ondulations alternées, ces dernières sont générées par une succession d'arcs de cercles tangents de façon alternée d'une position périphérique à une autre (Figure 5. 20). Cela permet d'obtenir des ondulations tangentes/voire croisées les unes des autres. Ici les ondulations ont une amplitude de 5 mm et une période de 40 mm. Les informations concernant la dynamique de génération de ce type de texture sont détaillées dans [93]. Les détails des conditions de rodage sont documentés dans la Table 5. 2 dans la section 2.1 du présent chapitre.

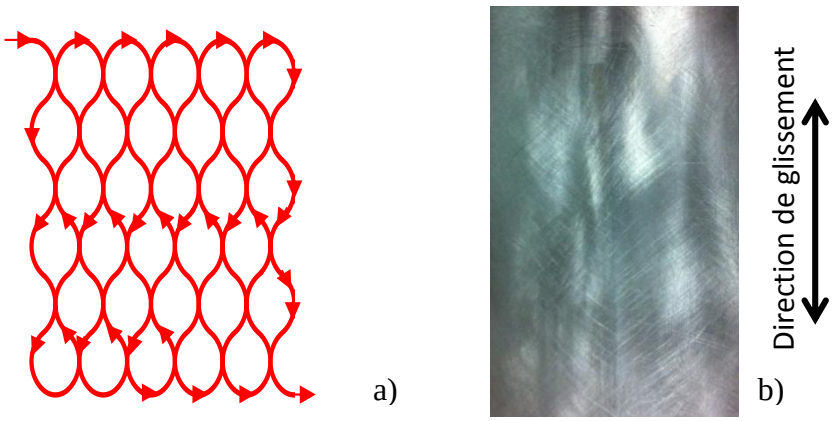


Figure 5. 20. (a) Schéma de génération de textures sous formes d'ondulations alternées [93] et (b) photographie de la texture obtenue

5.2 Analyse de la topographie

Les valeurs de rugosité surfacique (Sa, Sk, Spk et Svk) pour les textures de type ondulatoires comparativement à une texture HSH conventionnelle (dont les performances en frottement sont meilleures que pour le rodage PH aux conditions réelles de fonctionnement moteur) sont présentées dans la Figure 5. 21.

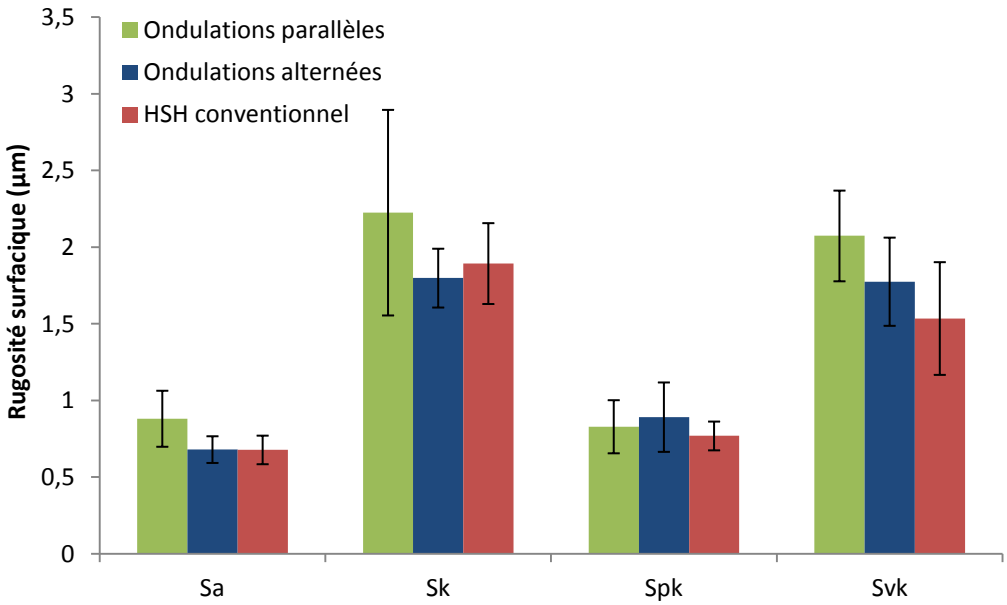


Figure 5. 21. Paramètres de rugosité surfacique pour les textures à ondulations alternée et parallèles comparativement à celles générées par rodage HSH

Les valeurs moyennes (à différente positions du fût) des rugosités surfaciques sont sensiblement similaires pour les textures différentes générées. De ceci, on peut considérer que les variations en frottement d'une texture à une autre seront dues à l'anisotropie de surface. Le comportement en frottement de ces textures sera également évalué par tribomètre.

5.3 Analyse des performances fonctionnelles en frottement

Les courbes de Stribeck associées aux textures composées d'ondulations parallèles et alternées sont représentées dans la Figure 5. 22 pour des vitesses de glissement variant de 0,3 à 0,9 m/s et des charges normales de 40 à 100 N. Les détails des conditions d'essais de frottement sont documentés dans la Section 2.3.

L'évolution des courbes de Stribeck montre clairement que les ondulations alternées sont plus performantes en termes de frottement que les ondulations parallèles dans la plage de Sommerfeld étudiée. Ceci s'explique par le fait que l'intersection de stries est favorable à une meilleure circulation de l'huile.

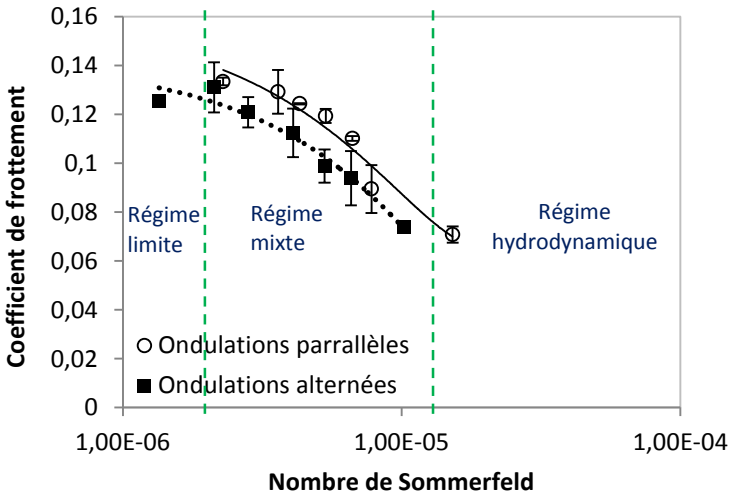


Figure 5. 22. Courbes de Stribeck des différentes textures de type ondulation

Les performances fonctionnelles en frottement de ces textures sont comparées à celles d'une texture HSH conventionnelle en Figure 5. 23, sous forme de courbes de Stribeck.

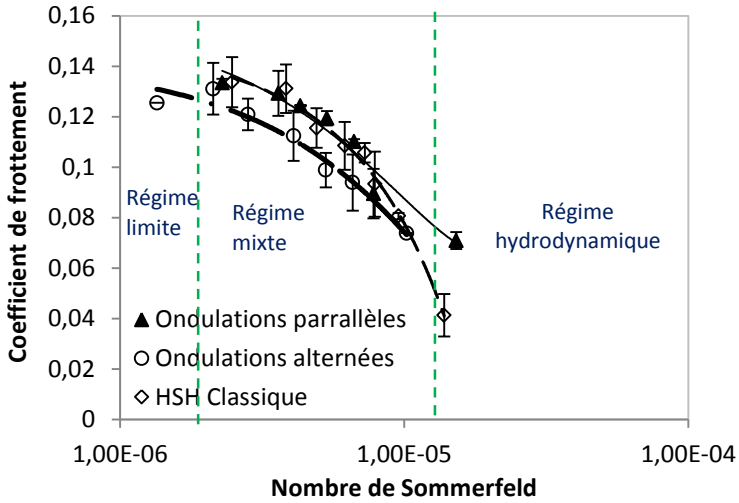


Figure 5. 23. Courbes de Stribeck des différentes textures de type ondulation comparativement aux textures conventionnelles

Ces courbes montrent d'une part, que les textures à ondulations synchronisées (parallèles) dégradent le frottement par rapport à une texture HSH conventionnelle sous forme de stries croisées. Ceci confirme l'importance d'un croisement de stries pointant dans le sens de mouvement au niveau fonctionnel. Ceci a été démontré dans [12,88] et plus particulièrement par Mezghani et al [54] pour la cas de surfaces rodées, concernant l'amélioration des conditions de lubrification de textures avec intersection de stries par rapport à des stries parallèles. D'autre part, pour le cas des ondulations alternées, une légère amélioration en frottement est constatée régime mixte et limite par rapport à une texture HSH conventionnelle. Toutefois, ces textures peuvent être optimisées en faisant varier l'amplitude et/ou la période des ondulations.

6 Comparatif des gains en frottement des différentes textures

Afin d'avoir une vision globale et quantitative sur le comportement en frottement de l'ensemble des texturations étudiée, il est intéressant de les comparer pour un nombre de Sommerfeld très représentatif du contact Segment-fut en fonctionnement moteur. Un nombre S=5.0x10-5 a été choisi, puisqu'il représente la zone à proximité de la fin du régime de lubrification mixte. Etant donné les vitesses élevées en fonctionnement moteur (autour de 2500 tr/min), où la majeure partie de la course du segment est en régime hydrodynamique hormis les zones à proximités des extrémités du fût, l'utilisation d'un nombre S proche de la transition des régimes mixte et hydrodynamique est intéressante.

Le gain en frottement de l'ensemble des textures étudiées par rapport à une texture HSH conventionnelle pour ce nombre de Sommerfeld est présenté dans la Figure 5. 24.

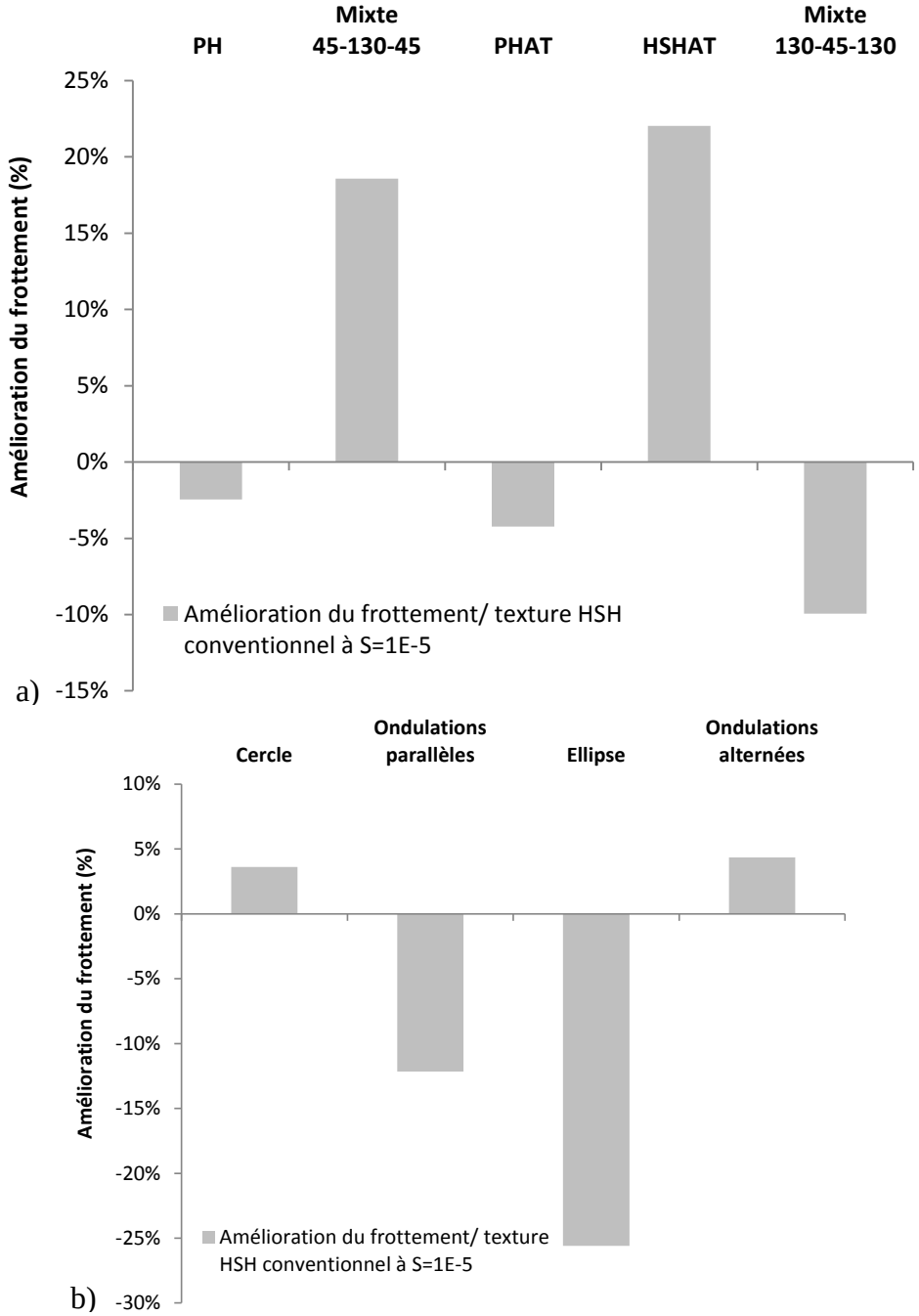


Figure 5. 24. Amélioration du frottement (a) des textures rectilignes et (b) curvilignes par rapport à une texturation de type HSH conventionnel à $S=5.0x10^{-5}$

Cela montre que les textures HSH assistées en trajectoire et mixte 45-130-45, dans ces conditions de fonctionnement, sont clairement les plus intéressantes en termes de frottement, avec une amélioration du frottement par rapport aux textures conventionnelles (HSH) autour de 20 %. Elles sont suivies de textures de type ondulation alternée (ou croisées) et cercle qui

sont légèrement plus performantes que les textures classiques (amélioration autour de 5%). En revanche, pour les textures mixtes 130-45-130, les ondulations synchronisées (ou parallèles) ainsi que les ellipses, une dégradation du coefficient de frottement est observée par rapport aux textures conventionnelles. Elle peut aller jusqu'à 25% pour le cas des ellipses aplaties dans le sens transversal au mouvement. Les raisons de l'augmentation du frottement sont dues à une présence majoritaire de stries dont l'orientation est inadaptée au régime de fonctionnement (cas des ellipses ou mixte 45-130-45) ou encore l'absence de zones croisement de stries favorables à une meilleure circulation du lubrifiant (cas des ondulations parallèles).

7 Conclusions

Cette étude a permis de tester des textures intéressantes pouvant améliorer le frottement par rapport aux textures issues des procédés de rodage conventionnels (PH et HSH).

En premier lieu, les textures générées par rodage HSH assisté en trajectoire–rendu possible grâce au procédé de rodage flexible– permettent une réduction significative du frottement par l'élimination des stries d'inversion. Ceci présente un fort potentiel pour une nouvelle avancée technologique et industrielle à l'instar de celle obtenue par rodage plateau auparavant en vue de la réduction du frottement dans le compartiment SPC. De plus, le procédé est directement industrialisable, puisqu'aucune optimisation n'est requise.

En second lieu, des textures mixtes de type 45-130-45 présentent des performances en frottement comparables à celles issues du HSHAT. Elles présentent des caractéristiques texturales optimisables au niveau process. D'une part, le frottement à bas régime et au niveau des points d'inversion peut être amélioré par l'augmentation des aires rodées à 45°. D'autre part, la contribution en frottement des deux zones de transition des stries à 45 et 130° doit être étudiée. Ceci permettra un réajustement de ces zones par l'utilisation de pierres de rodage de taille plus adéquate.

Enfin, d'autres textures curvilignes comme des cercles ou des ondulations alternées réduisent légèrement le frottement par une circulation satisfaisante du lubrifiant. Ces textures sont également optimisables avec la génération de textures plus allongées dans le sens de glissement. A titre d'exemple, l'amélioration significative en frottement d'une texture

circulaire (qui peut être présentée comme une ellipse avec des grands axes et petits axes égaux (a=b)), par rapport à une texture de type elliptique aplatie par rapport au sens de glissement (avec a>b) justifie cette piste de recherche. Il serait donc intéressant de tester des ellipses allongées par rapport au sens de glissement.

Conclusion générale

Les travaux de recherche décris dans le présent mémoire, sont focalisés sur deux principaux axes:

- un axe relatif à la compréhension et à l'optimisation des procédés de rodage industriels (PH, HSH et SH) en vue de définir les caractéristiques topographiques et texturales améliorant les performances fonctionnelles dans l'interface segment-chemise (SC) ;
- un axe traitant des anisotropies originales de rodage générées par une cinématique innovante au moyen d'un démonstrateur technologique de rodage flexible. Le but étant de déterminer une texture en rupture technologique en termes de bas frottement par rapport à des surfaces issues du rodage industriel.

L'étude de l'état de l'art a permis d'introduire la démarche scientifique de notre étude qui consiste à lier de façon robuste le tryptique Procédé/Surface/Fonctionnalité par le couplage de la caractérisation de surface avec la qualification fonctionnelle dans le système SC. Pour la caractérisation de surface, l'insuffisance des méthodes normalisées utilisées dans l'industrie en termes de lien process-produit a été mise en évidence. Pour la qualification fonctionnelle, il ressort que l'approche déterministe, qui prend en compte la topographie réelle mesurée de surface, est la plus intéressante pour évaluer le contact SC comparativement l'approche stochastique (basée sur l'utilisation de coefficients pondérateurs représentant l'effet de la rugosité) qui, malgré son utilisation répandue, n'est pas tout à fait adaptée aux caractéristiques texturales (caractère multiéchelle, anisotropie et morphologie) propres aux textures rodées.

Par la suite, une méthodologie expérimentale en phase avec la démarche scientifique a été proposée. Elle consiste à étudier le lien process-produit des surfaces issues du rodage industriel d'un part, et des surfaces à anisotropie innovante, d'autre part. Des moyens process (machine industrielle, démonstrateur technologique de rodage flexible), de caractérisation de surface aux différentes échelles ainsi que des moyens de qualification du contact SC (modèle de contact déterministe et tribomètre) ont été utilisés. Ces différents moyens et méthodes ont été validés expérimentalement. De plus, un choix adéquat des techniques de caractérisation de surfaces rodées a été réalisé en fonction de leur capacité à corréler le procédé aux performances fonctionnelles. Pour ces raisons mais aussi pour leurs abilités respectives à

caractériser l'anisotropie de surfaces rodées, la morphologie plateau-vallée et l'effet d'échelles, la caractérisation tridimensionnelle (3D) normalisée, l'approche morphologique ainsi que la décomposition multiéchelle sont préférées aux méthodes 2D normalisées.

Dans un premier temps, cette démarche expérimentale est appliquée aux procédés industriels (rodage plateau (PH), rodage hélico-glissant (HSH) et rodage glissant (SH)). Tout d'abord, l'étude a porté sur l'influence des caractéristiques process et texturales lors de l'étape de rodage finition (seconde étape de rodage) sur le frottement SC. Cela a permis de montrer que des stries fines et peu profondes obtenues avec de faibles vitesse d'expansion et taille de grains contribuent à la réduction du frottement SC. Notons tout de même une contribution supérieure de la largeur (par rapport à la profondeur) de stries sur les performances en frottement. Par la suite, l'étude s'est principalement focalisée aux caractéristiques texturales générée lors de l'étape de superfinition (troisième étape de rodage). D'une part, l'étude comparative du PH et SH a permis de mettre en évidence deux mécanismes de finition de surface lors de l'étape de rodage plateau à savoir l'écrêtage et le lissage de surface. Les phénomènes physiques en jeu de ces deux mécanismes ont pu être mis en évidence par une analyse de l'énergie spécifique. L'écrêtage, qui consiste à écrêter les pics de rugosité et par conséquent de réduire la composante plateau sans affecter les vallées se caractérise principalement par de la coupe. En revanche, le lissage, qui consiste à réduire la rugosité globale (plateau et vallées), se caractérise par de la coupe accompagnée par de la déformation plastique. Cette étude permis de montrer qu'une surface « plateau » composée de plateau fins et de vallées relativement profondes (suite à l'écrêtage des plateaux), contrairement à ce qui est communément admis, n'est pas forcément la plus performante au niveau frottement SC. Une surface fine avec des plateaux et vallées de faibles amplitudes et échelles de rugosité permettrait d'obtenir de meilleurs résultats en frottement. D'autre part, d'autres études (sur le rodage PH et HSH entre autres) ont mis en évidence l'effet couplé de l'anisotropie avec les caractéristiques topographiques sur le frottement SC. Un premier résultat montre une influence négligeable de l'écrêtage de surfaces à anisotropie HSH (stries orientées à 130°) par rapport à des surfaces à anisotropie PH (stries orientées à 50°). Ceci suggère une suppression de l'étape de superfinition lors du procédé de rodage HSH. D'autres résultats concernent la faible sensibilité du frottement SC à la rugosité (amplitude moyenne de rugosité, largeur et profondeur de stries) des surfaces HSH comparativement aux surfaces PH.

Dans un second temps, l'application de la démarche expérimentale aux procédés innovants a permis d'identifier des anisotropies améliorant le frottement par rapport aux textures issues du rodage industriel. Deux types de texturations permettent une réduction du frottement significative par rapport aux textures conventionnelles (en particulier les textures HSH) : il s'agit d'une part, des textures HSH Amélioré en Trajectoire (HSHAT) rendu possible avec la machine de rodage flexible avec l'absence de stries d'inversion non conformes observées par rodage conventionnel et d'autre part de textures mixte 45-130-45, composées de stries croisées à 45° aux point mort haut (PMH) et point mort bas (PMB) ainsi que de stries à 130° au point milieu (PM). D'autres textures de type curviligne présentent de légères améliorations en frottement telles que les cercles et les ondulations alternées. De manières générale, au niveau anisotropie et cinématique de rodage, les textures curviligne et mixtes restent optimisables contrairement aux textures HSHAT où aucune amélioration n'est requise à ce niveau.

Ces travaux de thèse ont permis d'obtenir des solutions de rodage intéressantes permettant la réduction du frottement dans le système SC mais sont également ouverts à de nouvelles perspectives de recherche. Au niveau des caractéristiques topographiques des textures issues du rodage industriel, où les résultats en frottement ont été obtenus par modélisation numérique, plusieurs résultats restent à prouver expérimentalement. On peut citer la non nécessité d'une surface à morphologie « plateau » pour la réduction du frottement SC ou encore la suppression de l'étape finale de rodage HSH sans altérer les performances fonctionnelles. Une étude en cours va dans ce sens où des surfaces PH et HSH sont rodées à différentes durées de rodage dont les performances en frottement et en usure (traduisant la durabilité) sont évaluées par tribomètre. Par rapport au rodage innovant, des textures mixtes 45-130-45 restent optimisables notamment en ce qui concerne leurs performances en frottement pour des conditions de lubrification proches du régime limite, avec une augmentation de zones de texturation à 45° au niveau des PMB et PMH et un réajustement de la zone de chevauchement des texturation à 45-130° avec un choix adéquat de la longueur des pierres de rodage. Pour cela, l'influence (négative ou positive) sur le frottement dans ces zones de chevauchement par rapport à des textures homogènes de 45° et 130° doit être étudiée via le modèle déterministe de contact SC. Pour le cas de textures curvilignes, des améliorations d'orientations peuvent être effectuées en vue de réduire le frottement en régime mixte et hydrodynamique. Ceci peut se faire, en particulier pour le cas de textures circulaires,

par la génération d'ellipses allongées longitudinalement. Par ailleurs, pour obtenir une surface « idéale » au niveau fonctionnel via un procédé économe énergétiquement, il est important de coupler les caractéristiques topographiques et texturales optimales par rodage industriel aux textures innovantes à frottement réduit. Il s'agit de surfaces à faibles échelles de rugosité, de rugosité fine, avec des vallées fines (faible largeur et profondeur) mais non nécessairement de type « plateau stratifié » (faible amplitude des plateaux par rapport à celle des vallées). Enfin, une partie des résultats obtenus au cours de cette thèse sont potentiellement transférables aux autres procédés de finition par abrasion comme la superfinition par toilage de paliers avec une thèse en cours de réalisation par K. Serpin intitulée « Texturations antifriction des portées cylindriques de pièces mobiles ».

Références bibliographiques

[1] Whitehouse D J 1978 Surfaces — a link between manufacture and function *Arch. Proc. Inst. Mech. Eng. 1847-1982 (vols 1-196)* **192** 179–88

[2] Taylor C M 1998 Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability *Wear* **221** 1–8

[3] Bhatt D V, Bulsara M A and Mistry K N 2009 Prediction of Oil Film Thickness in Piston Ring - Cylinder Assembly in an I C Engine : A Review **II** 3–6

[4] Malik M A, Usman A L I and Qasim S A 2010 Modeling of Piston Top Ring Lubrication by considering Cylinder Out-of-Roundness in Initial Engine Start up *Proceedings of the World Congress on Engineering Vol II* vol II (London, U.K.) pp 1331–6

[5] Stout K J and Spedding T A 1982 The Characterization of internal combustion engine bores *Wear* **83** 311–26

[6] Pawlus P 1994 A study on the functional properties of honed cylinders surface during running-in *Wear* **176** 247–54

[7] Pawlus P, Cieslak T and Mathia T 2009 The study of cylinder liner plateau honing process *J. Mater. Process. Technol.* **209** 6078–86

[8] Schmid J, Hoen T and Stumpf W 2009 Less Wear and Oil Consumption through Helical Slide Honing of Engines by Deutz **70** 46–51

[9] Haasis G and Weigmann U-P 1999 New Honing Technique Reduces Oil Consumption *IDR. Ind. Diam. Rev.* **59** 582:1–5

[10] Braun D, Greiner C, Schneider J and Gumbsch P 2014 Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication *Tribol. Int.* **77** 142–7

[11] Gehring 2014 Laser Honing *http://www.gehring.de/en/technology/laser-honing/* 1

[12] Pettersson U and Jacobson S 2007 Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors *Tribol. Int.* **40** 355–9

[13] Suh M, Chae Y, Kim S, Hinoki T and Kohyama A 2010 Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction *Tribiology Int.* **43** 1508–17

[14] Bobzin K, Ernst F, Zwick J, Schlaefer T, Cook D, Nassenstein K, Schwenk a., Schreiber F, Wenz T, Flores G and Hahn M 2008 Coating Bores of Light Metal Engine Blocks with a Nanocomposite Material using the Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spray Process *J. Therm. Spray Technol.* **17** 344–51

[15] Hu T, Zhang Y and Hu L 2012 Tribological investigation of MoS2 coatings deposited on the laser textured surface *Wear* **278-279** 77–82

[16] Bucht A and Ullrich N 2012 Using less gas and oil to get where you're going *Fraunhofer, Res. News* 12–3

[17] Reason R E 1979 Progress in the appraisal of surface topography during the first half-century of instrument development *Wear* **57** 1–16

[18] Stout K J and Davis E J 1984 Surface topography of cylinder bores - the relationship between manufacture, characterization and function *Wear* **95** 111–25

[19] De Chiffre L, Lonardo P, Trumpold H, Lucca D A, Goch G, Brown C A, Raja J and Hansen H N 2000 Quantitative characterization of surface texture *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **49** 635–52

[20] NF EN ISO 4287 1998 *Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface: Méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface*

[21] NF EN ISO 12085 1998 *Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : Méthode du profil - Paramètres liés aux motifs*

[22] International Standard ISO 13565-2:1996 1998 *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties —Part 2 : Height characterization using the linear material ratio curve*

[23] CNOMO 2003 *Fascicule de formation états de surface*

[24] Chen X, Raja J and Simanapalli S 1995 Multi-scale analysis of engineering surfaces *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **35** 231–8

[25] Sabri L 2010 *Développement et mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse multi-échelle du procédé de rodage en production de série, PhD thesis* (Arts et Métier ParisTech)

[26] Sabri L, Mezghani S, Mansori M El and Zahouani H 2011 Multiscale study of finish-honing process in mass production of cylinder liner *Wear* **271** 509–13

[27] Mezghani S, Demirci I, El Mansori M and Zahouani H 2013 Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system *Tribol. Int.* **59** 240–7

[28] Tomanik E 2008 Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes *Tribol. Int.* **41** 1032–8

[29] Rosen B-G, Anderberg C, Pawlus P and Thomas T . 2009 Alternative descriptions of roughness for cylinder liner production *J. Mater. Process. Technol.* **209** 1936–42

[30] NF EN ISO 25178-6 2010 *Etat de surface : Surfacique – Partie 6 : Classification des méthodes de mesurage de l'état de surface*

[31] Decencière E and Jeulin D 2001 Morphological decomposition of the surface topography of an internal combustion engine cylinder to characterize wear *Wear* **249** 482–8

[32] Frêne J 1982 *Paliers hydrodynamiques* vol 33 (Techniques de l'ingénieur)

[33] Jocsak J 2005 *The effect of surface finish on piston ring-pack performance in advanced reciprocating engine systems, Master Thesis* (Massachusetts Institute of Technology)

[34] Ting L L 1993 Development of a Reciprocating Test Rig for Tribological Studies of Piston Engine Moving Components - Part I: Rig Design and Piston Ring Friction Coefficients Measuring Method *International Congress and Exposition* (Dearborn, MI; United States: SAE Technical Papers) pp 930685:462–9

[35] Robota A and Zwein F 1999 Influence of cylinder bore topography on the oil consumption and particulate emissions of a DI TCI diesel engine *MTZ 60* **4** 11–4

[36] Richardson D E and Borman G L 1991 Using Fiber Optics and Laser Fluorescence for Measuring Thin Oil Films with Application to Engines *International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition* (Toronto, ON; Canada: SAE Technical Papers) pp 912388:1–32

[37] Bolander N W, Steenwyk B D, Kumar A and Sadeghi F 2004 Film thickness and friction measurement of piston ring cyliner liner contact with corresponding modeling including mixed lubrication *Proceedings of the 2004 Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division* pp 811–21

[38] Bolander N W, Steenwyk B D, Sadeghi F and Gerber G R 2005 Lubrication regime transitions at the piston ring-cylinder liner interface *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* **219** 19–31

[39] Mourier L, Mazuyer D, Ninove F-P and Lubrecht a a 2010 Lubrication mechanisms with laser-surface-textured surfaces in elastohydrodynamic regime *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* vol 224 pp 697–711

[40] Srivastava D K, Agarwal A K and Kumar J 2007 Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator *Mater. Des.* **28** 1632–40

[41] Ninove F and Mazuyer D 2009 Contacts EHD micro-texturés en application du contact segment chemise *19ème Congrès Français de Mécanique* (Marseille, France) pp 1–6

[42] Knoll G, Peeken H, Lechtape-Grüter R and Lang J 1996 Computer-aided simulation of piston and piston ring dynamics *J. Eng. Gas Turbines Power* **118** 880–6

[43] Priest M, Dowson D and Taylor C M 2000 Theoretical modelling of cavitation in piston ring lubrication *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* **214** 435–46

[44] Wong V, Tian T, Moughon L, Takata R, Jocsak J, Stanglmaier R, Bestor T, Evans K and Quillen K 2006 *Low-Engine-Friction Technology for advanced Natural-Gas Reciprocating Engines, Annual Technical Progress Report, for National Energy Technology Laboratory*

[45] Patir N and Cheng H S 1978 An Average Flow Model for Determining Effects of Three- Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication *Trans. ASME* **100** 12–7

[46] Patir N and Cheng H S 1979 Application of Average Flow Model to Lubrication Between Rough Sliding Surfaces *Trans. ASME* **101** 220–9

[47] Spencer A, Almqvist A and Larsson R 2011 A numerical model to investigate the effect of honing angle on the hydrodynamic lubrication between a combustion engine piston ring and cylinder liner *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* **225** 683–9

[48] A. Lubrecht A 1987 *The numerical solution of the elastohydrodynamically lubricated line and point contact problem, using multigrid techniques, PhD Thesis* (University of Twente)

[49] Buscaglia G C and Jai M 2004 Homogenization of the Generalized Reynolds Equation for Ultra-Thin Gas Films and Its Resolution by FEM *J. Tribol.* **126** 547

[50] Lotz Felter C 2008 Numerical simulation of piston ring lubrication *Tribol. Int.* **41** 914–9

[51] Caciu C A and Decencière E 2006 Numerical analysis of a 3D hydrodynamic contact *Int. J. Numer. Methods Fluids* **51** 1355–77

[52] Caciu C, Decencière E and Jeulin D 2008 Parametric Optimization of Periodic Textured Surfaces for Friction Reduction in Combustion Engines *Tribol. Trans.* **51** 533–41

[53] De Kraker A, van Ostayen R a. J, van Beek A and Rixen D J 2007 A Multiscale Method Modeling Surface Texture Effects *J. Tribol.* **129** 221–30

[54] Mezghani S, Demirci I, Zahouani H and El Mansori M 2012 The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction *Precis. Eng.* **36** 210–7

[55] Lugt P M and Morales-Espejel G E 2011 A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory *Tribol. Trans.* **54** 470–96

[56] Dobrica M B and Fillon M 2009 About the validity of Reynolds equation and inertia effects in textured sliders of infinite width *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* **223** 69–78

[57] Spencer A, Almqvist A and Larsson R 2011 A semi-deterministic texture-roughness model of the piston ring-cylinder liner contact *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* **225** 325–33

[58] Minet C 2009 *Lubrification mixte dans les étanchéités dynamiques: application aux garnitures mécaniques d'étanchéité, PhD Thesis* (Université de Poitiers)

[59] Tomanik E 2013 Modelling the hydrodynamic support of cylinder bore and piston rings with laser textured surfaces *Tribol. Int.* **59** 90–6

[60] Caciu C A 2006 *Analyse et optimisation des surfaces des chemises de moteurs thermiques, PhD Thesis* (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris)

[61] Arghir M, Roucou N, Helene M and Frene J 2003 Theoretical Analysis of the Incompressible Laminar Flow in a Macro-Roughness Cell *J. Tribol.* **125** 309–18

[62] Dobrica M B, Fillon M, Pascovici M D and Cicone T 2010 Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* **224** 737–50

[63] Habchi W 2008 *A Full-system finite element approach to elastohydrodynamic lubrication problems, PhD Thesis* (INSA de Lyon)

[64] Larsson R 2009 Modelling the effect of surface roughness on lubrication in all regimes *Tribol. Int.* **42** 512–6

[65] Tang W, Zhou Y, Zhu H and Yang H 2013 The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact *Appl. Surf. Sci.* **273** 199–204

[66] Tang W, Zhou Y, Zhu H and Yang H 2013 Applied Surface Science The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact *Appl. Surf. Sci.* **273** 199–204

[67] Greco A, Raphaelson S, Ehmann K, Wang Q J and Lin C 2009 Surface Texturing of Tribological Interfaces Using the Vibromechanical Texturing Method *J. Manuf. Sci. Eng.* **131** 0610051–8

[68] Wang S, Hu Y, Wang W and Wang H 2007 Effects of Surface Roughness on Sliding Friction in Lubricated-Point Contacts: Experimental and Numerical Studies *J. Tribol.* **129** 809–17

[69] Costa H L and Hutchings I M 2009 Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing *J. Mater. Process. Technol.* **209** 1175–80

[70] Yuan S, Huang W and Wang X 2011 Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces *Tribol. Int.* **44** 1047–54

[71] Brunetière N and Tournerie B 2012 Numerical analysis of a surface-textured mechanical seal operating in mixed lubrication regime *Tribol. Int.* **49** 80–9

[72] Huang W, Jiang L, Zhou C and Wang X 2012 The lubricant retaining effect of micro-dimples on the sliding surface of PDMS *Tribol. Int.* **52** 87–93

[73] Pascovici M D, Cicone T, Fillon M and Dobrica M B 2009 Analytical investigation of a partially textured parallel slider *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* **223** 151–8

[74] Kovalchenko A, Ajayi O, Erdemir A and Fenske G 2011 Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact *Wear* **271** 1719–25

[75] Ma C and Zhu H 2011 An optimum design model for textured surface with elliptical-shape dimples under hydrodynamic lubrication *Tribol. Int.* **44** 987–95

[76] Tala-Ighil N, Fillon M and Maspeyrot P 2011 Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing *Tribol. Int.* **44** 211–9

[77] Lu X and Khonsari M M 2007 An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings *Tribol. Lett.* **27** 169–76

[78] Wakuda M, Yamauchi Y, Kanzaki S and Yasuda Y 2003 Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact *Wear* **254** 356–63

[79] Stephens L S, Siripuram R, Hayden M and McCartt B 2004 Deterministic Micro Asperities on Bearings and Seals Using a Modified LIGA Process *J. Eng. Gas Turbines Power* **126** 147–54

[80] Mishra S P and Polycarpou A A 2011 Tribological studies of unpolished laser surface textures under starved lubrication conditions for use in air-conditioning and refrigeration compressors *Tribol. Int.* **44** 1890–901

[81] Nanbu T, Ren N, Yasuda Y, Zhu D and Wang Q J 2008 Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion *Tribol. Lett.* **29** 241–52

[82] Jackson R L 2010 A Scale Dependent Simulation of Liquid Lubricated Textured Surfaces *J. Tribol.* **132** 022001:1–6

[83] Srivastava D K, Agarwal A K and Kumar J 2007 Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator *Mater. Des.* **28** 1632–40

[84] Menezes P L and Kailas S V. 2008 On the effect of surface texture on friction and transfer layer formation—A study using Al and steel pair *Wear* **265** 1655–69

[85] Menezes P L, Kailas S V. and Lovell M R 2011 Friction and transfer layer formation in polymer–steel tribo-system: Role of surface texture and roughness parameters *Wear* **271** 2213–21

[86] Siripuram R B and Stephens L S 2004 Effect of Deterministic Asperity Geometry on Hydrodynamic Lubrication *J. Tribol.* **126** 527–34

[87] Ren N, Nanbu T, Yasuda Y, Zhu D and Wang Q 2007 Micro Textures in Concentrated-Conformal-Contact Lubrication : Effect of Distribution Patterns 275–85

[88] Costa H L and Hutchings I M 2007 Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions *Tribol. Int.* **40** 1227–38

[89] Wang Q J and Zhu D 2005 Virtual Texturing: Modeling the Performance of Lubricated Contacts of Engineered Surfaces *J. Tribol.* **127** 722–8

[90] Zhu D, Nanbu T, Ren N, Yasuda Y and Wang Q J 2010 Model-based virtual surface texturing for concentrated conformal-contact lubrication *J. Eng. Tribol.* **224** 1–12

[91] Křupka I, Šperka P, Hartl M, Xue Jin S and Xiao Yang C 2010 Effect of real longitudinal surface roughness on lubrication film formation within line elastohydrodynamic contact *Tribol. Int.* **43** 2384–9

[92] Wang X, Kato K, Adachi K and Aizawa K 2003 Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water *Tribol. Int.* **36** 189–97

[93] Goeldel B 2013 *Etude et mise en œuvre d'un moyen flexible pour le rodage de carter cylindre de moteur à combustion interne, PhD Thesis* (Arts et Métiers ParisTech)

[94] Álvarez L, Luis C J and Puertas I 2004 Analysis of the influence of chemical composition on the mechanical and metallurgical properties of engine cylinder blocks in grey cast iron *J. Mater. Process. Technol.* **153-154** 1039–44

[95] Goeldel B, Voisin J, Dumur D, El Mansori M and Frabolot M 2013 Flexible right sized honing technology for fast engine finishing *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **62** 327–30

[96] Yousfi M, Mezghani S, Demirci I and El Mansori M 2014 Comparative study between 2D and 3D characterization methods for cylinder liner plateau honed surfaces *Proceedings of NAMRI/SME, Vol. 42* vol 42

[97] Yousfi M, Mezghani S, Demirci I, El Mansori M and Zahouani H 2012 Optimisation de l'efficacité energétique des moteurs par la réduction du frottement du tribo-système segment-piston-cylindre *Tribologie: approches scientifiques et applications industrielles* ed Presse des Mines (Aix-en-Provence) pp 208–15

[98] Mezghani S, Demirci I, Yousfi M and El Mansori M 2013 Running-in wear modeling of honed surface for combustion engine cylinderliners *Wear* **302** 1360–9

[99] Rosen B-G, Anderberg C and Ohlsson R 2008 Parameter correlation study of cylinder liner roughness for production and quality control *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* **222** 1475–87

[100] Grabon W, Pawlus P and Sep J 2010 Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder liner honed surfaces under reciprocating sliding conditions *Tribol. Int.* **43** 1882–92

[101] Mansori M El, Mezghani S, Sabri L and Zahouani H 2010 On concept of process signature in analysis of multistage surface formation *Surf. Eng.* **26** 216–23

[102] Bruzzone A A G, Montanaro J S, Ferrando A and Lonardo P M 2004 Wavelet analysis for surface characterisation: An experimental assessment *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **53** 479–82

[103] Demirci I, Mezghani S, Yousfi M and El Mansori M 2014 Multiscale Analysis of the Roughness Effect on Lubricated Rough Contact *J. Tribol.* **136** 011501

[104] Yousfi M, Mezghani S, Demirci I and El Mansori M 2013 Study on the relevance of some of the description methods for plateau-honed surfaces *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* **2** 014006:1–7

[105] Eyring H 1936 Viscosity, Plasticity, and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates *J. Chem. Phys.* **4** 283

[106] Ehret P, Dowson D and Taylor C M 1998 On lubricant transport conditions in elastohydrodynamic conjunctions *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **454** 763–87

[107] Dowson D and Higginson G R 1966 *Elasto-hydrodynamic Lubrication, the Fundamentals of Roller and Gear Lubrication* (Oxford: Pergamon Press)

[108] Roelands C J A 1966 *Correlational Aspects of the Viscosity-temperature-pressure Relationship of Lubricating Oils, PhD Thesis* (PhD Thesis, Technical University Delft, Netherlands)

[109] Venner C H and Morales-Espejel G E 1999 Amplitude reduction of small-amplitude waviness in transient elastohydrodynamically lubricated line contacts *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* **213** 487–502

[110] Venner C H and Lubrecht A A 2000 *Multilevel methods in lubrication* vol 37 (Tribology Series)

[111] Rabinowicz E 1980 *Friction - especially low friction.* (MIT Press)

[112] Ren N, Zhu D, Chen W W, Liu Y and Wang Q J 2009 A Three-Dimensional Deterministic Model for Rough Surface Line-Contact EHL Problems *J. Tribol.* **131** 011501:1–9

[113] Hu Y and Zhu D 2000 A Full Numerical Solution to the Mixed Lubrication in Point Contacts *Trans. ASME* **122** 1–9

[114] Dimkovski Z, Cabanettes F, Lofgren H, Anderberg C, Ohlsson R and Rosen B G 2012 Optimization of cylinder liner surface finish by slide honing *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* **226** 575–84

[115] Mezghani S, Demirci I, Yousfi M and El Mansori M 2013 Mutual influence of crosshatch angle and superficial roughness of honed surfaces on friction in ring-pack tribo-system *Tribol. Int.* **66** 54–9

[116] Demirci I, Mezghani S, Yousfi M, Zahouani H and Mansori M El 2012 The Scale Effect of Roughness on Hydrodynamic Contact Friction *Tribol. Trans.* **55** 705–12

[117] Zhou Y, Zhu H, Tang W, Ma C and Zhang W 2012 Development of the theoretical model for the optimal design of surface texturing on cylinder liner *Tribol. Int.* **52** 1–6

[118] Yousfi M, Mezghani S, Demirci I and Mansori M El 2014 Mutual effect of groove size and anisotropy of cylinder liner honed textures on engine performances *Adv. Mater. Res.* **966-967** 175–83

[119] Yu H, Wang X and Zhou F 2009 Geometric Shape Effects of Surface Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure Between Conformal Contacting Surfaces *Tribol. Lett.* **37** 123–30

ETUDE TRIBO-FONCTIONNELLE DES TEXTURES BAS FROTTEMENT DES CYLINDRES DE MOTEURS GENEREES PAR LE PROCEDE DE RODAGE

RESUME : Le rodage mécanique demeure encore le procédé industriel de référence pour la finition des cylindres de moteurs dans le cadre des productions de grande série. La voie actuelle de fabrication en rodage procède par frottement et abrasion à vitesse réduite pour imprimer une texture anisotrope et multi-échelle sur la surface du cylindre. La signature de cette texture a la particularité de satisfaire des exigences multifonctionnelles du cylindre (frottement, lubrification, usure, consommation d'huile, etc.). Elle est cependant générée par un rodage stratifié en production industrielle qui consiste en trois étapes successives avec effet d'échelle: ébauche (échelle macroscopique), finition (échelle mésoscopique) et superfinition (échelle microscopique). Plusieurs méthodes de rodage ont émergé cette dernière décennie et dont la différentiation technologique et économique se fait essentiellement par le choix des attributs texturaux et topographiques de surface de rodage. La présente étude analyse les processus de rodage industriel, du choix d'anisotropie possibles et paramètres texturaux dans une optique de fonctionnalisation de la surface rodée du cylindre. Une approche méthodologique sur la tribo-fonctionnalité multi-échelle de la surface de rodage du cylindre a été développée, puis validée par simulation numérique dans le cas du tribo-contact segment-cylindre. Elle s'appuie sur le triptyque suivant :

- le couplage entre le processus de rodage et la fonctionnalité via la caractérisation de sa signature texturale multi-échelle,

- l'exploitation de l'anisotropie contrôlée par simulation numérique qui conduit à la texture de fonction,

- l'interaction surface – procédé de rodage qui devient indissociable, notamment dans la fabrication de la texture de fonction et sa qualification tribo-fonctionnelle par des essais tribométriques.

Cette démarche méthodologique a été appliquée aux procédés de rodage industriel tel que le rodage plateau (PH), glissant (SH) et hélico-glissant (HSH). Cela a permis de démontrer qu'une texture anisotrope fine composée de plateaux et vallées de faible amplitude présente les meilleurs attributs fonctionnels en frottement. Cependant, une texture anisotrope de type HSH avec un angle de striation de 130° est la moins sensible en frottement à l'aspect plateau obtenu par écrêtage des pics de rugosité. Ce résultat ouvre une évolution potentielle du process HSH où la dernière étape de rodage peut être réduite voire supprimée. Par la suite, la démarche développée a été étendue aux textures innovantes à bas frottement de rodage en développement avec une anisotropie circulaire, ondulatoire, stratifiée mixte, ou assistée en trajectoire. Les résultats ont montré que des textures HSH optimisées en trajectoire (avec suppression de stries d'inversion au niveau des points mort haut (PMH) et point mort bas (PMB) du cylindre) ainsi que des textures stratifiées mixtes 45°-130°-45° (stries à 45° au PMB et PMH et 130° au milieu du cylindre) permettent une réduction significative du frottement segment-fût en régime de lubrification mixte en comparaison par rapport aux textures de rodage HSH conventionnel.

Mots-clés : rodage, texture, approche multiéchelle, abrasion, aspect de surface, coupe, topographie, frottement, optimisation de procédé, usure.

TRIBOFUNCTIONAL STUDY OF LOW-FRICTION ENGINE LINER TEXTURES GENERATED BY HONING PROCESS

ABSTRACT : Mechanical honing process is still the reference industrial process for mass production of engine liners. The current manufacturing process uses friction and abrasion mechanisms at reduced velocity to print a multiscale and anisotropic texture on the liner surface. This texture signature has the particularity to hold multifunctional requirements of the liner (friction, lubrication, wear, oil consumption, etc.) to extend the engine life. It is however, generated by a stratified honing process for industrial production which consists of three stages with scale effect: rough stage (macroscopic scale), finish stage (mesoscopic scale) and super-finishing stage (microscopic scale). Different honing methods have been emerged during the last decade in which the technological and economical differentiation is essentially based on textural and topographical attributes of honed surfaces. The present study analyses the industrial honing processes, the possible surface anisotropy choices and texture parameters in order to functionalize honed engine liner surface. A methodological approach based on multiscale tribo-functionality has been developed and validated by numerical simulation in the case of ring-liner tribo-contact. It is built on the following triptych:

-The coupling between honing process and surface functionality through its multiscale textural signature;

-The exploitation of the controlled anisotropy by numerical simulation which conducts to surface functionality;

-The surface-process interaction which becomes intimate, particularly in functional texture manufacturing and its tribo-functional qualification through tribometric trials.

This methodology has been applied to industrial honing processes (plateau honing (PH), slide honing (SH) and helical slide honing (HSH)). The results show that smooth texture with lower plateau roughness and valley depth contributes to reduce frictional performances of honed surfaces. Nevertheless, helical slide honed surfaces are less sensitive in friction to the plateaudness i.e., to superficial roughness comparatively to PH textures. This is promising for HSH process optimization, in which the third stage can be reduced or removed. Then the developed approach has been extended to honing development for innovative texture anisotropy (circular, undulatory, mixed, trajectory assisted) for low-friction performances. The results show that assisted trajectory (without inversion grooves at top dead (TDC) and bottom dead centers (BDC)) and 45-130-45 mixed textures (with 45° cross-hatched grooves at TDC and BDC, 130° cross-hatched grooves at mid-height) significantly enhance the frictional performances in comparison to HSH conventional process.

Keywords : honing, surface texture, multi-scale analysis, abrasion, surface aspect, cutting, surface topography, friction, process optimization, wear.



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY