



**HAL**  
open science

# Texturation anti-friction des portées cylindriques de vilebrequins

Kevin Serpin

► **To cite this version:**

Kevin Serpin. Texturation anti-friction des portées cylindriques de vilebrequins. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2017. Français. NNT : 2017ENAM0018 . tel-01692997

**HAL Id: tel-01692997**

**<https://pastel.hal.science/tel-01692997>**

Submitted on 25 Jan 2018

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

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

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

**Doctorat ParisTech**

**T H È S E**

pour obtenir le grade de Docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité “ Génie mécanique - procédés de fabrication ”**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Kévin SERPIN**

le 17 mai 2017

## **Texturation anti-friction des portées cylindriques de vilebrequins**

Directeur de thèse : **Mohamed EL MANSORI**

Co-encadrement de thèse : **Sabeur MEZGHANI**

### **Jury**

**M. Pierre MONTMITONNET**, Directeur de Recherche CNRS, CEMEF - UMR 7635, MINES ParisTech

**M. Roberto DE SOUZA**, Professeur des universités, laboratoire LFS, École polytechnique, Université de São Paulo

**M. Michel FILLON**, Directeur de Recherche CNRS, Institut Pprime - UPR 3346, Université de Poitiers

**M. Yvan CHASTEL**, VP Materials Characteristics, DEA, Renault SAS

**M. Mohamed EL MANSORI**, Professeur des universités, MSMP - EA7350, Arts & Métiers ParisTech

**M. Sabeur MEZGHANI**, Maître de conférences, MSMP - EA7350, Arts & Métiers ParisTech

**Mme. Elisabeth PAGEOT**, CUET usinage pièces tournantes, DIPM, Renault SAS

**M. Eric SOURISSE**, Expert pièces mobiles, DIPM, Renault SAS

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Invité

**T  
H  
È  
S  
E**

# Remerciements

*Que d'émotions lors de l'écriture de ces remerciements. Je pourrais écrire plusieurs pages tant il y a de choses que je souhaiterais transmettre. Toutefois je dois, chère lectrice, cher lecteur, être synthétique. Plus d'une vingtaine de personnes ont participé activement à ce travail de recherche, et toutes ont été essentielles à son aboutissement.*

*Je tiens à remercier en premier lieu le professeur Mohamed EL MANSORI, mon directeur de thèse, pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur un sujet aussi intéressant. De lui, j'ai reçu non seulement des encouragements, mais aussi de précieux conseils pratiques qui auront permis de faire aboutir ce travail. Un grand merci au maître de conférences Sabeur MEZGHANI, mon co-encadrant scientifique, pour sa disponibilité et sa bienveillance. Nous avons partagé beaucoup de bons moments durant ces trois années. Je voudrais également exprimer mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse. Merci à Pierre MONTMITONNET, directeur de recherche CNRS au laboratoire CEMEF, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse, ainsi qu'à Michel FILLON, directeur de recherche CNRS à l'institut Pprime, et Roberto DE SOUZA, professeur au laboratoire LFS de l'université de Sao Paulo, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit. Leur lecture minutieuse et nos échanges constructifs m'ont permis d'apporter de nettes améliorations.*

*Le laboratoire MSMP et plus largement, le corps enseignant et l'équipe technique d'ARTS ET METIERS PARIS TECH Châlons-en-Champagne m'ont également beaucoup apporté. Merci à Julien VOISIN et à Cédric PERSON, responsables du service technique, pour leur participation active lors de mises en place d'expériences, ainsi qu'à Laurence FOUILLAND, maître de conférences, pour m'avoir formé sur le MEB.*

*Je dois, par ailleurs, énormément aux techniciens spécialistes. Je remercie en particulier Denis COLOMBI, spécialiste matériaux, Joël DLEVAQUE, spécialiste forge et soudure, Dominique DUFOSSE, spécialiste usinage, Samuel JACQUELET, spécialiste conception, Sébastien LEPRETRE, magasinier et spécialiste usinage, Laurent MARAVAL, spécialiste usinage, ainsi que Sébastien SOULAS, spécialiste métrologie tactile. Soyez certains que votre aide m'a fait gagner un temps précieux.*

*Des remerciements tout particuliers à mes chers amis ex-doctorants et désormais docteurs, Faissal CHEGDANI, Guillaume FILLIARD, Simon JOLIVET, Imane OUTMANI, Jinyang XU et Mohammed YOUSFI. La thèse est désormais derrière-nous... comme quoi tout arrive ! Je vous souhaite tout le meilleur pour la suite.*

*Des remerciements amicaux à Mohammed BENNOUNA, mon stagiaire, Dorian CHASSAGNE, Chargé de communication, Estelle DEROUILLAT, Responsable des relations extérieures, ainsi qu'à Manon PAUC, anciennement Ingénieure de recherche au laboratoire.*

*Ma gratitude se tourne également vers mon entreprise d'accueil, RENAULT, qui a mis à ma disposition tous les moyens me permettant de mener à bien ma thèse. Je remercie de manière générale les collègues de la DIPM, de la DEAMM et de la DEATC.*

*Un énorme merci à Elisabeth PAGEOT, ma responsable industriel et chef d'équipe de l'UET usinage pièces tournantes, pour son suivi rigoureux et son soutien inconditionnel. J'ai l'intime conviction d'avoir été encadré par une manageuse d'exception à la fois disponible, bienveillante et pragmatique. Merci également à Eric SOURISSE, expert pièce mobiles, pour l'ensemble des échanges que nous avons eus. J'ai beaucoup appris grâce à lui, en particulier sur l'entreprise elle-même. Merci à Emmanuel PION et à Fabrice AGNOLI, respectivement référent et ex-référent attelage mobile, pour avoir initié avec détermination la collaboration Produit / Process nécessaire à l'aboutissement de ce travail.*

*Beaucoup de collègues sont par ailleurs directement intervenus dans la conduite d'essais ou de mesures expérimentales. Je pense en particulier à Thierry GONCALVES et David LEVOY, tous deux spécialistes métier process, ainsi qu'à Eric BIDAULT, Stéphane BOUTET et Carmelo GUGLIOTTA, tous trois spécialistes matériaux tribologie. Je reconnais pleinement votre technicité et votre implication dans ce travail. Sachez que je vous en suis très reconnaissant.*

*Et bien entendu je remercie ma famille, ceux avec qui je partage ma vie au quotidien. Je pense à mes parents, à mes frères et à ma sœur, à ma grand-mère, à ma compagne Dhanya, à mes beaux-parents, à ma tante Isabelle, à mon oncle Jean-Marie, et enfin à mes cousines et cousins. Vous m'avez toutes et tous tellement forgé, tellement apporté depuis mon enfance. Sachez que cette thèse n'a de sens qu'à vos côtés.*

*Enfin, je tiens à souligner la forte contribution financière de la nation à ma réussite scolaire dans le supérieur. Je pense en particulier à la bourse de mérite que j'ai eu l'honneur de percevoir durant six années. Pour l'avoir vécu, je peux affirmer que ce dispositif est une clé de voûte essentielle pour l'égalité des chances.*

*À tous ceux qui reviennent de loin.*

# Table des matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>I</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>III</b>
<b>Table des figures .....</b>	<b>VI</b>
<b>Tables des tableaux .....</b>	<b>XI</b>
<b>Table des symboles .....</b>	<b>XII</b>
<b>Table des abréviations.....</b>	<b>XV</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I. Étude bibliographique .....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>I.1. Les paliers de vilebrequin dans l'attelage mobile .....</b>	<b>7</b>
I.1.1. Généralités .....	7
I.1.2. Paramétrage des paliers.....	8
I.1.3. Les régimes de fonctionnement.....	9
I.1.4. Cas du palier lisse court en régime hydrodynamique .....	11
I.1.5. Leviers d'action sur les grandeurs fonctionnelles des paliers .....	15
I.1.6. Conclusion .....	15
<b>I.2. Impacts fonctionnels de la texturation .....</b>	<b>16</b>
I.2.1. La texturation.....	16
I.2.2. Études représentatives du fonctionnement des paliers.....	21
I.2.3. Conclusion .....	24
<b>I.3. Le procédé industriel de toilage.....</b>	<b>26</b>
I.3.1. Généralités .....	26
I.3.2. Influence des paramètres process.....	29
I.3.3. Conclusion .....	33
<b>I.4. Les autres procédés de texturation.....</b>	<b>34</b>
I.4.1. Procédés par ablation ou ajout de matière .....	34
I.4.2. Procédés par abrasion .....	38
I.4.3. Procédés par micro-coupe.....	39
I.4.4. Procédés par déformation plastique .....	40
I.4.5. Conclusion .....	42
<b>Conclusion.....</b>	<b>44</b>
<b>Chapitre II. Méthodologie, dispositifs et protocoles expérimentaux .....</b>	<b>45</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>46</b>

<b>II.1. Éprouvettes d'essais .....</b>	<b>48</b>
II.1.1. Éprouvettes de développement process.....	48
II.1.2. Éprouvettes de caractérisation fonctionnelle.....	49
<b>II.2. Fabrication des textures.....</b>	<b>50</b>
II.2.1. Banc de toilage .....	50
II.2.2. Banc laser femto seconde TRUMPF.....	55
<b>II.3. Caractérisation des textures .....</b>	<b>59</b>
II.3.1. Échelles macro géométriques .....	59
II.3.2. Échelles micro géométriques .....	59
<b>II.4. Caractérisation fonctionnelle .....</b>	<b>64</b>
II.4.1. Coussinets et huiles utilisées .....	64
II.4.2. Machines À Palier Statique (MAPS) .....	66
II.4.3. Machine À Palier Dynamique (MAPD).....	69
<b>Conclusion.....</b>	<b>73</b>
<b>Chapitre III. Du toilage conventionnel au toilage texturant.....</b>	<b>74</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>75</b>
<b>III.1. Étude statistique du toilage conventionnel .....</b>	<b>76</b>
III.1.1. Définition du plan d'expérience et modélisation statistique .....	76
III.1.2. Influences des paramètres process.....	79
III.1.3. Limites du toilage conventionnel.....	82
III.1.4. Conclusion .....	83
<b>III.2. Introduction à la texturation par toilage .....</b>	<b>84</b>
III.2.1. Conditions texturales de régénération et/ou de préservation.....	84
III.2.2. Application au toilage conventionnel .....	85
III.2.3. Conclusion .....	86
<b>III.3. Développement des capacités texturales du procédé de toilage par modification des structures abrasives.....</b>	<b>87</b>
III.3.1. Le potentiel des structures abrasives .....	87
III.3.2. Influences du nombre de révolutions lors de l'utilisation de différentes structures abrasives .....	92
III.3.3. Conclusion .....	100
<b>Conclusion.....</b>	<b>101</b>
<b>Chapitre IV. Développement du toilage texturant.....</b>	<b>102</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>103</b>
<b>IV.1. Généralités sur le toilage texturant .....</b>	<b>104</b>
IV.1.1. Formalisation de la notion de toilage texturant.....	104
IV.1.2. Analyse des modifications texturales à chaque phase.....	105
IV.1.3. Conclusion .....	108
<b>IV.2. Étude statistique des capacités du procédé de toilage texturant.....</b>	<b>109</b>
IV.2.1. Définition du plan d'expérience et modélisation statistique .....	109
IV.2.2. Évolution des paramètres standards $Rpk$ , $Rk$ et $Rvk$ .....	111

IV.2.3. Évolution des caractéristiques texturales avancées.....	112
IV.2.4. Comparaison avec les textures conventionnelles.....	114
IV.2.5. Conclusion.....	115
<b>IV.3. Étude théorique et expérimentale de la cinématique d'impression texturale.....</b>	<b>117</b>
IV.3.1. Équations de trajectoire.....	117
IV.3.2. Caractéristiques associées à la trajectoire d'un grain.....	118
IV.3.3. Validation expérimentale.....	119
IV.3.4. Conclusion.....	123
<b>Conclusion.....</b>	<b>124</b>
<b>Chapitre V. Performances fonctionnelles « début de vie » .....</b>	<b>125</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>126</b>
<b>V.1. Définition et caractéristiques des textures testées.....</b>	<b>127</b>
V.1.1. Textures toilées .....	127
V.1.2. Textures hybrides .....	132
V.1.3. Conclusion.....	136
<b>V.2. Effets de la texturation en chargement statique sévère.....</b>	<b>137</b>
V.2.1. Effets de la texturation sur les grandeurs fonctionnelles « <i>in process</i> ».....	137
V.2.2. Analyse de l'usure sur les portées.....	143
V.2.3. Analyse de l'usure sur les coussinets.....	147
V.2.4. Conclusion.....	151
<b>V.3. Effets de la texturation en chargement dynamique .....</b>	<b>152</b>
V.3.1. Effets de la texturation sur les grandeurs fonctionnelles « <i>in process</i> ».....	152
V.3.2. Analyse de l'usure sur les portées.....	155
V.3.3. Analyse de l'usure des coussinets.....	158
V.3.4. Conclusion.....	162
<b>Conclusion.....</b>	<b>163</b>
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>164</b>
<b>Références .....</b>	<b>XVI</b>
<b>Production scientifique .....</b>	<b>XXIV</b>
<b>Publications dans des revues internationales.....</b>	<b>XXIV</b>
<b>Communications dans des congrès internationaux .....</b>	<b>XXIV</b>
<b>Communications dans des congrès nationaux .....</b>	<b>XXIV</b>

# Table des figures

<b>Figure 1</b> : Contributions du trafic routier à la pollution en Ile-de-France [4], global (1), détail (2).....	2
<b>Figure 2</b> : Contributions des différents organes du moteur aux PFM .....	3
<b>Figure I.1</b> : Attelage mobile, localisation (1), vue éclatée (2).....	7
<b>Figure I.2</b> : Paramétrage d'un palier cylindrique (1), distribution du champ de pression (2) .....	9
<b>Figure I.3</b> : Courbe de Stribeck représentant les trois régimes de fonctionnement .....	10
<b>Figure I.4</b> : Évolutions des principales grandeurs fonctionnelles d'un palier .....	14
<b>Figure I.5</b> : Évolutions circumférentielles du champ de pression et de l'épaisseur du film d'huile, pour une charge W de 200 daN (1), pour une charge W de 2000 daN (2).....	15
<b>Figure I.6</b> : Les quatre grandes familles de textures .....	17
<b>Figure I.7</b> : Clichés de textures fonctionnelles naturelles, peau de requin [10] (1), feuille de lotus [11] (2).....	18
<b>Figure I.8</b> : Effort de recherche mondial sur la texturation [24], nombre de publications par année (1), type de recherche (2) .....	19
<b>Figure I.9</b> : Effet de la texturation sur la courbe de Stribeck [56].....	21
<b>Figure I.10</b> : Principe du toilage (1), machine de toilage de vilebrequin NAGEL (2) .....	26
<b>Figure I.11</b> : Toilage par galet (1), toilage par mâchoires (2), [79].....	27
<b>Figure I.12</b> : Textures actuelles des portées vilebrequins, cliché MEB (1), exemple de paramètres standards de rugosité sur cinq portées (2).....	28
<b>Figure I.13</b> : Effets de la dureté d'insert sur la circularité des portées de vilebrequins [79].....	29
<b>Figure I.14</b> : Effets du temps de cycle en finition souple à sec sur l'enlèvement de matière (1), l'énergie spécifique (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79] .....	30
<b>Figure I.15</b> : Effets de la fréquence des oscillations en finition souple à sec sur l'enlèvement de matière (1), l'énergie spécifique (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79].....	31
<b>Figure I.16</b> : Effets de la pression de contact en finition souple arrosée sur l'enlèvement de matière (1), l'énergie spécifique (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79].....	32
<b>Figure I.17</b> : Effets de la granulométrie en finition souple arrosée sur l'enlèvement de matière (1), la circularité (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79] .....	33
<b>Figure I.18</b> : Étapes de l'ECM.....	36
<b>Figure I.19</b> : Photolithographie [99], les différentes étapes (1), exemple de texture hexagonale LIGA (2) .....	37
<b>Figure I.20</b> : Trois types de texture réalisables par meulage spécial conçu par [101–103].....	38
<b>Figure I.21</b> : Cage déformable dans le procédé VMT (1), système VMT complet (2) [105].....	39
<b>Figure I.22</b> : Fly cutting sur fût de carter cylindre [109,110].....	40
<b>Figure I.23</b> : Système d'indentation réalisé par Samanek et al. [120] (1), texturation obtenues (2) .....	42
<b>Figure II.1</b> : Démarche générale et moyens associés .....	46
<b>Figure II.2</b> : Vue d'ensemble du banc de toilage des portées cylindriques de vilebrequins .....	50

<b>Figure II.3</b> : Schéma du système de serrage .....	51
<b>Figure II.4</b> : Courbe type de l'évolution de la puissance consommée au cours du toilage [79].....	54
<b>Figure II.5</b> : Usinage avec des impulsions de 180 fs (1), usinage avec des impulsions de 8 ns (2).....	56
<b>Figure II.6</b> : Machine-outil GFH (1), prise pièce (2) .....	57
<b>Figure II.7</b> : Étapes de la cinématique laser/pièce vue de dessus .....	57
<b>Figure II.8</b> : Réseau de cavités LST vu au microscope optique, 0.5 % (1), 2.1 % (2), 8 % (3) .....	58
<b>Figure II.9</b> : Machines de mesure de forme MAHR MMQ 400 (1), localisation des trois zones de mesures sur chaque portée (2).....	59
<b>Figure II.10</b> : Profilomètre HOMMEL-ETAMIC T8000 (1), localisation des trois zones de mesure (2) .....	60
<b>Figure II.11</b> : Décomposition multi-échelle d'un profil primaire, profil primaire initial (1), composantes (2), profil primaire reconstruit par ajout des composantes (3).....	61
<b>Figure II.12</b> : Exemple de signal multi-échelle en toilage conventionnel, Ma (1), signature process $\Delta Ma$ (2)...	62
<b>Figure II.13</b> : Interféromètre WYKO 3300NT (1), localisation des trois zones de mesures (2).....	63
<b>Figure II.14</b> : MEB JEOL JSM-5510 .....	63
<b>Figure II.15</b> : Coupe en surface d'un coussinet de bielle supérieur PK1/CX4, grossissement x300 (1), grossissement x1000 (2).....	65
<b>Figure II.16</b> : Cartographie EDS de la composition d'un coussinet de bielle supérieur PK1/CX4 .....	65
<b>Figure II.17</b> : Caractéristique $\mu(Tc)$ de l'huile SHELL 0W-20 HTHS 2.6.....	66
<b>Figure II.18</b> : Vue globale de la MAPS (1), composition de la MAPS (2), détail de l'éprouvette (3), consigne de charge (4) .....	67
<b>Figure II.19</b> : Vue globale de la MAPD (1), efforts sur la MAPD (2), détail de l'éprouvette (3), consigne de charge (4).....	70
<b>Figure III.1</b> : Configurations types du toilage conventionnel .....	76
<b>Figure III.2</b> : Distribution des rugosités Rpk, Rk et Rvk, dans le plan Rvk/Rk (1), dans le plan Rvk/Rk (2) .....	78
<b>Figure III.3</b> : Adéquation des différents modèles statistiques en toilage conventionnel .....	79
<b>Figure III.4</b> : Les facteurs influents sur le Ra et C, sans regroupement (1) (3), avec regroupement (2) (4) .....	80
<b>Figure III.5</b> : Les facteurs influents sur le Rpk, Rk et Rvk, sans regroupement (1) (3) (5), avec regroupement (2) (4) (6) .....	81
<b>Figure III.6</b> : Réponses prédites pour plusieurs objectifs, Rpk, Rk, Rvk (1) et Ra et C (2) .....	82
<b>Figure III.7</b> : Modification texturale par interaction entre la surface initiale et la signature intrinsèque de bande abrasive .....	84
<b>Figure III.8</b> : Enlèvement de matière et amplitude des rugosités intrinsèques pour plusieurs granulométries, sans oscillations (1), avec oscillations (2).....	85
<b>Figure III.9</b> : Abaques des conditions de renouvellement texturale en toilage conventionnel, sans oscillations (1), avec oscillations (2) .....	86
<b>Figure III.10</b> : Les différents procédés de déposition de grains des structures abrasives .....	89
<b>Figure III.11</b> : Effet de trois structures abrasives, gains en rugosité (1), énergie spécifique de toilage et enlèvement de matière associée (2) .....	91
<b>Figure III.12</b> : Clichés MEB des copeaux de toilage (1) (3) (5) et des bandes usées (2) (4) (6) .....	92

<b>Figure III.13</b> : Longueur cinématique en toilage, pour une révolution (1), pour plusieurs révolutions en vue développée (2).....	93
<b>Figure III.14</b> : Effets de la cinématique sur les critères Rpk, Rk et Rvk par ajustement distinct du temps de cycle $t_c$ et de la vitesse de rotation $N_1$ .....	95
<b>Figure III.15</b> : Effets de la cinématique sur la signature multi-échelle du process par ajustement distinct du temps de cycle $t_c$ et de la vitesse de rotation $N_1$ .....	96
<b>Figure III.16</b> : Usure des structures abrasives en fonction du nombre de révolutions et de la stratégie adoptée. 98	
<b>Figure III.17</b> : Efficacité abrasive en fonction de la structure abrasive pour un nombre de révolutions $n = 160$ , énergie spécifique $E_s$ (1) et épaisseur de matière enlevée $e_p$ (2) .....	99
<b>Figure III.18</b> : Représentation schématique de la saturation en copeaux, structure conventionnelle (1), structure de polissage (2), structure 3D pyramidale (3) .....	100
<b>Figure IV.1</b> : Configurations types du toilage texturant .....	104
<b>Figure IV.2</b> : Clichés MEB des surfaces en toilage texturant, après la phase de striation (1), après la phase d'écraîtage (2), après la phase de polissage (3).....	105
<b>Figure IV.3</b> : Clichés interférométriques et profils des surfaces en toilage texturant, après la phase de striation (1) (2), après la phase d'écraîtage (3) (4), après la phase de polissage (5) (6).....	106
<b>Figure IV.4</b> : Évolution des caractéristiques en fonction de la hauteur de coupe virtuelle, profil initial (1), profil coupé (2) .....	107
<b>Figure IV.5</b> : Évolution des caractéristiques texturales en fonction de la profondeur de coupe virtuelle, rapport $P_v/L_v$ (1), angle d'ouverture (2), densité de vallées (3), densité de rétention (4) .....	108
<b>Figure IV.6</b> : Distribution des paramètres standards, dans le plans Rvk/Rpk (1), dans le plan Rvk/Rk (2) .....	110
<b>Figure IV.7</b> : Adéquation des différents modèles statistiques en toilage texturant .....	111
<b>Figure IV.8</b> : Effets des trois variables sur les paramètres standards Rpk, Rk et Rvk .....	112
<b>Figure IV.9</b> : Effets des trois variables sur le rapport profondeur/largeur $P_v/L_v$ et l'angle d'ouverture $\beta$ .....	113
<b>Figure IV.10</b> : Effets des trois variables sur la densité de vallées $d_v$ et la densité de rétention $d_r$ .....	114
<b>Figure IV.11</b> : Comparaison de la capacité texturale du toilage conventionnel et du toilage texturant .....	115
<b>Figure IV.12</b> : Plan de la surface développé et repère associé, portée réelle (1), portée développée, trajectoire sinusoïdale du mouvement grain/pièce lors d'une unique révolution .....	117
<b>Figure IV.13</b> : Strie générée par un grain pour $N_1 = 32$ tr/min et $N_2 = 550$ cycles/min, tangentes (1) et angles de striation (2) sur un quart de la période .....	119
<b>Figure IV.14</b> : Mâchoire spéciale mono indent, phase approche (1), phase d'indentation (2), exemple de strie générée (3) .....	120
<b>Figure IV.15</b> : Adequation entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées, angle de striation maximal $\alpha_{tmax}$ (1), période T (2).....	120
<b>Figure IV.16</b> : Superposition des trajectoires théoriques et expérimentales .....	121
<b>Figure IV.17</b> : Détermination de la distribution angulaire des stries par la transformée de Radon .....	122
<b>Figure IV.18</b> : Adéquation entre la valeur théorique et la valeur mesurée de l'angle moyen $\alpha_{t moy}$ pour $N_1=32$ tr/min en fonction de $N_2$ .....	123

<b>Figure V.1</b> : Écart de forme des portées texturées toilées.....	130
<b>Figure V.2</b> : Distribution des rugosités ISO 13565 .....	131
<b>Figure V.3</b> : Clichés MEB des textures toilées, référence 1 et 2 (1) (2), poli miroir (3), plateaux vallées 1 et 2 (4) (5).....	132
<b>Figure V.4</b> : Écart de forme des portées texturées hybrides .....	134
<b>Figure V.5</b> : Réseau de cavités des textures hybrides vu au microscope optique, 0,5 % (1), 2,1 % (2), 8 % (3).....	134
<b>Figure V.6</b> : Caractéristiques moyennes des cavités, clichés interférométrique (1), diamètre moyen (2), profondeur moyenne et maximum (3), volume de rétention (4) .....	135
<b>Figure V.7</b> : Clichés MEB des textures hybrides .....	136
<b>Figure V.8</b> : Exemple type de suivi « in process » lors des essais de grippage en chargement statique .....	138
<b>Figure V.9</b> : Effets des textures toilées sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process » lors des essais de grippage en chargement statique .....	140
<b>Figure V.10</b> : Effets des textures hybrides sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process » lors des essais de grippage en chargement statique .....	141
<b>Figure V.11</b> : Critères fonctionnels associés au départ en grippage des textures toilées .....	142
<b>Figure V.12</b> : Critères fonctionnels associés au départ en grippage des textures hybrides .....	143
<b>Figure V.13</b> : Les principaux modes d'usure observés sur les portées après les essais de grippage en chargement statique, aspect général (1), adhésion (2), érosion (3), abrasion (3).....	144
<b>Figure V.14</b> : Usure texturale des portées toilées après les essais de grippage en chargement statique .....	145
<b>Figure V.15</b> : Observations MEB du phénomène de transfert après les essais de grippage en chargement statique, sur une texture « plateaux/vallées » (1) (2), sur une texture hybride (3) (4) .....	146
<b>Figure V.16</b> : Quantification du transfert de bismuth sur les textures hybrides après les essais de grippage en chargement statique, cliché MEB (1), taux de cavités concernées (2) .....	147
<b>Figure V.17</b> : Les principaux modes d'usure observés sur les coussinets après les essais de grippage en chargement statique, aspect général (1), adhésion (2), arrachements (3), abrasion (4) .....	148
<b>Figure V.18</b> : Enlèvement de matière moyen sur les coussinets après les essais de grippage en chargement statique, paramétrage angulaire (1) (2), pour des textures toilées (3), pour des textures hybrides (4) .....	149
<b>Figure V.19</b> : Évolution de l'usure coussinets le long de la demi-circonférence après les essais de grippage en chargement statique.....	150
<b>Figure V.20</b> : Exemple type de suivi « in process » lors des essais en chargement dynamique .....	153
<b>Figure V.21</b> : Effets des textures toilées sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process » lors des essais en chargement dynamique.....	155
<b>Figure V.22</b> : Les principaux modes d'usure observés sur les portées après les essais en chargement dynamique, aspect général (1), adhésion (2), érosion (3), écaillage (3).....	157
<b>Figure V.23</b> : Usure texturale des portées toilées après les essais en chargement dynamique.....	158
<b>Figure V.24</b> : Observations MEB du phénomène de transfert sur une texture « plateaux/vallées » après les essais en chargement dynamique.....	158
<b>Figure V.25</b> : Les principaux modes d'usure observés sur les coussinets après les essais en chargement dynamique, aspect général (1), adhésion (2), fissuration par fatigue (3), écaillage par fatigue (3) .....	159

**Figure V.26 :** Enlèvement de matière moyen sur les coussinets après les essais en chargement dynamique, paramétrage angulaire (1) (3), après le premier cycle (2), après le deuxième cycle (4)..... 160

**Figure V.27 :** Évolution de l'usure de coussinets le long de la demi-circonférence après les essais en chargement dynamique..... 161

# Tables des tableaux

<b>Table I.1</b> : Exemple de données numériques relatives à un palier de vilebrequin.....	13
<b>Table I.2</b> : Caractéristiques géométriques des textures provenant de plusieurs procédés de texturation .....	43
<b>Table II.1</b> : Caractéristiques des éprouvettes de développement process du toilage.....	48
<b>Table II.2</b> : Caractéristiques des éprouvettes de caractérisation fonctionnelle .....	49
<b>Table II.3</b> : Paramètres expérimentaux en toilage.....	52
<b>Table II.4</b> : Mâchoires de toilage utilisées .....	52
<b>Table II.5</b> : Bandes abrasives utilisées .....	53
<b>Table II.6</b> : Procédure expérimentale du banc de toilage.....	55
<b>Table II.7</b> : Paramètres expérimentaux du banc LST.....	58
<b>Table II.8</b> : Procédure expérimentale de texturation sur banc LST.....	58
<b>Table II.9</b> : Paramètres standards de rugosités utilisés .....	60
<b>Table II.10</b> : Caractéristiques des coussinets de bielle utilisée .....	64
<b>Table II.11</b> : Paramètres expérimentaux sur MAPS.....	67
<b>Table II.12</b> : Procédure d’essai de la MAPS .....	68
<b>Table II.13</b> : Paramètres expérimentaux sur MAPD.....	71
<b>Table II.14</b> : Procédure d’essai de la MAPD .....	72
<b>Table III.1</b> : Facteurs simples et niveaux associés de l’étude d’optimisation du toilage conventionnel.....	77
<b>Table III.2</b> : Configurations testées lors de l’étude des signatures intrinsèques de bandes abrasives .....	85
<b>Table III.3</b> : Configurations testées lors de l’étude du potentiel texturant des structures abrasives .....	90
<b>Table III.4</b> : Configurations testées lors de l’étude de l’influence du nombre de révolutions .....	94
<b>Table IV.1</b> : Facteurs simples et niveaux associés de l’étude d’optimisation du toilage texturant .....	109
<b>Table V.1</b> : Configuration process associée aux textures de référence .....	128
<b>Table V.2</b> : Configuration process associée à la texture « poli miroir ».....	128
<b>Table V.3</b> : Configuration process associée aux textures « plateaux/vallées » .....	129
<b>Table V.4</b> : Configuration process associée aux textures hybrides .....	133

# Table des symboles

## Symboles liés au paramétrage et à la fonctionnalité des paliers

$C$	( $m$ )	Jeu radial ( $C = R_2 - R_1$ )
$C_f$	( $N.m$ )	Couple de frottement
$C_{f_{petroff}}$	( $N.m$ )	Couple de frottement selon la loi de Petroff
$D_1$	( $m$ )	Diamètre de la portée
$D_2$	( $m$ )	Diamètre du coussinet
$e$	( $m$ )	Excentricité, distance ( $O_1O_2$ )
$ec$	( $\mu m$ )	Épaisseur de matière enlevée sur le coussinet
$f$	(-)	Coefficient de frottement
$f_{grippage}$	(-)	Coefficient de frottement au départ du grippage du palier
$h$	( $m$ )	Épaisseur du film d'huile au point courant
$h_{min}$	( $m$ )	Épaisseur minimale du film d'huile
$H$	(-)	Nombre d'Hershey
$L$	( $m$ )	Largeur du contact
$M$	(-)	Point courant sur la portée
$N_1$	( $tr/min$ )	Vitesse de rotation de la portée
$O_1$	(-)	Centre de la portée
$O_2$	(-)	Centre du coussinet
$R_1$	( $m$ )	Rayon de la portée
$R_2$	( $m$ )	Rayon du coussinet
$Rc$	( $Ohms$ )	Résistance électrique de contact
$S$	(-)	Nombre de Sommerfeld
$S_{grippage}$	(-)	Nombre de Sommerfeld entraînant le départ en grippage du palier
$t$	( $s$ )	Temps
$Tc$	( $^{\circ}C$ )	Température en dos de coussinet
$Tc_{grippage}$	( $^{\circ}C$ )	Température en dos de coussinet au départ du grippage du palier
$Th$	( $^{\circ}C$ )	Température d'entrée de l'huile
$W_{grippage}$	( $N$ )	Charge appliquée entraînant le départ en grippage du palier
$W$	( $N$ )	Charge appliquée sur le palier
$\varepsilon$	(-)	Excentricité relative
$\theta$	( $rad$ )	Angle entre les vecteurs $\overrightarrow{O_1M}$ et $\overrightarrow{O_1O_2}$

$\Phi$	(rad)	Angle de calage, angle entre les vecteurs par $\overrightarrow{O_1O_2}$ et $\vec{W}$
$\mu$	(Pa.s)	Viscosité dynamique de l'huile du palier
$\omega_1$	(rad/s)	Vitesse de rotation de la portée

## Symboles liés au procédé de toilage

*	(-)	Exposant relatif à la première passe (phase d'ébauche ou de striation)
**	(-)	Exposant relatif à la seconde passe (phase de demi-finition ou d'écrêtage)
***	(-)	Exposant relatif à la troisième passe (phase de finition ou de polissage)
$\alpha t(t)$	(rad)	Angle formé entre $\vec{y}$ et la tangente d'une strie à l'instant $tc$
$\alpha t_{max}$	(rad)	Angle de striation maximal
$\alpha t_{moy}$	(rad)	Angle de striation moyen
$A$	(mm)	Amplitude des oscillations
$Av$	(mm)	Avance de la bande abrasive entre chaque passe
$ep$	( $\mu m$ )	Épaisseur de matière enlevée sur la portée
$Es$	( $J/mm^3$ )	Energie spécifique
$F$	(N)	Force normale appliquée par chaque bras
$G_s$	( $\mu m$ )	Granulométrie équivalente des grains d'abrasifs
$l$	(mm)	Longueur cinématique totale de toilage
$lc$	(mm)	Longueur développé du contact entre les inserts et la portée
$n$	(-)	Nombre de révolutions de la portée
$N_1$	(tr/min)	Vitesse de rotation de la portée
$N_2$	(cycles/min)	Vitesse des oscillations longitudinales
$tc$	(s)	Temps de cycle
$T_s$	(mm)	Période d'une strie
$P$	(W)	Puissance consommée par l'opération de toilage
$V$	( $mm^3$ )	Volume de matière enlevée sur la portée
$X_s(t)$	(mm)	Composante sur $\vec{x}$ d'un grain à l'instant $tc$
$Y_s(t)$	(mm)	Composante sur $\vec{y}$ d'un grain à l'instant $tc$
$\rho$	(m)	Rayon polaire relatif à la transformée de Radon
$\theta$	(rad)	Angle polaire relatif à la transformée de Radon
$\omega_1$	(rad/s)	Vitesse de rotation de la portée
$\omega_2$	(rad/s)	Vitesse des oscillations longitudinales

## Symboles liés aux états de surface

<b><i>C</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Circularité de la portée (ISO 6318)
<b><i>dr</i></b>	( $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ )	Densité de rétention
<b><i>dv</i></b>	(vallées/ $\text{mm}^2$ )	Densité des vallées
<b><i>Lv</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Largeurs des vallées
<b><i>Ma (i)</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Moyenne arithmétique des amplitudes de la $i^{\text{ème}}$ composante du profil
<b><i>Mr1</i></b>	(%)	Taux séparant les pics du profil écrêté (ISO 13565)
<b><i>Mr2</i></b>	(%)	Taux séparant les vallées du profil écrêté (ISO 13565)
<b><i>Pv</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Profondeurs des vallées
<b><i>Ra</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Rugosité arithmétique (ISO 4287)
<b><i>Rk</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Amplitude du cœur de la rugosité (ISO 13565)
<b><i>Rpk</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Hauteur des pics de la rugosité (ISO 13565)
<b><i>Rvk</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Profondeur des vallées de la rugosité (ISO 13565)
<b><math>\beta\text{v}</math></b>	( $^{\circ}$ )	Angle d'ouverture des vallées
<b><math>\Delta\text{Ma}</math></b>	(%)	Signature process multi-échelle d'une opération
<b><math>\Delta\text{Rk}</math></b>	(%)	Réduction relative des <i>Rk</i> après une opération
<b><math>\Delta\text{Rpk}</math></b>	(%)	Réduction relative des <i>Rpk</i> après une opération
<b><math>\Delta\text{Rvk}</math></b>	(%)	Réduction relative des <i>Rvk</i> après une opération
<b><i>Wa</i></b>	( $\mu\text{m}$ )	Ondulation arithmétique

## Symboles liés aux études statistiques

<b><i>Y</i></b>	(-)	Réponse mesurée
<b><math>\hat{Y}</math></b>	(-)	Réponse prédite
<b><math>\beta_i</math></b>	(-)	Coefficients de la <i>RLM</i>
<b><math>X_i</math></b>	(-)	Facteurs process
<b><i>p</i></b>	(-)	Nombre total de facteur
<b><math>R^2</math></b>	(-)	Coefficient de corrélation du modèle statistique
<b><math>Q^2</math></b>	(-)	Coefficient de prédictivité du modèle statistique
<b><math>F_{X_i}</math></b>	(-)	Critères de Fisher du facteur process $X_i$
<b><math>C_{X_i}</math></b>	(%)	Contributions au $R^2$ du facteur process $X_i$

# Table des abréviations

<b><i>AJM</i></b>	Abrasive Jet Machining
<b><i>AVT</i></b>	Amortisseurs de Vibration de Torsion
<b><i>COVNM</i></b>	Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
<b><i>ECM</i></b>	Electro Mechanical Texturing
<b><i>EHD</i></b>	Elasto-Hydro-Dynamique
<b><i>GES</i></b>	Gaz à Effet de Serre
<b><i>HD</i></b>	HydroDynamique
<b><i>HTHS</i></b>	High Temperature, High Shear (Haute Température, Haute Contrainte)
<b><i>LST</i></b>	Laser Surface Texturing
<b><i>MAPD</i></b>	Machine À Palier Dynamique
<b><i>MAPS</i></b>	Machine À Palier Statique
<b><i>MEB</i></b>	Microscope Électronique à Balayage
<b><i>NO<sub>x</sub></i></b>	Oxydes d'azote
<b><i>PFM</i></b>	Pertes par Frottement du Moteur
<b><i>PM10</i></b>	Particules fines de moins de 10 µm
<b><i>RLM</i></b>	Régressions Linéaires Multiples
<b><i>VMT</i></b>	Vibro Mechanical Texturing

*Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE entre le DIPM (Département Ingénierie Process Mécanique) de RENAULT, et le laboratoire MSMP (Mechanics, Surfaces and Material Processing) d'ARTS ET MÉTIERS PARISTECH de Châlons-en-Champagne. Cette activité de recherche, nécessairement limitée à trois années selon les textes officiels régissant les conventions CIFRE, a fait l'objet de plusieurs travaux de valorisation scientifique. Ces derniers sont détaillés à la fin du présent manuscrit. À l'heure où sont écrites ces lignes, plusieurs publications à caractère international sont par ailleurs toujours en cours de finalisation.*

## Introduction générale

Le développement des sociétés humaines a toujours été intimement lié aux frottements. Leur maîtrise est en effet ancestralement rattachée aux progrès de notre espèce. La production de feu par friction, qui tient une place centrale dans notre évolution, nous a par exemple permis de nous protéger des prédateurs, de cuire nos aliments, de fabriquer des outils et par là même, d'accroître nos facultés intellectuelles. Les premières sociétés ont par ailleurs cherché à supprimer l'usure et à diminuer le frottement dès la construction des premiers mécanismes (meules à grain, tours de poterie, chariot, crapaudines) [1]. Plusieurs millénaires après, ces derniers sont encore et toujours, à raison, au centre des préoccupations humaines.

On estime aujourd'hui qu'environ la moitié de l'énergie transformée par l'homme sur terre est perdue dans les frottements [2]. Malheureusement, une grande part de celle-ci se traduit en pollution particulièrement dangereuse pour l'environnement et notre santé. Avec plus d'un milliard de véhicules thermiques immatriculés, le secteur automobile, contribue largement au phénomène. Chaque véhicule perd environ un tiers de son énergie carburant dans les seuls frottements via le moteur, la transmission et la résistance au roulement [3]. Or, en Ile-de-France par exemple, le trafic routier représente à lui seul 57 % des émissions en oxydes d'azote ( $NO_x$ ), 17 % des Composés Organiques Volatils Non Méthaniques ( $COVNM$ ), 28 % des émissions en particules fines ( $PM_{10}$ ) et 32 % des Gaz à Effet de Serre ( $GES$ ) (**Figure 1.1**) [4]. Du fait de leur grand nombre, les véhicules particuliers sont généralement les plus gros contributeurs (**Figure 1.2**).

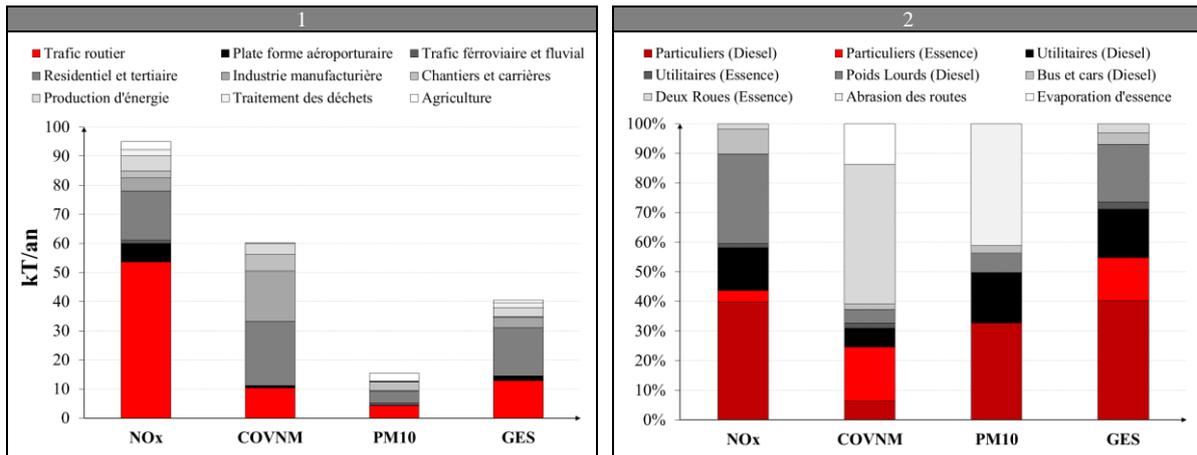


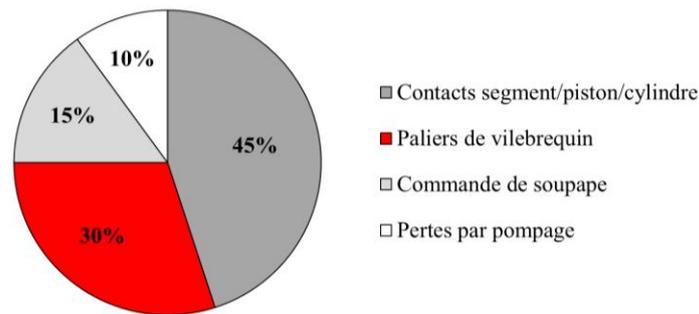
Figure 1 : Contributions du trafic routier à la pollution en Ile-de-France [4], global (1), détail (2)

Ce constat, aussi alarmant soit-il, ne doit cependant pas éclipser les progrès réalisés par les constructeurs en matière de dépollution (filtre à particules, pot catalytique, piège à  $NO_x$ , optimisation du mélange air/carburant, réduction de la cylindrée, recyclage des vapeurs d'essence et d'huile, réutilisation de gaz d'échappement, système « stop and start », etc.). La motorisation thermique est en perpétuelle mutation, et les innovations liées aux frottements sont nombreuses.

Les frottements moteur, qui consomment à eux seuls 11,5 % de l'énergie carburant [3], sont particulièrement étudiés. Les huiles (additifs), les revêtements (« Diamond Like Coating », « Bore Spray Coating ») et les états de surface font l'objet de toutes les attentions. Un certain nombre de travaux, menés sur les contacts segment/fût et came/poussoir, ont montré qu'il était possible de réduire sensiblement les frottements en produisant des espaces de rétention (cavités et vallées) sur les surfaces en contact. De telles surfaces, appelées textures anti-friction, pourraient possiblement se révéler pertinentes sur d'autres organes.

Au sein de l'ingénierie RENAULT, une telle texturation est de plus en plus envisagée sur les tourillons et manetons des vilebrequins séries. Deuxièmes contributrices aux Pertes par Frottements Moteurs (PFM) [3], ces portées représentent, au travers des paliers, un réel levier d'action pour la dépollution des moteurs thermiques (Figure 2). Les tourillons et manetons sont actuellement superfinis par toilage,

un procédé d'abrasion à la fois robuste et économique. Malheureusement, ce procédé semble peu adapté à la réalisation de textures anti-friction innovantes.



**Figure 2 : Contributions des différents organes du moteur aux PFM**

Ce travail de recherche s'intéresse à la texturation par toilage des portées de vilebrequins en acier. Il a pour objectif d'investiguer finement les capacités de texturation du procédé et de quantifier les potentiels gains fonctionnels réalisables. L'étude propose un ensemble d'analyses expérimentales visant à comprendre les limites texturales observées en usine et offre des solutions innovantes afin d'accroître très sensiblement le potentiel texturant du procédé de toilage. S'articulant autour du triptyque Process/Texture/Fonctionnalité, ce travail se positionne dans une démarche globale en s'intéressant à la fois à la texturation laser, la caractérisation des surfaces texturées et à l'influence des textures sur la fonctionnalité statique et dynamique des paliers. Il s'agit de conduire une recherche capable de faire apparaître les mécanismes physiques en lien avec les conditions opératoires et le besoin fonctionnel traduit, dans un premier temps, par l'intermédiaire des critères d'état de surface puis, dans un second temps, par l'intermédiaire des critères fonctionnels. Plus largement, ce travail permet d'analyser le lien entre textures et fonctionnalités et contribue à une meilleure compréhension des phénomènes tribologiques relatifs aux paliers de vilebrequin.

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

- **un chapitre de synthèse bibliographique** subdivisé en quatre parties. Une première a pour objectif d'introduire l'environnement et la physique des paliers. Une seconde s'intéresse à l'interaction entre textures et fonctionnalités. Une troisième partie relate les différents travaux scientifiques correspondant au procédé de toilage. Et, enfin une dernière détaille les procédés de texturation les plus courants ;
- **le deuxième chapitre** expose la démarche, les dispositifs ainsi que les protocoles expérimentaux mis en place. Il s'articule en quatre parties. La première partie recense les données relatives aux éprouvettes d'essais. La seconde concerne les moyens de fabrication. La troisième partie s'intéresse à la caractérisation d'état de surface. Et, enfin la dernière concerne les données relatives à la caractérisation fonctionnelle ;

- **le troisième chapitre** analyse les limites du toilage dans les configurations usines (toilage conventionnel) puis propose une solution innovante afin d'accroître le potentiel textural du procédé. Il est décliné en trois parties. La première identifie statistiquement les limites texturales du toilage conventionnel. La seconde tente d'en expliquer les causes. Et, enfin, la troisième, qui tente de lever ces limites, s'intéresse au potentiel textural de nouvelles bandes abrasives de toilage, jusqu'ici non utilisées par les constructeurs automobiles ;
- **le quatrième chapitre**, qui capitalise les connaissances du chapitre précédent, étudie les capacités de texturation d'une nouvelle configuration de toilage combinant plusieurs morphologies d'abrasifs (toilage texturant). Il se compose de trois parties. La première introduit la notion de toilage texturant et y associe des configurations types. La seconde étudie statistiquement les possibilités offertes par ces configurations. Et, enfin, la troisième, qui complète la seconde, s'intéresse aux trajectoires de grains et à la prédiction des angles de stries, critère souvent jugé influent dans la littérature scientifique ;
- **le cinquième chapitre** s'intéresse à la pertinence fonctionnelle de différentes textures toilées (par toilage conventionnel et texturant) et hybrides (par toilage et *LST*). Il est constitué de trois parties. La première décrit les caractéristiques des textures testées. La seconde étudie l'influence fonctionnelle des textures lors d'un chargement statique, la troisième lors d'un chargement dynamique. Plusieurs grandeurs fonctionnelles sont ainsi analysées : couple de frottement, température de contact, courbe de Stribeck, usure des portées et des coussinets.

# **Chapitre I.**

## **Étude bibliographique**

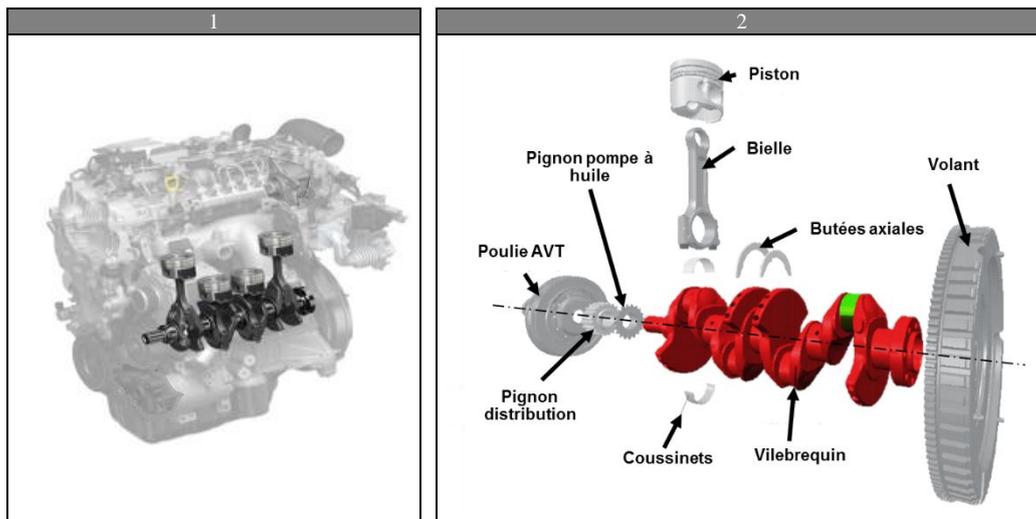
## **Introduction**

L'objectif de cette étude bibliographique consiste à réaliser un état des lieux des travaux de recherche portant sur la texturation anti-friction. L'étude est divisée en quatre parties. La première fera l'objet de l'introduction de la problématique dans un contexte industriel en mettant l'accent sur l'environnement du vilebrequin et les verrous technologiques. La seconde sera dédiée au lien entre la morphologie de textures et ses performances fonctionnelles. La troisième sera consacrée au procédé de toilage, les phénomènes physiques mis en jeu et l'identification des paramètres process les plus influents sur l'état de surface. Enfin la dernière ouvrira l'étude à d'autres procédés de texturation afin d'analyser les avantages et les inconvénients de chacun en vue d'une éventuelle application industrielle.

## I.1. Les paliers de vilebrequin dans l'attelage mobile

### I.1.1. Généralités

Le vilebrequin est la pièce maîtresse de l'attelage mobile. Sa fonction principale est de convertir, au moyen d'un mécanisme bielle manivelle, la force appliquée par la pression de combustion sur le piston en un couple utile disponible à l'arbre de sortie du moteur.



**Figure I.1 : Attelage mobile, localisation (1), vue éclatée (2)**

Le vilebrequin est logé dans le carter cylindre (**Figure I.1.1**). Il reçoit d'un côté le volant moteur, de l'autre la pignonnerie dédiée à l'entraînement de la distribution, de la pompe à huile et de la poulie Amortisseurs de Vibration de Torsion (AVT) (**Figure I.1.2**). Il est généralement en fonte (cas des moteurs à faibles puissances spécifiques) ou en acier (cas des moteurs à fortes puissances spécifiques). La très grande majorité des vilebrequins est fabriquée par des opérations successives de matriçage à chaud, de tournage, de perçage, de trempe par induction, de rectification, de toilage et d'équilibrage statique et dynamique. Le corps d'un vilebrequin est constitué de masselottes d'équilibrage et de plusieurs portées. Parmi elles, on distingue :

- les tourillons. Ils correspondent aux portées assurant la liaison entre le vilebrequin et le carter cylindre. Ces derniers sont généralement au nombre de quatre pour les moteurs à trois ou six cylindres et au nombre de cinq pour les moteurs quatre cylindres ;
- les manetons. Ils correspondent aux portées assurant la liaison entre le vilebrequin et les bielles. Hormis pour des applications très spécifiques, chaque maneton reçoit une bielle.

Au même titre que l'ensemble du vilebrequin, ces portées sont soumises à des contraintes multiples (flexion, torsion et vibratoire) et extrêmes dont la part est variable en fonction du régime moteur et de la charge. À titre d'exemple, un palier de tête bielle reçoit un pic de charge proche de dix tonnes au

moment de la combustion... Pour assurer les fonctionnalités tribologiques du contact dans ces conditions, des demi-coussinets, que nous appellerons par la suite coussinets, sont insérés à l'interface entre les portées du vilebrequin et les alésages de logement. Ces derniers sont généralement multicouches, chaque couche ayant une épaisseur de quelques micromètres et des caractéristiques fonctionnelles qui lui sont propres. En outre, les paliers sont alimentés avec de l'huile par l'intermédiaire de galeries percées directement dans la masse (sous une pression de quelques bars). Cette huile permet de maintenir une distance entre les deux surfaces antagonistes, de préserver l'intégrité des pièces dans les conditions les plus sévères aux moyens d'additifs spécifiques et enfin d'évacuer la majorité de la chaleur provenant du cisaillement de l'huile ou des aspérités de surface.

### I.1.2. Paramétrage des paliers

Dans le plan orthogonal à l'axe de rotation, on peut schématiser un palier de façon simple par deux cylindres de largeur  $L$  et de rayons voisins, l'un propre à la portée de vilebrequin de centre  $O_1$  et de rayon  $R_1$  et l'autre, propre au coussinet de centre  $O_2$  et de rayon supérieur  $R_2$  (**Figure I.2**). On appelle jeu radial, la valeur  $C = R_2 - R_1$ . En fonctionnement et en considérant le palier rigide, la localisation de l'arbre par rapport au coussinet est habituellement paramétrée en coordonnées cylindriques par la distance  $O_1O_2$ , appelée excentricité  $e$ , et l'angle que fait la charge  $\vec{W}$  avec le vecteur des centres  $\overline{O_1O_2}$ , appelé angle de calage  $\Phi$ . L'excentricité relative  $\varepsilon$ , donnée en équation (1) est également très utilisée.

$$\varepsilon = \frac{e}{C} \quad (1)$$

La valeur de l'épaisseur minimale  $h_{min}$  du film lubrifiant est alors donnée par l'équation (2).

$$h_{min} = C(1 - \varepsilon) \quad (2)$$

En appliquant la règle des sinus au triangle  $O_1MO_2$  et en négligeant les termes très petits devant l'unité, on peut déterminer l'expression générale de l'épaisseur du film d'huile  $h$ . Son expression est donnée par l'équation (3).

$$h(\theta) = C + e \cos(\theta) \quad (3)$$

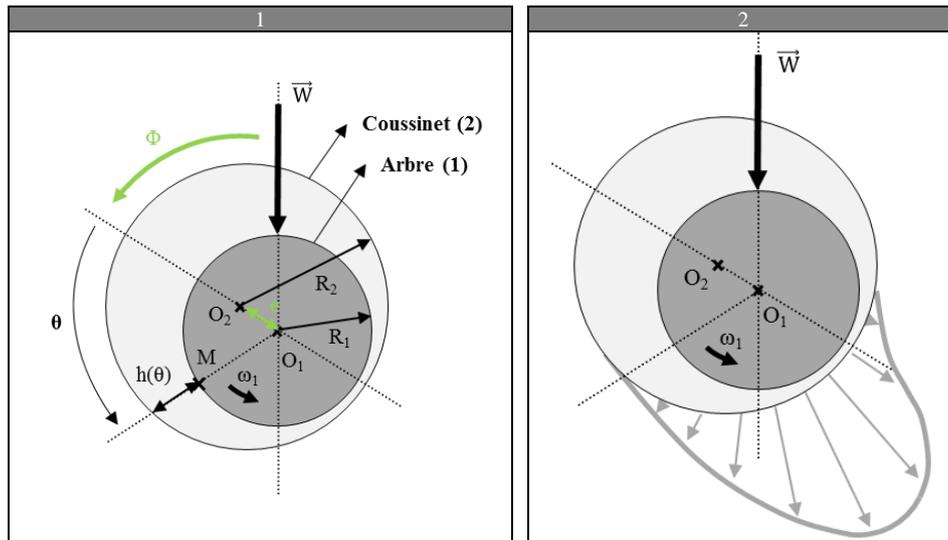


Figure I.2 : Paramétrage d'un palier cylindrique (1), distribution du champ de pression (2)

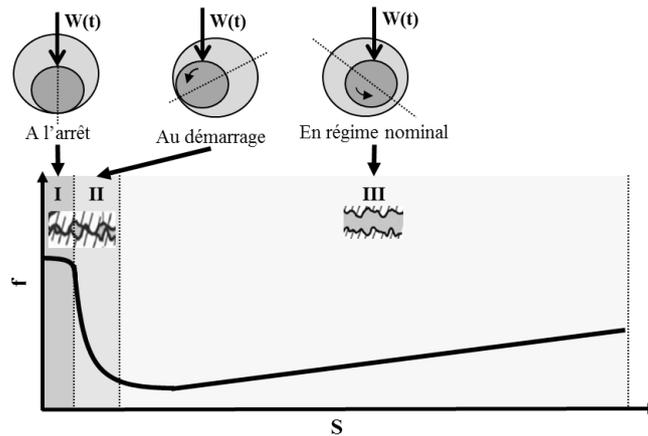
### I.1.3. Les régimes de fonctionnement

Il est utile de développer une classification des différentes conditions de fonctionnement des paliers pour permettre une analyse physique de ces derniers. Dans la pratique, la classification la plus fréquemment adoptée est basée sur le rapport qui existe entre le coefficient de frottement global du système et des paramètres tels que la vitesse de rotation,  $\omega_1$ , la viscosité du lubrifiant  $\mu$ , la charge  $W$ , la température  $T_c$ , l'épaisseur minimale du film d'huile  $h_{min}$ .

Historiquement c'est Richard Stribeck, en 1902, qui le premier établit une classification de ce type [5]. Ce graphe est toujours utilisé et a pris le nom de « courbe de Stribeck ». Il semble que celle-ci ait été initialement établie pour définir la relation qui existe entre le coefficient de frottement  $f$  d'un palier et l'épaisseur du film d'huile  $h$ , puis ultérieurement avec le nombre de Hershey et le nombre de Sommerfeld [6]. C'est ce dernier que nous utiliserons dans la suite de ce travail. Plusieurs formulations du nombre de Sommerfeld existent. Nous utiliserons, dans ce travail, l'expression anglo-saxonne. Celle-ci est donnée en équation (4).

$$S = \frac{\mu L R_1 \omega_1}{W} \left( \frac{R_1}{C} \right)^2 \quad (4)$$

Avec  $S$  le nombre de Sommerfeld,  $\mu$  la viscosité dynamique,  $L$  la largeur de contact,  $R_1$  le rayon de l'arbre,  $\omega_1$  la vitesse de rotation de l'arbre par rapport au palier, et  $W$  la charge appliquée. L'allure générale d'une courbe de Stribeck est décrite en **Figure I.3**. Celle-ci est valable pour une charge appliquée fixe en intensité et en direction. Celle-ci nécessite également de considérer le lubrifiant sans débris. Cela induit qu'il n'y ait pas de frottement ou d'usure générée par érosion ou abrasion due à la contamination par des particules dures.



**Figure I.3 : Courbe de Stribeck représentant les trois régimes de fonctionnement**

Cette courbe a permis de différencier trois principaux modes de fonctionnement, appelés également régimes de lubrification. Ceux-ci sont identifiés en fonction du type d'interaction de contact entre la surface de la portée et la surface antagoniste, généralement un coussinet. D'une manière tout à fait générale, l'évolution du frottement dans le palier est couplée à la localisation spatiale de l'arbre. Analysons ces régimes lors du démarrage d'un palier alimenté en huile et en ne faisant varier que la vitesse de rotation  $\omega_1$  de la portée.

À l'arrêt, la pompe n'alimente pas encore le contact en huile et le seul lubrifiant qui soit dans le palier est celui qui est resté piégé après l'arrêt précédent. L'arbre repose sur le coussinet et est à l'opposé de l'effort appliqué (**Figure I.3**). Une fois en rotation, il commence par rouler puis par glisser sur la surface du coussinet. La charge appliquée sur le palier  $W$  est alors supportée par les aspérités en contact. Le frottement et l'usure sont importants. C'est le régime I, dit « limite ». Les surfaces réagissent avec le peu d'huile présente et adsorbent un fin film de lubrifiant sur quelques Angströms, ce qui permet de réduire le coefficient de frottement. Celui-ci se rompt cependant ponctuellement lors de l'entrechoquement entre aspérités, ce qui augmente le coefficient de frottement et initie l'usure par adhérence, voire même le transfert de matière. Les additifs anti-frictions et anti usures, généralement à base de soufre et de phosphore, tiennent une place centrale dans ce régime en permettant de moduler les conditions d'apparition et l'épaisseur du film adsorbé.

Quand la vitesse de rotation  $\omega_1$  augmente, la pompe à huile alimente le circuit de lubrification. Le lubrifiant présent entre l'arbre et le coussinet est alors entraîné par l'arbre en rotation dans un convergent (on parle de coin d'huile) puis dans un divergent (**Figure I.2.2**). L'excès de lubrifiant dans la zone active (convergent) combiné à la cavitation de lubrifiant dans la zone inactive (divergent) génère alors un effort qui vient s'opposer à la charge appliquée  $W$ . La portée commence à s'éloigner du coussinet. Cependant, si la vitesse de rotation est trop faible, les efforts extérieurs sont à la fois encaissés par les contacts entre aspérités et par le film d'huile sous pression. C'est le régime II, dit « mixte ». La diminution progressive de la surface réelle de contact, donc de l'adhésion, ainsi que de la force appliquée abaisse

progressivement le coefficient de frottement  $f$ . Le rôle de l'adsorption, et donc des additifs, est moins prépondérant. Le frottement chute jusqu'à atteindre un minimum (**Figure I.3**), qui survient lorsque l'épaisseur du film d'huile devient égale à la hauteur des pics de rugosité.

Enfin, lorsque la vitesse de rotation de l'arbre  $\omega_1$  continue d'augmenter, les pièces s'éloignent encore davantage l'une de l'autre et le film d'huile sous pression finit par supporter seul la charge. C'est le régime III, dit « hydrodynamique ». Le coefficient de frottement est alors imputable aux seuls cisaillements de l'huile. Le frottement augmente de manière linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur du film d'huile  $h$  et du nombre de Sommerfeld  $S$  (**Figure I.3**).

Bien évidemment, dans le cas réel d'un palier de vilebrequin, la charge appliquée n'est pas constante. Pour une même vitesse de rotation  $\omega_1$ , les pics de chargement dus aux explosions exercées par les bielles sur le vilebrequin entraînent des transitions permanentes entre les différents régimes. Tout est fait cependant afin que le fonctionnement nominal se fasse dans le régime hydrodynamique : il évite l'usure et limite au minimum possible les pertes d'énergie par frottement. Intéressons-nous de plus près à l'évolution des grandeurs fonctionnelles dans ce régime et pour un cas simplifié.

#### I.1.4. Cas du palier lisse court en régime hydrodynamique

La physique du palier en régime hydrodynamique est principalement gouvernée par le principe fondamental de la dynamique, la mécanique des fluides, et, si les effets thermiques sont considérés, par les équations de l'énergie et les équations de conduction de chaleur. Concernant la mécanique des fluides, l'équation de Reynolds est généralement utilisée (son utilisation nécessite plusieurs hypothèses qui ne sont pas rappelées ici). Celle-ci est donnée en équation (5) dans le repère cylindrique.

$$\frac{1}{R_1^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6(\omega_1 - 2\dot{\phi}) \frac{dh}{d\theta} + 12\dot{e} \cos(\theta) \quad (5)$$

Cette équation aux dérivées partielles du second ordre de type elliptique n'admet pas, sauf dans quelques cas simples, de solutions analytiques. Elle est alors généralement résolue en appliquant la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis. Cependant, il existe des solutions analytiques, moyennant certaines hypothèses [7,8].

Ocvirk [8] s'est intéressé au cas où la longueur du palier est très faible devant son diamètre. Ce cas très particulier, appelé hypothèse du « palier lisse court », permet de négliger le gradient de pression circonférentielle. Cette hypothèse est justifiée pour des rapports largeur sur diamètre inférieur à 0,125. Dans la pratique, elle est encore utilisée pour des rapports de 0,5 car l'erreur commise reste faible sur le couple et la charge. Cette solution est particulièrement intéressante pour notre application car les rapports largeur sur diamètre des paliers de vilebrequin sont généralement compris en deçà de cette

valeur (typiquement entre 0,25 et 0,45 [9]). Intéressons-nous de plus près à l'expression des principales grandeurs fonctionnelles dans ce cas simplifié.

Le détail des calculs qui suivent est donné dans les références [1,2]. Nous nous limitons ici au régime hydrodynamique établi et nous supposons l'écoulement du fluide isotherme, laminaire et permanent. Les génératrices de la portée et du coussinet sont en outre considérées parfaitement parallèles. Les différentes hypothèses permettent la simplification de l'équation de Reynolds (5). Celle-ci devient alors l'équation (6).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu\omega_1 \frac{dh}{d\theta} \quad (6)$$

Considérons les conditions aux limites de Gumbel :

$$\begin{aligned} p(\theta = 0, z) &= 0 \text{ et } p(\theta = \pi, z) = 0 \\ p(\theta, z) &= 0 \text{ si } \pi < \theta < 2\pi \end{aligned}$$

La pression hydrodynamique  $p$  est obtenue en intégrant l'équation (6) par rapport à  $z$ . Celle-ci est donnée par l'équation (7).

$$p(\theta, z) = -\frac{3\mu\omega_1}{C^2} \left( z^2 - \frac{L^2}{4} \right) \frac{\varepsilon \sin(\theta)}{(1 + \varepsilon \cos(\theta))^3} \quad (7)$$

Les équations d'équilibre du principe fondamental de la dynamique s'énoncent :

$$\begin{cases} W \cos(\Phi) + L \int_0^{2\pi} p \cos(\theta) R_1 d\theta = 0 \\ -W \sin(\Phi) + L \int_0^{2\pi} p \sin(\theta) R_1 d\theta = 0 \end{cases}$$

La résolution du système permet de déterminer l'expression de la charge admissible par le film  $W$  ainsi que l'angle de calage  $\Phi$ . Ces derniers sont donnés par les équations (8) et (9).

$$W = \mu L R_1 \omega_1 \left( \frac{R_1}{C} \right)^2 \left( \frac{L}{D_1} \right)^2 \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon^2)^2} \sqrt{16\varepsilon^2 + \pi^2(1 - \varepsilon^2)} \quad (8)$$

$$\tan(\Phi) = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{1 - \varepsilon^2}{\varepsilon}} \quad (9)$$

Le couple de frottement  $C_f$  est ensuite obtenu par intégration des contraintes de cisaillement sur la surface de l'arbre. Son expression finale, tout calcul fait, est donnée en (10).

$$Cf = \frac{\mu L R_1^3 \omega_1}{C} \frac{\pi(2 + \varepsilon)}{(1 + \varepsilon)\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (10)$$

Le coefficient de frottement sur l'arbre est alors donné par l'équation (11).

$$f = \frac{Cf}{R_1 W}$$

$$f = \frac{\mu L R_1^2 \omega_1}{C W} \left( \frac{\pi(2 + \varepsilon)}{(1 + \varepsilon)\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) \quad (11)$$

Sans charge  $W$ , l'équation (8) donne une excentricité relative  $\varepsilon$  nulle et le couple de frottement de l'équation (10) s'exprime alors par la loi de Petroff selon l'équation (12).

$$Cf_{\text{petroff}} = \frac{2\pi\mu L R_1^3 \omega_1}{C} \quad (12)$$

Cette loi est intéressante car elle montre clairement qu'il est beaucoup plus efficace de réduire les frottements par la réduction du rayon  $R_1$  plutôt que la largeur de contact  $L$ . Réalisons une application numérique afin de quantifier les ordres de grandeur et suivre l'évolution des principales grandeurs fonctionnelles.

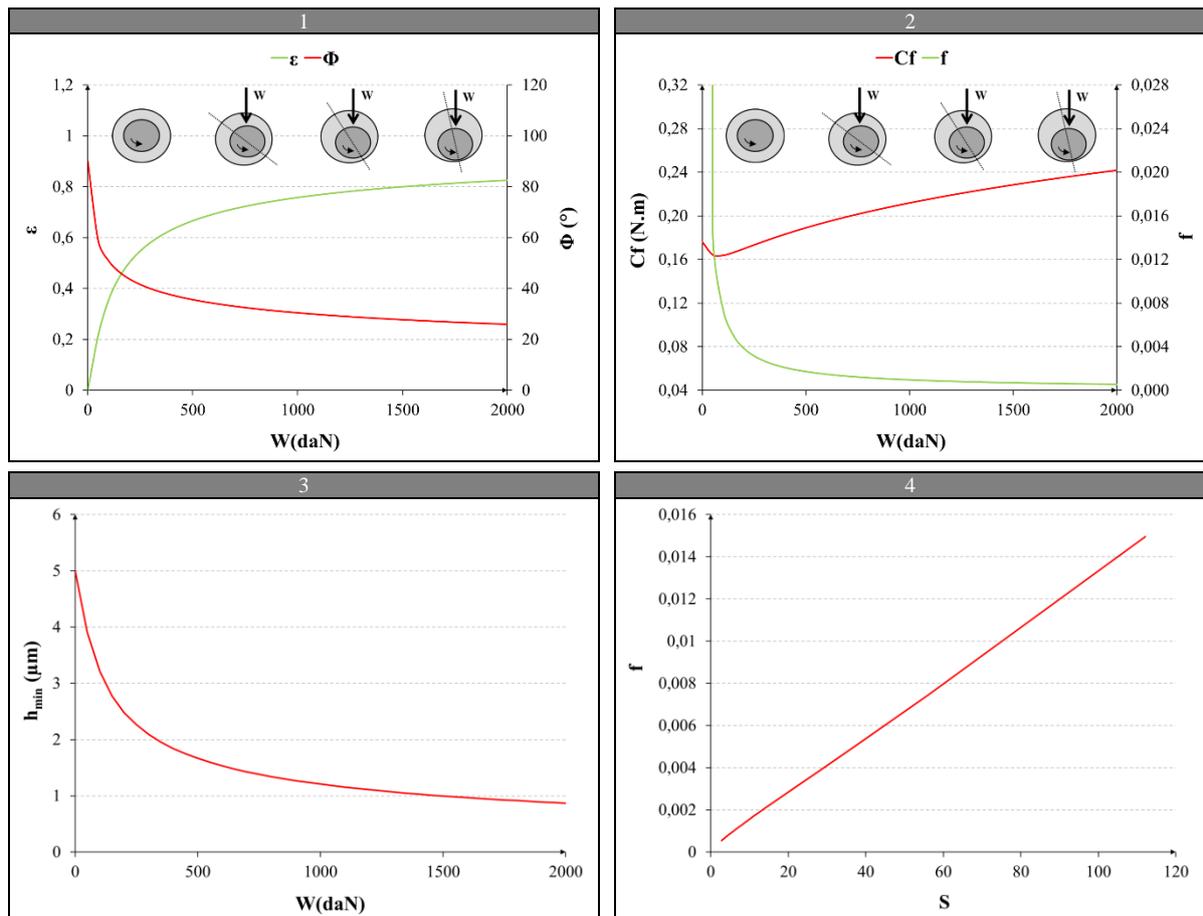
Soit les données numériques données en **Table I.1**.

**Table I.1 : Exemple de données numériques relatives à un palier de vilebrequin**

Paramètres	Not.	Valeur
Rayon	$R_1$	21,985 mm
Largeur du contact	$L$	15 mm
Viscosité dynamique	$\mu$	0,0035 Pa.s
Jeu radial	$C$	5 $\mu$ m
Vitesse de rotation de la portée	$N_1$	2400 tr/min

Considérons une variation croissante de la charge appliquée  $W$ . Les résultats de l'application numérique sont récapitulés en **Figure I.4**. On observe que l'augmentation de la charge  $W$  en régime hydrodynamique entraîne :

- Un alignement progressif de la ligne des centres sur la direction de la charge ;
- Une réduction de l'épaisseur minimale du film d'huile  $h_{\min}$  ;
- La réduction du coefficient de frottement  $f$  ;
- Une augmentation lente du couple de frottement  $Cf$  ;
- Et enfin, comme attendu, la linéarité du coefficient de frottement  $f$  avec le nombre de Sommerfeld  $S$ .



**Figure I.4 : Évolutions des principales grandeurs fonctionnelles d'un palier**

Il est intéressant de suivre l'évolution circonférentielle de la pression hydrodynamique  $p$  et de l'épaisseur du film d'huile  $h$ . Plaçons-nous pour cela au centre de la portée ( $z=0$ ) et considérons deux charges  $W$ , respectivement 1000 daN et 2000 daN. Les résultats sont donnés en **Figure I.5**. On observe que :

- la pression hydrodynamique  $p$  croît puis décroît pour enfin devenir nulle à partir de  $\theta = 180^\circ$ . Cette zone décrit la dislocation par cavitation du film d'huile dans la zone divergente ;
- l'augmentation de la charge  $W$  augmente la pression hydrodynamique  $p$  et diminue l'épaisseur minimale  $h_{min}$  du film d'huile ;
- et enfin, que l'ordre de grandeur de la pression hydrodynamique  $p$  est d'environ une centaine de MPa.

Comme nous venons de le voir, l'ensemble des hypothèses formulées permet la résolution analytique des équations. Bien que très pertinente dans un premier temps afin de préjuger de l'influence de principales variables, cette approche ne doit en rien faire oublier que le cas réel est beaucoup plus complexe (la charge est dynamique, des phénomènes thermiques et élastiques ont lieu, les pièces ne sont pas lisses ni parfaitement parallèles, l'huile peut être contaminée, etc.). Notre travail ne cherchant pas à simuler le contact, nous nous ne concentrerons pas davantage sur cet aspect.

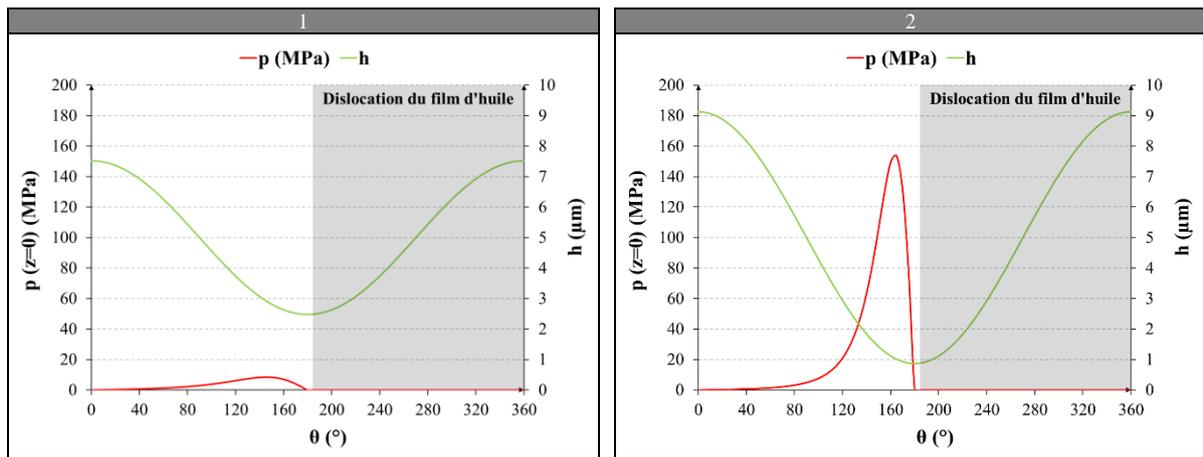


Figure I.5 : Évolutions circumférentielles du champ de pression et de l'épaisseur du film d'huile, pour une charge  $W$  de 200 daN (1), pour une charge  $W$  de 2000 daN (2)

### I.1.5. Leviers d'action sur les grandeurs fonctionnelles des paliers

Il existe une multitude de méthodes pour agir sur les performances fonctionnelles des paliers, et ce, quel que soit le régime de fonctionnement. On distingue :

- le dimensionnement (rayon, largeurs, etc.) ;
- les propriétés matériaux (dureté, réactivité chimique, etc.) ;
- les propriétés de l'huile (viscosité, additifs, filtrage, etc.) ;
- la forme (rectitude, circularité, etc.) ;
- les états de surface (rugosité, ondulation, etc.)

La texturation anti-friction se situe bien entendu dans ce dernier point.

### I.1.6. Conclusion

Le fonctionnement des paliers en régime hydrodynamiques et les grandeurs associées sont aujourd'hui bien modélisés au niveau macroscopique. Au-delà de la prise en compte des effets thermiques, dynamiques et de l'élasticité des matériaux, les simulations les plus complètes permettent d'ailleurs de considérer certains défauts macroscopiques tels que les défauts de rectitude ou de circularité, ou encore les rugosités de surfaces.

## I.2. Impacts fonctionnels de la texturation

### I.2.1. La texturation

#### I.2.1.a. Définition

Toutes les surfaces, quelle que soit leur nature, présentent un profil géométrique unique constitué d'une multitude d'éléments individuels (aspérités, protubérances, irrégularités, creux, bosses, etc.). Désigné par différents termes selon le contexte (état de surface, texture, topographie, cartographie etc.), l'ensemble de ces éléments devient fondamental dès lors que l'on étudie le phénomène de frottement.

La texturation consiste, dans la définition la plus courante, à générer des morphologies de surface maîtrisées, appelées textures, afin de remplir une fonctionnalité donnée. On peut distinguer quatre grandes familles de textures (**Figure I.6**) :

- les textures de type « stries » (**Figure I.6.1** et **Figure I.6.2**), formées de stries continues très denses. Dans ce type de morphologie, la répartition des hauteurs du profil de rugosité est symétrique par rapport à la ligne moyenne. C'est ce type de texture que nous trouvons aujourd'hui sur les vilebrequins des véhicules série du groupe RENAULT ;
- les textures de type « plateaux/vallées » (**Figure I.6.3** et **Figure I.6.4**), formées de plateaux fins et de vallées continues plus ou moins profondes. Dans ce type de morphologie, la répartition des hauteurs du profil de rugosité est dissymétrique par rapport à la ligne moyenne ;
- les textures de type « poli miroir » (**Figure I.6.5** et **Figure I.6.6**), formées d'une surface de très faible rugosité, invisible à l'œil nu (ce qui implique, par considération de la longueur d'onde la plus basse de la lumière visible,  $R_z < 0,380 \mu\text{m}$ ) ;
- les textures de type « hybride » (**Figure I.6.7** et **Figure I.6.8**), qui combinent l'une des textures précédentes avec des cavités macroscopiques non continues. Il s'agit généralement de formes hémisphériques. Comme pour les textures de type « plateaux/vallées », la répartition des hauteurs du profil de rugosité est dissymétrique par rapport à la ligne moyenne. Nous pouvons caractériser ces espaces de rétention suivant leurs formes (circulaire, triangulaire, etc.) dans différents plans de coupe, leurs densités (rapport entre la surface recouverte par les espaces de rétention et la surface apparente totale), leurs dimensions (diamètre, longueur, etc.) et leurs anisotropies (caractéristiques angulaires).

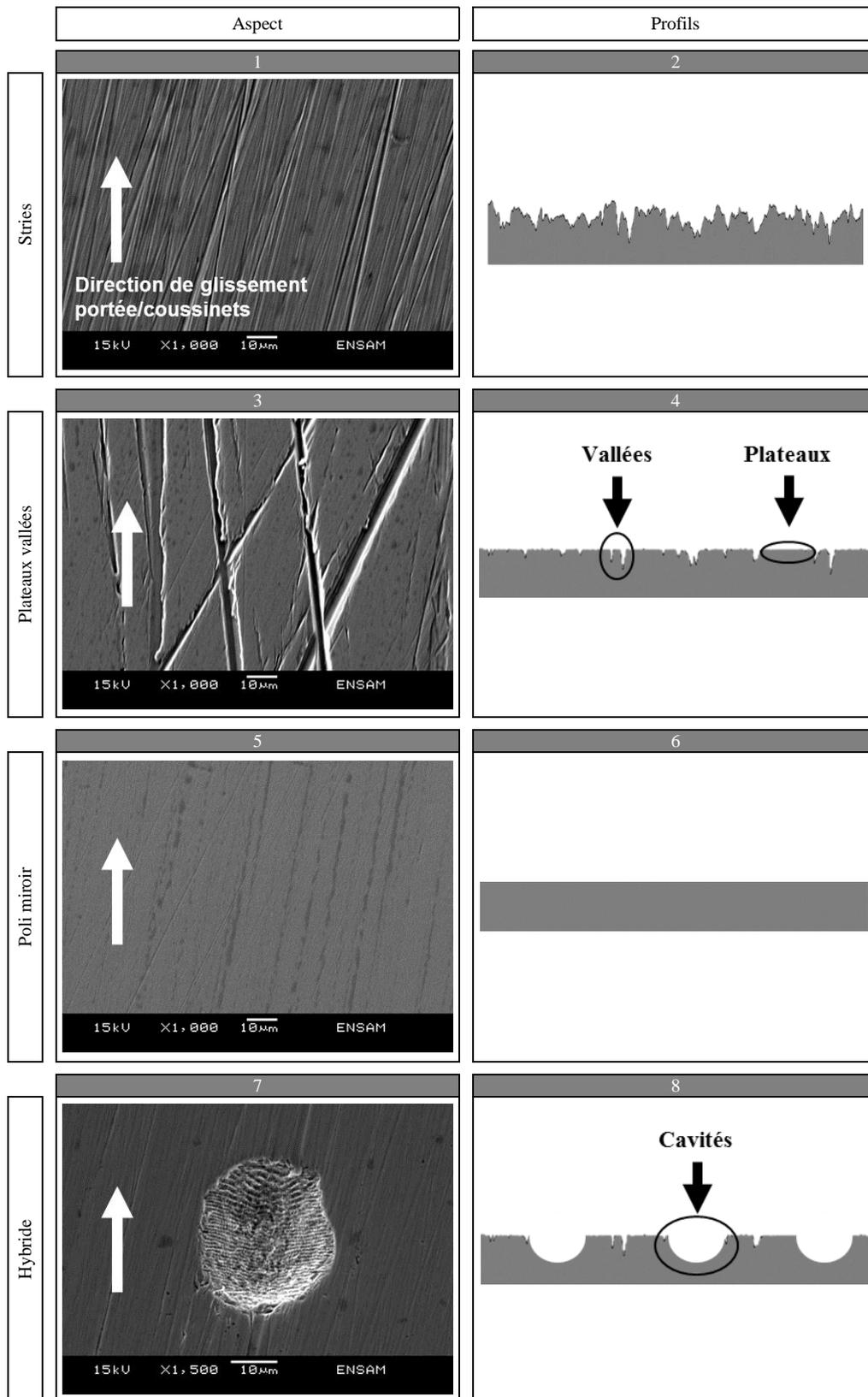
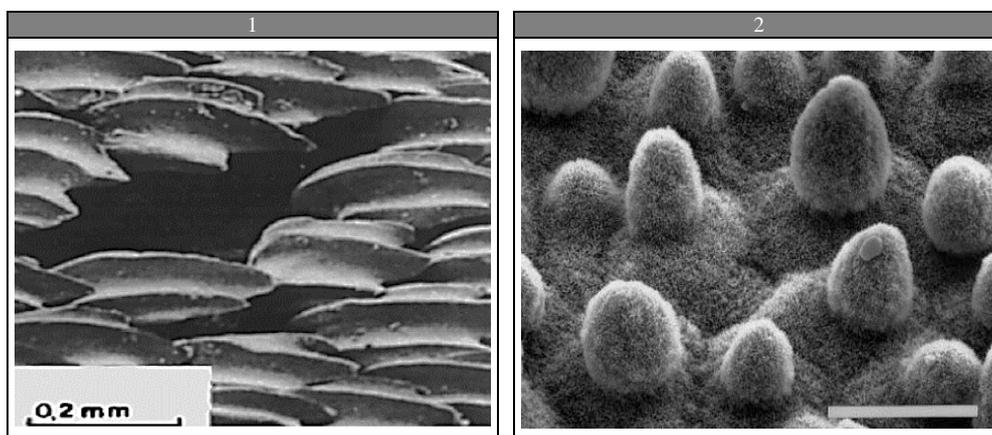


Figure I.6 : Les quatre grandes familles de textures

### I.2.1.b. Historique

L'utilisation des morphologies de surface à des fins fonctionnelles n'est pas nouvelle. Répondant à des

problématiques diverses, il est même possible de l'observer dans la nature à travers la faune et la flore, (**Figure I.7**). Citons par exemple la peau de requin dont les denticules permettent de réduire la résistance au fluide [10], la peau de l'éléphant, profondément striée, qui permet de retenir l'eau afin d'évacuer la chaleur corporelle, ou encore la feuille de lotus dont la surface est recouverte d'une cire structurée super hydrophobe [11].



**Figure I.7 : Clichés de textures fonctionnelles naturelles, peau de requin [10] (1), feuille de lotus [11] (2)**

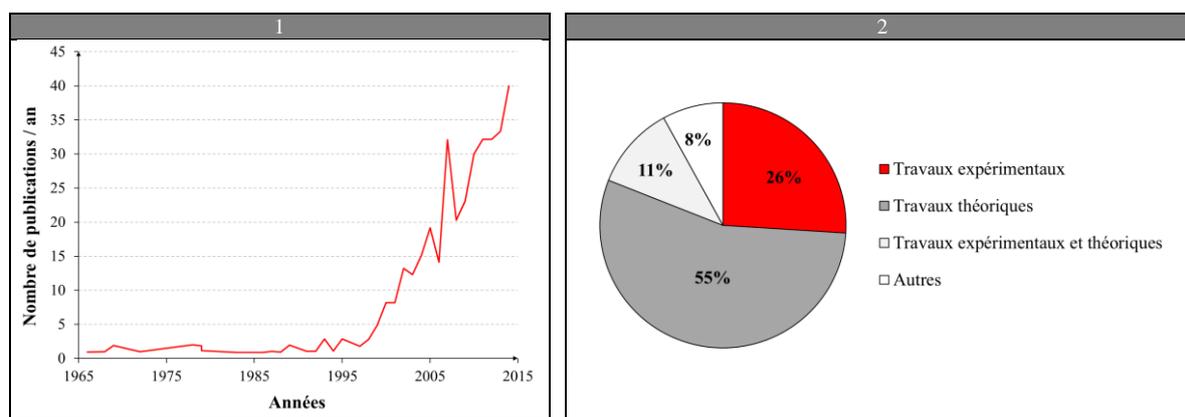
En ce qui concerne l'Homme, l'influence de l'état de surface sur les performances tribologiques est connue depuis le Moyen âge. Les premières études recensées ont été réalisées au XV<sup>ème</sup> siècle par Léonard de Vinci (1452-1519), qui est le premier à avoir formalisé le phénomène en observant expérimentalement, dans un contact sec, une dépendance importante entre la rugosité et le coefficient de frottement. Des siècles plus tard, cette interaction a été théorisée par les apports successifs de Guillaume Amontons (1663-1705), Bernard Forrest Belidor (1697-1761) et Charles Augustin Coulomb (1736-1806). Les travaux sur la thématique de frottement se sont littéralement multipliés, peu après, avec le début de la Révolution Industrielle. C'est alors que sont apparues les premières études relatives à la lubrification des paliers.

Gustav Adolph Hirn (1815-1890) puis Nikolai Pavlovitch Petrov (1836-1920) sont sans conteste les premiers à s'être intéressés expérimentalement aux frottements dans les paliers lubrifiés. Ils découvrirent la loi de variation du frottement avec la vitesse de rotation et conceptualisèrent, pour la première fois, les différents régimes de lubrification. En parallèle, les mesures de Beauchamp Tower (1845-1904) sur la distribution de pression hydrodynamique au sein des paliers permirent à Osborne Reynolds (1842-1912) de formuler les désormais célèbres équations qui portent aujourd'hui son nom. En 1902, Richard Stribeck (1861-1950) prolongea les résultats de Hirn et Petroff en montrant que l'évolution du coefficient de frottement dépendait directement de l'épaisseur du film d'huile et du nombre adimensionné de Hershey. Les décennies qui suivirent furent marquées par l'arrivée des techniques de caractérisation et de super finition de surface. Celles-ci permirent aux ingénieurs de fabriquer des surfaces mieux maîtrisées et fonctionnellement optimisées.

Les premiers travaux spécifiquement dédiés à la fabrication de rugosité anti-friction datent des premières machines de rodage de fûts de cylindres, c'est-à-dire quelques années avant la Seconde Guerre Mondiale. Les ingénieurs en charge d'étudier le contact Segment/Piston/Cylindre montrèrent alors que les stries générées par abrasion pouvaient servir de réservoir de lubrifiant, permettre une meilleure distribution de l'huile dans le contact et que leur anisotropie conditionnait fortement la réponse en frottement.

Pour autant, ce n'est qu'à partir des années soixante que le terme texturation apparaît. Hamilton et al. [12], souvent considérés dans la littérature comme les pionniers de la texturation, étudient, en 1966, l'influence d'une texture réalisée par photogravure sur le fonctionnement d'un joint d'étanchéité. Ils observèrent que la texture augmentait significativement la capacité de charge en régime hydrodynamique et interprétèrent cet effet comme la conséquence du phénomène de cavitation dans les zones divergentes du film. Leurs travaux marquèrent véritablement un tournant. Beaucoup de travaux numériques furent alors effectués afin de comprendre plus finement la phénoménologie sous-jacente [13–23].

À la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, le développement des procédés de micro-texturation (laser, électroérosion, micro-sablage, etc.), des moyens de mesure (interféromètre, etc.) ainsi que la forte croissance des puissances de calcul ont ouvert en grand le champ des possibles. Le nombre d'études a alors augmenté exponentiellement. Une étude de Gropper et al. [24] datant de 2015 montre toute l'ampleur de l'effort mondial de recherche sur le sujet (**Figure 1.8**). Outre la spectaculaire croissance du nombre de publications, on remarque qu'il y a deux fois plus de travaux théoriques que de travaux expérimentaux.



**Figure 1.8 : Effort de recherche mondial sur la texturation [24], nombre de publications par année (1), type de recherche (2)**

### 1.2.1.c. Phénoménologie de l'effet fonctionnel de la texturation

La compréhension des mécanismes inhérents à l'effet de la texturation fait toujours l'objet de vifs débats dans la communauté scientifique. Bien qu'il n'y ait pas de convergence générale sur la phénoménologie,

plusieurs mécanismes élémentaires semblent toutefois avoir été identifiés au cours des années. Ainsi, et selon les articles récents, les textures pourraient :

- piéger les débris qui résultent à cause de l'usure, ce qui diminue le frottement (régime limite et mixte) [25–30];
- réduire la surface de contact et diminuer par conséquent le nombre d'interactions entre les aspérités (régime limite et mixte) [31–34];
- agir comme des réservoirs qui ont pour rôle d'alimenter et d'assurer une meilleure distribution du lubrifiant dans la zone de contact (régime limite et mixte) [31–40];
- générer, par cavitation de l'huile, une distribution asymétrique de la pression, ce qui accroît la portance hydrodynamique (régime mixte et hydrodynamique) [41–47];
- augmenter, par effet de piézo-viscosité, l'épaisseur de film d'huile, ce qui accroît la portance hydrodynamique (régime mixte et hydrodynamique) [48];
- induire des turbulences et augmenter ainsi la résistance du lubrifiant à l'écoulement, ce qui accroît la portance hydrodynamique (régime mixte et hydrodynamique) [49–55].

Ces mécanismes élémentaires, qui peuvent être antagonistes selon les conditions de fonctionnement, vont jouer un rôle plus ou moins prononcé sur les caractéristiques fonctionnelles macroscopiques. Parmi les critères les plus étudiés, on retrouve :

- le coefficient et/ou le couple de frottement ;
- la tenue en grippage ;
- l'usure des pièces.

De manière tout à fait générale, Min Soo Suh et al. [56] schématisent l'action bénéfique de la texturation en utilisant la courbe de Stribeck (*Figure I.9*). Selon cette représentation, une texturation optimale favoriserait les transitions entre les régimes et abaisserait le coefficient de frottement dans les régimes limite et mixte. Toute la difficulté étant bien sûr de déterminer les caractéristiques texturales optimales.

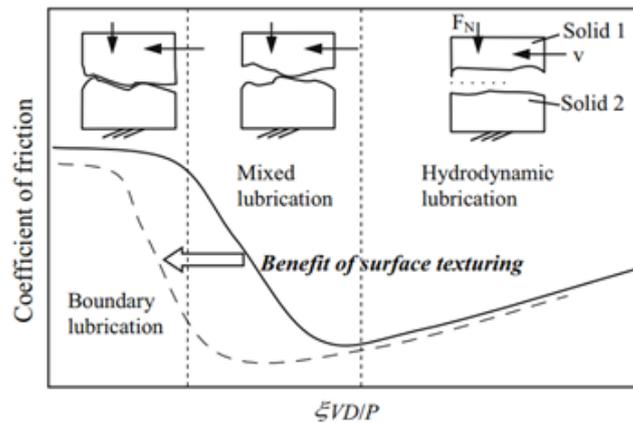


Figure 1.9 : Effet de la texturation sur la courbe de Stribeck [56]

### I.2.2. Études représentatives du fonctionnement des paliers

Malgré le très grand nombre de publications relatives à la texturation, il n'existe que peu d'études représentatives du fonctionnement des paliers. Par ailleurs, la majorité des études expérimentales et numériques sur ce périmètre ont été réalisées en appliquant une texturation sur les coussinets et non sur les portées. Nous proposons, ci-après, de réaliser une analyse des travaux les plus récents.

#### I.2.2.a. En régime limite et mixte

Dans ce type de régime, l'épaisseur du film lubrifiant n'est pas suffisante pour permettre le support intégral de la charge appliquée. Par conséquent, des interactions entre les aspérités ont lieu dans certaines zones du contact. Ces interactions (abrasion, adhésion, érosion, formation et action du tribo-film, etc.) sont extrêmement difficiles à simuler numériquement. Cette difficulté oriente bien souvent les chercheurs vers une démarche expérimentale plutôt que numérique. Plusieurs publications récentes, représentatives du fonctionnement des paliers, s'intéressent à ces régimes.

Commençons par citer l'étude de Lu et al. [57], datant de 2007, concernant des coussinets en laiton texturés par des cavités. L'analyse est basée sur les courbes de Stribeck en variant successivement la charge appliquée, le type d'huile, la taille et la forme des cavités. Les auteurs constatent que la texturation peut diminuer le coefficient de frottement en régime mixte et favoriser la transition du régime mixte vers le régime hydrodynamique. Ils notent que l'efficacité des textures est modulée par la viscosité de l'huile et dans, une moindre mesure, par les caractéristiques géométriques des cavités. Les auteurs soulignent par ailleurs qu'une texturation complète est plus efficace qu'une texturation partielle localisée dans la zone active.

Dans une condition de contact beaucoup plus sévère, Galda et al. [58] mènent, en 2010, une étude de résistance au grippage en suivant l'évolution du coefficient de frottement sur des bagues texturées par des cavités hémisphériques et en gouttes. Ils ne considèrent qu'une portion du contact. Ils ont recours à

un arbre en acier et à un coussinet en fonte. Le grippage est obtenu en variant, par palier, la charge appliquée. Le taux de recouvrement est maintenu fixe à 10 % et deux vitesses de rotation sont considérées. Ils remarquent que les textures en forme de gouttes d'eau sont les plus efficaces pour lutter contre le grippage. La durée de vie des paliers est multipliée jusqu'à plus de deux fois. Les auteurs relèvent toutefois que l'augmentation de la vitesse rend la texturation moins pertinente.

L'année qui suit est marquée par les travaux d'Adatepe et al. [59] qui étudient expérimentalement l'impact fonctionnel de vallées longitudinales et transversales sur un coussinet en aluminium. Ils tracent les courbes de Stribeck en faisant varier la vitesse de rotation et répètent les opérations pour trois charges appliquées relativement faibles. Ils étudient des stries macroscopiques de 30 à 50  $\mu\text{m}$  de profondeur espacée de 1 mm. Ils constatent que, quelle que soit l'orientation, la présence de vallées augmente le coefficient de frottement. Plus précisément, ils relèvent que la configuration transversale apparaît la plus sévère.

Des effets défavorables dus aux textures sont également observés, en 2012, par Koszela et al. [60]. Pendant les tests effectués sur un banc d'essai de type pion-disque sur des échantillons en bronze, ils mesurent, pour certaines configurations, une augmentation de l'usure d'environ 30 % à cause de la texturation. Dans la continuité, Kovalchenko et al. [61] soulignent également que les textures peuvent augmenter l'usure tout en favorisant la transition entre les régimes. En toute logique, ils déconseillent l'usage des surfaces texturées dans les applications où l'usure des pièces n'est pas tolérée.

Nous finissons ce récapitulatif des études dédiées aux régimes limite et mixte en mentionnant les récents travaux de Sander et al. [62] qui étudient numériquement l'effet de l'usure du coussinet. Ils considèrent une portée en acier composée de stries longitudinales ( $Ra = 0,27 \mu\text{m}$ ) et un coussinet en alliage d'aluminium. Deux pressions diamétrales sont considérées. Contre toute attente, leurs modèles théoriques prédisent que l'usure du coussinet tend à diminuer le coefficient de frottement et à favoriser la transition entre le régime mixte et hydrodynamique.

### *1.2.2.b. En régime hydrodynamique*

Le régime hydrodynamique est le régime de fonctionnement normal des paliers. Contrairement aux régimes précédents, les surfaces sont ici totalement séparées par le film d'huile. La portance hydrodynamique qui génère la séparation des surfaces suscite un très grand intérêt car une augmentation de celle-ci permettrait l'optimisation de la plupart des applications concernées. La très grande majorité des travaux traitant de ce régime sont théoriques.

L'une des plus anciennes préoccupations des numériciens de la lubrification hydrodynamique est celle de l'impact fonctionnel de l'anisotropie de la rugosité. Le sujet est très discuté dans la communauté et l'on constate, à premier vue, un grand nombre de contradictions. Plusieurs études ont traité

spécifiquement le cas des paliers. Latif et al. [63] montrent numériquement que la striation longitudinale est préférable à une striation transverse pour améliorer la portance hydrodynamique. L'apport de Raj et al. [64] semble confirmer cette tendance. Le débat continue avec Weng et al. [65], qui montrent qu'une striation longitudinale ou isotrope accroît par ailleurs la stabilité du palier, alors même qu'une striation transverse la dégrade. Ces conclusions sont partagées par les études récentes de Chiang et al. [65], de J.R. Lin [66–68] et d'Adatepe et al. [59]. Ces travaux montrent tous la pertinence fonctionnelle d'une striation longitudinale.

Malheureusement, cette conclusion est loin de faire l'unanimité car plusieurs publications viennent infirmer les tendances citées ci-dessus. Ainsi, Turaga et al. [69] montrent au contraire que c'est la striation transverse qui est à privilégier face à une striation isotrope ou longitudinale. Dobrica et al. [70] et Mongkolwongrojn et al. [71] montrent également une amélioration significative de la charge admissible et de la stabilité dynamique avec des stries transverses. Les récentes contradictions amènent à penser qu'il n'y a toujours pas de convergence sur le sujet.

Dans un tout autre registre, certains travaux récents se sont intéressés à l'impact fonctionnel de textures composées de cavités. En 2007, Lu et al. [57] réalisent des poches hémisphériques sur des coussinets et analysent l'évolution des courbes de Stribeck pour plusieurs configurations de cavités. Ils constatent que la texturation ne modifie pas le coefficient de frottement en régime hydrodynamique. Ces conclusions sont partagées par l'étude numérique Tala-Ighil et al. [72], en 2011, dans laquelle aucun effet positif n'est observé dans le cas d'une texturation totale des coussinets. Pour autant, les auteurs indiquent que la texturation partielle pourrait induire des effets positifs sur le comportement du palier. Notons que les travaux théoriques de Brizmer et al. [73], réalisés quelques temps après, semblent confirmer les résultats de Tala-Ighil et al. [72] en montrant des gains fonctionnels significatifs à l'aide d'une texturation partielle.

La convergence de publications citées précédemment est cependant toute relative car plusieurs travaux expérimentaux montrent, là aussi, des tendances différentes. Ainsi, en 2013, Gupta et al. [74], qui texturent des coussinets, montrent à l'inverse que les cavités affectent positivement la pression hydrodynamique, et que, par ailleurs, l'intensité de l'effet croît avec la vitesse de rotation. Plus récemment encore, Lu et al. [75], qui étudient l'effet d'une texturation à distribution phyllo-tactique, remarquent que certaines configurations permettent une diminution sensible du coefficient de frottement.

Certains travaux sont également plus atypiques. C'est le cas de l'étude de Sinanoglu et al. [76], datant de 2005, dans laquelle ils comparent expérimentalement un palier équipé d'un arbre lisse à des paliers équipés d'arbres texturés avec des stries longitudinales de forme trapézoïdale ou en dents de scie. Hormis le poids de l'arbre, aucune charge n'est appliquée. Les auteurs mesurent la pression hydrodynamique sur la circonférence du coussinet pour trois vitesses de rotation. Ils concluent que les

stries longitudinales trapézoïdales augmentent la pression hydrodynamique et donc la charge admissible par le film d'huile. À l'opposé, les stries en dents de scie diminueraient la pression hydrodynamique.

L'étude de Dobrica et al. [77], datant de 2012, s'inscrit également dans cette lignée. Les auteurs simulent numériquement l'effet de l'usure abrasive sur le comportement des paliers en régime hydrodynamique. Ils font varier, la profondeur, la densité, le taux de recouvrement et la position des stries d'usure. Ils remarquent que la profondeur est le paramètre le plus influent. Ils notent que l'effet de l'usure est négligeable lorsque la profondeur des stries est petite devant l'épaisseur minimale du film d'huile. En revanche, si cette même profondeur dépasse le jeu radial, alors cet effet devient plus sévère.

Enfin, l'étude numérique très récente de Quiñonez et al. [78] est également intéressante. Celle-ci se focalise sur le lien entre la morphologie des rugosités et la charge admissible. Trois types de textures longitudinales ont été considérés : une texture striée, une texture « plateaux/vallées » et, enfin, une texture striée composée de vallées transverses. Par comparaison avec une surface parfaitement lisse, les résultats montrent que la texture « plateaux/vallées » améliore la capacité de charge du palier, alors même que les autres textures la dégradent.

### **I.2.3. Conclusion**

Ce travail d'investigation a permis d'identifier les principaux éléments qui ont conduit, au cours du temps, au développement et à l'étude de la texturation des surfaces. Toutes configurations de contact et matériaux confondus, de nombreux travaux montrent des améliorations sur l'usure, le frottement et la capacité de charge.

Cette synthèse indique toutefois que les gains obtenus sont loin d'être systématiques. Dans la pratique, la texturation peut avoir des effets aussi bien bénéfiques que défavorables. Les contradictions constatées dans la littérature sont d'ailleurs la preuve de la complexité des phénomènes induits par la texturation. Les mécanismes sont parfois clairement antagonistes et dépendent largement des conditions de fonctionnement du contact. Typiquement, une texture permettant d'augmenter, en régime hydrodynamique, la charge admissible du film d'huile peut très bien se révéler agressive en régime mixte, en augmentant le coefficient de frottement et l'usure des pièces. On intuite dès lors qu'il s'agit de trouver le meilleur compromis. De manière générale, on souligne qu'un effort de synthèse reste encore à effectuer afin d'intégrer cet aspect multicritère de la fonctionnalité.

Ce travail de synthèse bibliographique soulève également la problématique de la faisabilité industrielle. D'une part, la majorité des études numériques traitant de la texturation se basent sur des surfaces virtuelles, obtenues par des modèles mathématiques élémentaires, souvent non réalisables industriellement. D'autre part, les textures issues des travaux expérimentaux sont réalisées dans des conditions laboratoires ne respectant pas les critères de productivité de la production série. Aussi, un

véritable travail de développement process reste à réaliser pour garantir la pérennité industrielle de la texturation.

Notons, enfin, que la plupart des études expérimentales publiées traitent la texturation des coussinets et non des arbres. Ce choix n'est pas commenté dans les publications mais semble être implicitement lié à des raisons de faisabilité process ou instrumentale.

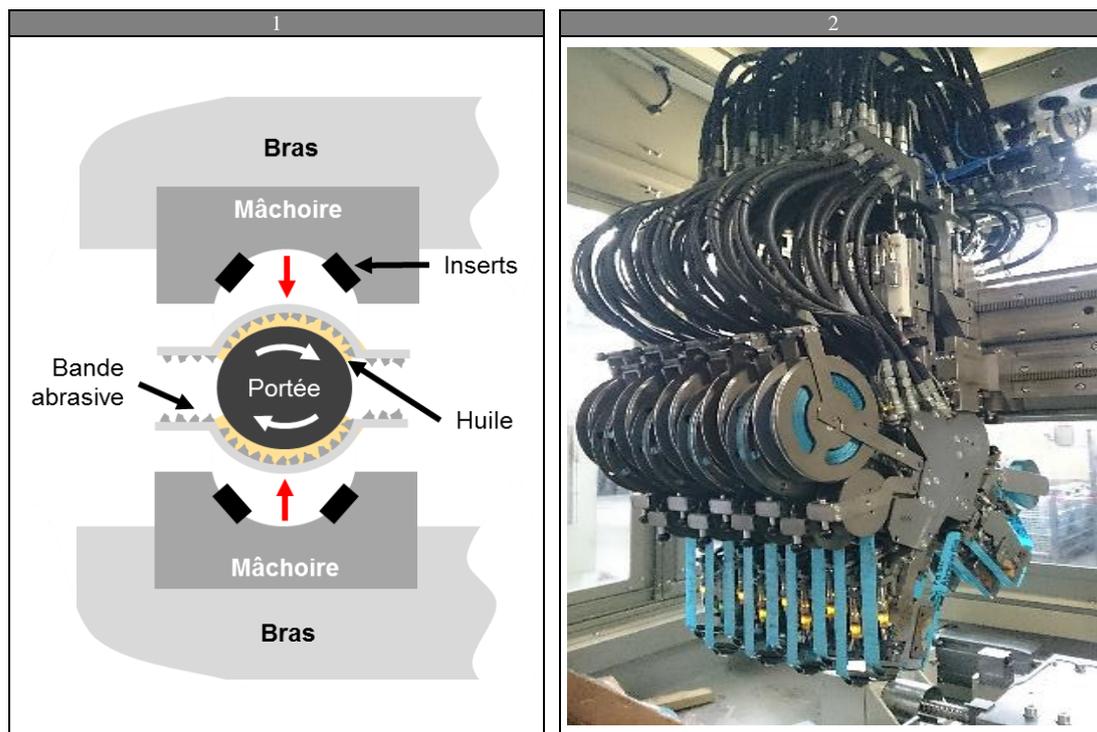
Ces différentes données nous permettent de resituer notre problématique dans le contexte scientifique. Nous allons nous intéresser, par la suite, à la texturation des portées en nous concentrant tout particulièrement sur le procédé de toilage, qui est le procédé actuellement utilisé pour la super finition des manetons et tourillons de vilebrequins.

## I.3. Le procédé industriel de toilage

### I.3.1. Généralités

#### I.3.1.a. Le toilage chez RENAULT

Le toilage est actuellement le procédé d'usinage par abrasion le plus utilisé pour la super finition des portées de vilebrequins. Il consiste en l'application d'une bande abrasive sur la pièce mise en rotation (*Figure I.10.2*).



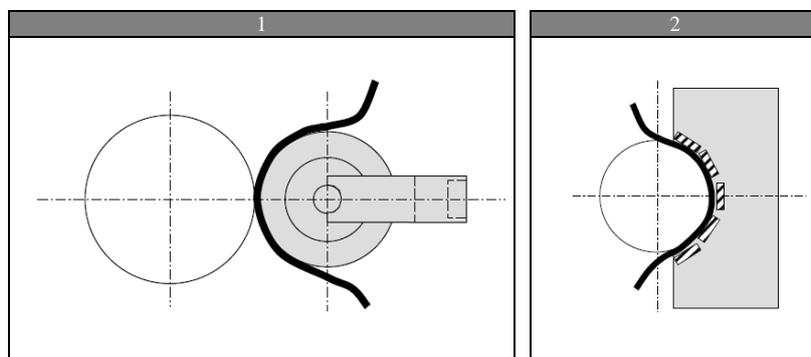
**Figure I.10 : Principe du toilage (1), machine de toilage de vilebrequin NAGEL (2)**

On distingue deux types de technologie, le toilage par galet et celui par mâchoire [79] :

- la première consiste à mettre en contact la pièce avec une bande abrasive sans fin tournant autour de deux cylindres. Le contact avec la pièce est de type tangentiel comme dans le cas de la rectification. La bande est remplacée lorsque que son pouvoir abrasif est fortement réduit : les conditions de finition ne sont donc pas stables. Pour cette raison, cette configuration de toilage est utilisée surtout pour des opérations d'ébauche dans le cas de matériaux fragiles ;
- la deuxième, qui fera l'objet de cette étude, se caractérise par le défilement continu ou indexé d'un ruban abrasif neuf. Ce défilement assure les mêmes conditions de finition pour chaque pièce. Dans cette typologie de toilage, différentes configurations de toilage peuvent être aussi distinguées en fonction de la géométrie du support pressant la toile contre la surface à usiner :

- dans le premier cas, un galet cylindrique, de dureté définie, presse la toile abrasive sur la pièce. Le contact toile abrasive/surface usinée s'apparente à un contact tangentiel (**Figure I.11.1**) ;
- dans le second, des mâchoires (deux ou trois généralement) pressent la bande abrasive sur la pièce (**Figure I.11.2**). Le contact bande abrasive/surface est enveloppant, il recouvre en effet la majeure partie de la circonférence de la pièce. Ce type de toilage est réservé à l'obtention simultanée de spécifications macro-géométrique et micro-géométrique.

Il est également courant d'utiliser un système d'oscillation longitudinale, ce dernier étant soit donné à la pièce soit aux mâchoires. De plus, le contact bande abrasive/pièce est généralement alimenté en huile.



**Figure I.11 : Toilage par galet (1), toilage par mâchoires (2), [79]**

En production série, l'opération se fait avec des machines dédiées propres à chaque modèle de vilebrequin (faible flexibilité). Ces machines possèdent autant de bras de toilage que de portées sur le vilebrequin, généralement au nombre de neuf pour un vilebrequin de moteur quatre cylindres (**Figure I.10.2**). Le cycle de toilage se fait généralement en deux ou trois étapes avec des grains abrasifs de plus en plus fins, de granulométrie allant de 40  $\mu\text{m}$  à 9  $\mu\text{m}$  voire 5  $\mu\text{m}$ . La première passe se faisant avec des mâchoires enveloppantes composées d'inserts de contact rigide (céramiques etc.) afin de rattraper d'éventuels défauts de forme, et les passes suivantes avec des mâchoires enveloppantes ou tangentielles composées d'inserts de contact souple en élastomère.

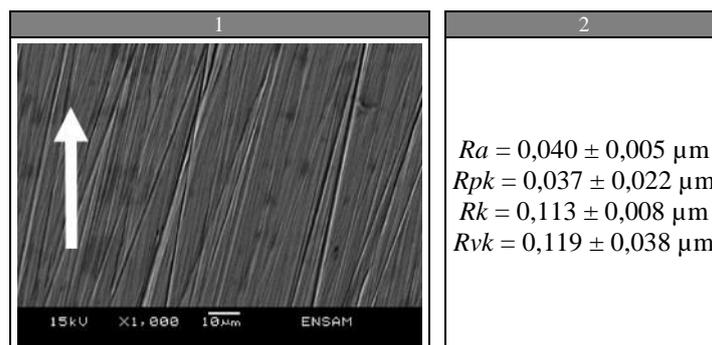
### *1.3.1.b. Les textures toilées actuelles*

Les portées de vilebrequins subissent chronologiquement six phases majeures d'opération :

- la phase d'obtention du brut (forgeage ou fonderie) ;
- la phase d'ébauche (tournage et arasage pour les tourillons, fraisage par interpolation pour les manetons) ;
- la phase d'usinage des trous de lubrification (perçage ou forage) ;
- la phase de traitement thermique (induction) et de renforcement des raccords (galetage) ;

- la phase de finition (rectification) ;
- et, enfin, la phase de super finition (toilage).

En tant qu'ultime opération d'usinage, le toilage donne aux portées leurs états de surface définitifs. Les surfaces en sortie de production sont constituées de fines stries continues suivant la circonférence des portées. Ainsi, en chaque point d'une portée, les stries sont parallèles à la direction de glissement avec le coussinet, à quelques degrés près (*Figure I.12.1*). Les morphologies ne présentent pas de plateaux et les stries recouvrent toute la surface.



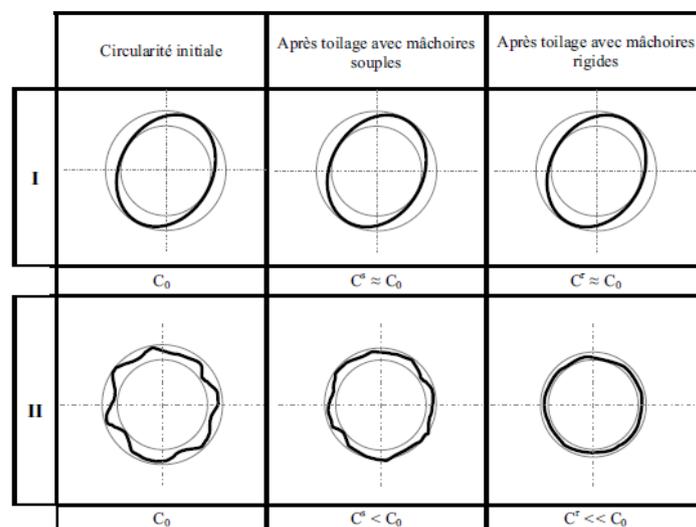
**Figure I.12 : Textures actuelles des portées vilebrequins, cliché MEB (1), exemple de paramètres standards de rugosité sur cinq portées (2)**

Bien entendu, il est possible de plus ou moins contrôler les textures toilées en modifiant les paramètres process. Malheureusement, il y a peu d'études sur ce point clé. Pendant longtemps, les pratiques industrielles relatives à l'abrasion s'appuyaient sur un ensemble de règles fondamentales décrites dans plusieurs ouvrages et articles de référence [80–83] mais l'accent n'était pas porté sur les textures de surfaces. En dehors de ces travaux, il n'y eu pas vraiment d'avancée majeure sur le sujet pendant de nombreuses années. Cependant, avec la sévérisation des critères de qualité des états de surface, les années 2000 ont vu ressurgir de nouvelles études, tant théoriques [84,85] qu'expérimentales [79,85–88]. Pour l'essentiel, ce sont les travaux de Sura et al. [79,86–88] qui offrent la base de données expérimentales la plus complète. Ses études, menées sur des vilebrequins acier et fonte permettent d'appréhender l'effet de chaque paramètre indépendamment. Notons de plus que l'ensemble de ses essais ont été effectués dans des conditions process industriellement représentatives (mâchoires enveloppantes, bandes abrasives à grains déposés électrostatiquement, paramètres machines). Ces essais étudient l'effet sur la rugosité moyenne, les ondulations et la forme tout en s'attachant à investiguer les phénomènes physiques mis en jeu à travers la quantification de l'enlèvement de matière et de l'énergie spécifique.

### I.3.2. Influence des paramètres process

#### I.3.2.a. Dureté des inserts de toilage

La dureté d'insert est un paramètre clé pour l'ensemble des critères de forme des portées toilées. De manière générale, il a été montré qu'une grande dureté d'insert augmentait l'épaisseur de l'enlèvement de matière tout en permettant un meilleur travail des écarts de forme (circularité, rectitude, cylindricité). Toutefois, tous les défauts ne peuvent pas être corrigés en toilage (**Figure I.13**). L'utilisation d'inserts rigides ne modifie pas les tendances observées avec des inserts souples, mais cela en accentue plus ou moins les effets. D'un point de vue énergétique par exemple, cela peut engendrer une baisse d'environ 25 % de l'énergie spécifique.



**Figure I.13 : Effets de la dureté d'insert sur la circularité des portées de vilebrequins [79]**

#### I.3.2.b. Temps de cycle

Sura et al. [79] se sont aperçus que le temps agissait physiquement sur la portée uniquement lors des premiers instants de toilage. L'enlèvement de matière devient quasi nul après seulement quelques secondes de toilage. Ils observent, après cette durée, une baisse significative de la puissance consommée. D'un point de vue énergétique, les auteurs notent que l'énergie spécifique de toilage augmente de manière linéaire avec le temps de cycle (**Figure I.14**).

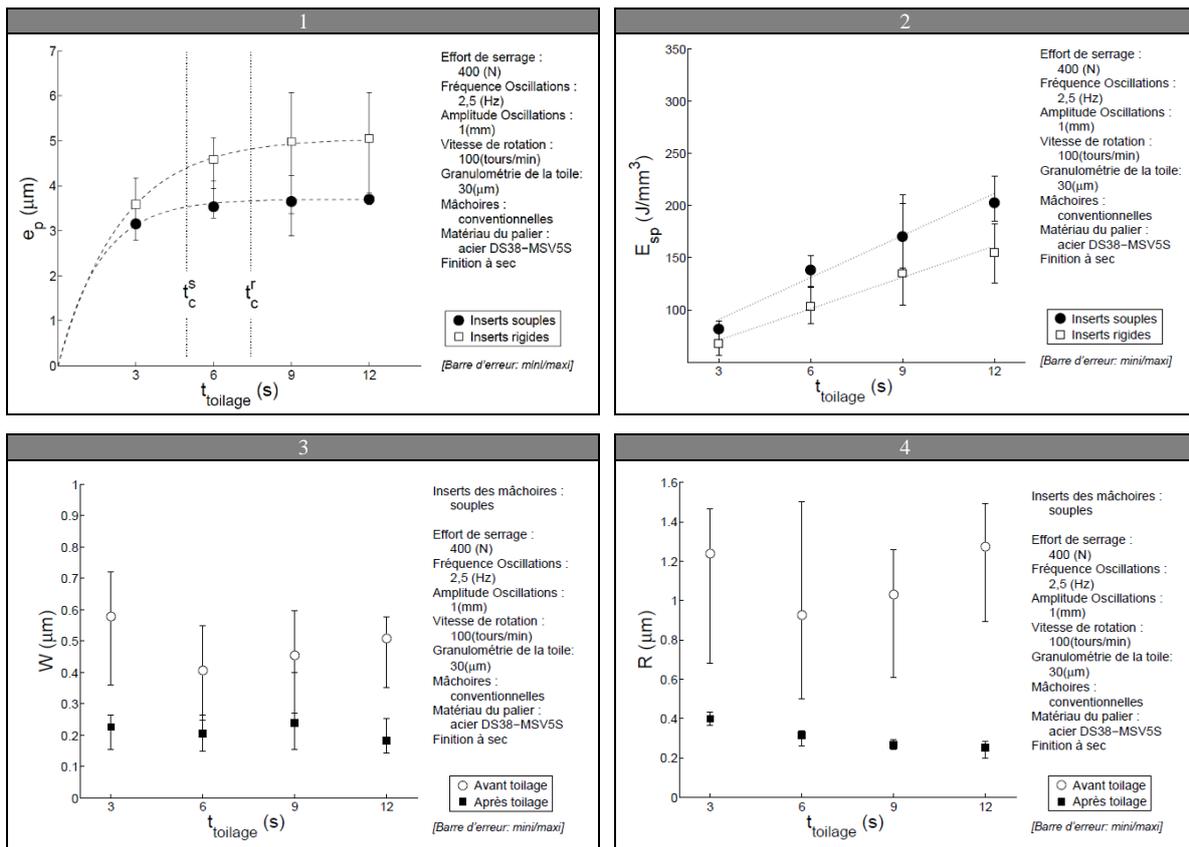


Figure I.14 : Effets du temps de cycle en finition souple à sec sur l'enlèvement de matière (1), l'énergie spécifique (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79]

### I.3.2.c. Fréquence des oscillations

De manière générale, une faible fréquence d'oscillations diminue les ondulations et la rugosité (**Figure I.15.3** et **Figure I.15.4**). Sura et al. [79] observent également une baisse significative de l'énergie spécifique pour une fréquence d'oscillations supérieure à 0,5 Hz, soit 30 cycles/min (**Figure I.15.2**).

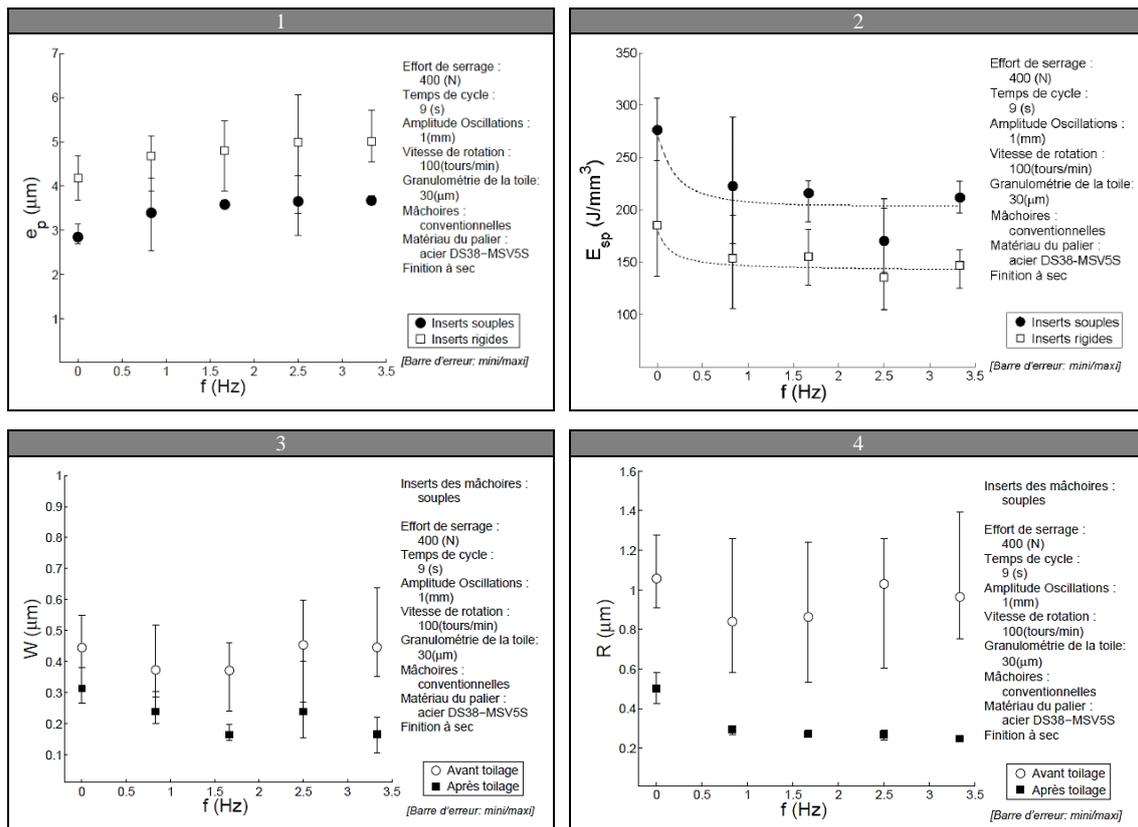


Figure I.15 : Effets de la fréquence des oscillations en finition souple à sec sur l'enlèvement de matière (1), l'énergie spécifique (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79]

### I.3.2.d. Pression de contact

La rugosité et les ondulations sont des fonctions décroissantes de la pression de contact. Toutefois, l'évolution des courbes montre la présence de paliers, et on observe que seulement 0,6 MPa est nécessaire pour atteindre l'ondulation et la rugosité minimale (*Figure I.16.3* et *Figure I.16.4*). D'un point de vue énergétique, le constat est différent puisque l'on observe que l'énergie spécifique croît de manière quasi-linéaire avec la pression (*Figure I.16.2*).

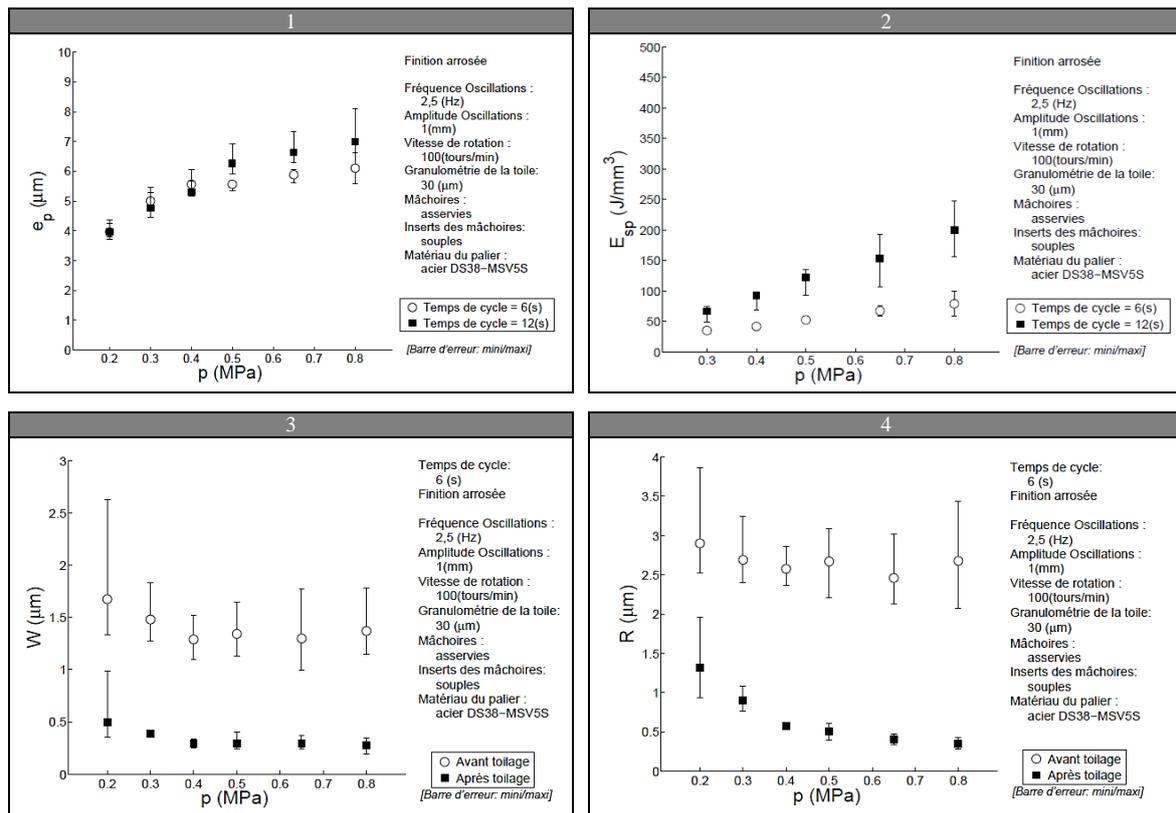


Figure I.16 : Effets de la pression de contact en finition souple arrosée sur l'enlèvement de matière (1), l'énergie spécifique (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79]

### I.3.2.e. Granulométrie des bandes abrasives

La granulométrie des grains de bandes abrasives apparaît comme un facteur influent, tant sur la rugosité et l'ondulation que sur l'enlèvement de matière et l'énergie spécifique. Dans le cas de grains oxyde d'aluminium déposés électrostatiquement, Sura et al. [79] observent un accroissement important de l'enlèvement de matière, de la rugosité et de l'ondulation en fonction des tailles de grain (Figure I.17.1, Figure I.17.3 et Figure I.17.4). En outre, les grains étant plus pénétrants pour de grosses granulométries, il apparaît que l'énergie spécifique décroît en fonction de la taille des grains.

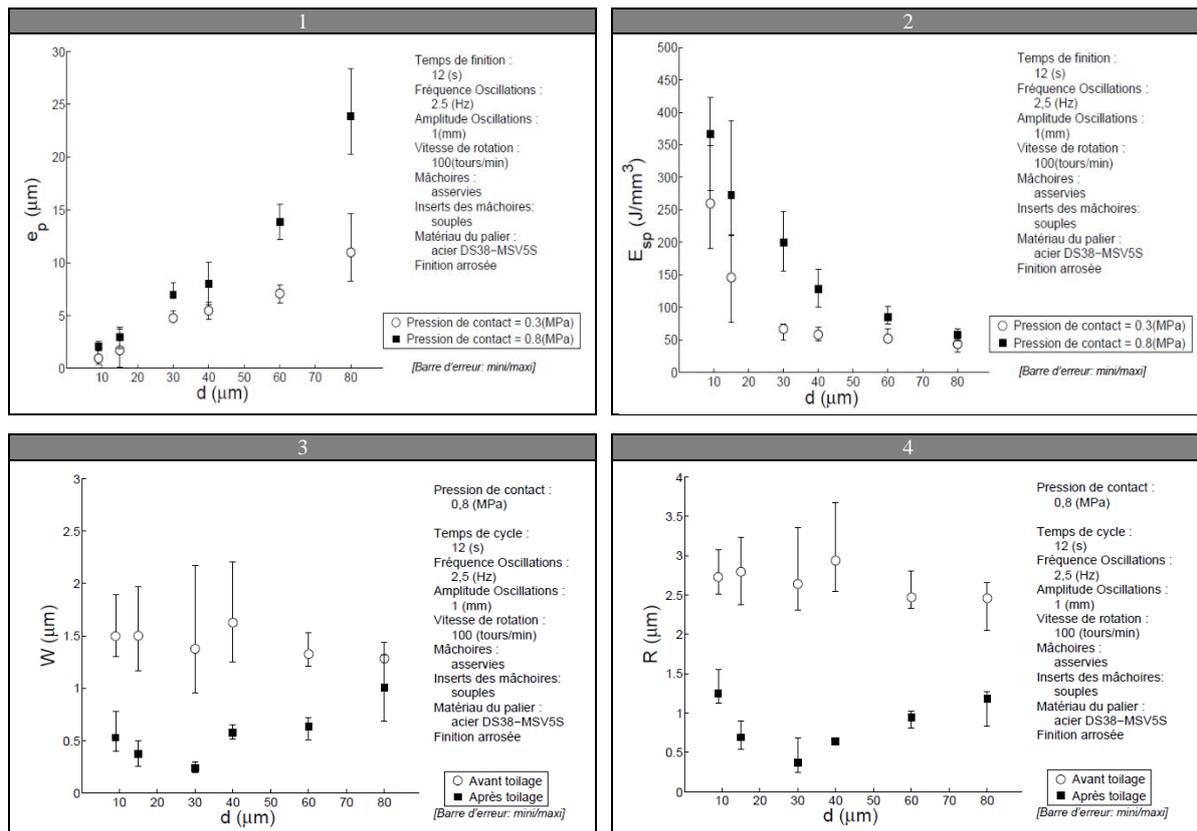


Figure I.17 : Effets de la granulométrie en finition souple arrosée sur l'enlèvement de matière (1), la circularité (2), l'ondulation (3) et la rugosité (4), [79]

### I.3.3. Conclusion

Le toilage est un procédé simple dans le principe mais physiquement complexe. Le nombre de paramètres process rend extrêmement difficile son optimisation sur les lignes de production. D'un point de vue théorique, les phénomènes physiques commencent à être compris mais dans la pratique, la mise au point des opérations de toilage se fait encore de manière empirique en s'appuyant sur des plans d'essais, longs, coûteux et parfois mal adaptés. De plus, aucune étude ne s'est véritablement penchée sur les capacités de texturation de ce procédé. Il existe, pour ainsi dire, une réelle zone d'ombre. A première vue, avec les configurations existantes, le toilage conventionnel semble ne pouvoir offrir qu'une seule modalité morphologique de texture, à savoir des stries circonférentielles, continues et sans plateaux. Excepté l'amplitude spatiale et l'oscillation longitudinale des stries, les textures produites sont morphologiquement similaires. Il ne fait aucun doute que beaucoup de travaux restent à réaliser sur le sujet.

## I.4. Les autres procédés de texturation

Il existe un grand nombre de procédés de texturation hormis le toilage et tous, sont potentiellement applicables sur des portées cylindriques. Toutefois, les plus pertinents sont ceux qui offrent le meilleur compromis entre la répétabilité, la flexibilité, la diversité des motifs réalisables, le coût et la productivité. Nous proposons ici d'établir un état de l'art des procédés les plus utilisés en dehors du toilage. Nous distinguerons ces technologies suivant la physique du procédé. On retrouvera ainsi :

- les procédés de texturation par ablation ou ajout de matière ;
- les procédés de texturation par abrasion ;
- les procédés de texturation par micro-coupe ;
- les procédés de texturation par déformation plastique.

### I.4.1. Procédés par ablation ou ajout de matière

#### *I.4.1.a. Le Laser Surface Texturing (LST)*

L'application du laser pour la texturation en surface des matériaux a été largement étudiée. Elle repose sur l'utilisation d'un faisceau d'énergie concentré en un spot très fin qui permet de modifier la surface d'un matériau par ablation de matière. Ce procédé permet de réaliser des textures avec diverses morphologies (cavités, rainures,...) à des échelles micrométriques sur différents matériaux en fonction de la technologie utilisée. On distingue les lasers par leurs milieux actifs, ces derniers peuvent être liquides, gazeux, semi-conducteurs ou bien solides comme pour la technologie Nd : YAG. Remarquons également qu'il existe deux modes de fonctionnement distincts des lasers.

- dans le premier, la source de pompage donne de l'énergie au milieu actif en permanence pour réexciter les atomes désexcités par émission stimulée. Dans ce cas, le faisceau laser en sortie est continu.
- dans le second, la source de pompage fonctionne de manière pulsée, un rayon laser très bref est produit à chaque pulse dont la durée peut aller de quelques femtosecondes à quelques millisecondes. Ce mode de fonctionnement permet la création de rayons lasers plus puissants. Ainsi, les lasers femtoseconde permettent de graver les surfaces sans effet thermique important et d'obtenir de façon industrielle des milliers de motifs ayant des dimensions de seulement quelques dizaines de microns. Les texturations que génèrent ces lasers présentent un niveau de qualité élevé qui se caractérise par une absence de re-déposition de la matière expulsée et une zone thermiquement affectée très réduite.

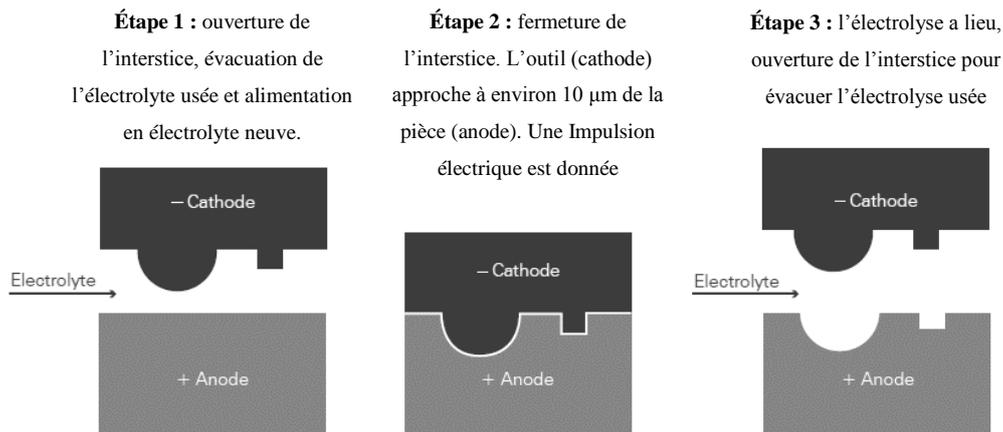
La littérature recense très peu d'études expérimentales concernant l'application du procédé *LST* sur les paliers. En effet, la majeure partie des travaux se focalise pour le moment sur des géométries planes et

sur des surfaces de tailles assez réduites. Soulignons tout de même que la majorité des laboratoires travaillant sur la *LST* des métaux utilisent les technologies cristallines, principalement des Nd : YAG en mode pulsé. En 2006, Andersson et al. [89] réalisent des cavités sur une surface plane en acier rapide. En 2007, Raeymaekers et al. [90] du Technion ont généré des textures sur un pion en aluminium. Cette même année, et dans ce même laboratoire, L. Rapoport et al. [91] ont à nouveau eu recours au Nd : YAG afin de texturer des disques en acier de dureté 60 HRC, la profondeur des cavités atteignait 2  $\mu\text{m}$  et les diamètres avoisinaient 65 $\mu\text{m}$ . En 2008, en Slovénie, Vilhena et al. [92] texturent de l'acier en se penchant davantage sur l'influence des paramètres du laser sur la morphologie des cavités. Encore très récemment en Corée du Sud, Kim et al. [93] ont également utilisé le Nd : YAG afin de texturer sur des disques en fonte des cavités de 106  $\mu\text{m}$  de diamètre et de 15  $\mu\text{m}$  de profondeur. Beaucoup d'autres travaux ont utilisé le *LST*, en particulier ceux de Dumitru et al. [94–96] qui ont étudié la texturation par Nd : YAG et Ti : sapphire.

Le *LST* est considéré par certains chercheurs comme le plus prometteur de tous les procédés de texturation [3,97]. Propre, il offre également une très bonne précision de la forme et de la taille des cavités. De plus, moyennant des ajustements du faisceau à l'aide de filtres ainsi que des lentilles divergentes et convergentes, les lasers permettent de produire des textures très diverses [97]. Cependant, le *LST* présente certains inconvénients. Il peut par exemple laisser sur la circonférence des cavités, des bourrelets de matière dus au refroidissement rapide du bain de fusion.

#### *1.4.1.b. Electro Chemical Machining (ECM)*

Ce procédé s'apparente au procédé d'électroérosion. Basé sur la loi de Faraday, l'usinage électrochimique est un procédé relativement simple. L'outil est la cathode, la pièce à texturer est l'anode, l'ensemble étant recouvert d'électrolyte, nécessaire afin de dissoudre et d'attirer les ions métalliques. Lorsque ce circuit formé est alimenté en courant de haute intensité et qu'une décharge a lieu, une zone de la pièce est dissoute par électrolyse. Les déchets présents dans l'électrolyte sont ensuite filtrés et une nouvelle décharge peut être effectuée.



**Figure I.18 : Étapes de l'ECM**

Il existe de nombreux procédés dérivés de l'ECM qui diffèrent par leurs cinématiques et la nature de l'électrolyte. Ainsi, on recense par exemple le perçage *ECM*, le tournage *ECM*, la rectification *ECM* et le polissage *ECM* [98]. La texturation peut se faire par plusieurs technologies. La plus courante est d'utiliser des masques disposés sur la pièce afin de canaliser l'électrolyse sur les zones à texturer et de mettre en mouvement l'électrolyte par une pompe afin de le projeter sur la surface de la pièce.

À l'université de Cambridge, Costa et al. [98] ont texturé une surface plane en acier avec ce procédé. En se basant sur la technologie de perçage *ECM* Electro Jet, ils sont parvenus à produire des cavités de profondeurs inférieures à 50 µm sur plusieurs pièces en utilisant un seul masque disposé sur l'outil.

Procédé connu depuis longtemps, l'ECM a longtemps été laissé de côté car cette technique ne permettait pas d'être concurrentiel. Les travaux récemment menés ont permis de l'améliorer. Avec l'arrivée des machines de haute productivité et haute précision, l'ECM attire à nouveau l'attention, en particulier pour la texturation de surface. Très utilisées dans le secteur aéronautique pour la fabrication d'aubes et d'ailettes de turbomachines, les machines *ECM* permettent de travailler les alliages métalliques indépendamment de leurs caractéristiques mécaniques, notamment leurs duretés et de reproduire aisément les formes complexes, le tout sans aucune bavure ni aucune incidence thermique sur la structure métallurgique.

#### *1.4.1.c. Techniques de lithographie*

Différentes techniques de lithographie peuvent être employées pour réaliser des texturations de surface. De manière générale, elles consistent en l'application d'une résine photosensible sur la surface du substrat à texturer. Un masque est positionné ensuite sur la résine avant son irradiation avec une longueur d'onde donnée. Un développement, le plus souvent par chimie humide, permet de révéler les motifs dans la résine. La gravure du substrat ou le dépôt de métal dans les zones de la surface laissées libres permet d'obtenir la texture de surface voulue. Il suffit ensuite d'éliminer la résine restante.

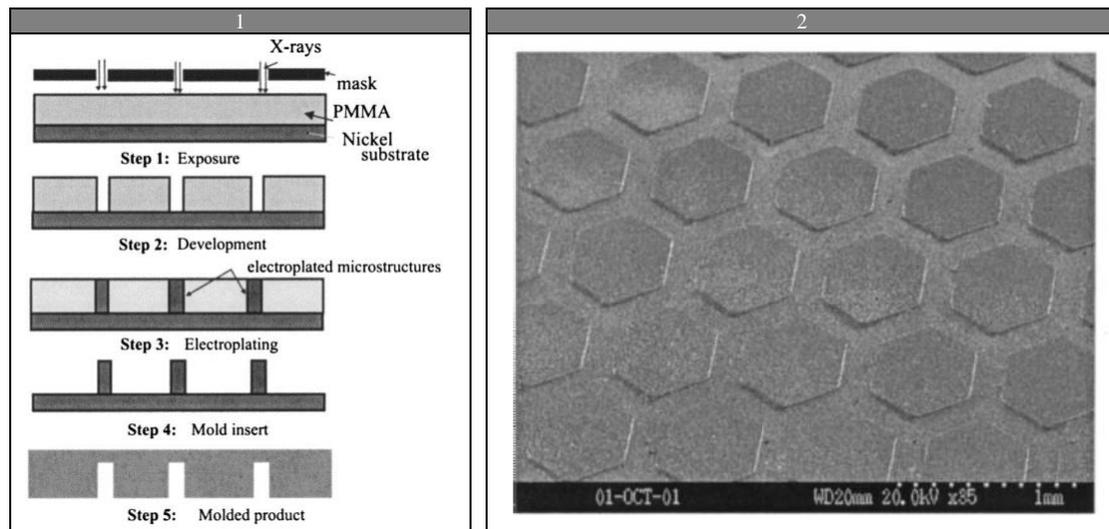


Figure 1.19 : Photolithographie [99], les différentes étapes (1), exemple de texture hexagonale LIGA (2)

Les procédés de lithographie varient en fonction de la technique utilisée pour créer la texture en négatif ou en positif dans la résine (rayonnement UV, faisceaux de rayons X, d'ions, d'électrons). Les résolutions dépendent de la longueur de l'onde utilisée : plus la longueur d'onde est faible, plus la résolution est grande. La photolithographie permet d'obtenir des résolutions d'une centaine de nanomètres tandis que la lithographie par faisceau d'électrons offre des résolutions de l'ordre du nanomètre. Le procédé *LIGA* est un exemple de technologie basée sur la lithographie. Il utilise un faisceau très directif de rayons UV ou rayons X et permet d'obtenir des microstructures très petites et, surtout, de grands rapports d'aspect. Ces technologies *LIGA* sont aujourd'hui utilisées dans le domaine de la microélectronique et l'instrumentation. Malek et al. [100] ont effectué un état de l'art complet sur le sujet.

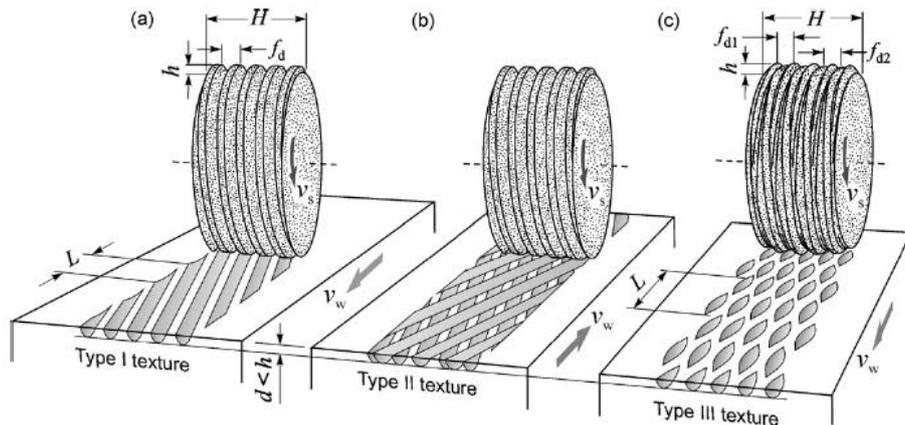
Beaucoup d'études expérimentales existent, cependant, la majorité se concentre sur des matériaux très éloignés de ce que l'on peut trouver sur des portées de vilebrequins [100]. Il existe toutefois quelques travaux pouvant nous intéresser. C'est le cas des études menées au Bearings and Seals Laboratory où Stephens et al. [99] ont fabriqué des textures positives hexagonales en nickel par *LIGA* sur une butée hydrodynamique. Les textures réalisées avaient une hauteur allant de 3 à 100  $\mu\text{m}$  et un diamètre moyen de 550  $\mu\text{m}$ .

L'avantage majeur de ce procédé réside dans le fait que la texturation ait lieu en une fois. Il est également reconnu pour sa précision et sa répétabilité. Toutefois, il nécessite beaucoup de matériels et son coût est important. Qui plus est, aucun travail de texturation par photolithographie sur des surfaces cylindriques n'a été trouvé dans la littérature, la majorité des travaux de texturation par photolithographie se concentrant principalement sur des surfaces planes de petites tailles.

## I.4.2. Procédés par abrasion

### I.4.2.a. Meulage spécial

Développé en 1989 par Stepien [101], ce procédé est un dérivé du meulage traditionnel. Afin de générer des cavités, la géométrie de la meule a été modifiée. La pièce et la meule, une fois en mouvement sont mises en contact et l'enlèvement de matière par abrasion a lieu.



**Figure I.20 : Trois types de texture réalisables par meulage spécial conçu par [101–103]**

Il s'agit d'un procédé simple, de grande productivité et bon marché qui permet la réalisation de trois formes de cavité sur des pièces planes et cylindriques [101–103] (Figure I.20). Avec ce procédé, Stepien est parvenu à texturer une plaque en acier rapide. Les cavités de rétention présentaient une profondeur de 20  $\mu\text{m}$  et une largeur de quelques millimètres.

L'inconvénient de ce procédé réside dans la répartition stochastique des grains abrasifs de la meule qui dégradent la rugosité de surface de manière inhomogène. Toutefois, cela ne semble pas affecter les dimensions et l'arrangement des cavités [102]. Ce procédé semble, de plus, bien adapté aux grandes dimensions et aux pièces cylindriques.

### I.4.2.b. Abrasive Jet Machining (AJM)

Ce procédé consiste à introduire des particules fines, généralement en oxyde d'aluminium ou en carbure de silicium, dans un flux de gaz à haute vitesse. Les particules d'air sont dirigées via une buse, dont la pointe est distante de moins de 1 mm vers la surface à travailler. Les particules viennent fracturer localement le matériau à travers un masque métallique ou polymérique, laissant apparaître des cavités.

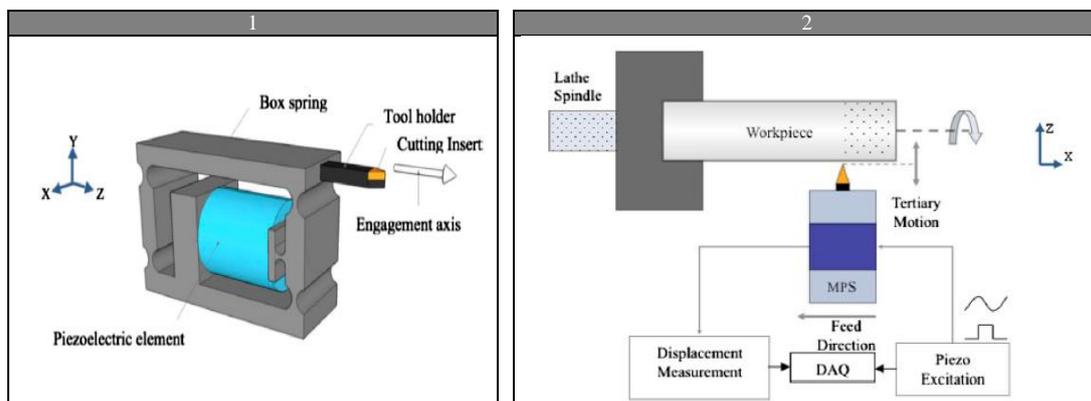
Ce procédé est très utilisé pour l'ébavurage, la préparation des surfaces avant traitement ainsi que pour le polissage des surfaces [104]. Très répandu dans l'industrie du verre, il peut être également employé sur les métaux.

L'AJM permet de réaliser des cavités de profils complexes sur des matériaux métalliques durs selon les formes données au masque. Il est également abordable et le marché des machines AJM est bien développé. Cependant le temps de cycle de ce procédé reste important. Qui plus est, les particules fines ne sont pas réutilisables et la buse elle-même a une durée de vie limitée de plusieurs centaines d'heures.

### I.4.3. Procédés par micro-coupe

#### I.4.3.a. Vibro-Mechanical Texturing (VMT)

Il s'agit d'un procédé de texturation utilisant un outil coupant (plaquette triangulaire dans la plupart des cas) oscillant sous l'action d'un élément piézoélectrique. Dans la pratique, la pièce est mise en rotation par un tour à commande numérique et l'élément piézo-électrique est inséré dans une pièce « quatre barres » que nous appellerons cage, déformable élastiquement et qui remplace le porte outil standard sur la tourelle (*Figure I.21*).



*Figure I.21 : Cage déformable dans le procédé VMT (1), système VMT complet (2) [105]*

Sous l'action de l'élément piézo-électrique, la cage se déforme suivant l'axe Z et engage l'outil dans la matière de la pièce à texturer. La profondeur de l'enlèvement de matière dépend de l'oscillation de l'élément piézo-électrique, de sa fréquence et de son amplitude ainsi que de la forme de l'outil coupant. Katoh [106] en 1984, est le premier à utiliser cette cage « quatre barres » pour texturer, système dès lors repris par plusieurs scientifiques [105,107,108]. Pour les matériaux tendres, tel l'aluminium, l'outil utilisé est une plaquette carbure triangulaire revêtue de titane et nickel. Autrement, pour les matériaux durs, une plaquette triangulaire en nitrure de bore cubique poly-cristallin est utilisée.

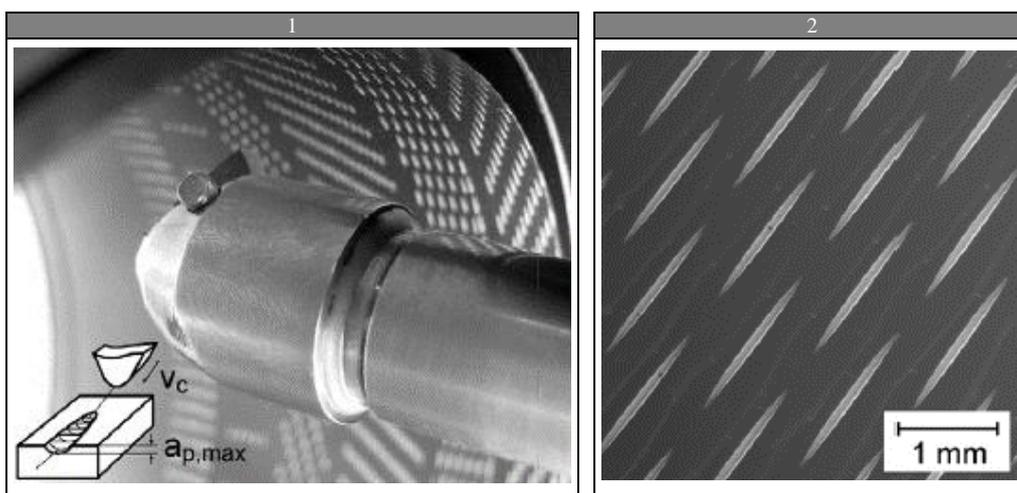
Greco et al. [105] sont parvenus à texturer deux matériaux différents avec ce procédé. Notons que la dureté de l'éprouvette acier ici texturée est très voisine de la dureté des portées de vilebrequins automobile, qui avoisine les 55 HRC. Ainsi, tout porte à croire que ce moyen est parfaitement adapté à notre problématique. Très modulaire, il s'adapte très bien aux machines à commandes numériques. Les formes des plaquettes et la commande des oscillations combinées à la flexibilité du tour permettent de faire varier la forme, la profondeur, le diamètre et la densité de couverture des cavités. Avec une

plaquette triangle de rayon de bec 0,97 mm, les limites minimales et maximales en profondeur étaient de 2 et 50  $\mu\text{m}$ , de 100 et 550  $\mu\text{m}$  pour l'espaceur transverse, quant à l'espaceur longitudinal, elles allaient de 50  $\mu\text{m}$  jusqu'à des stries continues circonférentielles. Notons que ce procédé est très proche des procédés utilisés dans l'industrie du stockage d'information sur surface [109].

#### 1.4.3.b. Le Fly cutting

Le fly cutting est un autre procédé de micro-coupe permettant l'obtention de cavités généralement allongées. Dans un mouvement radial imposé par une broche de fraiseuse, l'outil, monté à la périphérie d'un disque, s'engage dans la matière de la pièce selon une trajectoire hélicoïdale.

En Allemagne, Denkena et al. [109,110] ont étudié ce procédé. Ils sont parvenus à adapter la cinématique du fly cutting afin de texturer un cylindre intérieur de chemise de moteur (**Figure I.22**). Les dimensions de cavités sur les surfaces planes étaient de 1 à 2 mm en longueur, de 50 à 100  $\mu\text{m}$  en largeur et 5 à 30  $\mu\text{m}$  en profondeur.



**Figure I.22 : Fly cutting sur fût de carter cylindre [109,110]**

Le fly cutting est un procédé facile à mettre en place, bon marché et qui permet de réaliser des cavités allongées dans des gammes dimensionnelles pertinentes. L'inconvénient majeur de ce procédé est l'encombrement de l'outil face à une forme complexe telle qu'un vilebrequin. En effet, pour pouvoir engager un palier, il est nécessaire d'avoir recours à des outils avec de fortes excentricités et des bras de tailles réduites autrement, la morphologie de la cavité sera moins bien maîtrisée.

### I.4.4. Procédés par déformation plastique

#### 1.4.4.a. Moletage et autres procédés de roulage

Il s'agit ici de produire des cavités grâce un galet ou une bille sur lesquels sont disposées des aspérités de géométrie maîtrisée. L'outil, en roulant sur la pièce, va imprimer sur sa surface le négatif des

aspérités. Ce procédé est essentiellement utilisé sur des pièces cylindriques. Plusieurs dérivés du procédé existent, avec des cinématiques différentes et des formes d'outils différentes. Dans sa forme la plus simple, l'outil est exempt d'aspérité. S'il s'agit d'un galet, on retrouve alors un procédé de galetage, très répandu pour améliorer la résistance à la fatigue mais également pour la super finition de surface [111]. Dès lors, le procédé de galetage permet de réduire la rugosité vers une limite estimée entre Ra 0,02  $\mu\text{m}$  et 0,04  $\mu\text{m}$ , ce qui en fait un concurrent du toilage. Dans sa forme habituelle, l'outil est une bille ou un galet texturé. Sous cette forme, le roulage est principalement utilisé afin d'augmenter l'adhérence d'une pièce, de fabriquer des filetages et, de manière générale, pour la texturation de surface.

L'université de Rzeszów en Pologne, très active sur la texturation par roulage [58,112–116], a mis au point un système adaptable sur un tour et permettant de travailler des surfaces planes et cylindriques, aussi bien intérieures qu'extérieures [113]. Cet outil peut produire des cavités de profondeur allant de 3  $\mu\text{m}$  à 200  $\mu\text{m}$  [115]. En 2009, faisant suite à des travaux plus anciens [113], Galda et al. [58] ont eu recours à ce système afin de texturer une bague en acier de dureté 32 HRC. Ils ont produit des cavités de forme sphérique et en goutte, de 55 à 60  $\mu\text{m}$  en profondeur, de 500 à 800  $\mu\text{m}$  en largeur et de 800 à 1600  $\mu\text{m}$  en longueur. Plus récemment, Koszela et al. [115] ont utilisé ce système sur des chemises de cylindres. Notons qu'il existe de nombreux dérivés au roulage, le vibro-rolling en est un exemple. Il a été développé par Schneider en 1984 [117] et consiste en la production de stries par déformation plastique à l'aide d'un galet indenteur vibrant qui roule sur la surface à texturer. Il semble avoir été peu étudié.

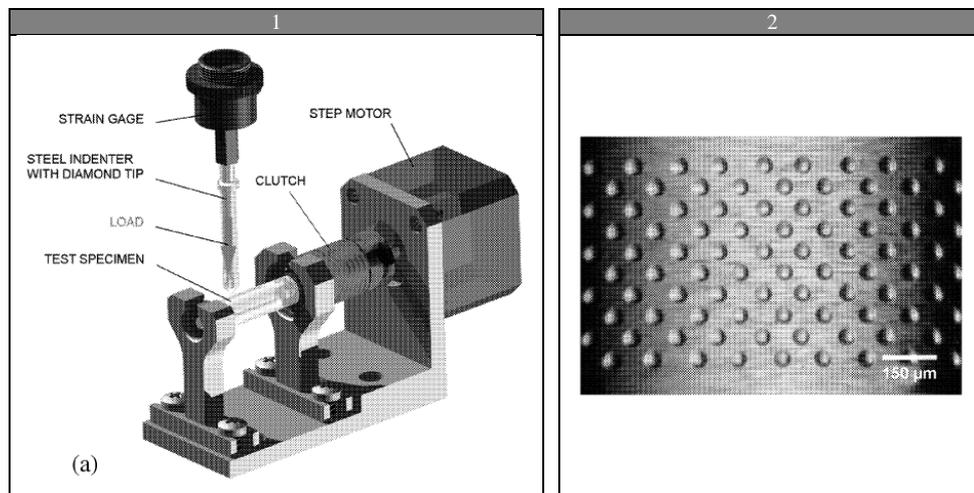
La texturation par moletage, et plus généralement par roulage, est bon marché, rapide à mettre en place et ne produit aucun copeau. De plus, le temps de texturation est convenable pour une industrialisation de masse. Toutefois, des études ont montré que les dimensions des cavités étaient parfois inhomogènes sur la surface. Ceci peut s'expliquer par le non parallélisme de l'axe de l'outil par rapport à la surface à texturer, phénomène qui peut être accentué dans le cas de surfaces avec d'importants défauts de forme. Ce procédé génère également de légers bourrelets de matière sur les bords des cavités et altère localement la structure métallurgique. De plus, sa flexibilité est moyenne car il nécessite d'avoir recours à autant d'outils que de formes de cavités.

#### *1.4.4.b. Indentation*

Contrairement au roulage, il s'agit ici d'imprimer plastiquement le motif d'un outil texturé sur la pièce, le tout sans glissement ni roulage et sous un chargement normal.

Au milieu des années 2000, Petterson et al. [118,119] ont eu recours à ce procédé pour texturer des surfaces planes. Les outils obtenus par lithographie ont permis d'imprimer des cavités prismatiques très fines de quelques micromètres de profondeur et de largeur. Ils soulignent cependant l'apparition de bourrelets en périphérie. D'autres études se sont concentrées sur l'utilisation d'indenteur à l'instar des

machines de dureté (*Figure I.23*). Krupka et al. [32,33] ainsi que Samanek et al. [120] ont ainsi utilisé un indenteur Rockwell pour réaliser des cavités sur une bille et un cylindre en acier. Ils sont ainsi parvenus à réaliser des cavités d'une profondeur de 400 nm et 800 nm.



*Figure I.23 : Système d'indentation réalisé par Samanek et al. [120] (1), texturation obtenues (2)*

L'utilisation d'un indenteur, à des fins de texturation, est une solution peu coûteuse et qui ne produit aucun copeau. Contrairement au roulage, il permet un bon contrôle des dimensions de cavité. La texture finale est contrôlée par la texture de l'outil d'impression, ce qui assure une très bonne répétabilité. Cependant, du fait du repositionnement à chaque cycle de l'indenteur, le temps nécessaire à la réalisation d'une texturation de surface de grandes dimensions est plus que conséquent [120].

#### **I.4.5. Conclusion**

Comme nous le voyons, il existe de nombreux procédés de texturation de surface. Certains sont l'objet de beaucoup d'attention, tel le *LST*, d'autres, plus traditionnels mais néanmoins très répandus dans l'industrie, sont moins étudiés. En termes géométriques, les textures constatées sont diverses et propres à chaque procédé, allant de la cavité circulaire à la strie continue en passant par l'ellipse, la goutte d'eau ou même à des formes complètement quelconques (*Table I.2*).

**Table I.2 : Caractéristiques géométriques des textures provenant de plusieurs procédés de texturation**

Procédés	Réf.	Motif de la texture	Diamètre		Profondeur (μm)	Densité (%)
			Longueur (μm)	Largeur (μm)		
<b>LST</b>	[121]	Circulaire	106		15	-
	[89]	Circulaire	35→50		10→30	8→30
	[90]	Circulaire	100		2	20
	[91]	Circulaire	50→80		2	10→60
	[92]	Circulaire	220		10	7→27
	[93]	Circulaire	80→130		11→32	14→30
	[122]	Circulaire	58→80		4→7	7→15
	[123]	Circulaire	72		8	50
	[124]	Circulaire	100		10	13
[125]	Circulaire	90→100		9→10	53→66	
<b>ECM</b>	[52]	Circulaire; Strié ; Chevrons	25→∞	25→130	2→8	2→24
	[126]	Circulaire	2000		50	-
<b>LIGA</b>	[99]	Hexagonale	550	550	3-100	41
<b>Meulage spécial</b>	[101]	Strié	∞	2700	60	-
	[102]	Strié	∞	2000	20	-
<b>VMT</b>	[105]	Elliptique, strié	50 →∞	100→550	2→50	-
<b>Fly cutting</b>	[109]	Elliptique	1000→2000	50→100	5→30	-
<b>Moletage</b>	[58]	Circulaire, goutte d'eau	800→1600	500→900	55→60	10→20
	[112]	Strie hélicoïdale, circulaire	-	-	60	-
	[115]	Circulaire	150→330		5→13	11→14
<b>Indentation</b>	[32]	Circulaire	-		0,2→0,3	-
	[33]	Circulaire	30→60		0,2→0,8	-
	[120]	Circulaire	45		0,4→0,8	-

Parmi l'ensemble des procédés mentionnés, le *LST*, le moletage et le *VMT* attirent particulièrement l'attention. Ils permettent en effet une texturation sur acier, avec une productivité proche des attentes industrielles. Ils permettent également une importante diversité des motifs de textures moyennant soit une simple reconfiguration des paramètres machines (cas du *LST*) soit des changements d'outils (cas du *VMT* et du moletage). Ces trois procédés travaillent dans des échelles légèrement différentes. On constate en effet que les textures *LST* peuvent atteindre des dimensions minimales de l'ordre de 30 μm, tandis que les dimensions des textures *VMT* et moletées ne descendent pas en dessous 100 μm (*Table I.2*).

## Conclusion

De manière générale, le fonctionnement des paliers de vilebrequin est bien identifié. Les choses se compliquent très nettement si l'on considère les interactions entre la mécanique des volumes et la mécanique des surfaces. Or, c'est bien ici que la texturation agit. À l'heure actuelle, la physique de cette interaction échappe encore pour la plus grande part aux scientifiques. Néanmoins, la majorité des publications scientifiques de ces dernières années s'accordent sur la phénoménologie générale. En dehors de cette compréhension physique, de véritables tendances texturales se dégagent et commencent à constituer, en arrière-plan, une véritable base de données, ce qui offre un support non négligeable pour élaborer notre étude.

D'un point de vue process, les capacités texturales du toilage semblent ne jamais avoir été étudiées en profondeur et les références relatives au procédé même, se limitent bien souvent aux rugosités moyennes... Aussi, on constate que beaucoup de leviers d'action n'ont pas été utilisés. À première vue, des technologies, telles que le *LST*, le moletage ou le *VMT* semblent plus appropriées en permettant une maîtrise déterministe des caractéristiques texturales, une très grande diversité des motifs, tout en garantissant une importante productivité. Dans un contexte de sévérisation générale des critères de pollution, tout l'enjeu de notre étude sera d'explorer les limites texturales du toilage conventionnel, d'étudier sa pertinence, à la fois process et fonctionnelle vis-à-vis des autres procédés de texturation, en particulier du *LST*.

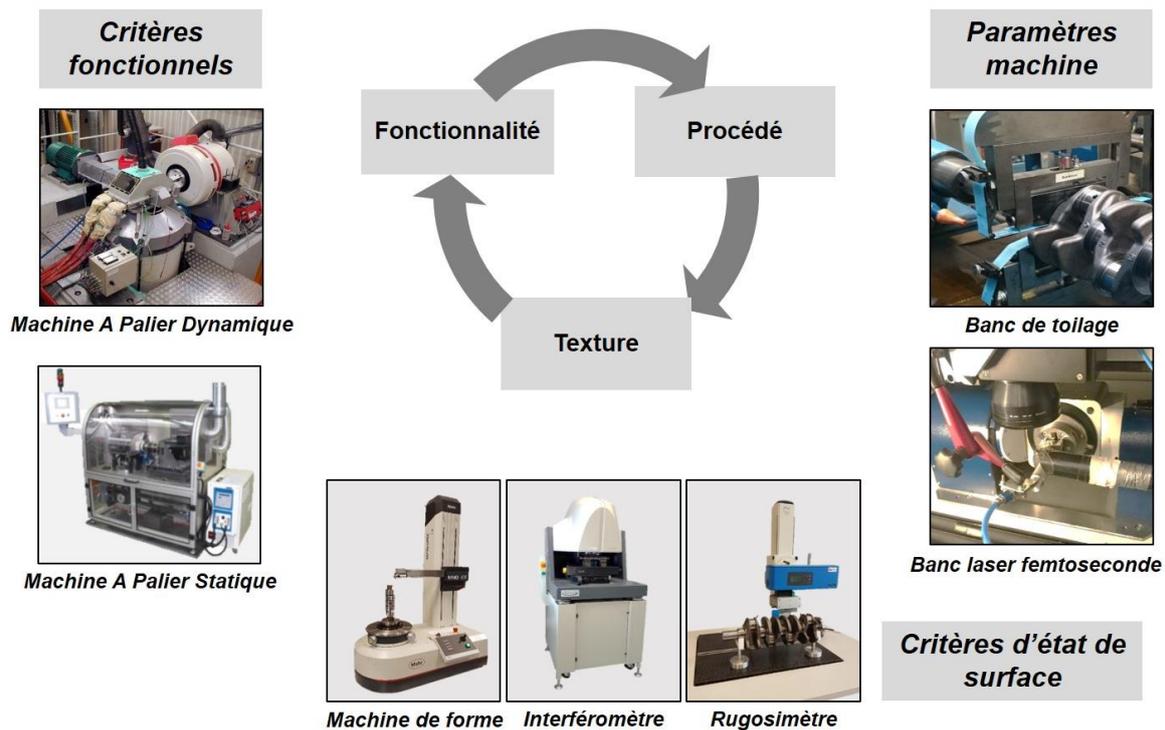
## **Chapitre II.**

# **Méthodologie, dispositifs et protocoles expérimentaux**

## Introduction

La démarche entreprise tout au long de ce travail consiste à corrélérer le triptyque procédé/texture/fonctionnalité. Cette corrélation a été réalisée en deux temps. Le premier est consacré au couplage entre les procédés et la caractérisation des textures (*Chapitre III* et *Chapitre IV*) et le second, au couplage entre la caractérisation des textures et les performances fonctionnelles des paliers (*Chapitre V*). Plusieurs étapes élémentaires ont dû être effectuées (*Figure II.1*) :

- 1) l'étude et la fabrication d'une large diversité de textures par l'exploration des paramètres process, à la fois en toilage et en LST ;
- 2) la caractérisation des surfaces des portées texturées, principalement au moyen d'écartés de forme, de paramètres normalisés 2D et d'autres paramètres innovants, comme la densité de rétention, la densité de vallées et la signature multi-échelle des surfaces ;
- 3) l'analyse comparative des performances dynamique et statique des différentes textures générées puis la définition d'une texture fonctionnellement et industriellement optimale.



*Figure II.1 : Démarche générale et moyens associés*

Ce chapitre est consacré à la présentation des moyens et protocoles mis en place pour ces tâches élémentaires. La plupart des équipements expérimentaux présentés ici sont mis en place dans une plateforme de recherche collaborative entre RENAULT et le laboratoire MSMP, le POLE PROCESS ECO<sup>2</sup>. Le présent chapitre se décompose en quatre parties. Dans la première seront présentés les matériaux utilisés, éprouvettes et vilebrequins d'essais et dans la seconde, les équipements process, le

banc de toilage et le banc de texturation *LST*. Seront présentés, dans la troisième partie, les différents moyens de caractérisation d'état de surface, de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique. Enfin, dans la dernière, seront présentés les bancs de caractérisation fonctionnelle, statique et dynamique, destinés à l'évaluation des performances des portées texturées.

## II.1. Éprouvettes d'essais

### II.1.1. Éprouvettes de développement process

L'un des principaux objectifs de ce travail est de développer le pouvoir texturant du procédé de toilage afin de parvenir à une grande diversité texturale. Pour ce faire, nous avons utilisé deux types d'éprouvettes (*Table II.1*):

- les éprouvettes de toilage en acier, conçues et fabriquées spécialement pour cet objectif afin de réduire les coûts et la durée de caractérisation des états de surface. Elles sont composées de cinq tourillons. Hormis l'absence de trous de lubrification, elles ont été fabriquées suivant la même gamme que les vilebrequins acier RENAULT ;
- et les vilebrequins acier, qui ont été prélevés sur les lignes de production en sortie de rectification. Ces derniers sont destinés à équiper les moteurs diesel de la gamme DCI 130. On y retrouve cinq tourillons et quatre manetons. Étant donné la conception du banc de toilage, seuls les tourillons ont fait l'objet d'étude.

D'une manière tout à fait générale, les éprouvettes de toilage ont été employées pour explorer l'impact des variables process tandis que les vilebrequins ont été destinés aux étapes de validation. Ces deux types d'éprouvettes de développement process sont en acier allié. Leur dureté a été amenée au-dessus de 50 HRC par induction thermique sur une épaisseur de plusieurs millimètres. Dans l'ensemble, seules leurs géométries et leurs dimensions permettent de les distinguer. La très grande majorité des résultats présentés dans le présent mémoire ont été effectués sur les éprouvettes de toilage.

*Table II.1 : Caractéristiques des éprouvettes de développement process du toilage*

Type	Tourillons	Manetons	Matériau	Macro dureté	Photo
Éprouvette de toilage	Ø = 54,795 mm L = 30 mm	Absence de manetons	D38MnSV6Pb	50 - 55 HRC	
Vilebrequin	Ø = 52,095 mm L = 20 mm	Ø = 48,2 mm L = 22 mm	D38MnSV6Pb	50 - 55 HRC	

### II.1.2. Éprouvettes de caractérisation fonctionnelle

L'utilisation de bancs de caractérisation fonctionnelle a nécessité de travailler sur des éprouvettes spécifiques, conçues à cet effet. On en distingue deux types selon le banc de caractérisation considéré (*Table II.2*). Ainsi nous retrouvons :

- les éprouvettes à Machine À Palier Statique (*MAPS*), qui se présentent sous la forme de manetons alésés équipés d'un unique trou de lubrification. Pour être utilisables sur banc, ces éprouvettes sont fixées sur un axe doté de deux tourillons.
- et, les éprouvettes à Machine À Palier Dynamique (*MAPD*), qui sont constituées de deux tourillons et d'un maneton dont la lubrification en huile est assurée par un réseau de trous débouchants.

Les éprouvettes sont donc particulièrement représentatives des produits RENAULT, ce qui assure le transfert à l'échelle industrielle de l'ensemble des résultats de ce travail de recherche.

**Table II.2 : Caractéristiques des éprouvettes de caractérisation fonctionnelle**

Type	Tourillons	Manetons	Matériau	Macro dureté	Photo
<b>Éprouvette MAPS</b>	Ø = 54,795 mm L = 20 mm	Ø = 43,97 mm L = 20 mm	D38MnSV6Pb	50 - 55 HRC	
<b>Éprouvette MAPD</b>	Ø = 54,795 mm L = 20 mm	Ø = 43,97 mm L = 22 mm	D38MnSV6Pb	50 - 55 HRC	

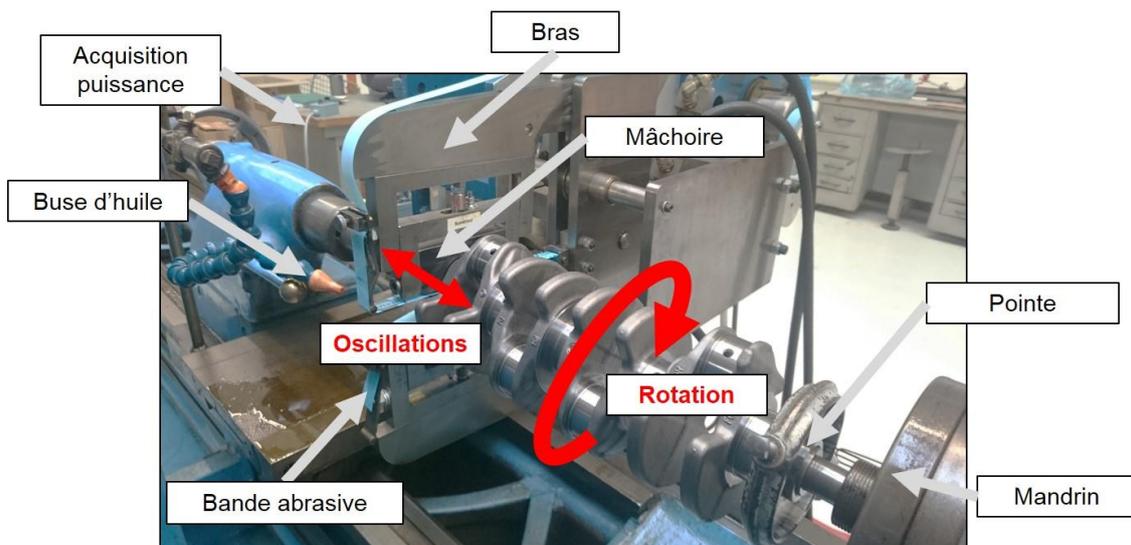
## II.2. Fabrication des textures

### II.2.1. Banc de toilage

#### II.2.1.a. Principe et constitution

Le banc de toilage instrumenté qui a été utilisé dans ce travail a été développé et implanté au sein du laboratoire MSMP dans le cadre d'un précédent travail de recherche [79]. Initialement conçu pour être modulaire et représentatif des machines de production, il a été le support de plusieurs études dans le cadre du partenariat avec RENAULT.

Le banc est constitué d'un appareil de toilage de type Bader monté directement sur le support d'outil d'un tour conventionnel (*Figure II.2*). L'appareil rapporté a essentiellement pour fonction de mettre l'outil de toilage dans un mouvement oscillatoire régulier et de presser la bande abrasive de manière constante à une pression définie sur la surface de la portée cylindrique. Le tour se charge de la mise en position de la pièce et de sa mise en rotation. Le banc ne permet pas le toilage de portée excentrée, par conséquent, sur vilebrequin, seuls les tourillons peuvent être toilés.



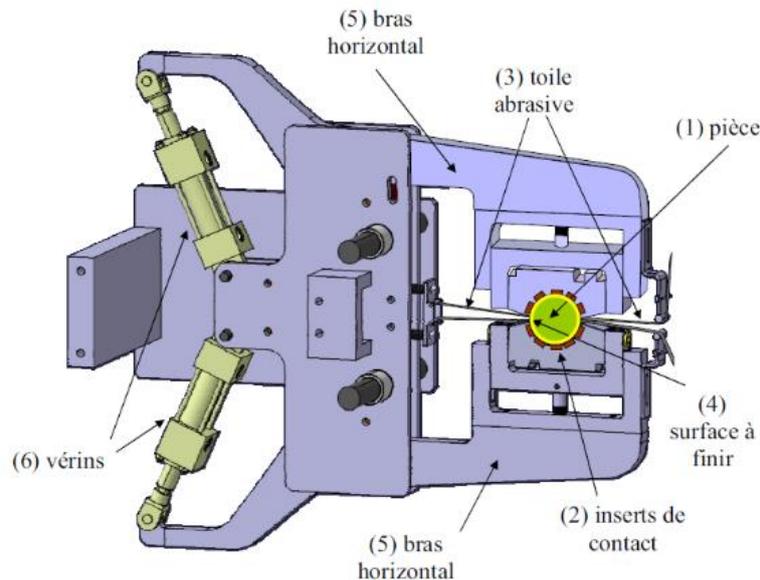
*Figure II.2 : Vue d'ensemble du banc de toilage des portées cylindriques de vilebrequins*

Les principaux composants du banc sont ainsi les suivants :

- un tour conventionnel caractérisé par une puissance à la broche de 9 kW : celui-ci assure essentiellement le serrage avec la mise en rotation de la pièce et commande le mouvement de déplacement éventuellement nécessaire de l'appareil rapporté. La pièce est montée entre deux pointes : l'une dans la broche du tour, équipée d'un système d'un toc/pousse toc pour l'entraînement en rotation, l'autre dans la poupée mobile. Le tour est également équipé d'un

système d'arrosage par huile avec son système de filtration à cartouche composé de trois filtres successifs de 1  $\mu\text{m}$ . Le débit maximum est de 5 l/min ;

- un bras de toilage par plongée : la bande abrasive est pressée sur la pièce cylindrique par l'intermédiaire d'un bras de la pièce. La tête de toilage de l'appareil Bader (*Figure II.3*) est très voisine de celle qui est utilisée dans l'industrie automobile. En fonctionnement, la bande abrasive (3) est pressée contre la surface à finir (4) par l'intermédiaire de deux mâchoires (2). Selon l'application et la qualité recherchée, des mâchoires avec des inserts durs ou souples seront utilisées. La fermeture des mâchoires est assurée par l'intermédiaire de vérins (6) par serrage hydraulique des bras horizontaux (5) ;
- un système d'entraînement électrique servant à produire l'oscillation du cylindre de contact ou des mâchoires : le mouvement rotatif d'un moteur électrique est converti en mouvement oscillant par le biais d'un excentrique fixe (système bielle - manivelle). La fréquence d'oscillations peut être modifiée de 0 à 550 cycles/min en fonction de la vitesse de rotation du moteur. L'amplitude de l'oscillation est déterminée par la valeur de l'excentration de la manivelle et peut être réglée de 0 à 10 mm.



*Figure II.3 : Schéma du système de serrage*

### *II.2.1.b. Paramètres expérimentaux*

Le toilage est un procédé avec un grand nombre de variables opératoires. De manière synthétique, nous pouvons en distinguer trois types:

- celles liées au dispositif qui définissent les conditions cinématiques et de contact. Elles sont propres à l'ensemble composé du tour conventionnel et de l'appareil Bader avec son système d'oscillations ;

- celles liées aux consommables. Ces derniers sont propres aux bandes abrasives et aux propriétés du lubrifiant ;
- et enfin, celles relatives au mode opératoire. Typiquement, le nombre de passes ou l'avance de la bande.

La **Table II.3** regroupe l'ensemble de ces paramètres. Certains d'entre eux ont fait l'objet de ce travail, ce sont les paramètres variables, tandis que d'autres, ont été maintenus constants. La **Table II.3** nous renseigne également sur la plage de variation des paramètres étudiés. Celle-ci est composée des bornes minimale et maximale utilisées lors de nos travaux.

**Table II.3 : Paramètres expérimentaux en toilage**

Ensemble	Paramètre	Type	Fixe	Variable	Plage étudiée
Machine	Vitesse de rotation	Quantitatif		x	32 → 800 tr/min
	Pression des bras	Quantitatif		x	0,2 → 1 MPa
	Fréquence des oscillations	Quantitatif		x	0 → 550 cycles/min
	Amplitude des oscillations	Quantitatif	x		1 mm
	Temps de cycle	Quantitatif		x	6 → 96 s
	Type de mâchoires	Qualitatif		x	Voir <b>Table II.4</b>
	Avance de la bande	Quantitatif	x		100 %
Consommables	Lubrification	Qualitatif	x		Houghton Cutmax H05
	Granulométrie	Quantitatif		x	1 → 80 $\mu$ m
	Modèle de bande abrasive	Qualitatif		x	Voir <b>Table II.5</b>

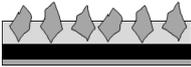
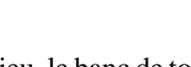
En outre, nous avons eu recours à plusieurs types de mâchoires de toilage selon les dimensions de la portée et les objectifs considérés. Leurs caractéristiques sont renseignées en **Table II.4**.

**Table II.4 : Mâchoires de toilage utilisées**

Type	Modèle	Inserts	Dureté	Pièce concernée	Dimensions contact	Photo
Enveloppantes dures	SUPFINA $\varnothing = 52,095$ mm	Acier 16MnCr6 diamanté	10 Mohs	Vilebrequins	l = 55 mm L = 19 mm	
	NEUTEQ $\varnothing = 54,795$ mm	Céramique Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9 Mohs	Éprouvettes de toilage et MAPD	l = 75 mm L = 21 mm	
	NEUTEQ $\varnothing = 43,97$ mm	Céramique Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9 Mohs	Éprouvettes MAPS/MAPD	l = 50 mm L = 20 mm	
Enveloppantes souples	NEUTEQ $\varnothing = 54,795$ mm	Élastomère uréthane	90 Shore	Éprouvettes de toilage et MAPD	l = 50 mm L = 21 mm	
	NEUTEQ $\varnothing = 43,97$ mm	Élastomère uréthane	90 Shore	Éprouvettes MAPS/MAPD	l = 50 mm L = 20 mm	
Tangentielles souples	SUPFINA flexible	Élastomère vulkolan	90 Shore	Vilebrequins	l = 10 mm L = 19 mm	

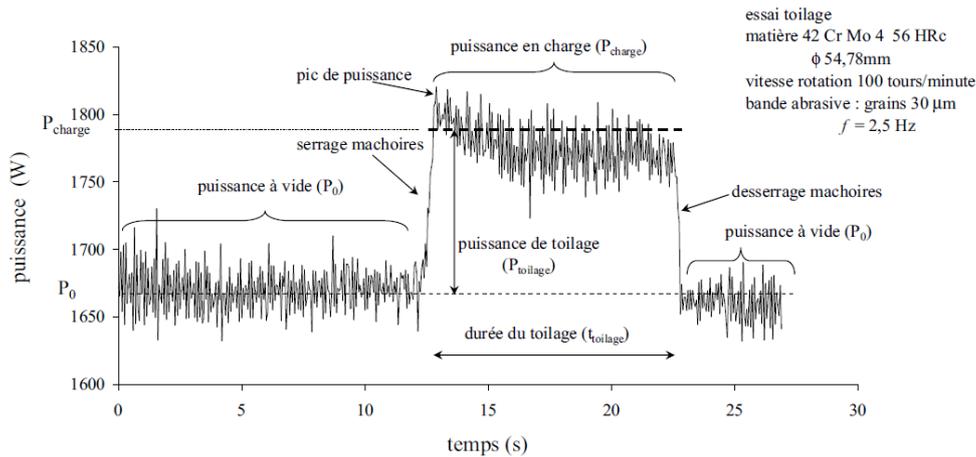
Plusieurs modèles de bandes abrasives ont également été utilisés afin d'étudier leur pouvoir texturant en toilage. Leurs caractéristiques sont renseignées en **Table II.5**. Ce levier d'action sera longuement étudié et discuté dans le **Chapitre III**.

**Table II.5 : Bandes abrasives utilisées**

Type	Modèle	Grains	Déposition	Schéma
Microfinishing Films (MF)	HERMES FB637	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Par électrostatisme	
	WENDT WF1301			
Lapping Films (LF)	3M 261X		Par laminage	
	WENDT WS2000			
Structures agglomérées	3M 253FA			

### II.2.1.c. Mesures physiques « in process »

Afin de permettre une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, le banc de toilage a été équipé d'un système d'acquisition de puissance. La mesure de la puissance consommée par le processus de toilage  $P$  est déterminée par la différence entre la puissance moyenne en charge et celle à vide de la machine-outil. Son acquisition « in process » s'effectue par le biais d'un transducteur de puissance DigitalWay - 16 kW associé au logiciel de traitement Tool Power Analyser. La **Figure II.4** montre les variations typiques de la puissance en charge (mesure réalisée lorsque la toile est totalement en prise avec la pièce) et celle à vide en fonction du temps. Ainsi, la puissance de toilage s'additionne à la puissance à vide dès le serrage des mâchoires de travail, puis progresse en quelques secondes pour atteindre une valeur maximale. Elle décroît ensuite pour se stabiliser pendant le reste de la durée de toilage.



**Figure II.4 : Courbe type de l'évolution de la puissance consommée au cours du toilage [79]**

Combinée avec la mesure du volume de matière enlevée sur la pièce, la mesure de la puissance consommée en toilage nous offre la possibilité de calculer l'énergie spécifique de toilage [79,127]. Elle est, par définition, l'énergie nécessaire pour enlever  $1 \text{ mm}^3$  de matière. Son expression est donnée par l'équation (13).

$$Es = \frac{P \times tc}{V} \quad (13)$$

Avec  $Es$  l'énergie spécifique,  $P$  la puissance consommée en toilage,  $tc$  le temps de cycle et  $V$  le volume de matière enlevée. La valeur de l'énergie spécifique nous renseigne sur l'efficacité d'un procédé à enlever de la matière. Plus cette valeur est faible, plus le procédé est efficace. À titre d'exemple, dans le cas du toilage, on observe que l'utilisation de gros grains (par exemple  $80 \mu\text{m}$ ) diminue significativement l'énergie spécifique, au même titre que l'augmentation de la pression de contact [79].

#### II.2.1.d. Procédure expérimentale

La **Table II.6** récapitule la procédure expérimentale mise en œuvre. Comme précisé en **II.1.2**, l'ensemble des textures qui ont été réalisées par *LST* ont été appliquées sur des éprouvettes préalablement toilées dédiées aux bancs de caractérisations fonctionnelles. Notons que ces pièces ont subi par la suite une dernière passe de toilage afin de garantir l'absence de bourrelets autour des motifs de cavités induits par les chocs laser.

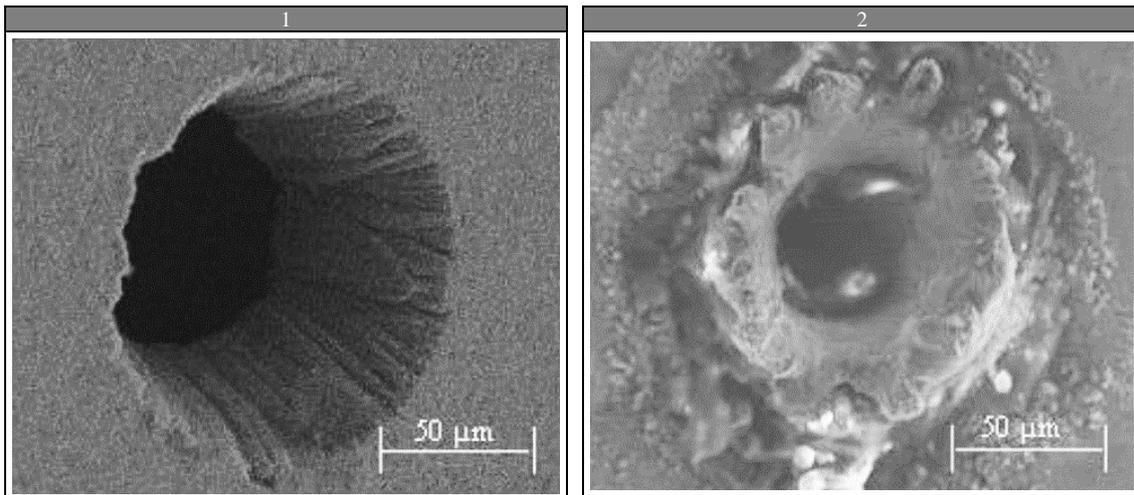
**Table II.6 : Procédure expérimentale du banc de toilage**

Étapes	Opérations
1	Nettoyage de la pièce (acétone & air comprimé)
2	Chargement de la pièce et alignement bras/pièce
3	Allumage de la lubrification
4	Mise en rotation de la pièce
5	Acquisition de la puissance à vide
6	Fermeture du bras, acquisition simultanée de la puissance en charge
7	Arrêt de la rotation de la pièce
8	Enregistrement des puissances mesurées
9	Avance manuelle de la bande abrasive

## II.2.2. Banc laser femto seconde TRUMPF

### II.2.2.a. Principe et constitution

L'exploitation de la technologie *LST* a été rendue possible par l'utilisation de moyens et de compétences externes. Suite au benchmark de plusieurs fournisseurs, il s'est avéré que l'entreprise allemande TRUMPF était la plus à même de répondre à notre problématique de texturation fine sur pièces cylindriques. Cette entreprise est par ailleurs l'un des leaders internationaux dans le secteur de la fabrication de sources laser. Dans le cadre d'une prestation entre leur laboratoire et le groupe RENAULT, nous avons pu mener un ensemble d'essais de texturation au moyen d'une machine *LST* dédiée que nous qualifierons de « pré-industrielle ». Cet équipement a été utilisé dans notre étude afin de texturer sur des éprouvettes toilées, un réseau carré de cavités fines et hémisphériques. Ledit équipement est capable de texturer une portée cylindrique avec un temps de cycle contenu, allant de la minute à un peu moins d'une heure dans le cas d'une texturation dense (10 %) et profonde (8  $\mu\text{m}$ ). Ceci constitue une véritable prouesse car chaque portée est constituée d'environ un million de cavités... De plus, grâce à la très faible durée de l'impulsion (900 fs), la qualité texturale est irréprochable et aucun « bourrelet » résiduel n'est observable sur la périphérie des cavités, ce qui n'est malheureusement pas le cas avec des sources laser picosecondes ou nanosecondes. (**Figure II.5**). Cette interaction laser/matière est d'ailleurs l'objet de bon nombre d'études [128].



**Figure II.5 : Usinage avec des impulsions de 180 fs (1), usinage avec des impulsions de 8 ns (2)**

La machine *LST* que nous avons utilisée se décompose en deux ensembles :

- une machine-outil à commande numérique dédiée cinq axes GFH GmbH GL.evo qui a pour but la mise et le maintien en position de la pièce, le contrôle du positionnement angulaire de la pièce par rapport au faisceau laser et la mise en sécurité de l'opérateur (**Figure II.6.1**). Sa charge utile est de 10 kg, autrement dit légèrement moins que la majorité des vilebrequins et sa répétabilité angulaire est de 1 arcsec.
- une source laser femto seconde TRUMPF Femto 5080 équipée de son système de visée à miroir galvanométrique qui a pour rôle de générer un faisceau laser pulsé ultra-court permettant l'ablation du matériau texturé et de piloter les déplacements rectilignes du faisceau par rapport à la pièce (**Figure II.6.2**). La puissance moyenne de cette source est de 80 W en continu et la durée d'impulsion minimale de 900 fs. En fonctionnement, l'énergie et la fréquence maximum de l'impulsion sont respectivement de 200  $\mu$ J et 1 MHz. Le système de visée a été quant à lui équipé d'une focale de 100 mm. Notons également la présence d'un système de soufflage et d'aspiration dirigé vers la zone irradiée. Il a pour objectif d'éliminer le gaz composé de matière ablatée en suspension.

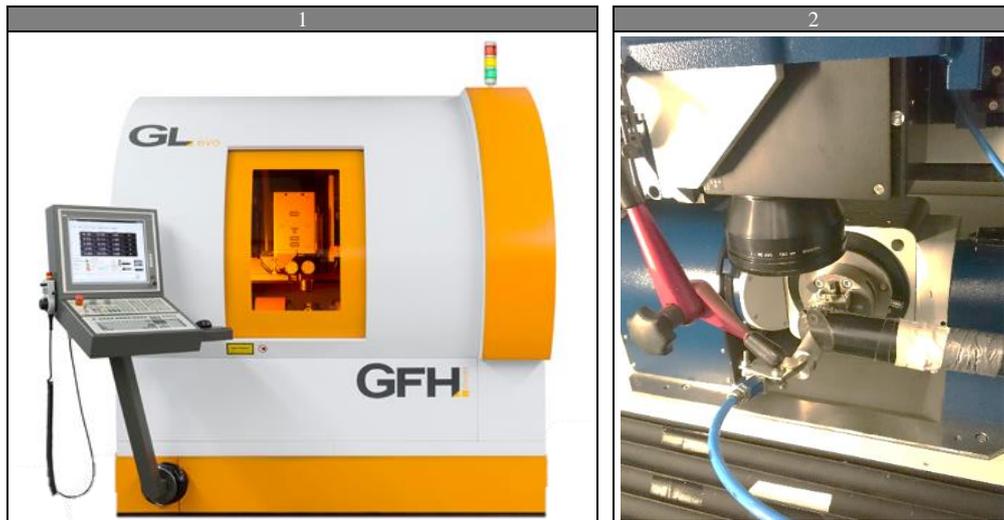


Figure II.6 : Machine-outil GFH (1), prise pièce (2)

La cinématique entre la pièce et le faisceau est pilotée à la fois par le système de visée et par la rotation de la broche. Dans la pratique, l'automatisation des étapes de déplacement est assurée par la partie logicielle de la machine. Celle-ci nécessite la saisie des paramètres de maille du réseau de cavités et les dimensions de la zone parcourue par le faisceau laser, sans aucune rotation de la pièce. Les deux étapes élémentaires successives de la cinématique de la pièce et du faisceau sont présentées en **Figure II.7**.

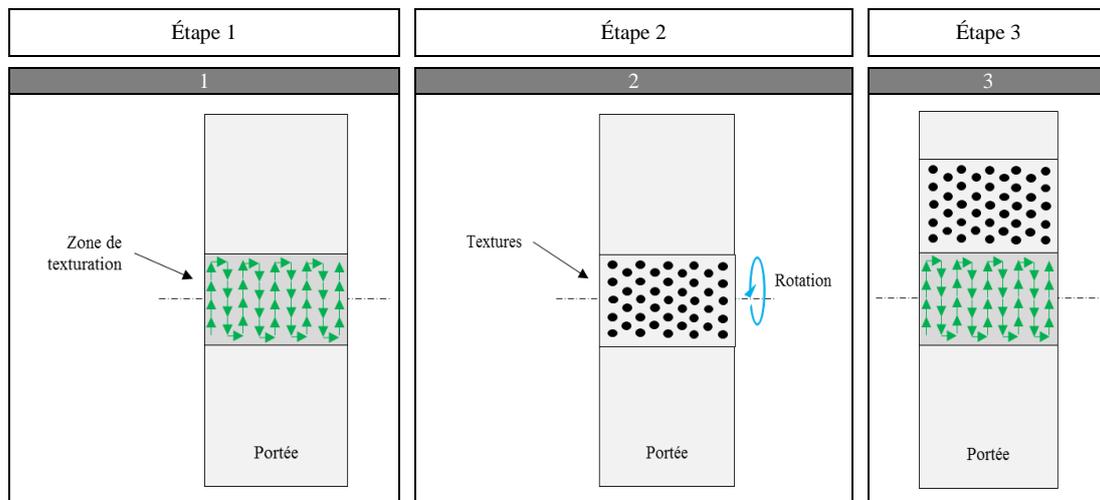


Figure II.7 : Étapes de la cinématique laser/pièce vue de dessus

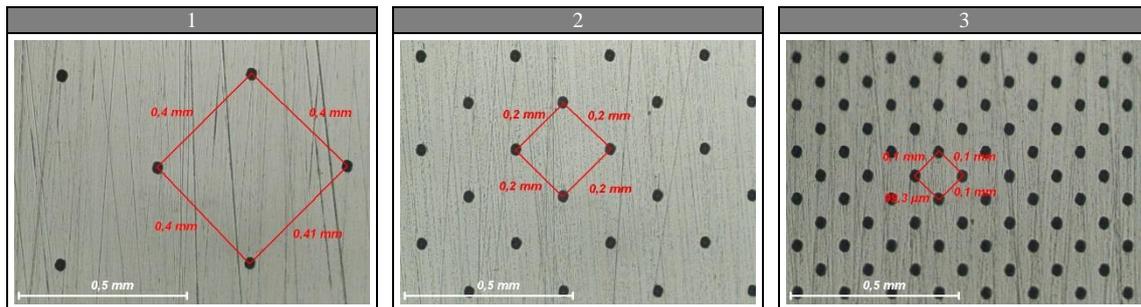
### II.2.2.b. Paramètres expérimentaux

Comme le procédé de toilage, la technologie *LST* fait intervenir un grand nombre de variables process. Ces dernières sont données en **Table II.7**.

Table II.7 : Paramètres expérimentaux du banc LST

Ensemble	Paramètres	Type	Fixe	Variable	Plage étudiée
Source laser & système de visée	Durée d'impulsion	Quantitatif	x		900 fs
	Energie d'impulsion	Quantitatif	x		2,5 $\mu$ J
	Temps de maintien	Quantitatif		x	1 $\rightarrow$ 3 s
	Fréquence du faisceau	Quantitatif	x		800 KHz
	Mise en forme du faisceau	Qualitatif	x		Gaussien
	Distance de texturation	Quantitatif	x		Au point focal
	Diamètre du faisceau	Quantitatif	x		30 $\mu$ m
	Déplacement du faisceau (distance entre 2 cavités)	Quantitatif		x	100 $\rightarrow$ 400
	Soufflage et aspiration	Qualitatif	x		Avec

Les textures *LST*, fabriquées dans le cadre de cette étude, sont toutes composées de cavités hémisphériques de diamètre 30  $\mu$ m de profondeur variable (2,5 et 9  $\mu$ m) réparties sur la surface selon un maillage carré de paramètres de maille variable lui aussi (**Figure II.8**). Pour cela, il a d'abord été nécessaire d'effectuer des essais de mise au point process afin d'explorer l'interaction laser/matière. Suite à cela, a été déterminée une configuration type optimisant la qualité de texturation, à savoir la régularité des contours en se basant sur des observations *MEB* et interférométriques. Ensuite, seuls le temps de maintien (qui agit sur la profondeur des cavités) et les paramètres de déplacement du faisceau (qui agit sur la distance entre les cavités) ont été modifiés pour générer des textures diverses.

Figure II.8 : Réseau de cavités *LST* vu au microscope optique, 0,5 % (1), 2,1 % (2), 8 % (3)

### II.2.2.c. Procédure expérimentale

La **Table II.8** présente la procédure expérimentale mise en œuvre lors des essais de texturation. Comme précisé en **II.1.2**, les textures ont été appliquées sur des éprouvettes MAPS préalablement toilées.

Table II.8 : Procédure expérimentale de texturation sur banc *LST*

Étapes	Opérations
1	Nettoyage de la pièce (acétone & air comprimé)
2	Chargement de la pièce et alignement système de visée/pièce
3	Mise au point du système de visée (focus du faisceau) et fermeture de la fenêtre protectrice
4	Texturation <i>LST</i> avec la cinématique combinée
5	Fin de la texturation et ouverture de la fenêtre protectrice

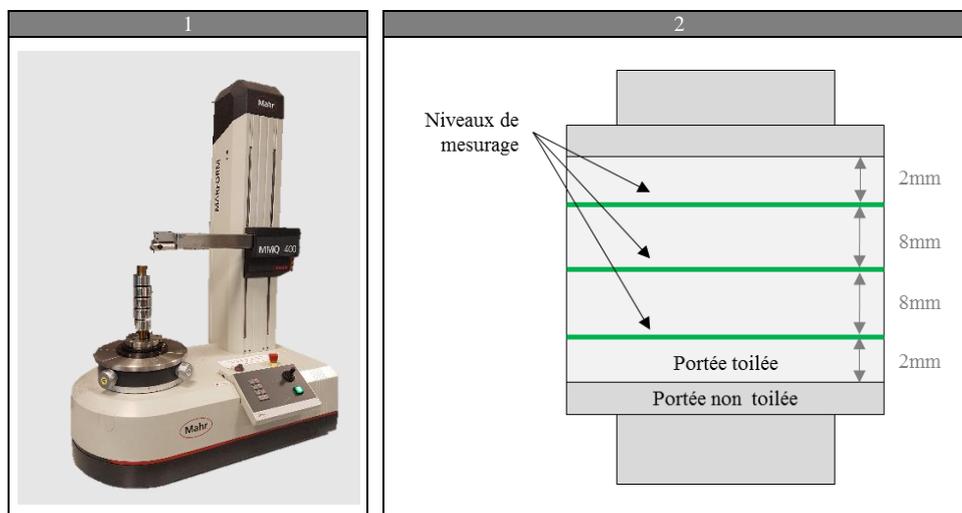
## II.3. Caractérisation des textures

Dans cette partie sont présentés l'ensemble des moyens métrologiques ainsi que les critères morphologiques utilisés pour caractériser les surfaces texturées. Les mesures qui en découlent nous permettent, d'une part, de mettre en lumière des tendances physiques avec les paramètres process et/ou fonctionnels et d'autre part, de contrôler la stabilité de certains paramètres. Nous décrivons ici les différents moyens de mesure de surface, de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique.

### II.3.1. Échelles macro géométriques

#### II.3.1.a. Machines de formes et paramètres associés

Dans le cadre de notre étude, le défaut de forme doit être minimal et si possible constant pour ne pas polluer les futures interprétations. Ici, un dispositif de contrôle de forme de type MAHR-MMQ 400 doté d'une bille de palpage d'un diamètre de 5 mm a été utilisé (*Figure II.9*). Pour chaque portée, trois mesures ont été effectuées. L'erreur de mesure maximale de ce moyen est de 1  $\mu\text{m}$  pour la cylindricité, de 0,7  $\mu\text{m}$  pour la circularité et de 0,3  $\mu\text{m}$  pour la rectitude. La machine MMQ 400 n'étant pas adaptée au confinement des portées sur vilebrequin, seules les éprouvettes ont pu faire l'objet de mesures d'écart de formes.



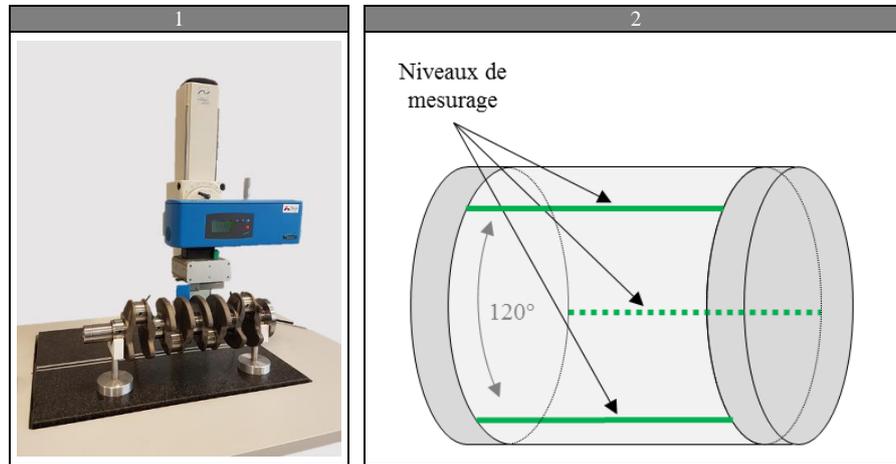
*Figure II.9 : Machines de mesure de forme MAHR MMQ 400 (1), localisation des trois zones de mesures sur chaque portée (2)*

### II.3.2. Échelles micro géométriques

#### II.3.2.a. Profilomètre tactile

Les caractérisations de surface 2D à l'échelle micro-géométrique ont été effectuées par le biais d'un profilomètre tactile HOMMEL-ETAMIC T8000 doté d'un stylet avec une pointe diamant, de rayon de

courbure  $2 \mu\text{m}$  et d'un angle au sommet de  $90^\circ$ . La résolution verticale de cet appareil est de  $0,01 \mu\text{m}$  tandis que sa résolution latérale est de  $2 \mu\text{m}$ . Le traitement logiciel est quant à lui effectué par le logiciel SURFASCAN. Afin de maximiser la représentativité des mesures, la caractérisation 2D a été réalisée sur une longueur de  $16,8 \text{ mm}$  le long de la génératrice et sur 3 zones différentes espacées de  $120^\circ$  (**Figure II.10**).



**Figure II.10 : Profilomètre HOMMEL-ETAMIC T8000 (1), localisation des trois zones de mesure (2)**

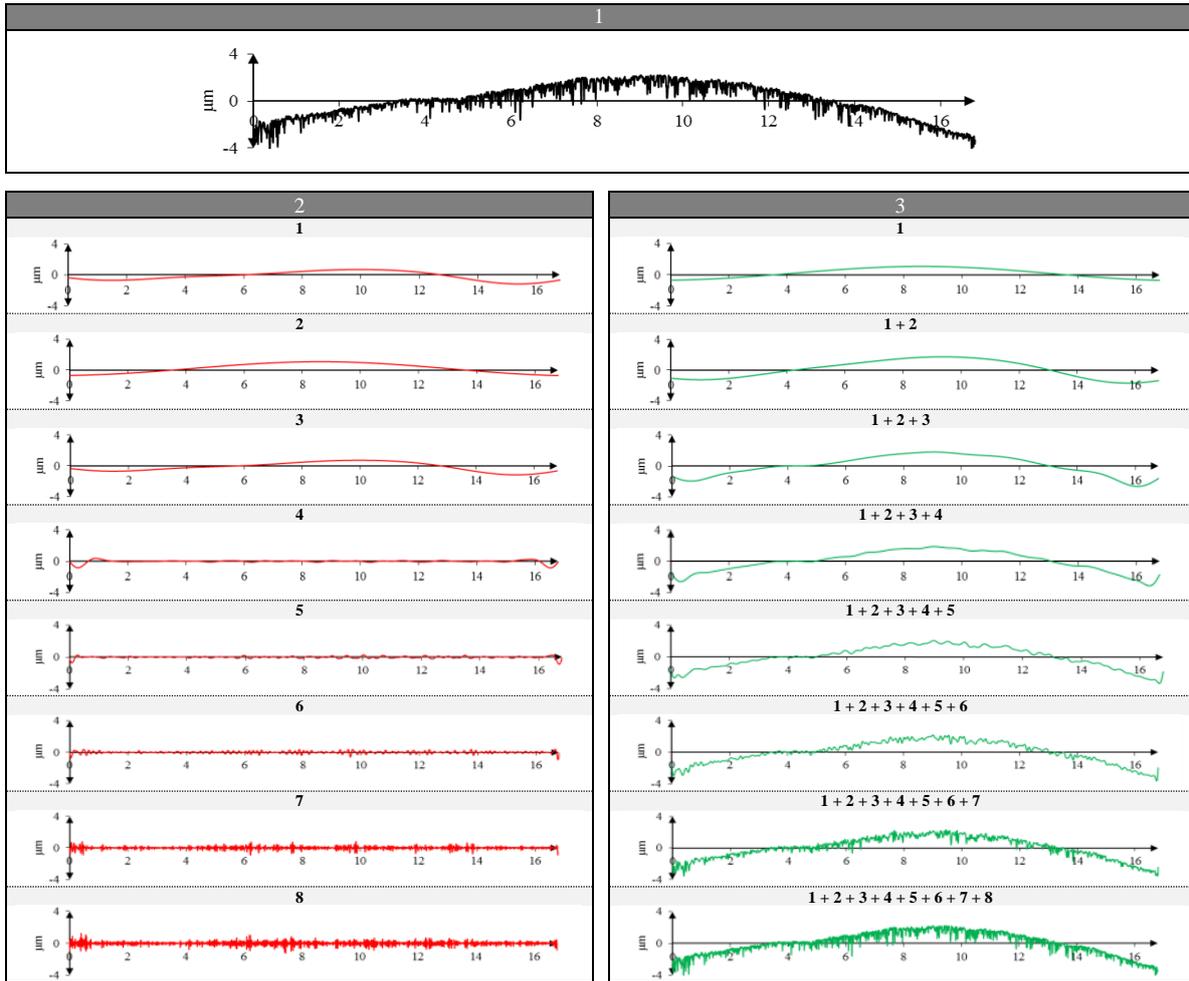
Le profil 2D brut est ensuite filtré avec un filtre gaussien de longueur de coupure  $0,8 \text{ mm}$ . Plusieurs paramètres standards d'état de surface ont été étudiés afin de décrire la morphologie des textures. Ces différents paramètres sont recensés en **Table II.9**. Considérant la procédure de caractérisation RENAULT, nous nous sommes tout particulièrement intéressés aux paramètres  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$ .

**Table II.9 : Paramètres standards de rugosités utilisés**

Paramètres	Normes	Définitions	Définitions brèves
$Ra$	ISO 4287	Somme des pics et des creux situés de part et d'autre de la ligne moyenne divisée par la longueur de base du profil de rugosité.	Rugosité arithmétique
$Wa$	ISO 4287	Somme des pics et des creux situés de part et d'autre de la ligne moyenne divisée par la longueur de base du profil d'ondulation.	Ondulation arithmétique
$Rpk$	ISO 13565	Basé sur la courbe d'Abbott Firestone. Hauteur moyenne des pics saillants situés au-dessus du profil écrêté.	Hauteur des pics
$Rk$	ISO 13565	Basé sur la courbe d'Abbott Firestone. Hauteur du profil écrêté, distance verticale entre les droites parallèles C1 et C2.	Amplitude du cœur
$Rvk$	ISO 13565	Basé sur la courbe d'Abbott Firestone. Hauteur moyenne des vallées situées au-dessous du profil écrêté.	Profondeur des vallées
$Mr1$	ISO 13565	Basé sur la courbe d'Abbott Firestone. Taux en pourcentage déterminé sur la ligne de coupure C2 qui sépare les pics du profil écrêté.	Taux séparant les pics du profil écrêté
$Mr2$	ISO 13565	Basé sur la courbe d'Abbott Firestone. Taux en pourcentage déterminé sur la ligne de coupure C2 qui sépare les vallées du profil écrêté.	Taux séparant les vallées du profil écrêté

Une décomposition multi-échelle des profils primaires, c'est-à-dire avant le filtrage gaussien, a permis de compléter les paramètres standards en exploitant au maximum les informations contenues dans chaque profil. Dans la pratique, cette décomposition consiste à déterminer la transformée par ondelette continue directe, puis inverse, du profil primaire pour extraire, échelle par échelle, toutes ses

composantes (**Figure II.11**) et calculer, sur chacune d'entre elles, les paramètres d'état de surface. Notons ici que toutes les décompositions ont été effectuées avec l'ondelette de Morlet.



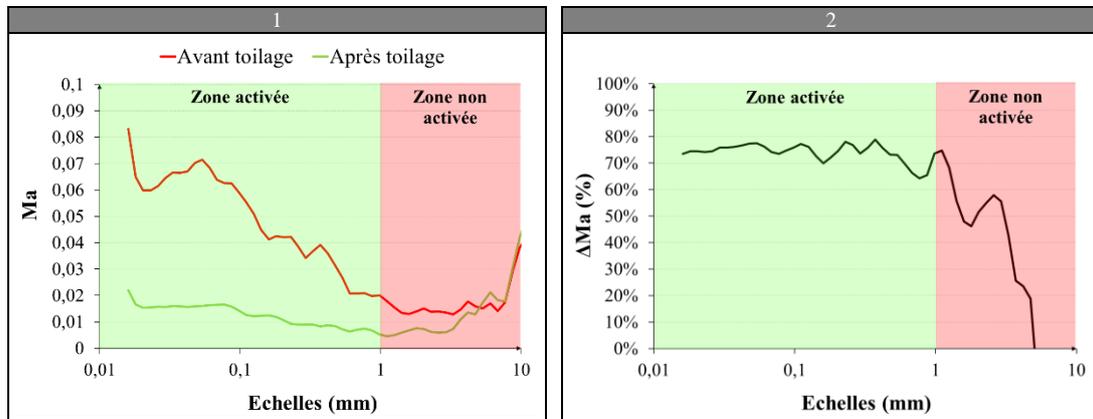
**Figure II.11 : Décomposition multi-échelle d'un profil primaire, profil primaire initial (1), composantes (2), profil primaire reconstruit par ajout des composantes (3)**

L'application de cet algorithme nous a permis de suivre l'évolution multi-échelle de plusieurs paramètres d'état de surface sur une large bande d'échelles. Nous avons principalement étudié l'évolution du signal multi-échelle  $Ma$ , qui se trace point par point en calculant sur chaque composante  $i$  l'écart moyen arithmétique  $Ma(i)$  du profil par rapport à la ligne moyenne (par analogie avec le calcul du  $Ra$ ). Afin de considérer la rugosité initiale, nous avons été naturellement amenés à étudier la signature process  $\Delta Ma$  qui se calcule selon (14) en considérant d'une part le  $Ma$  du profil avant toilage ( $Ma_{initial}$ ) et le  $Ma$  du profil après toilage ( $Ma_{final}$ ).

$$\Delta Ma(\%) = 100 \times \frac{Ma_{initial}(i) - Ma_{final}(i)}{Ma_{initial}(i)} \quad (14)$$

Des exemples de spectres  $Ma$  et  $\Delta Ma$  obtenus en toilage conventionnel sont donnés en **Figure II.12**. On constate l'existence d'une valeur d'échelle en dessous de laquelle le  $\Delta Ma$  est à la fois constant et

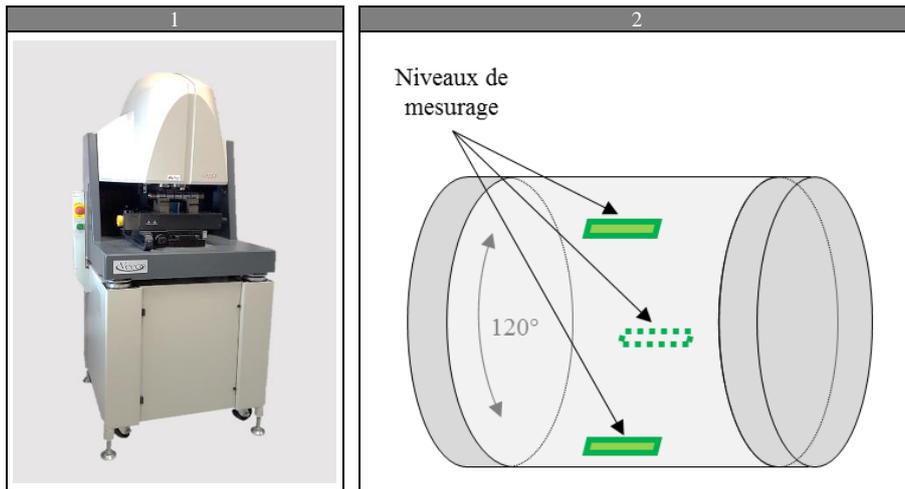
maximum. Cette valeur délimite la zone activée par l'opération de toilage. Toutes les composantes associées aux échelles de cette zone seront fortement impactées par le processus d'abrasion. La valeur de cette échelle dépend de la configuration de toilage.



**Figure II.12 : Exemple de signal multi-échelle en toilage conventionnel,  $Ma$  (1), signature process  $\Delta Ma$  (2)**

### II.3.2.b. Interféromètre et caractérisation avancées des textures

Pour aller plus loin dans l'analyse des textures, un interféromètre à lumière blanche WYKO 3300NT a été également utilisé. Équipé du logiciel VISION, cet équipement nous a permis d'étudier plus en détail les morphologies de surface. Les opérations de caractérisation des surfaces texturées ont été effectuées avec un objectif 50 mm sur trois zones situées au centre de la portée et espacées de  $120^\circ$  (**Figure II.13.2**). Afin d'optimiser la captation, plusieurs modes de l'interféromètre ont été utilisés selon la rugosité des textures considérées (mode Phase Shifting Interferometry pour les moins rugueuses et mode Vertical Scanning Interferometry pour les plus rugueuses). L'ajustement du rapport signal/bruit a par ailleurs permis de limiter l'apparition de possibles aberrations de mesures provoquées par la forte inclinaison des flancs de strie. Les images ont été discrétisées en  $13000 \times 480$  points espacés d'un pas constant de  $0,4 \mu\text{m}$ , la résolution verticale de cet appareil est quant à elle de  $0,01 \mu\text{m}$ . En outre, tout comme les mesures 2D, la composante de forme a été éliminée par un filtrage spline bicubique.



**Figure II.13 : Interféromètre WYKO 3300NT (1), localisation des trois zones de mesures (2)**

Grâce à ces mesures 3D, il a été possible en post-traitement de quantifier l'évolution des caractéristiques texturales non standards au moyen d'un programme spécialement développé à cet effet. En lien avec ce qui est couramment fait dans la littérature, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'évolution du rapport profondeur/largeur  $P_v/L_v$ , l'angle d'ouverture  $\beta_v$  des vallées, la densité de vallées  $dv$  par unité de longueur et la densité de rétention  $dr$  par unité de surface.

### II.3.2.c. Microscope Électronique à Balayage (MEB)

À des fins d'observations, nous avons également eu recours à un MEB JEOL JSM-5510 (**Figure II.14**). Il peut atteindre une résolution de 3.5 nm à 30 kV en vide poussé et 4,5 nm en mode vide dégradé. Il est équipé d'un détecteur d'électrons secondaires et d'un détecteur des électrons rétrodiffusés. Le dispositif offre un agrandissement allant de  $18 \times$  à  $100\,000 \times$ . Dans la pratique, ce moyen a été utilisé pour l'observation des bandes abrasives, des copeaux de toilage, des coussinets et des surfaces texturées.



**Figure II.14 : MEB JEOL JSM-5510**

## II.4. Caractérisation fonctionnelle

La caractérisation fonctionnelle est l'aboutissement de notre démarche de recherche et c'est à travers elle que les optimums fonctionnels et industriels ont pu être déterminés. Nous décrivons dans cette partie les coussinets et l'huile utilisée ainsi que les deux bancs de caractérisation fonctionnelle auxquels nous avons eu recours.

### II.4.1. Coussinets et huile utilisés

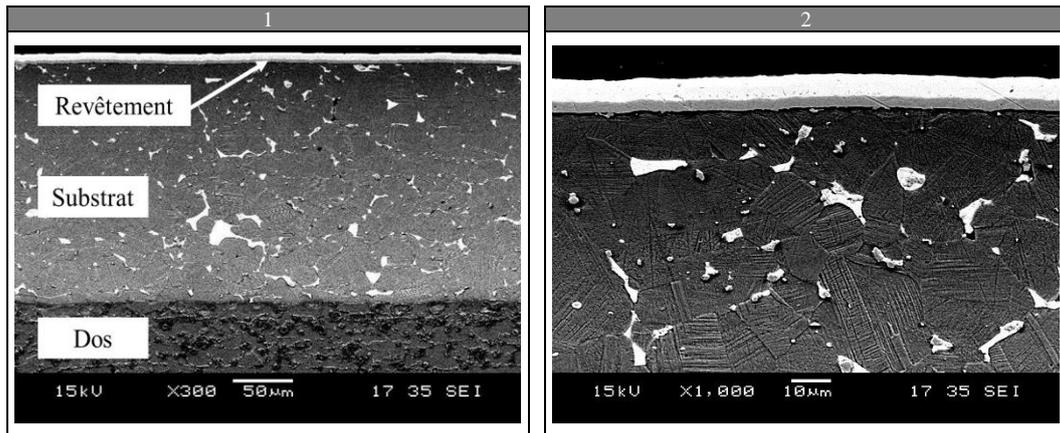
#### II.4.1.a. Coussinets de bielle

La configuration coussinet qui a été retenue pour nos essais est une configuration série de la gamme Diesel des moteurs RENAULT. Les caractéristiques des coussinets utilisés sont données en **Table II.10**.

**Table II.10 : Caractéristiques des coussinets de bielle utilisée**

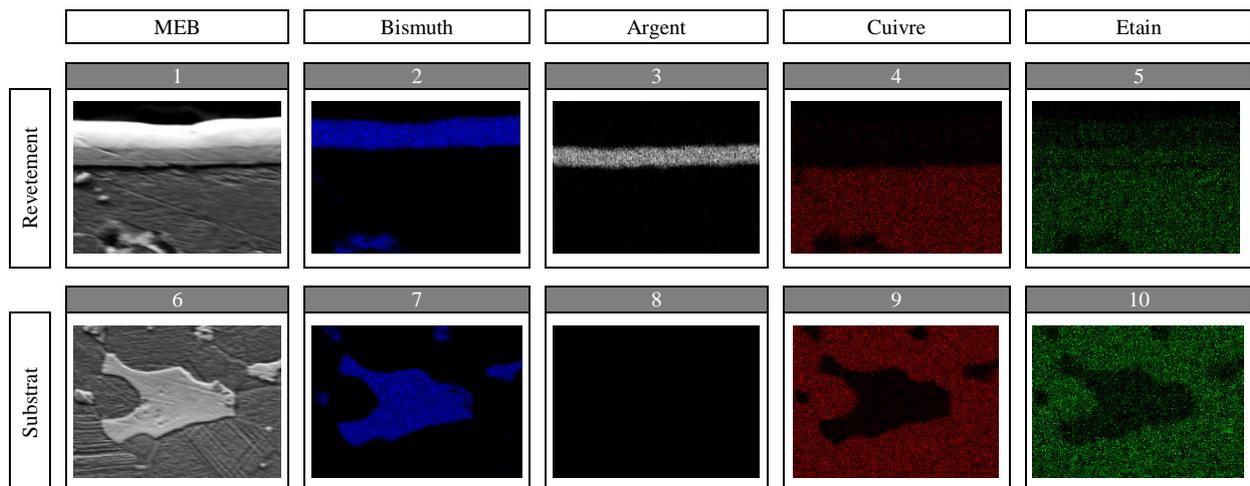
Localisation	Désignation	Technologie	Substrat	Revêtement	Barrière anti diffusion	Dureté substrat
Coussinet supérieur	DAIDO PK1/CX4	Tri-métallique électrolytique	CuSn10Bi4	Bi puis Ag	Aucune	135HV
Coussinet inférieur	DAIDO A10H	Bi-métallique	AlSn10Si2.5Cu1.5		Aucune	57HV5

Les coussinets de bielle Diesel DAIDO PK1/CX4, qui nous intéressent tout particulièrement puisqu'ils subissent la majeure partie de la charge, sont composés en surface d'une double couche composée de bismuth et d'argent permettant une excellente adaptation en début de vie (**Figure II.15** et **Figure II.16**). Son rôle est d'écarter tout grippage lors de la période de rodage du moteur. Elle est très tendre et extrêmement sensible à l'usure. Dans la pratique, cette couche de quelques micromètres disparaît dans les toutes premières heures de fonctionnement moteur.



**Figure II.15 : Coupe en surface d'un coussinet de bielle supérieur PK1/CX4, grossissement x300 (1), grossissement x1000 (2)**

En dessous de cette couche est situé un substrat d'environ 200 µm composé d'un alliage bronze/ bismuth particulièrement résistant à la fatigue et hautement inscutable. Il a pour fonction de garantir le bon fonctionnement tribologique du palier jusqu'à la fin de vie du moteur. Plus en profondeur vient le dos en acier du coussinet. Il assure la rigidité, la conduction de la chaleur générée et le maintien en position du coussinet dans le logement de bielle.



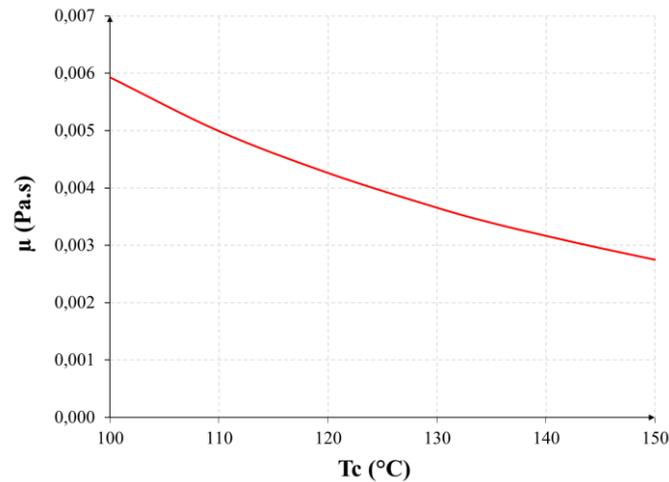
**Figure II.16 : Cartographie EDS de la composition d'un coussinet de bielle supérieur PK1/CX4**

#### II.4.1.b. Huile

L'huile qui a été utilisée pour l'ensemble des essais fonctionnels est une huile synthétique SHELL 0W-20 HTHS 2,6, dont la viscosité dynamique  $\mu$  en fonction de la température  $T_c$  est donnée en **Figure II.17**. Sa viscosité est plus basse que les huiles actuellement utilisées par RENAULT, qui elles, sont de HTHS 3,2. Le choix de cette huile, en particulier de sa viscosité, a été motivé pour deux raisons majeures :

- d'un point de vue stratégique, cette huile est amenée à équiper les futurs moteurs de la gamme RENAULT.

- d'un point de vue expérimental, cette huile plus fluide favorise la transition du régime hydrodynamique vers le régime mixte, et favorise donc l'apparition des phénomènes discriminants ;



**Figure II.17 : Caractéristique  $\mu(T_c)$  de l'huile SHELL 0W-20 HTHS 2.6**

## II.4.2. Machines À Palier Statique (MAPS)

### II.4.2.a. Principe et constitution

La Machine À Palier Statique (MAPS) est un banc d'organe RENAULT (**Figure II.18.1**). Construit par ACTEMIUM, il est dédié à l'étude du comportement tribologique des manetons de vilebrequin en régime mixte, en particulier de leur tenue en grippage. Pour cela, cette machine applique sur la portée une charge normale évolutive constante par palier (**Figure II.18.4**) pouvant atteindre un maximum de 50 kN. La vitesse de rotation maximale est quant à elle de 2 800 tr/min. Le seuil de filtration de l'huile est de 10  $\mu\text{m}$ . Dans la pratique, l'essai est effectué sur une éprouvette dont les caractéristiques matériaux sont similaires à celles des vilebrequins. Cette dernière est composée d'un axe équipé de deux tourillons sur lequel est monté un faux maneton (objet de la texturation) (**Figure II.18.3**), que nous appellerons par la suite éprouvette MAPS. L'éprouvette complète est montée sur une broche dont la mise en rotation est assurée par un moteur électrique via une poulie d'entraînement et un accouplement. La charge est quant à elle appliquée par l'intermédiaire de chapeaux et d'une véritable bielle équipée de coussinets. La composition détaillée de la MAPS est donnée en **Figure II.18.2**.

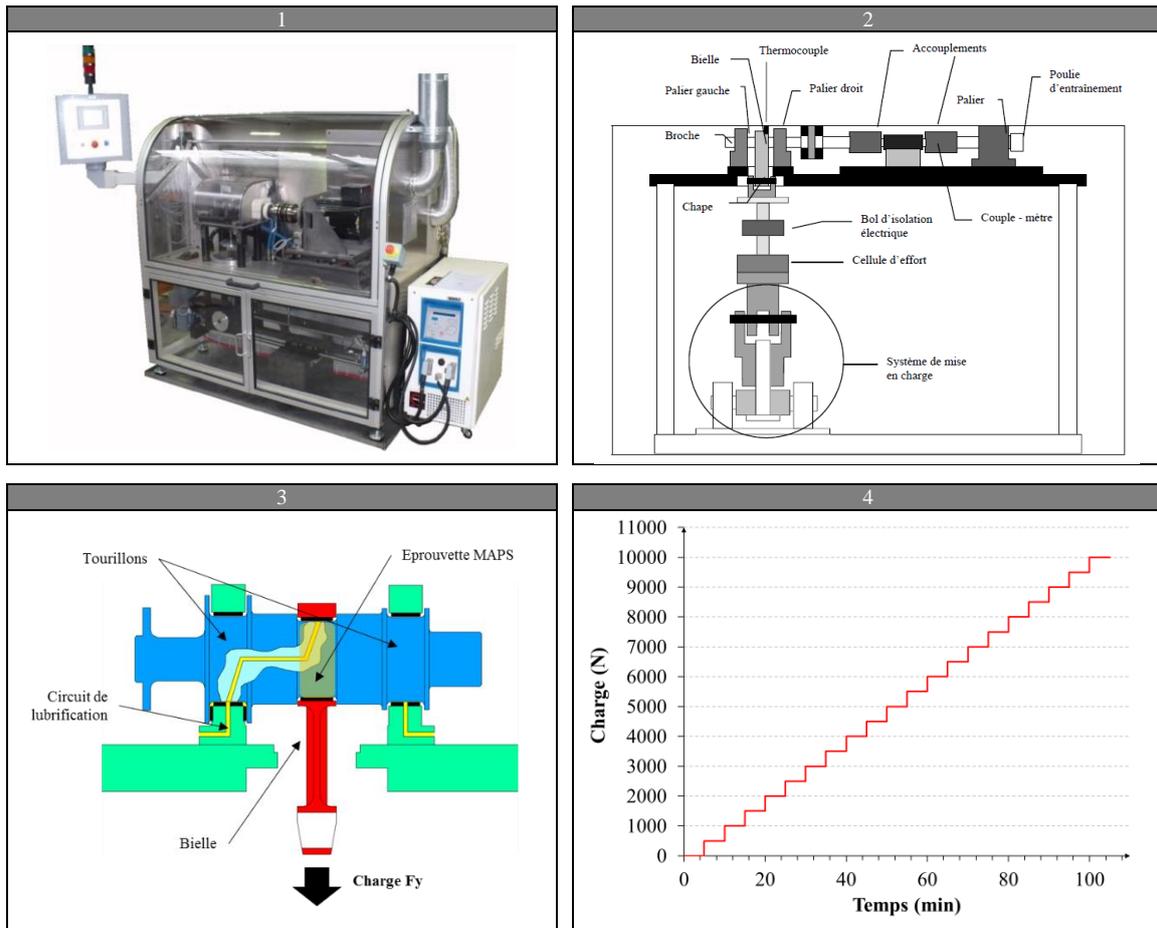


Figure II.18 : Vue globale de la MAPS (1), composition de la MAPS (2), détail de l'éprouvette (3), consigne de charge (4)

#### II.4.2.b. Paramètres expérimentaux

Il est possible de piloter plusieurs paramètres sur le banc. Ces derniers sont donnés en **Table II.11**. On retrouve parmi eux des paramètres propres au cycle de caractérisation et des paramètres propres aux consommables.

Table II.11 : Paramètres expérimentaux sur MAPS

Ensemble	Catégorie	Paramètre	Type	Plage étudiée
MAPS	Cycle de rodage	Durée	Quantitatif	15 min
		Charge	Quantitatif	500 N (poids du bras de chargement)
		Vitesse	Quantitatif	2400 tr/min
		Pression d'huile	Quantitatif	3 bars
		Température	Quantitatif	130 °C
	Cycle de caractérisation	Charge	Quantitatif	Consigne « escalier » (500 N ; 5 min), voir <b>Figure II.18.4</b>
		Vitesse	Quantitatif	2400 tr/min
		Pression d'huile	Quantitatif	3 bars
Consommables	Coussinets	Coussinets faux manetons	Qualitatif	DAIDO PK1 CX4 (supérieur) DAIDO A10H (inférieur)
		Coussinets tourillons	Qualitatif	DAIDO A22 (supérieur et inférieur)
	Autres	Huile	Qualitatif	SHELL 0W-20 HTHS 2.6, voir <b>Figure II.17</b>
		Filtre	Quantitatif	10 µm

#### II.4.2.c. Mesures instrumentales « in situ »

Le banc est équipé d'une instrumentation « in situ » diverse et variée. On recense :

- un couple mètre monté sur la broche (mesure du couple de frottements  $C_f$  des trois paliers) ;
- une cellule d'effort (mesure de la charge réelle appliquée  $W$ ) ;
- un thermocouple positionné à travers la bielle sur le dos du coussinet supérieur (mesure de la température du contact  $T_c$ ) ;
- un système de mesure de la résistance électrique du contact entre l'éprouvette complète et les coussinets (mesure du taux de contact  $R_c$ ).

Cette instrumentation est très riche en information. Il est par exemple possible de remonter jusqu'à la courbe de Stribeck complète du tribocontact en reportant point par point le coefficient de frottement  $f$  en fonction du nombre de Sommerfeld  $S$ , dont l'équation a été définie en **I.1.2**.

#### II.4.2.d. Procédure d'essai

La procédure d'essai est synthétisée en **Table II.12**. L'éprouvette, est d'abord nettoyée, montée sur la broche puis assemblée avec ses coussinets sur les chapeaux de bâti et de bielle. Suite à cela, la lubrification est mise en route et la mise en rotation de la broche débute. Après une phase de montée en température de l'huile, un cycle de rodage de 15 minutes est effectué pour permettre l'accommodation partielle des surfaces au sein du contact. Finalement, la consigne de charge est appliquée jusqu'au grippage de l'éprouvette *MAPS*, considéré avéré lorsque le couple de frottement dépasse 9 Nm ou une température en dos de coussinet de 200 °C.

**Table II.12 : Procédure d'essai de la MAPS**

Étapes	Opérations
1	Nettoyage de la pièce (acétone & air comprimé)
2	Montage de la pièce sur la broche puis montage coussinets et des chapeaux
3	Mise en route de la lubrification
4	Mise en rotation de la broche
5	Montée en température jusqu'à 130 °C en 1 h, 500 N, 200 tr/min
6	Rodage de l'éprouvette
7	Début du cycle de caractérisation, application de la consigne de charge
8	Fin de l'essai si le couple de frottement ou la température atteignent leurs valeurs seuils
9	Démontage et récupération des mesures « in process »

### II.4.3. Machine À Palier Dynamique (MAPD)

#### II.4.3.a. Principe et constitution

La Machine À Palier Dynamique (MAPD) est également un banc d'organe RENAULT (**Figure II.19.1**). Il est dédié lui aussi à l'étude du comportement tribologique des manetons de vilebrequin en régime mixte. Il s'agit avant tout d'une machine de validation fonctionnelle. Contrairement à la MAPS, cette machine applique une consigne de charge représentative des efforts réels. Cette consigne cyclique, obtenue au moyen d'un banc moteur instrumenté, est composée de deux efforts variables et périodiques (période 720 °) selon la position angulaire de l'éprouvette (**Figure II.19.2** et **Figure II.19.4**). La charge maximale applicable est de 110 kN pour l'axe y et de 10 kN pour l'axe x. La vitesse de rotation maximale est de 6 000 tr/min. Le seuil de filtration de l'huile est de 10 µm.

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes, dite MAPD, dont les caractéristiques matériaux sont similaires à celles des vilebrequins. À la différence de la MAPS, cette dernière est monobloc et est composée d'un axe équipé de deux tourillons et d'un faux maneton, objet de la texturation (**Figure II.19.3**). L'éprouvette complète est montée sur une broche dont la mise en rotation est assurée par un moteur électrique via une poulie d'entraînement et un accouplement. La charge est quant à elle appliquée par l'intermédiaire de chapeaux et d'une véritable bielle équipée de coussinets.

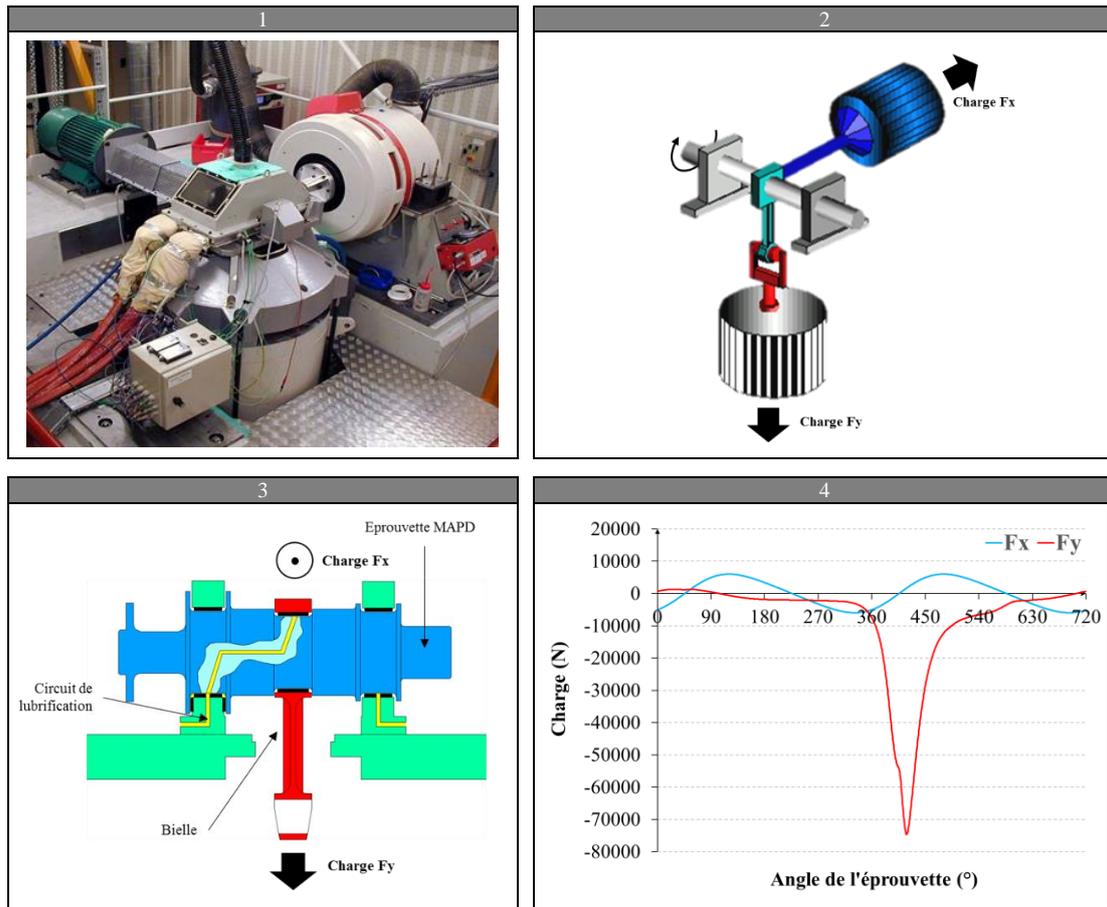


Figure II.19 : Vue globale de la MAPD (1), efforts sur la MAPD (2), détail de l'éprouvette (3), consigne de charge (4)

#### II.4.3.b. Paramètres expérimentaux

La MAPD possède les mêmes paramètres opératoires que la MAPS. Ces derniers sont détaillés dans la **Table II.13**. L'huile et les coussinets sont identiques à ceux utilisés sur la MAPS. Dans l'ensemble, seuls quelques paramètres voient leurs valeurs modifiées, comme la vitesse de rotation, la température du bac d'huile et tout ce qui est relatif à la période de rodage. Ces modifications sont nécessaires pour maximiser le pouvoir discriminant de la configuration.

**Table II.13 : Paramètres expérimentaux sur MAPD**

Ensemble	Catégorie	Paramètre	Type	Plage étudiée
MAPD	Cycle de rodage	Durée	Quantitatif	60 min
		Charge	Quantitatif	Consigne moteur, voir <i>Figure II.19.4</i>
		Vitesse	Quantitatif	1750 tr/min
		Pression d'huile	Quantitatif	4 bars
		Température	Quantitatif	Rampe de 70°C à 145°C
	Cycle de caractérisation	Durée	Quantitatif	2 x 15 h
		Charge	Quantitatif	Consigne moteur, voir <i>Figure II.19.4</i>
		Vitesse	Quantitatif	1750 tr/min
		Pression d'huile	Quantitatif	4 bars
		Température	Quantitatif	145 °C
Consommables	Coussinets	Coussinets faux manetons	Qualitatif	DAIDO PK1 CX4 (supérieur) DAIDO A10H (inférieur)
		Coussinets tourillons	Qualitatif	DAIDO A22 (supérieur et inférieur)
	Autres	Huile	Qualitatif	SHELL 0W-20 HTHS 2.6, voir <i>Figure II.17</i>
		Filtre	Quantitatif	10 µm

#### II.4.3.c. Mesures instrumentales « in-situ »

La MAPD est équipée de la même base instrumentale que la MAPS. On retrouve donc :

- un couple-mètre (mesure du couple de frottements des trois paliers  $C_f$ ) ;
- deux cellules d'effort (mesure de la charge réelle appliquée  $W$ ) ;
- un thermocouple (mesure de la température du contact  $T_c$ ) ;
- un système de résistance électrique (mesure du taux de contact  $R_c$ ) ;
- et enfin, et contrairement à la MAPS, un capteur angulaire afin d'ajuster la consigne de charge en fonction de la position de l'éprouvette.

#### II.4.3.d. Procédure d'essai

La procédure MAPD qui a été utilisée est très similaire à la procédure MAPS (*Table II.14*). La seule différence réside dans les conditions de fin d'essai. Contrairement à la MAPS, la consigne de charge est périodique (*Figure II.19*) et se répète dans le temps. Si aucun grippage n'est constaté, le cycle de charge est arrêté au bout de 15 h de fonctionnement puis est répété une seconde fois.

**Table II.14 : Procédure d'essai de la MAPD**

Cycle	Étapes	Opérations
<b>Premier cycle</b>	<b>1</b>	Nettoyage de la pièce (acétone & air comprimé)
	<b>2</b>	Montage de la pièce sur la broche puis montage coussinets et des chapeaux
	<b>3</b>	Mise en route de la lubrification
	<b>4</b>	Mise en rotation de la broche
	<b>5</b>	Rodage de l'éprouvette
	<b>6</b>	Début du premier cycle de caractérisation, application de la consigne de charge
	<b>7</b>	Fin du premier cycle au bout de 15 h
	<b>8</b>	Démontage, récupération des mesures « <i>in process</i> » et mesures post process
<b>Deuxième cycle</b>	<b>9 → 16</b>	Répétition des étapes 1 → 8

## **Conclusion**

Au terme de ce chapitre consacré à la méthodologie, aux dispositifs et aux protocoles expérimentaux, le lecteur pourra notamment remarquer que nous avons eu recours à une démarche transversale qui couple à la fois procédé, caractérisation d'état de surface et caractérisation fonctionnelle. Les moyens déployés sont par ailleurs fortement représentatifs. Contrairement à beaucoup d'études de la littérature, les pièces, les machines ainsi que les procédures ont été choisies afin d'être au plus proche des lignes de production, ce qui assure la transférabilité industrielle de la très grande majorité des résultats présentés dans les chapitres suivants.

## **Chapitre III.**

# **Du toilage conventionnel au toilage texturant**

## Introduction

L'absence de travaux consacrés à la texturation par toilage nous amène à penser que ses véritables limites texturales ne sont pas encore connues. Pendant très longtemps, la problématique anti-friction elle-même n'existait pas. Les spécifications d'états de surface étaient facilement atteignables et une unique passe de pierrage ou de toilage permettait d'atteindre la qualité demandée. De manière synthétique, l'optimisation des process de super finition était dédiée à l'amélioration de la productivité et des défauts de forme.

L'inversement des priorités s'est effectué très rapidement avec l'arrivée des normes européennes d'émission EURO. Leurs applications ont profondément bouleversé les stratégies de développement. La nécessité de réduire les *PFM* a convaincu les constructeurs d'optimiser les états de surface des organes stratégiques. Dans l'optique de mieux décrire la morphologie des surfaces et son influence fonctionnelle, certains constructeurs, dont RENAULT, ont profondément changé leurs critères d'état de surface et ont commencé à spécifier la rugosité avec les paramètres *Rpk*, *Rk*, *Rvk*, plus adaptés à la caractérisation des surfaces texturées. De manière générale, les nouvelles spécifications de rugosités contraignent les usines à rechercher des textures de type « plateaux/vallées » (avec un *Rvk* important et des *Rpk* et *Rk* faibles). Cette transition est un véritable défi pour les usines car l'optimisation multicritères rend la maîtrise de la qualité extrêmement délicate. Malgré l'ajout de nouvelles passes et la baisse globale des granulométries, le procédé de toilage ne parvient pas toujours à assurer la qualité de manière robuste. Il semble en ce sens avoir atteint une limite à-priori infranchissable. Ce chapitre a pour objectif d'étudier et de lever cette limite.

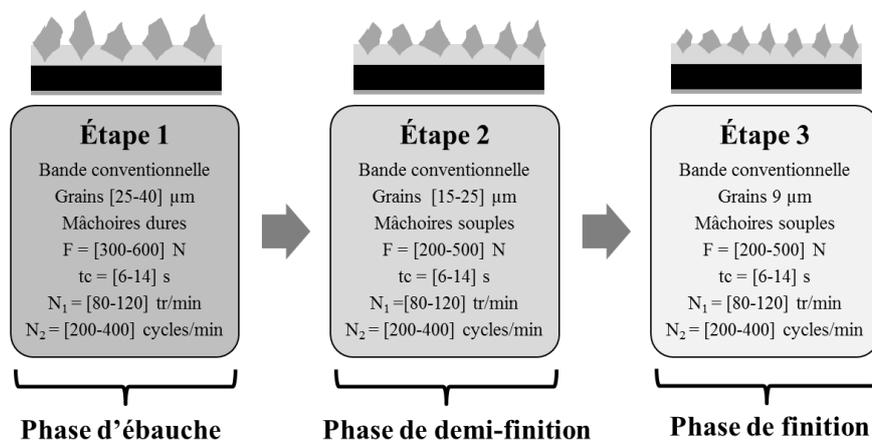
Ce travail d'étude et de développement process se décomposera en trois parties bien distinctes. Dans une première partie, nous étudierons statistiquement les influences et les limites d'action des paramètres process sur la rugosité en toilage conventionnel. Dans une seconde partie, nous analyserons ces limites et chercherons à isoler des leviers d'action afin d'accroître la maîtrise des textures toilées. Enfin, dans une dernière partie, nous développerons et discuterons de ces différents leviers en traitant plus particulièrement des interactions entre les structures abrasives, la cinématique de toilage et les textures finales.

## III.1. Étude statistique du toilage conventionnel

Même si des différences réelles existent du fait de la diversité des fournisseurs de machines, la très grande majorité des usines de production du groupe RENAULT ont recours à des configurations de toilage relativement semblables. Des points communs notables sont ainsi observés sur :

- la cinématique, qui s'effectue toujours avec des vitesses d'oscillations de plusieurs centaines de cycles par minute et des vitesses de rotation proches de la centaine de tours par minute ;
- le temps de cycle, qui est de l'ordre de la dizaine de secondes ;
- le nombre de passes, qui est généralement de trois (ébauche, demi-finition et finition) ;
- les bandes abrasives, qui sont toutes constituées de grains électrodéposés (*Figure III.10.1*, *Figure III.10.2* et *Figure III.10.3*) ;
- les granulométries, qui sont généralement de 40 ou 30  $\mu\text{m}$  en ébauche, de 20 ou 15  $\mu\text{m}$  en demi-finition et de 9  $\mu\text{m}$  en finition.

Les configurations respectant dans les grandes lignes ces conditions sont appelées par la suite « configurations conventionnelles » ou simplement « toilage conventionnel ». Le détail de ces configurations est donné en *Figure III.1*. Nous allons chercher ici à quantifier leurs capacités texturales.



*Figure III.1 : Configurations types du toilage conventionnel*

### III.1.1. Définition du plan d'expérience et modélisation statistique

#### III.1.1.a. Définition du plan d'expérience

Beaucoup de paramètres influent significativement sur la rugosité en toilage. Malheureusement, aucune étude complète dédiée à la quantification de ces influences n'a été trouvée dans le cas d'un toilage industriellement représentatif. Bien souvent les travaux publiés sur ce périmètre se concentrent sur un ou quelques facteurs sans jamais s'intéresser à l'ensemble des paramètres du cycle de toilage. Dans ce contexte et afin de construire de manière pertinente la suite de notre travail de recherche, nous proposons

ici d'étudier statistiquement l'impact des différents paramètres process sur les états de surface finaux, traduits ici par les critères de rugosité 2D  $Ra$ ,  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$  et par le critère de circularité  $C$ . De manière générale, il s'agit de définir une loi de comportement de type combinaison linéaire entre les paramètres process (les facteurs) et les critères d'états de surfaces (les réponses). Le plan d'expérience destiné à cette étude a été construit à partir des configurations conventionnelles en trois passes. On distingue ainsi :

- l'ébauche, effectuée avec des mâchoires dures enveloppantes ;
- la demi-finition, effectuée avec des mâchoires souples enveloppantes ;
- la finition, également effectuée avec des mâchoires souples enveloppantes.

L'ensemble des facteurs simples et leurs niveaux sont donnés dans la **Table III.1**, ces derniers ont été définis pour correspondre aux valeurs minimales, nominales et maximales observées sur les lignes de production. Les valeurs de temps de cycle  $tc$  et de vitesse de rotation  $N_l$  sont identiques sur les trois passes. En outre, excepté pour la granulométrie qui est toujours de  $9 \mu\text{m}$ , tous les paramètres process de la passe de finition sont couplés aux paramètres process de la passe de demi-finition. Pour le reste, les paramètres process d'ébauche sont totalement découplés des passes de demi-finition et finition. Par conséquent, nous pouvons catégoriser les facteurs principaux selon le type de mâchoire utilisé. Ainsi, dans la dénomination, les exposants \* sont relatifs aux facteurs associés aux mâchoires dures (c'est-à-dire à l'ébauche) et les exposants \*\* aux facteurs associés aux mâchoires souples (c'est-à-dire la demi-finition et la finition).

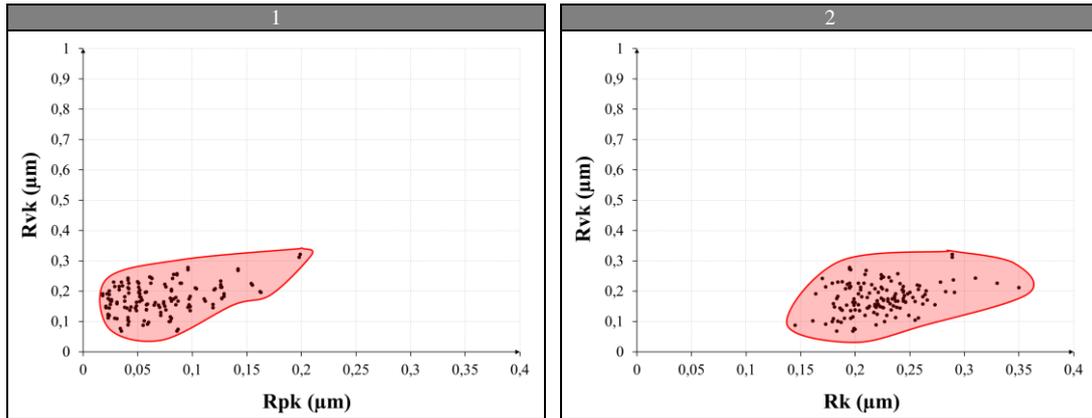
**Table III.1 : Facteurs simples et niveaux associés de l'étude d'optimisation du toilage conventionnel**

Paramètres	Not.	Ébauche*	Demi-finition**	Finition
Granulométrie	$G_s$	20 / 25 / 30 / 40 $\mu\text{m}$	15 / 20 / 25 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$
Force normale	$F$	300 / 400 / 600 N		200 / 300 / 500 N
Vitesse des oscillations	$N_2$	200 / 300 / 400 cycles/min		200 / 300 / 400 cycles/min
Avance de la bande	$A_v$	10 / 20 / 30 mm		10 / 20 / 30 mm
Mâchoires	-	Enveloppantes dures (*)		Enveloppantes souples (**)
Temps de cycle	$tc$		6 / 10 / 14 s	
Vitesse de rotation	$N_l$		80 / 100 / 120 tr/min	
Amplitude des oscillations	$A$		1 mm	
Modèle de bande abrasive	-		FB637	
Lubrification	-		Avec	
Pièce	-		Éprouvette de toilage	
État initial	-		État après rectification	
Rugosité initiale	-	$Ra = 0,524 \pm 0,011 \mu\text{m}$	$Rpk = 0,458 \pm 0,015 \mu\text{m}$	$Rk = 1,872 \pm 0,089 \mu\text{m}$ $Rvk = 1,364 \pm 0,084$
Circularité initiale	-		$C = 2,724 \pm 0,139 \mu\text{m}$	

Le plan d'expérience a été conçu suivant la méthode de Taguchi afin de minimiser le nombre d'essais à effectuer. Chaque configuration a été répétée deux fois pour augmenter la robustesse de notre modélisation statistique. Au total, ce n'est pas moins de 140 portées qui ont été toilées.

III.1.1.b. Distribution des paramètres standards  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$

La distribution des paramètres standards  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$  dans les plans  $Rvk/Rpk$  et  $Rvk/Rk$  permet d'apprécier de manière synthétique la diversité des rugosités obtenues et les niveaux atteints suite aux essais (**Figure III.2**). Les distributions apparaissent groupées et aucune tendance évidente ne se dégage. Les profondeurs de vallées, associées aux  $Rvk$  et qui nous intéressent tout particulièrement, sont comprises entre  $0,08 \mu\text{m}$  et  $0,31 \mu\text{m}$ .



**Figure III.2 : Distribution des rugosités  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$ , dans le plan  $Rvk/Rpk$  (1), dans le plan  $Rvk/Rk$  (2)**

III.1.1.c. Modélisation statistique du lien entre facteurs et réponses

La modélisation du lien statistique entre facteurs et réponses a été réalisée par des Régressions Linéaires Multiples (RLM) en prenant en compte les facteurs principaux, les quadratiques et les interactions d'ordre deux. Un modèle théorique statistique a ainsi été obtenu pour chaque réponse étudiée ( $Ra$ ,  $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rvk$  et  $C$ ). Chaque modèle approxime alors les valeurs réelles mesurées et peut s'exprimer suivant l'équation (15).

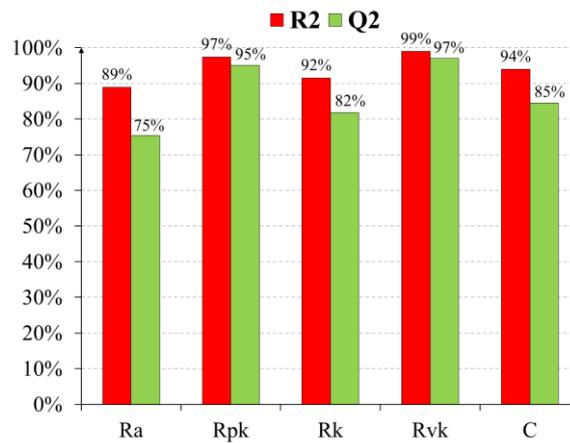
$$Y \approx \hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} X_{ii}^2 + \sum_{i,j=1}^p \beta_{ij} X_i X_j \quad (15)$$

Avec  $Y$  la réponse,  $\hat{Y}$  la réponse prédite par le modèle,  $p$  le nombre total de facteur,  $(\beta_1, \dots, \beta_n)$  les coefficients de la RLM et  $(X_1, \dots, X_n)$  les facteurs simples. Dans cette équation, la première somme est relative aux facteurs simples ( $tc$ ,  $N_I$ , etc.) la seconde aux quadratiques ( $tc^2$ ,  $N_I^2$ , etc.) et la dernière aux interactions ( $tc \times N_I$ , etc.). Après analyse des résidus pour écarter toute anomalie, l'évaluation globale de la pertinence de chaque modèle a été évaluée. Celle-ci a été effectuée en calculant le coefficient de corrélation  $R^2$  (16), qui explique la part de la variance totale attribuable aux termes du modèle, et le coefficient de prédictivité  $Q^2$  (17), qui mesure la prédictivité du modèle par validation croisée. Généralement, des valeurs de  $R^2$  et de  $Q^2$  supérieures à 80 % signifient que le modèle a un fort pouvoir prédictif.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (16)$$

$$Q^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (17)$$

Avec  $n$  le nombre total d'essais,  $Y_i$  la valeur mesurée de la réponse du  $i^{\text{ème}}$  essai,  $\bar{Y}$  la valeur moyenne des mesures de la réponse  $Y$ ,  $\hat{Y}_i$  la valeur prédite de  $Y_i$  et  $\hat{Y}_{(i)}$  la valeur prédite de  $Y_i$  sans tenir compte de la mesure associée au  $i^{\text{ème}}$  essai. Après calcul de ces deux critères, on observe que les cinq modèles présentent une bonne adéquation avec les mesures expérimentales (**Figure III.3**).



**Figure III.3 : Adéquation des différents modèles statistiques en toilage conventionnel**

### III.1.2. Influences des paramètres process

L'influence de chaque facteur a enfin été quantifiée selon l'équation (18) en calculant leurs contributions au  $R^2$  par l'intermédiaire des critères de Fisher.

$$C_{x_i}(\%) = 100 \times \frac{R^2 \times F_{X_i}}{\sum_{i=1}^p F_{X_i}} \quad (18)$$

Avec  $C_{x_i}$  la contribution au  $R^2$  du facteur  $X_i$  (simple, quadratique ou interaction) et  $F_{x_i}$  son critère de Fisher calculé par l'intermédiaire d'une analyse de variance. Concrètement, la contribution ici calculée permet de visualiser l'influence du retrait d'une variable explicative sur l'ajustement du modèle lorsque toutes les autres variables sont conservées. Les résultats sont donnés en **Figure III.4** et **Figure III.5** pour l'ensemble des réponses étudiées ( $Ra$ ,  $C$ ,  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$ ). Les contributions des facteurs simples et quadratiques ont été sommées afin d'améliorer la lisibilité des graphiques.

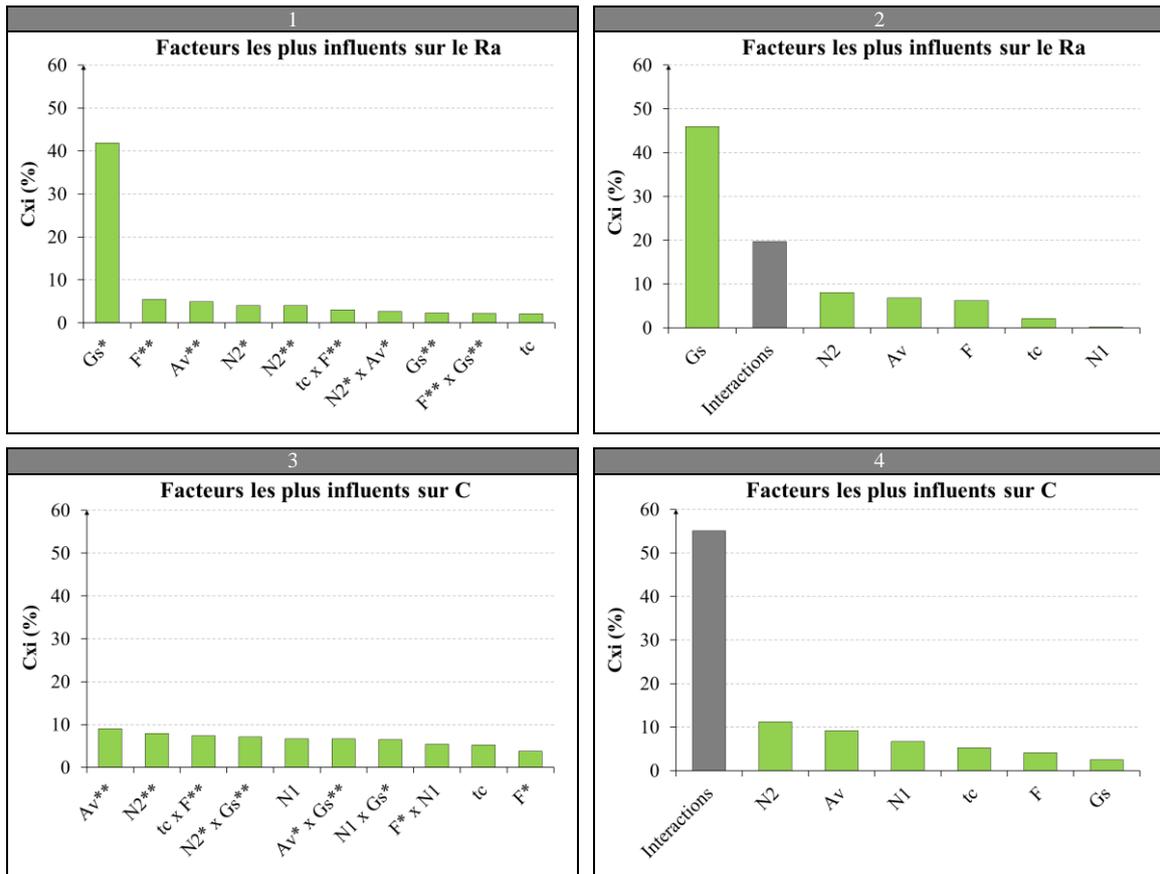
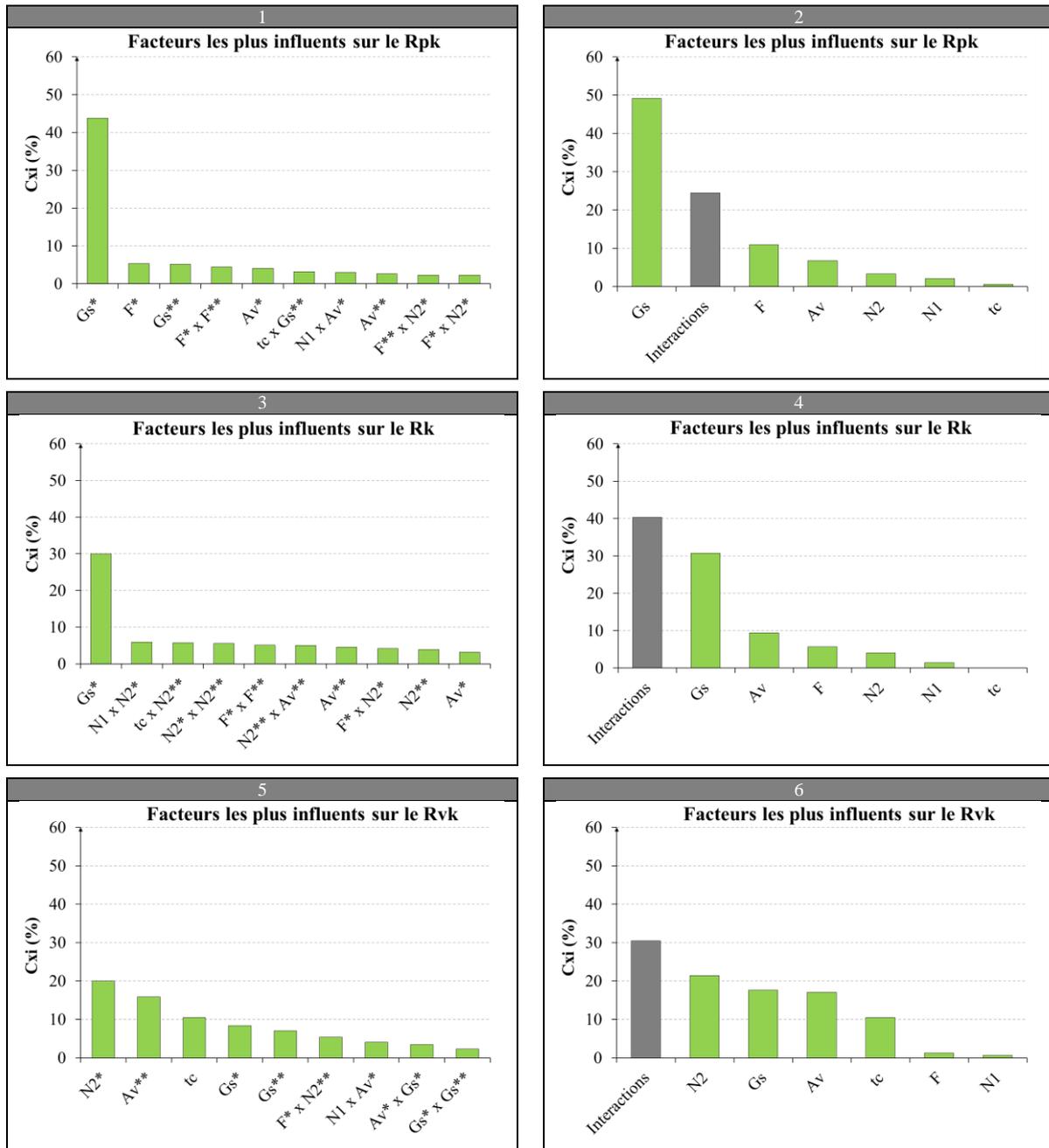


Figure III.4 : Les facteurs influents sur le Ra et C, sans regroupement (1) (3), avec regroupement (2) (4)



**Figure III.5 : Les facteurs influents sur le Rpk, Rk et Rvk, sans regroupement (1) (3) (5), avec regroupement (2) (4) (6)**

Nous pouvons extraire de ces résultats de précieuses informations. On observe que certains facteurs ont une influence généralisée sur la rugosité. La granulométrie d'ébauche est la plus influente dans cette catégorie, elle impacte tous les critères sans distinction. Bien que moins forte, la granulométrie de demi-finis joue un rôle non négligeable, particulièrement sur les vallées où son influence est aussi importante que la granulométrie d'ébauche. Les facteurs relatifs à l'avance de la bande et à la vitesse d'oscillations sont également très influents, notamment sur la profondeur de vallée Rvk.

Outre ces tendances généralisées, d'autres facteurs semblent impacter spécifiquement certains critères. Les forces appliquées en sont un bon exemple, elles apparaissent influentes sur le Rpk, alors qu'elles le

sont moins sur le  $Rk$  et quasiment inexistantes sur le  $Rvk$ . D'un point de vue physique et après observations des effets, il semblerait que les forces ne soient pas réellement efficaces pour augmenter l'indentation des grains et donc la profondeur des vallées, ce qui vient conforter les résultats de Sura [79].

Certains facteurs ont en revanche une influence générale négligeable, c'est le cas par exemple de la vitesse de rotation. Enfin, soulignons le fort pouvoir explicatif des interactions qui contribuent très fortement à la variabilité de l'ensemble des critères de rugosité étudiés. Les tendances sur la circularité  $C$  (Figure III.4.3 et Figure III.4.4) sont quant à elles beaucoup plus difficiles à formaliser. Aucun paramètre process ne semble particulièrement apte à décrire sa variabilité. Il se peut que le domaine d'étude ait été trop étroit pour réellement observer des modifications significatives.

### III.1.3. Limites du toilage conventionnel

#### III.1.3.a. Limites texturales

Par application de l'algorithme du simplexe, les équations de régression nous permettent également de prédire la configuration process optimale ainsi que les critères de rugosité pour un objectif ou une combinaison d'objectifs. Nous avons ainsi pu quantifier les niveaux de rugosité atteignables pour divers objectifs. Du fait de notre problématique visant à la maîtrise du volume de rétention des surfaces toilées, nous nous sommes particulièrement intéressés aux objectifs relatifs au  $Rvk$ . La procédure d'optimisation consistait à étudier l'évolution prédite des critères  $Rpk$  et  $Rk$  pour plusieurs niveaux cibles de  $Rvk$ . Une minimisation des critères  $Rpk$  et  $Rk$  était renseignée afin de garantir la pertinence texturale de la configuration retenue. Les résultats de cette étude sont donnés en Figure III.6. Nous pouvons apprécier à travers elle toute la difficulté inhérente aux opérations de toilage industriel.

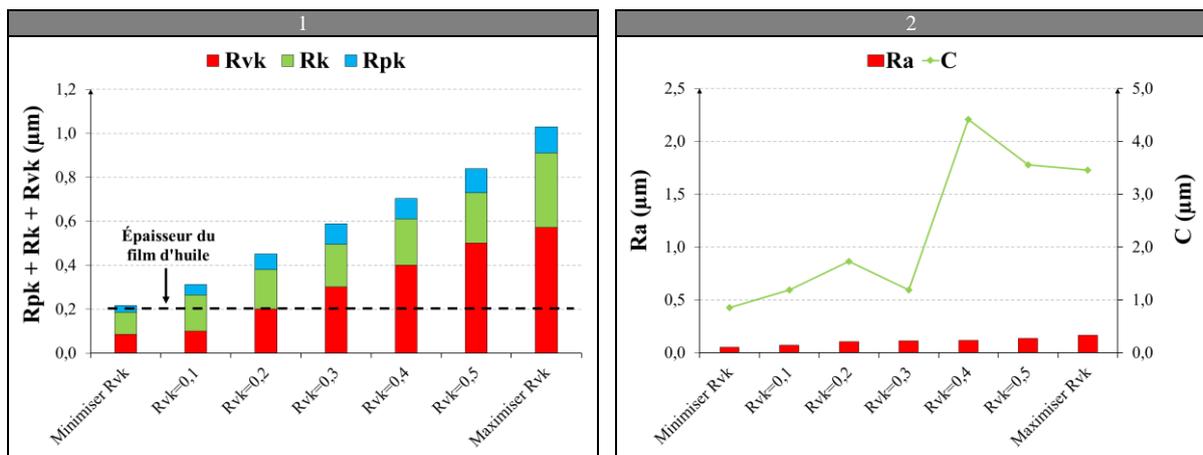


Figure III.6 : Réponses prédites pour plusieurs objectifs,  $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rvk$  (1) et  $Ra$  et  $C$  (2)

En toute cohérence avec les résultats précédents, nous constatons l'indépendance de la circularité  $C$  et une forte dépendance linéaire des critères de rugosité  $Ra$ ,  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$ . Quelle que soit la configuration

process choisie, l'obtention d'un fort volume de rétention implique une augmentation sensible de la hauteur des pics et de cœur. Dans la pratique, cela signifie que ces derniers sont liés et qu'il est difficile voire impossible de travailler indépendamment les vallées du reste de la rugosité en toilage conventionnel. En outre, l'analyse des variables process laisse apparaître que de profondes vallées ne sont possibles qu'en diminuant la granulométrie en ébauche  $G_s^*$  et en augmentant celle de demi-finition  $G_s^{**}$ . En dehors de cette observation, nous pouvons apprécier sur cette figure l'étendue ainsi que les extremums des critères de rugosité atteignables dans une stratégie de texturation à forte rétention. Les minimums  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$  approchent respectivement  $0,03 \mu\text{m}$ ,  $0,1 \mu\text{m}$  et  $0,09 \mu\text{m}$ . En outre, la gamme de travail des  $Rvk$  apparaît relativement importante et peut atteindre des valeurs allant jusqu'à environ  $0,6 \mu\text{m}$ . La somme des  $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rvk$ , qui renvoie à la notion d'amplitude totale du profil de rugosité, va quant à elle de  $0,2 \mu\text{m}$  à  $1 \mu\text{m}$ .

### III.1.3.b. Limites fonctionnelles

Les minimas et les étendues de rugosité peuvent apparaître à première vue très faibles. Cependant leurs amplitudes approchent voire dépassent nettement l'épaisseur du film d'huile minimale séparant la portée du coussinet en régime nominal. Des modélisations menées en interne RENAULT chiffrent cette épaisseur minimale aux alentours de  $0,2 \mu\text{m}$ , ce qui correspond peu ou prou à l'amplitude minimale de rugosité atteignable en toilage conventionnel. Cela signifie implicitement que la fonctionnalité est extrêmement sensible à toute dérive du process.

### III.1.4. Conclusion

Un certain nombre de verrous ont pu être clairement identifiés suite à cette étude visant à étudier statistiquement les configurations actuelles de toilage. Nous retiendrons principalement que :

- le procédé de toilage et la physique sous-jacente sont extrêmement complexes, principalement du fait du grand nombre de variables et de leurs interactions ;
- il est impossible d'augmenter le volume de rétention des surfaces ( $Rvk$ ) sans dégrader l'amplitude des pics et du cœur de la texture ( $Rpk$  et  $Rk$ ). Le qualificatif de surface « plateaux/vallées » est donc logiquement inapproprié pour les surfaces toilées selon des configurations conventionnelles.
- l'équivalence entre l'amplitude minimale des rugosités ( $Rpk + Rk + Rvk$ ) et l'épaisseur minimale du film d'huile  $h_{min}$  montre la limite fonctionnelle des configurations conventionnelles.

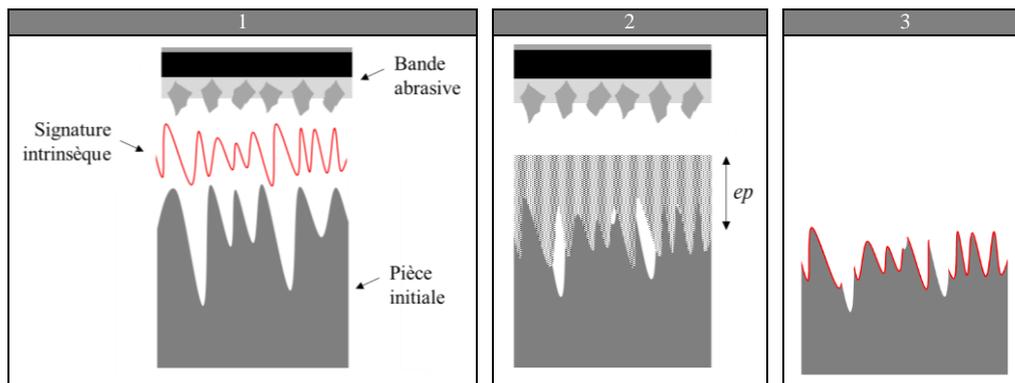
## III.2. Introduction à la texturation par toilage

La génération de surfaces type « plateaux/vallées » en toilage conventionnel semble délicate du fait du très fort couplage entre la profondeur des vallées  $Rvk$ , de la hauteur de cœur  $Rk$  et des pics  $Rpk$ . La variété texturale est en ce sens extrêmement réduite. Les causes de cette limite ne sont toutefois pas clairement identifiées. Nous nous sommes intéressés plus en détail à cette problématique.

### III.2.1. Conditions texturales de régénération et/ou de préservation

Comme nous le savons déjà, la superfinition par toilage s'effectue en plusieurs passes en abaissant graduellement la granulométrie des bandes abrasives. De manière tout à fait générale, l'interaction entre chaque passe engendre la transformation de la surface, donnant ainsi naissance à une texture unique. En dehors de toute considération physique, la phénoménologie du processus est relativement simple. Considérons  $(Rpk + Rk + Rvk)$  l'amplitude de la rugosité initiale et  $ep$  l'enlèvement de matière engendré lors de la passe de toilage (**Figure III.7**). Trois cas de figure de modification texturale sont possibles suite aux opérations :

- si  $ep \ll (Rpk + Rk + Rvk)$ , le profil initial est légèrement modifié par l'action d'abrasion, les vallées de la surface sont préservées tandis que les pics sont totalement remodelés ;
- si  $ep \approx (Rpk + Rk + Rvk)$ , la surface initiale n'est quasiment plus visible, seules les vallées les plus profondes subsistent encore ;
- enfin, si  $ep \gg (Rpk + Rk + Rvk)$ , tout le profil initial est effacé et la bande abrasive a imprimé sur la surface finale une signature qui lui est propre, appelée par la suite signature intrinsèque.



**Figure III.7 : Modification texturale par interaction entre la surface initiale et la signature intrinsèque de bande abrasive**

En conséquence, lors d'une passe, la texture finale est naturellement conditionnée par le triplet composé de l'enlèvement de matière, de l'amplitude des rugosités initiales et de la signature, dite intrinsèque, de la bande abrasive utilisée (qui varie selon la configuration machine).

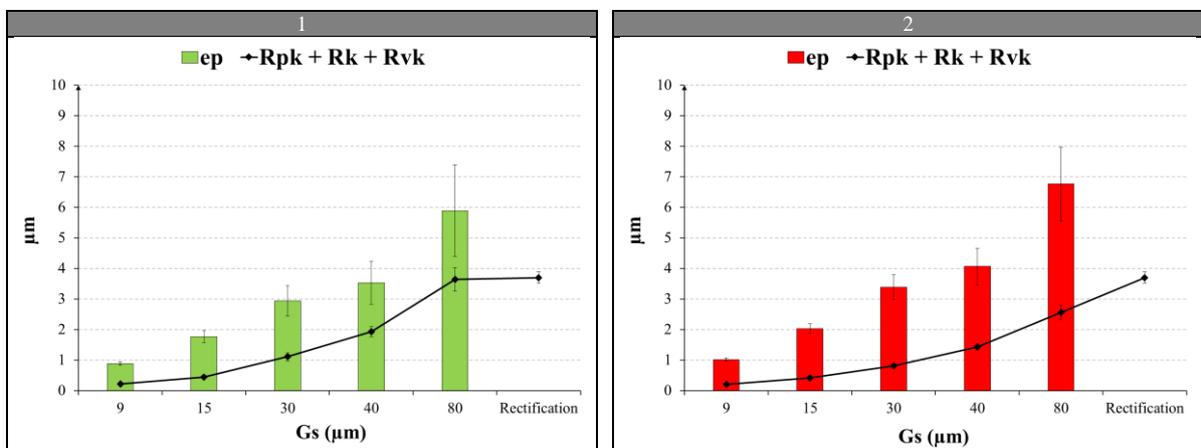
### III.2.2. Application au toilage conventionnel

Afin de quantifier précisément les conditions de renouvellement de la rugosité et d'isoler ces signatures, nous avons entrepris de réaliser une étude sur des surfaces initialement polies, en variant la seule granulométrie. Les essais, dont le plan est détaillé en **Table III.2**, ont été effectués avec oscillations puis sans oscillations.

**Table III.2 : Configurations testées lors de l'étude des signatures intrinsèques de bandes abrasives**

Paramètre	Not.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Granulométrie	$G_s$	9 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$
Mâchoires	-	Env. souples		Env. dures		Env. souples		Env. dures			
Vitesse des oscillations	$N_2$	0 cycles/min				550 cycles/min					
Vitesse de rotation	$N_1$					100 tr/min					
Temps de cycle	$t$					10 s					
Force normale	$F$					600 N					
Amplitude des oscillations	$A$					1 mm					
Bande abrasive	-					Structure conventionnelle					
Avance de la bande	-					Complète					
Lubrification	-					Avec					
Pièce	-					Éprouvette de toilage					
État initial	-					État après polissage fin					
Rugosité initiale	-	$R_a = 0,015 \pm 0,005 \mu\text{m}$		$R_{pk} = 0,015 \pm 0,070 \mu\text{m}$		$R_k = 0,060 \pm 0,014 \mu\text{m}$		$R_{vk} = 0,063 \pm 0,019 \mu\text{m}$			
Circularité initiale	-					$C = 2,140 \pm 0,118 \mu\text{m}$					

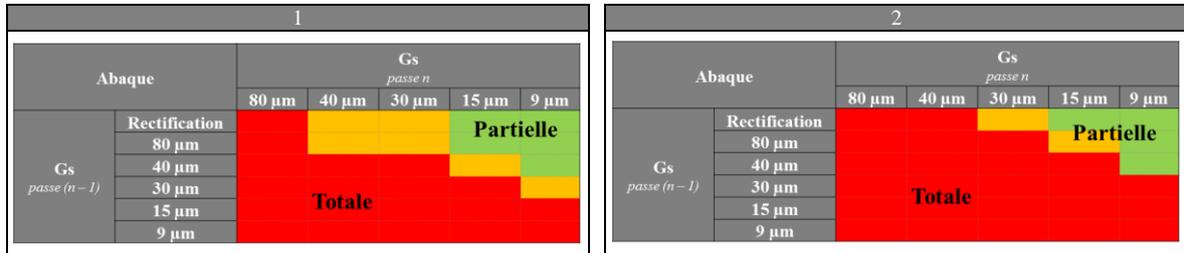
Puis, nous avons mesuré l'enlèvement de matière  $ep$  ainsi que les critères standards  $R_{pk}$ ,  $R_k$  et  $R_{vk}$ , que nous avons sommés afin de calculer l'amplitude totale de la rugosité (**Figure III.8**).



**Figure III.8 : Enlèvement de matière et amplitude des rugosités intrinsèques pour plusieurs granulométries, sans oscillations (1), avec oscillations (2)**

De manière triviale, nous avons observé une augmentation de leurs valeurs avec l'élévation de la granulométrie. En toute cohérence avec les travaux de Sura [79], nous remarquons également que la présence d'oscillations augmente l'enlèvement de matière tout en permettant une diminution d'environ 50 % de l'amplitude totale des rugosités. Excepté ces observations, la lecture des graphiques permet d'établir les conditions de régénération des textures initiales, en lien avec ce qui a été dit précédemment. Nous pouvons par exemple raisonnablement supposer que les granulométries de 9 et 15  $\mu\text{m}$  préservent

une partie des vallées initiales issues de stries de rectification (car  $ep \ll Rpk + Rk + Rvk$ ), alors que les granulométries 30, 40 et 80  $\mu\text{m}$  les effacent intégralement (car  $ep \gg Rpk + Rk + Rvk$ ). En prolongeant ce raisonnement sur des surfaces initialement toilées avec différentes granulométries (passe  $n - 1$ ), il a été possible de formaliser sous la forme d'abaques les conditions de renouvellement textural lors d'une passe de toilage (passe  $n$ ). Ceux-ci sont donnés en **Figure III.9**.



**Figure III.9 : Abaques des conditions de renouvellement texturale en toilage conventionnel, sans oscillations (1), avec oscillations (2)**

Si on reporte de façon itérative les configurations testées en **III.1.1.a** sur l'abaque de la **Figure III.9.2**, on remarque qu'elles sont pour la plupart régénératives.

### III.2.3. Conclusion

Il ressort de cette courte étude que l'utilisation successive des bandes abrasives conventionnelles limite le pouvoir texturant de par leur fort pouvoir de coupe. En supprimant à chaque passe les vallées présentes initialement, ces bandes impriment très rapidement leur signature propre, rendant ainsi impossible la dissociation entre les pics et le cœur de rugosité d'une part et les vallées d'autre part.

### III.3. Développement des capacités texturales du procédé de toilage par modification des structures abrasives

Le toilage existant ne peut permettre la texturation de surface type « plateaux/vallées ». Toutefois, un certain nombre de paramètres, non étudiés dans la littérature, peuvent potentiellement lever ce verrou. Initialement développé pour l'enlèvement de matière, l'amélioration des formes et de la rugosité arithmétique, le toilage n'a pas encore connu d'adaptation majeure afin d'augmenter ses capacités de texturation. L'un de nos objectifs est d'apporter les changements nécessaires au procédé conventionnel pour permettre d'accroître la diversité texturale.

#### III.3.1. Le potentiel des structures abrasives

Nous avons vu précédemment que le choix des abrasifs pilote de manière déterministe l'empreinte laissée sur la pièce. Ce lien de causalité nous permet d'émettre l'hypothèse que la structure abrasive conditionne en grande partie les capacités texturantes du procédé de toilage.

##### III.3.1.a. Analyse de l'existant

L'offre commerciale est très souvent conséquente chez les fournisseurs de bandes abrasives. Les matériaux de grains, les résines, les supports, les granulométries, les densités et le type de déposition sont les principales variables maîtrisées lors du processus de fabrication et il existe potentiellement autant de modèles de bande que de combinaisons entre ces facteurs. On peut distinguer trois de types de structure :

- les structures à grains électrodéposés, appelées aussi « Microfinishing Films ». Ce sont les seules à être utilisées en toilage conventionnel. Les grains sont disposés par électrostatisme selon une orientation normale au support de bande (*Figure III.10.1*). Avec ce type de déposition, la limite minimale granulométrique est de 9  $\mu\text{m}$ , des grains plus fins ne pourraient être correctement orientés. Cette structure, connue pour être très abrasive, est généralement déposée sur un support épais (environ 125  $\mu\text{m}$ ) en polyester extrudé ;
- les structures à grains laminés, appelées aussi « Lapping Films » ou encore bande de polissage. Ce sont des structures utilisées principalement dans le secteur de l'électronique pour la finition des connectiques. Elles sont peu connues de l'automobile. Les grains de cette structure sont préalablement mélangés à la résine avant d'être étalés sur le support de bande à l'aide d'un laminoir lisse (*Figure III.10.4*). Avec ce type de déposition, les grains ont une orientation préférentielle parallèle au support de bande et les arêtes vives sont partiellement ou totalement recouvertes de résine (*Figure III.10.6*). La hauteur de saillie des grains est finement maîtrisée et leur densité est beaucoup plus élevée que dans le cas des structures électrodéposés. Il n'existe

pas de limite minimale granulométrique avec ce type de déposition. Toutefois dans la pratique, ces structures sont généralement commercialisées avec une plage granulométrique allant de 40  $\mu\text{m}$  à 0,1  $\mu\text{m}$ . Cependant leurs supports sont généralement moins épais (environ 75  $\mu\text{m}$ ) que ceux des bandes à grains électrodéposés. Ce sont par conséquent des bandes fragiles qui nécessitent de travailler dans des gammes de charge relativement faibles. Suite aux multiples essais effectués, nous avons constaté que des endommagements apparaissaient à partir de 600 N (léger allongement plastique et décollement partiel de l'abrasif) ;

- les structures à motifs tridimensionnels constituées d'agglomérats de grains liés entre eux par l'intermédiaire de la résine (**Figure III.10.8**). Lors du processus de déposition, les grains sont mélangés à la résine puis étalés sur le support de bande par un laminoir structuré spécifique (**Figure III.10.7**). On retrouve dans les catalogues toutes sortes de motifs où les plus communs sont composés d'agglomérats hémisphériques ou pyramidaux (**Figure III.10.9**). Tout comme la structure précédente, il n'existe pas de limite minimale de granulométrie. Cette structure est généralement apposée sur des supports très épais en tissu plastifié.

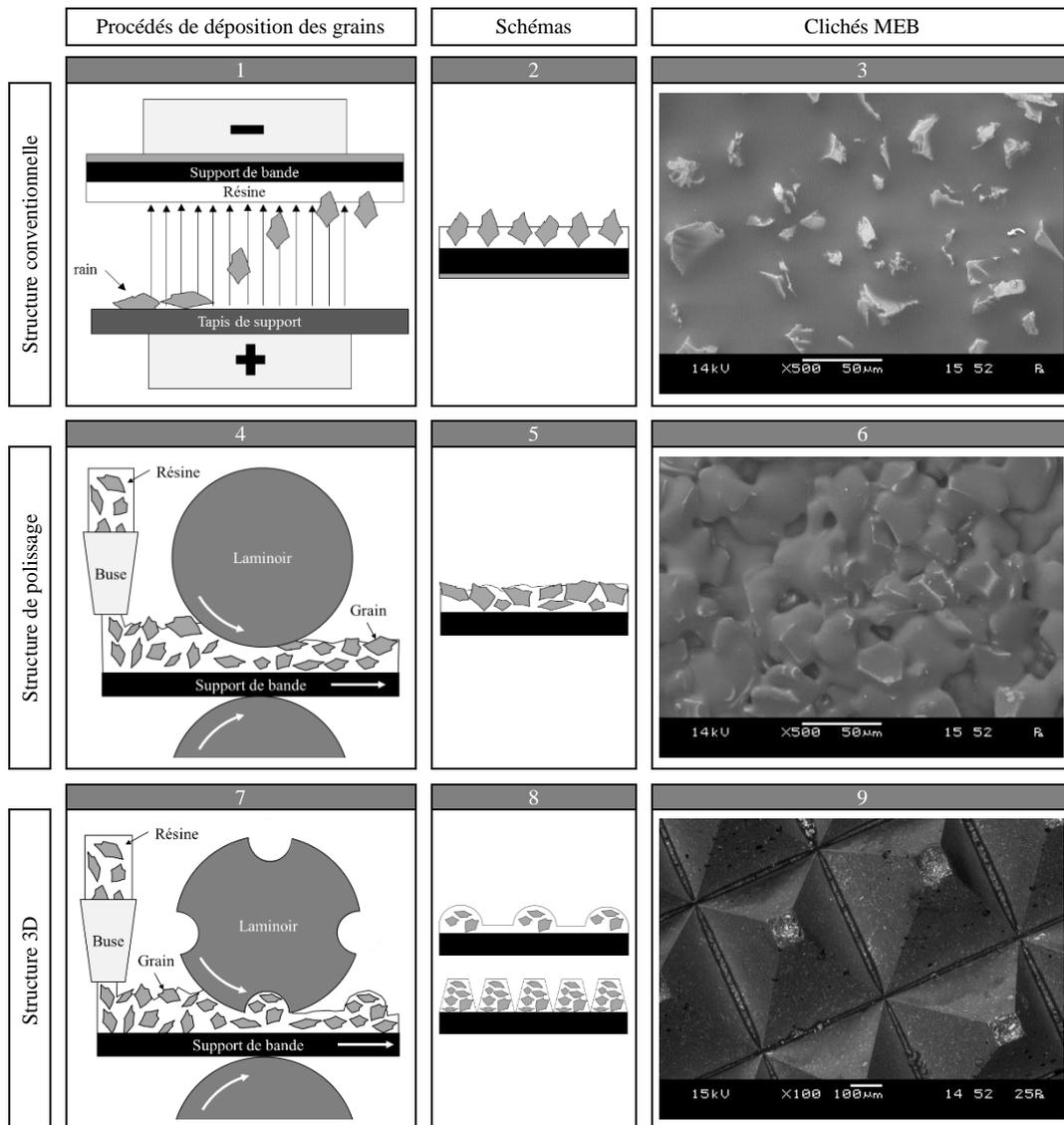


Figure III.10 : Les différents procédés de dépôt de grains des structures abrasives

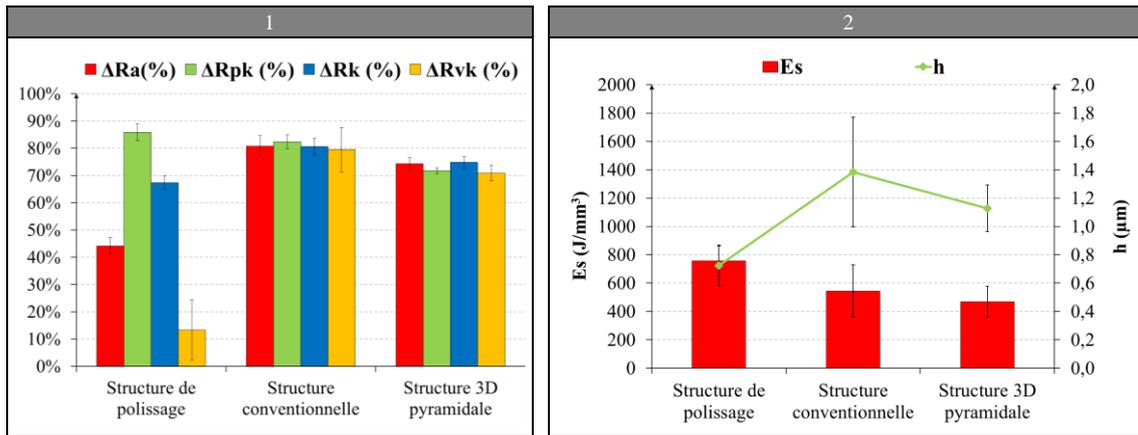
### III.3.1.b. Influences des structures abrasives sur les performances texturales et la physique de toilage

Du fait de leurs différences morphologiques, nous pouvons nous attendre à ce que ces structures aient des aptitudes spécifiques en toilage. Nous allons dans une première approche chercher à vérifier l'aptitude de ces structures à texturer pour une même configuration. Pour cela, nous avons tout d'abord toilé une éprouvette rectifiée avec une bande de type Microfinishing Film de grains  $80\ \mu\text{m}$ . La surface, composée alors de stries très profondes, a ensuite été retoilée avec trois structures abrasives différentes (abrasif conventionnel, abrasif de polissage et abrasif tridimensionnel pyramidal), toutes composées de grains de  $30\ \mu\text{m}$ . La configuration expérimentale est donnée en **Table III.3**.

Table III.3 : Configurations testées lors de l'étude du potentiel texturant des structures abrasives

Paramètre	Not.	1	2	3
Bande abrasive	-	Conventionnelle	Polissage	3D pyramidale
Vitesse de rotation	$N_1$		100 tr/min	
Temps de cycle	$t$		12 s	
Force normale	$F$		600 N	
Vitesse des oscillations	$N_2$		275 cycles/min	
Amplitude des oscillations	$A$		1 mm	
Granulométrie	$G_s$		30 $\mu\text{m}$	
Avance de la bande	-		Complète	
Lubrification	-		Avec	
Mâchoires	-		Enveloppantes dures	
Pièce	-		Éprouvette de toilage	
État initial	-		État après toilage conventionnel ébauche 80 $\mu\text{m}$	
Rugosité initiale	-	$R_a = 0,447 \pm 0,077 \mu\text{m}$	$R_{pk} = 0,408 \pm 0,073 \mu\text{m}$	$R_k = 1,342 \pm 0,222 \mu\text{m}$ $R_{vk} = 1,145 \pm 0,208 \mu\text{m}$

Suite aux essais, un résultat attire particulièrement l'attention. La quantification des gains en rugosité (*Figure III.11.1*), de l'épaisseur de matière enlevée et de l'énergie spécifique (*Figure III.11.2*), montre que la bande de polissage enlève moins de matière que les deux autres structures. Cela est également visible de manière flagrante au travers de la rugosité où l'on observe quasiment aucune évolution de la profondeur des vallées  $R_{vk}$ . Pour autant, on constate bien un réel écrêtage de la rugosité, comme en témoignent les gains sur les hauteurs de pics  $R_{pk}$  et le cœur  $R_k$ , ce qui est cohérent avec les clichés *MEB* et interférométriques. Le corolaire à ces observations est que l'utilisation d'une telle structure augmente systématiquement l'énergie spécifique de toilage. Son action est en somme superficielle. Ces tendances peuvent raisonnablement s'expliquer du fait de l'orientation couchée des grains. Étalés sur le support ces derniers ont davantage tendance à araser plutôt qu'à pénétrer le volume de la pièce. Quant à la structure tridimensionnelle pyramidale, elle suit une tendance très proche de la structure conventionnelle. Énergétiquement efficace, elle enlève une épaisseur de matière de l'ordre 1  $\mu\text{m}$ . On aurait pu s'attendre à un transfert des motifs pyramidaux sur la surface, mais il n'en est rien, ou dans une moindre mesure, cet effet n'est pas observable. Nous pouvons émettre l'hypothèse que, du fait des oscillations et de leur effet sur la cinématique grains/pièce, les stries générées par les zones de contact se recouvrent mutuellement.



**Figure III.11 : Effet de trois structures abrasives, gains en rugosité (1), énergie spécifique de toilage et enlèvement de matière associée (2)**

La caractérisation qualitative par MEB des copeaux montre également l'importance de l'orientation de grains sur le pouvoir de coupe. De manière tout à fait logique et cohérente avec ce qui a été dit précédemment, on observe que les copeaux générés avec la bande de polissage sont environ deux fois moins épais qu'avec les deux autres structures. Ils sont également moins fragmentés. L'observation des abrasifs usés révèle en outre que les modes d'usure sont différents. Du fait de sa grande densité, la structure de polissage se sature en copeaux lors du toilage. Ces derniers sont comme piégés dans la structure et viennent combler une grande partie de l'espace intergrain. À l'opposé, l'usure de la structure conventionnelle, déjà étudiée et quantifiée par Sura [79], se caractérise par une altération de la géométrie des grains et par leur arrachement partiel ou total de la matrice en résine. Du fait de sa densité plus faible, la saturation en copeaux de la structure est très légère après nettoyage au bain ultra-sonique. La structure tridimensionnelle pyramidale suit un tout autre mode d'usure. Seuls les sommets des agglomérats pyramidaux subissent l'effet de l'abrasion. En fonctionnement, les grains se désolidarisent de la matrice et sont évacués du contact, laissant ainsi des grains neufs sous-jacents apparaître.

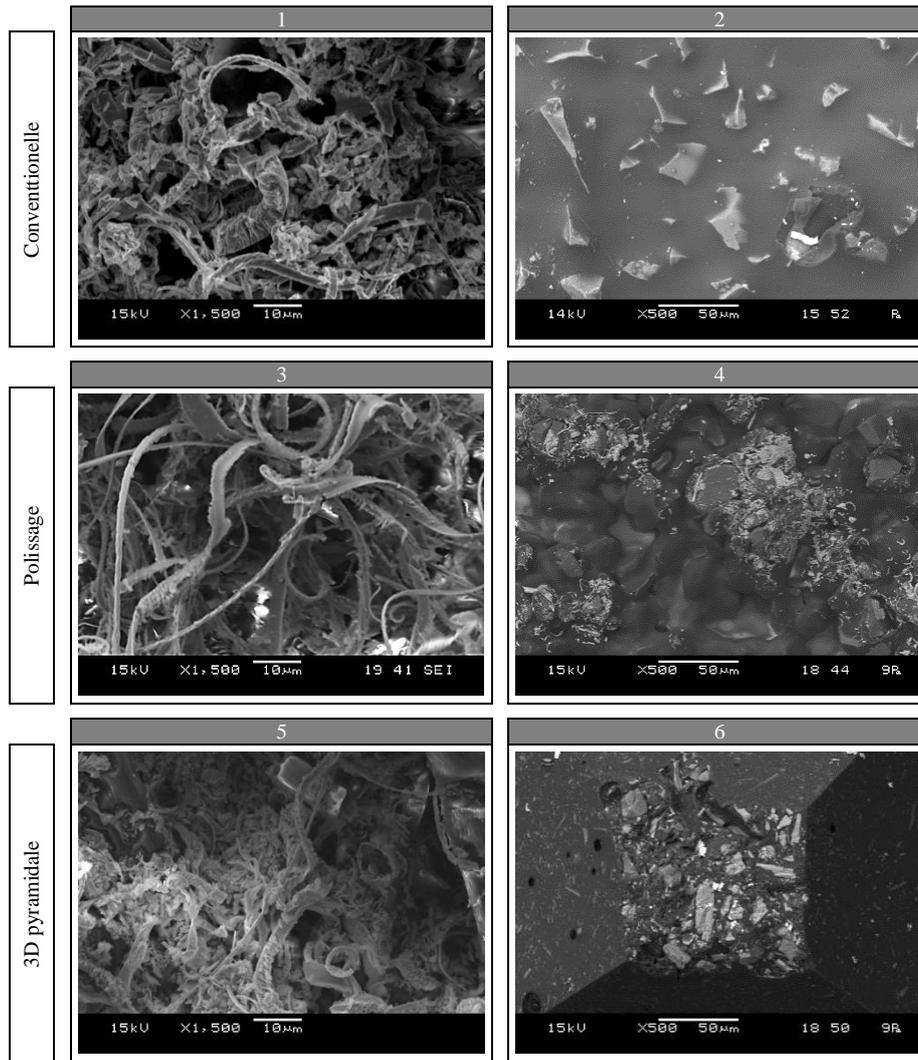


Figure III.12 : Clichés MEB des copeaux de toilage (1) (3) (5) et des bandes usées (2) (4) (6)

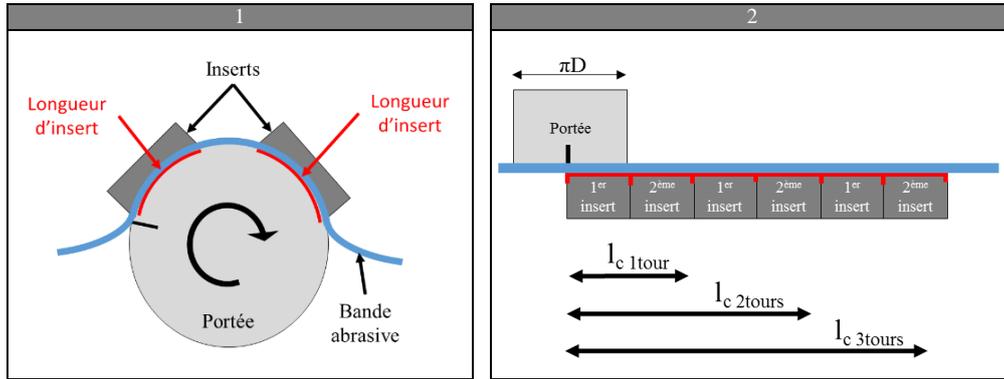
### III.3.2. Influences du nombre de révolutions lors de l'utilisation de différentes structures abrasives

La cinématique entre la bande et la pièce joue un rôle considérable sur les états de surface en toilage conventionnel. Elle conditionne la trajectoire des grains sur la pièce et par conséquent l'orientation des stries qui peuvent être plus moins croisées. Par exemple, il est connu que la présence d'oscillations, même faibles, permet de diminuer d'environ 50 % de la rugosité arithmétique  $R_a$  des profils toilés. Il est probable que ce résultat soit conditionné par le type de structure abrasive.

#### III.3.2.a. Nombre de révolutions et longueur cinématique

Les portées effectuent plusieurs révolutions durant une opération de toilage. Le nombre total de révolutions s'exprime analytiquement à l'aide de la vitesse de rotation de la portée  $\omega_1$  et du temps de toilage  $t_c$  par l'équation (19). Lors d'une unique révolution et sans oscillations, chaque portion de la pièce subit l'action des grains sur une longueur d'arc égale à la longueur développée du contact  $l_c$ , qui

peut être calculée simplement comme la somme des longueurs développées de chaque insert, comme représenté en **Figure III.13**.



**Figure III.13 : Longueur cinématique en toilage, pour une révolution (1), pour plusieurs révolutions en vue développée (2)**

Dans ce cas particulier sans oscillations, cette longueur de contact permet de calculer la longueur cinématique totale  $l$  de toilage selon l'équation (20). Cette dernière représente tout simplement la longueur totale d'abrasif que voit la pièce lors de l'opération de toilage, comme représenté dans la **Figure III.13**.

$$n = \frac{N_1 tc}{60} = \frac{\omega_1 tc}{2\pi} \quad (19)$$

$$l = n \times lc \quad (20)$$

Les capacités d'abrasion et l'usure des structures abrasives sont bien entendu intimement liées à ces paramètres. Ainsi :

- pour une même longueur de contact  $lc$ , l'augmentation de la longueur cinématique  $l$  et donc du nombre de révolutions  $n$  augmente l'usure des bandes et engendre une accumulation des copeaux dans le contact. Cet effet trivial a été largement observé et étudié, notamment par Sura [79] ;
- un peu plus subtilement, pour une même longueur cinématique  $l$ , l'augmentation de la longueur de contact  $lc$  diminue l'usure des bandes et retarde la saturation en copeaux des espaces intergrains. C'est le cas par exemple en finition lorsque l'on passe de mâchoires souples tangentielles à des mâchoires souples enveloppantes. À pression de contact et longueur cinématique identiques, l'épaisseur de matière enlevée est plus importante avec une mâchoire enveloppante qu'avec une mâchoire tangentielle.

III.3.2.b. Étude expérimentale de l'influence du nombre de révolutions par ajustement distinct du temps de cycle  $t_c$  et de la vitesse de rotation  $N_1$

Étudions plus particulièrement cette problématique. Au regard de l'équation (19), il est possible de modifier le nombre de révolutions  $n$  selon deux stratégies cinématiques :

- soit en ajustant la vitesse de rotation de la portée  $N_1$  et en maintenant le temps de cycle  $t_c$  constant, ce qui modifie les trajectoires de grains ;
- soit, à l'inverse, en ajustant le temps de cycle  $t_c$  et en maintenant la vitesse de rotation de la portée  $N_1$  constante, ce qui préserve les trajectoires de grains.

Un plan d'expérience a été habilement conçu de façon à observer l'impact textural de ces deux stratégies pour plusieurs nombres de révolutions  $n$  et une fréquence d'oscillations  $N_2$  constante. Le détail du plan est donné en **Table III.4**. Chaque configuration a été répétée à trois reprises pour améliorer la robustesse des observations. Les puissances consommées et les enlèvements de matière ont été mesurés, ce qui a permis de quantifier l'énergie spécifique de toilage au cours des opérations. Trois mesures de rugosité 2D ont également été effectuées sur les génératrices des portées.

**Table III.4 : Configurations testées lors de l'étude de l'influence du nombre de révolutions**

Paramètres	Not.	1	2	3	4	5	6	7
Vitesse de rotation	$N_1$	100 tr/min	100 tr/min	100 tr/min	100 tr/min	200 tr/min <sup>1</sup>	400 tr/min	800 tr/min
Temps de cycle	$t_c$	12 s	24 s	48 s	96s	12s	12s	12s
Nombre de révolutions	$n$	20	40	80	160	40	80	160
Longueur de contact	$l_c$				42 mm			
Force	$F$				600 N			
Vitesse des oscillations	$N_2$				265 cycles/min			
Amplitude des oscillations	$A$				1 mm			
Lubrification	-				Avec			
Avance de la bande	-				Complète			
Mâchoire	-				Enveloppantes dures			
Pièce	-				Éprouvette de toilage			
État initial	-				État après toilage conventionnel ébauche 80 $\mu\text{m}$			
Rugosité initiale	-	Ra = 0,604 $\pm$ 0,050 $\mu\text{m}$		Rpk = 0,414 $\pm$ 0,055 $\mu\text{m}$	Rk = 1,781 $\pm$ 0,218 $\mu\text{m}$		Rvk = 1,501 $\pm$ 0,132 $\mu\text{m}$	

Les **Figure III.14** et la **Figure III.15** permettent d'apprécier les modifications texturales 2D engendrées par les deux stratégies d'augmentation de la longueur cinématique  $l$  de toilage. À travers elles, nous pouvons constater que la stratégie basée sur le temps de cycle  $t_c$  permet de diminuer l'ensemble des critères de rugosité et ce, pour toutes les structures de bandes abrasives. La profondeur des vallées, caractérisée par le critère  $Rvk$ , est la plus impactée de tous. Globalement, le passage de 20 révolutions à 160 avec la structure conventionnelle et 3D pyramidale a pour conséquence de réduire de 10 % la profondeur de vallées (**Figure III.14.3** et **Figure III.14.9**). L'observation est nettement moins significative avec les structures abrasives de polissage, où le gain est de seulement quelques pourcent (**Figure III.14.6**), cela vient confirmer le caractère superficiel de ce genre de bande. À l'opposé, l'augmentation du nombre de révolutions  $n$  par la variation de la vitesse de rotation de la portée  $N_1$  suit

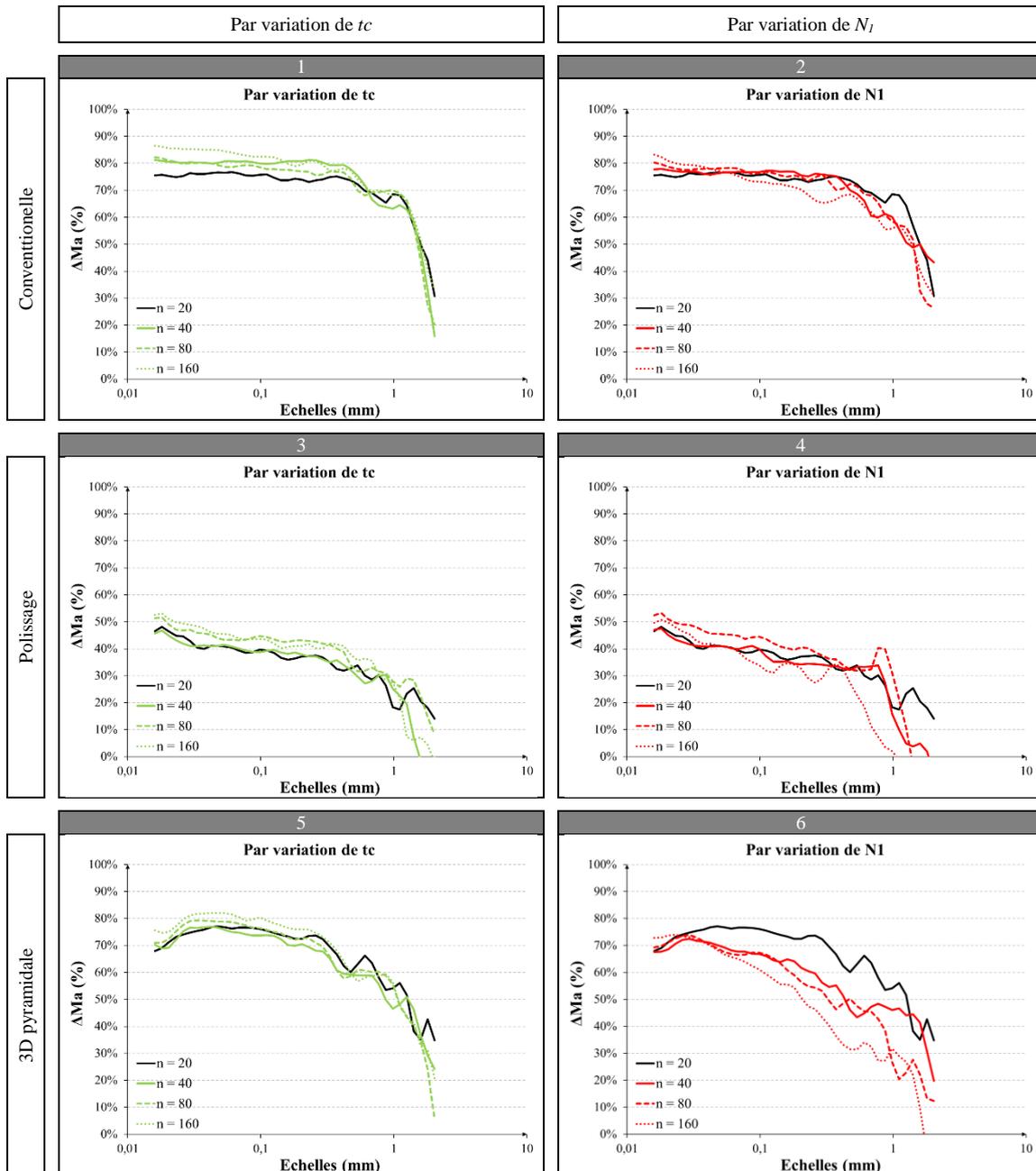
une toute autre logique. Avec la structure conventionnelle et pyramidale, le gain relatif sur les critères  $R_k$  et  $R_{vk}$  chute en effet progressivement avec l'augmentation du nombre de révolutions  $n$ . La chute est même critique sur les profondeurs de vallées où le gain relatif diminue de 20 % lors du passage 20 à 160 révolutions, c'est-à-dire lors du passage d'une vitesse de rotation de 100 à 800 tr/min (**Figure III.14.3** et **Figure III.14.9**). Cette tendance n'est pas perceptible avec la bande de polissage.



**Figure III.14 : Effets de la cinématique sur les critères  $R_{pk}$ ,  $R_k$  et  $R_{vk}$  par ajustement distinct du temps de cycle  $t_c$  et de la vitesse de rotation  $N_1$**

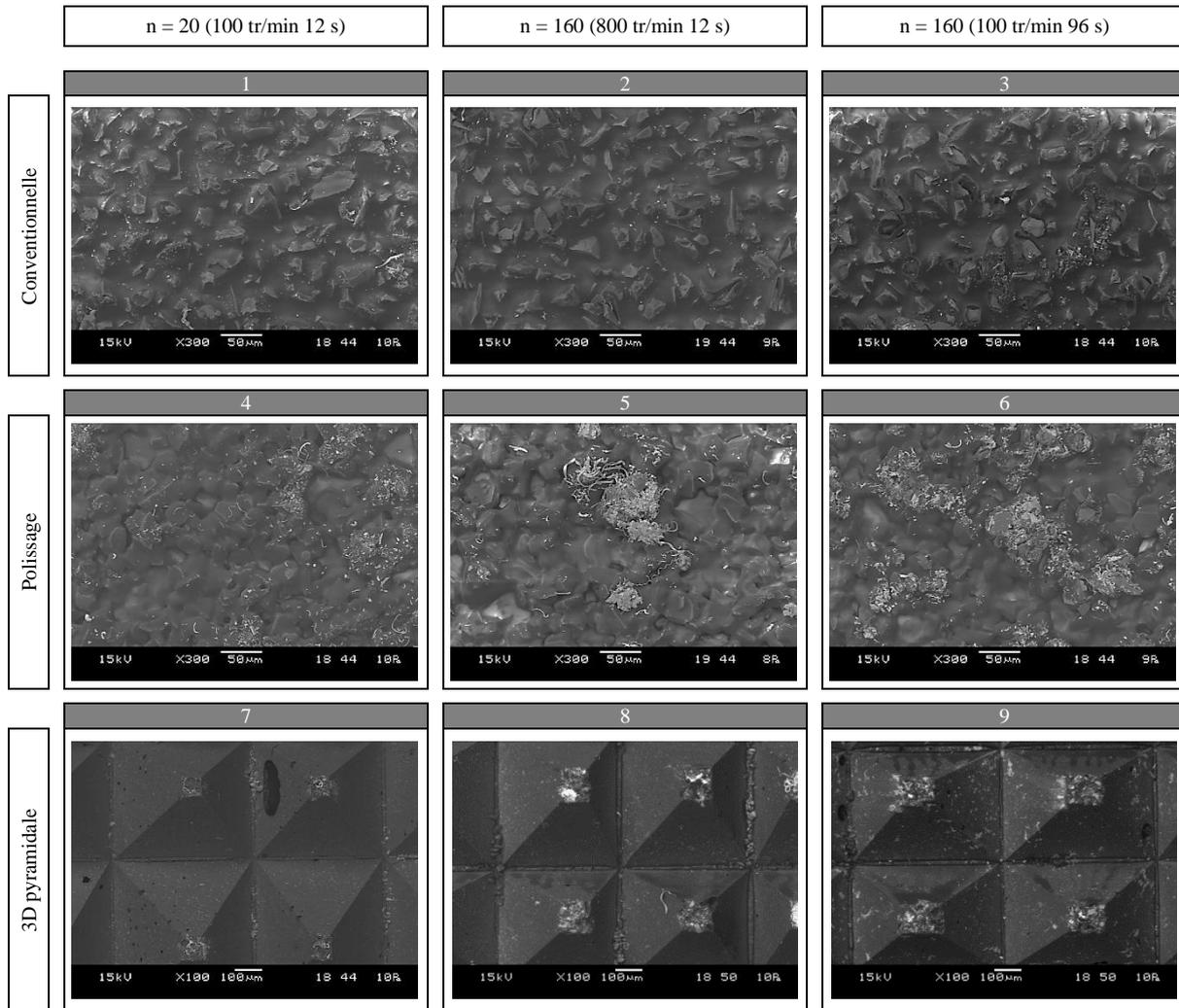
L'analyse multi-échelle des profils 2D par la décomposition en ondelettes nous a permis de constater que l'effet textural du choix de stratégie se faisait aussi sentir sur les échelles activées lors de l'opération de toilage. Le gain multi-échelle basé sur le critère de rugosité arithmétique  $R_a$  indique en effet que l'augmentation de la vitesse de rotation  $N_1$  réduit la bande d'échelles activées alors même que l'effet n'est pas perceptible lors de la variation du temps de cycle  $t_c$ . Ici encore, le constat est plus significatif avec les structures abrasives conventionnelles à grains déposés électrostatiquement et les structures 3D pyramidales (**Figure III.15.2** et **Figure III.15.6**). En outre, la distinction des gains se fait aux alentours de 30  $\mu\text{m}$ , ce qui correspond exactement à la taille des grains. En dessous de cette échelle de 30  $\mu\text{m}$ , le

$\Delta Ma$  augmente avec  $n$ , que ce soit avec l'augmentation du temps de cycle  $t_c$  ou de la vitesse de rotation  $N_1$ . En revanche, au-delà, l'augmentation de  $N_1$  engendre une diminution du gain, alors que l'augmentation de  $t_c$  tend toujours à le maximiser.



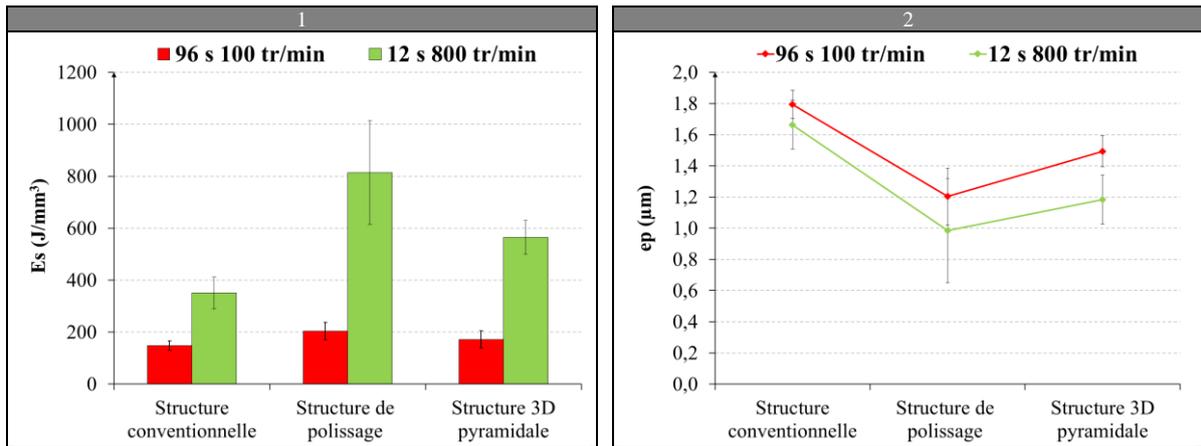
Les clichés MEB des bandes usées n'ont pas permis d'illustrer des mécanismes d'usure particuliers en fonction de la stratégie adoptée. Les structures conventionnelles et de polissage usé montrent globalement une tenue moyenne. On distingue des arrachements ou des éclatements de grains, qui tendent à croître avec le nombre de révolutions effectuées. En outre, la saturation en copeaux est également très présente. Immédiatement après les essais et pour les deux stratégies, on constate

visuellement que ces deux structures sont encrassées. Après le nettoyage au bain ultra-sonique, il apparaît que cette saturation disparaît de la structure conventionnelle alors qu'elle persiste sur la structure de polissage (**Figure III.16.4** et **Figure III.16.5**). Cette distinction est à mettre en lien avec la densité et l'orientation de leurs grains. Nous émettons ici l'hypothèse que l'évacuation des copeaux coincés sur la surface abrasive ne peut se faire que si les volumes intergrains sont suffisants pour permettre leur circulation. La bande tridimensionnelle pyramidale offre quant à elle une impressionnante tenue. Initialement conçue par les fournisseurs pour être utilisée plusieurs fois lors de cycles répétés, elle présente une usure contenue malgré le nombre important de révolutions imposées. Sous l'action de l'abrasion, les sommets se détériorent et voient leur hauteur légèrement diminuer, augmentant ainsi la surface réelle en contact. L'usure n'est pas perceptible à l'œil nu.



**Figure III.16 : Usure des structures abrasives en fonction du nombre de révolutions et de la stratégie adoptée**

Le rendement énergétique apparaît également dépendant du choix de la stratégie (**Figure III.17**). Pour un même nombre de révolutions  $n$ , on constate que l'augmentation de la vitesse de rotation  $N_f$  au dépend du temps de cycle  $t_c$ , a pour effet de détériorer significativement l'efficacité énergétique de l'opération de toilage. Les énergies spécifiques  $E_s$  sont ainsi multipliées par deux à quatre fois selon la structure considérée.

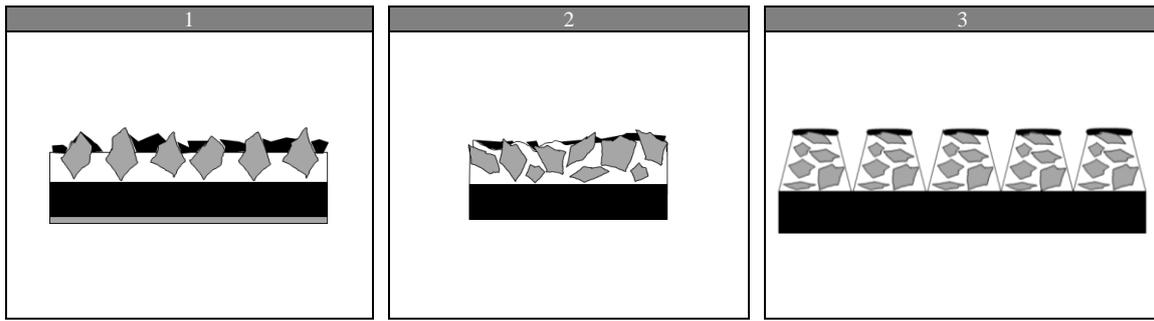


**Figure III.17 : Efficacité abrasive en fonction de la structure abrasive pour un nombre de révolutions  $n = 160$ , énergie spécifique  $E_s$  (1) et épaisseur de matière enlevée  $ep$  (2)**

Les choix cinématiques impactent donc grandement la signature process et l'efficacité de l'opération de toilage. Plusieurs causes peuvent être responsables de ce phénomène. On peut distinguer deux catégories principales :

- les causes physiques, résultantes des modifications phénoménologiques du processus d'abrasion lors de l'opération de toilage ;
- les causes géométriques, résultantes de la modification des trajectoires de stries sur les mesures 2D.

Physiquement d'abord, l'une des hypothèses les plus probables est que la stratégie basée sur l'augmentation de la vitesse de rotation  $N_f$  entraîne une diminution du pouvoir abrasif à cause des effets induits par la hausse du débit matière enlevée par abrasion. Le débit de fuite étant alors beaucoup plus faible, le processus de saturation en copeaux des bandes pourrait s'accélérer et fortement diminuer les capacités d'indentation des structures abrasives (**Figure III.18**). Ceci expliquerait très bien l'évolution à la baisse des gains sur les profondeurs de vallées en fonction de la vitesse de rotation. Par ailleurs, étant donné la très faible capacité d'indentation de la structure de polissage, il apparaîtrait tout à fait cohérent de ne pas constater de modifications majeures entre les profils 2D observés avec les deux stratégies.



**Figure III.18 : Représentation schématique de la saturation en copeaux, structure conventionnelle (1), structure de polissage (2), structure 3D pyramidale (3)**

D'un autre côté, les trajectoires de grains peuvent également être responsables des tendances observées sur les rugosités 2D. Pour une faible vitesse de rotation  $N_l$ , les stries générées sont peu nombreuses et ont une période très réduite. Très espacées, elles sont également davantage croisées. À l'inverse, si la vitesse de rotation  $N_l$  est très grande, les stries sont très nombreuses et quasiment parallèles les unes aux autres. Or, plus l'angle de striation est proche de  $90^\circ$ , plus les stries sont orientées selon la direction de la mesure, ce qui tend à augmenter les paramètres liés aux espacements, à minimiser la rugosité et maximiser l'ondulation mesurée suite au filtrage gaussien. Ceci pourrait expliquer le fait que la rugosité est mieux travaillée dans les grandes échelles avec les configurations cinématiques à  $N_l = 100$  tr/min. Comme pour l'hypothèse précédente, cet effet serait conditionné par le pouvoir d'indentation de la structure, ce qui pourrait là aussi expliquer le fait que la structure abrasive de polissage ne soit que très faiblement impactée par ce phénomène.

### III.3.3. Conclusion

Nos études menées sur les trois structures abrasives laissent apparaître une voie très prometteuse de développement de la texturation par toilage. Elles ont permis de montrer la pertinence toute particulière des bandes de polissage qui permettent d'écarter tout en préservant les vallées des rugosités initiales. Contrairement aux autres structures abrasives de toilage, leurs signatures texturales apparaissent peu sensibles à la configuration cinématique, ce qui peut être un atout de taille pour augmenter la productivité.

## Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer toute la difficulté propre à la texturation par toilage. Nous nous sommes d'abord intéressés au toilage conventionnel, tel pratiqué par les lignes de production. Après un travail expérimental conséquent, nous avons quantifié l'influence statistique de la majorité des variables process sur quatre paramètres d'états de surface ( $Ra$ ,  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$ ) et un paramètre de forme ( $C$ ). Nous avons constaté que la granulométrie des abrasifs était le facteur process prédominant sur la rugosité et qu'il existait de très fortes interactions entre les variables. D'une manière générale, nous avons confirmé qu'il était extrêmement délicat de maîtriser la texturation en toilage avec des bandes conventionnelles, que leurs utilisations en usine engendraient une régénération totale des surfaces et que chaque passe effaçait quasi systématiquement la texture imprimée par la passe précédente. Ceci rend impossible le dégroupage entre la profondeur des vallées ( $Rvk$ ) et le reste de la rugosité, et par là même, la fabrication de surfaces « plateaux/vallées », qui sembleraient pourtant être les plus pertinentes d'un point de vue fonctionnel.

Partant de cette observation, nous avons cherché à maximiser la préservation des vallées en utilisant des abrasifs de nouvelle génération beaucoup moins agressifs. Les bandes de polissage ont montré d'excellents résultats. Nous avons vu qu'elles permettaient un écrêtage significatif et qu'elles étaient peu sensibles à la cinématique de toilage, ouvrant ainsi la voie à des surfaces toilées « plateaux/vallées » inatteignables jusqu'alors. Nous allons pouvoir apprécier dans la suite de ce travail l'ampleur de la diversité texturale rendue possible par une utilisation habile de ces bandes abrasives.

# **Chapitre IV.**

## **Développement du toilage texturant**

## **Introduction**

Les études précédentes ont montré qu'il était possible de maximiser la diversité texturale en toilage par l'utilisation des structures de polissage. Nous avons pu constater que ces bandes s'adaptaient parfaitement aux machines de toilage industrielles, qu'elles étaient moins onéreuses que les bandes conventionnelles et qu'elles écrêtaient significativement les pics les plus saillants de la rugosité. Si leur intérêt semble indiscutable, l'intégration de ce genre de bandes sur les lignes de production nécessite toutefois un travail d'optimisation en amont afin d'accompagner les modifications process ultérieures. Au-delà du simple changement de type d'abrasif, il s'agit de modifier la stratégie de super finition actuelle en facilitant la préservation des vallées entre chaque étape du cycle de toilage.

Ce chapitre a pour ambition de montrer qu'il est possible de maîtriser finement les textures toilées en combinant le fort pouvoir d'indentation des bandes conventionnelles à la capacité d'écrêtage des bandes de polissage. Nous formaliserons dans une première partie les bases de ce véritable toilage texturant en définissant avec précision les configurations et les enjeux associés. Nous aborderons ensuite la problématique de la maîtrise des caractéristiques texturales par deux études. Dans la première, objet de la seconde partie, nous montrerons que seules quelques variables process suffisent pour ajuster efficacement le niveau de rétention des surfaces. En particulier, une comparaison avec les surfaces toilées en production série sera réalisée. Dans la seconde, objet de la troisième partie, nous discuterons de l'aspect déterministe des caractéristiques inhérentes aux trajectoires de strie (période, angle moyen et maximal de striation, etc.) en confrontant la théorie à l'expérience.

## IV.1. Généralités sur le toilage texturant

Nous allons dans cette partie définir et formaliser la texturation par toilage à travers l'utilisation combinée de bandes conventionnelles et de polissage. Nous appelons par la suite « toilage texturant » les configurations de toilage faisant intervenir cette combinaison de bandes.

### IV.1.1. Formalisation de la notion de toilage texturant

L'un des moyens les plus évidents pour générer et découpler les plateaux et vallées, est de configurer les étapes de finition de façon à préserver les vallées obtenues lors de l'ébauche (voir *III.2.1*). Nous avons naturellement cherché à exploiter le pouvoir de striation des bandes conventionnelles et le pouvoir écrêtant des structures de polissage. Suite à de multiples essais de mise au point, certaines configurations se sont révélées particulièrement pertinentes d'un point de vue textural. Celles-ci sont données en *Figure IV.1*.

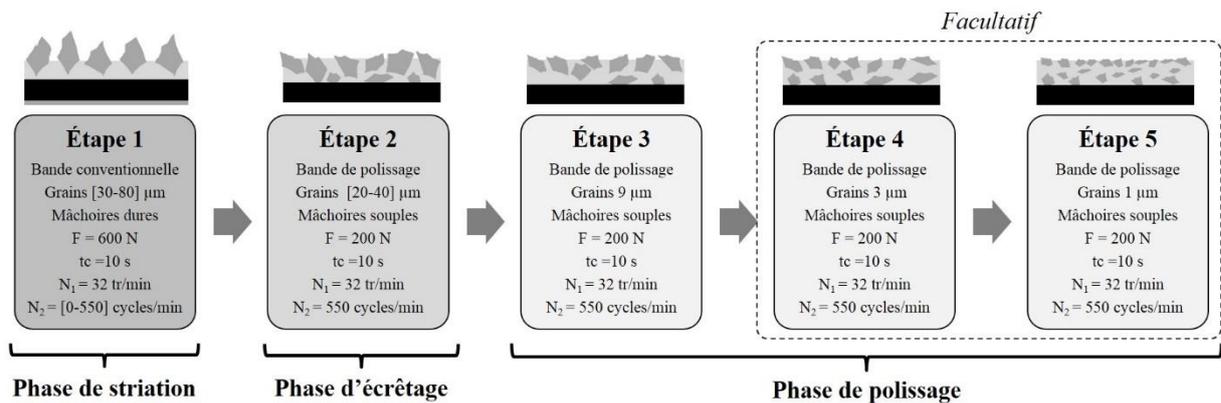


Figure IV.1 : Configurations types du toilage texturant

De manière synthétique, toutes ces configurations présentent trois phases bien distinctes. On distingue :

- une phase de striation qui est effectuée en une seule étape à l'aide de bandes conventionnelles de fortes granulométries (de 30 à 80 µm). Celle-ci est réalisée avec des mâchoires dures afin de garantir la forme de la pièce finale et à faible vitesse de rotation pour permettre une grande diversité d'angles de striation. Les vallées initiales étant préservées lors du toilage texturant (*Figure IV.2.3*), la phase de striation conditionne la majorité des caractéristiques des stries (densité, angle d'ouverture, angle de striation, profondeur). Suite à cette phase, les surfaces ont une densité de stries extrêmement importante (*Figure IV.2.1*) et la distribution des hauteurs est symétrique par rapport à la hauteur moyenne ;
- une phase d'écrêtage, également effectuée en une seule étape, est réalisée avec des bandes de polissage de fortes granulométries (de 20 à 40 µm). Elle est réalisée avec des mâchoires souples, sous faible charge et à grande vitesse d'oscillations. Les surfaces subissent un fort écrêtage lors

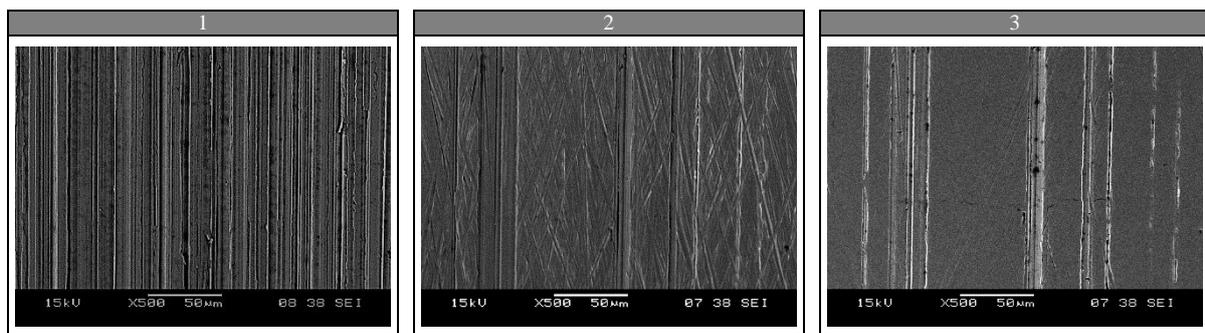
de cette phase (**Figure IV.2.2**). Les vallées initiales les moins profondes sont éliminées alors que les stries les plus profondes persistent. La distribution des hauteurs n'est plus symétrique par rapport à la hauteur moyenne, la morphologie de surface devient de type « plateaux/vallées ». La rugosité superficielle des plateaux demeure toutefois importante ;

- une phase de polissage qui est réalisée avec des bandes de polissage de très faibles granulométries. Contrairement aux phases précédentes, celle-ci peut être constituée de plusieurs étapes selon le niveau de rugosité des plateaux recherché. Dans les travaux qui suivent, nous avons réalisé cette phase en une seule étape avec une bande abrasive de granulométrie 9  $\mu\text{m}$ . Comme la phase précédente, la phase de polissage est effectuée avec des mâchoires souples, sous faible charge et haute vitesse d'oscillations. La surface finale présente alors les mêmes vallées que la phase précédente, mais les plateaux sont cette fois-ci nettement moins rugueux (**Figure IV.2.3**).

#### IV.1.2. Analyse des modifications texturales à chaque phase

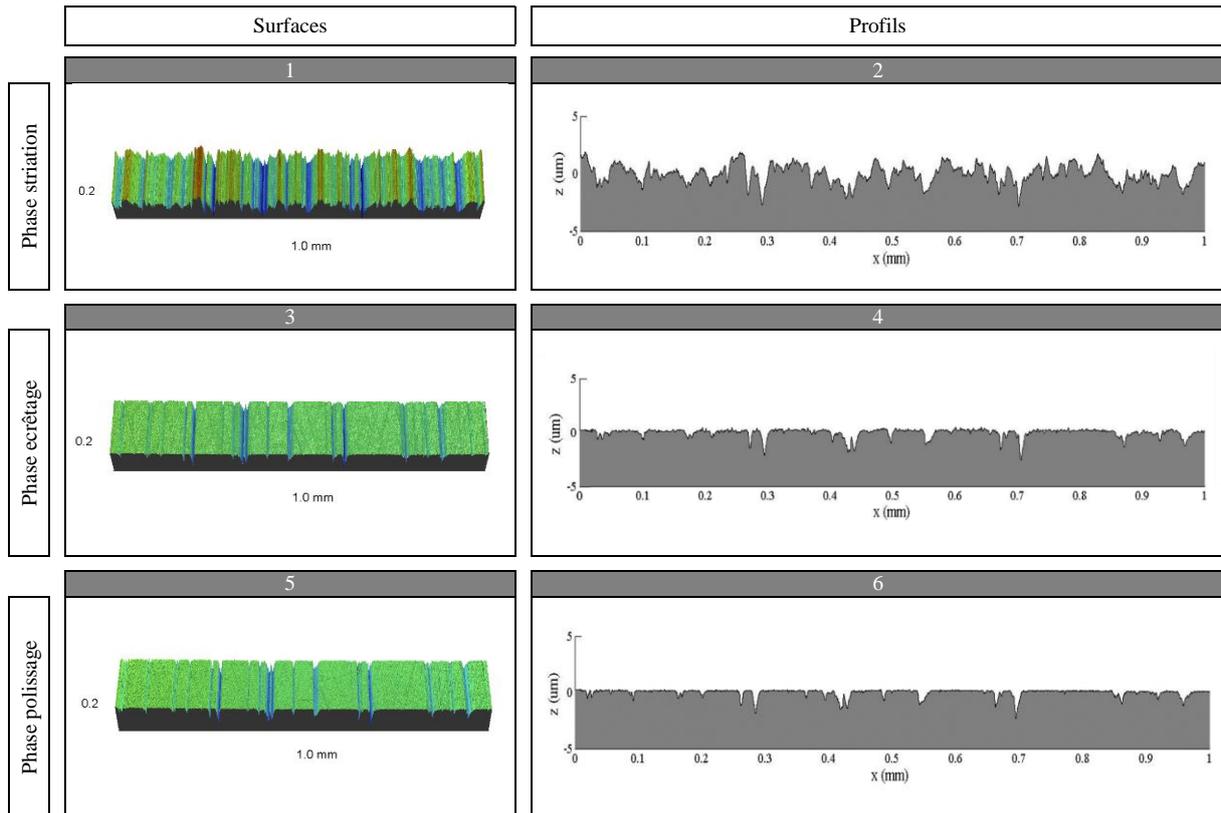
##### IV.1.2.a. Évolution de l'aspect général

Après une série d'essais préliminaires, l'observation des surfaces à chaque étape de fabrication montre, comme attendu, un dégroupage net entre plateaux et vallées. Les clichés MEB de la **Figure IV.2**, effectués sur une même zone de la surface, montrent que les vallées les plus profondes sont préservées tandis que les pics de rugosité sont littéralement effacés par les passes successives d'écrêtage et de polissage.



**Figure IV.2 : Clichés MEB des surfaces en toilage texturant, après la phase de striation (1), après la phase d'écrêtage (2), après la phase de polissage (3)**

L'analyse des profils en **Figure IV.3** permet par ailleurs de révéler la très bonne planéité des plateaux générés. De plus, l'enlèvement de matière de la passe de polissage est extrêmement faible, voire non mesurable avec les moyens utilisés ici. Ceci met en avant le caractère hautement superficiel de cette étape qui permet un polissage fin des plateaux sans jamais altérer en profondeur les motifs de la texture générée initialement.



**Figure IV.3 : Clichés interférométriques et profils des surfaces en toilage texturant, après la phase de striation (1) (2), après la phase d'écrêtage (3) (4), après la phase de polissage (5) (6)**

#### IV.1.2.b. Évolution des caractéristiques avancées

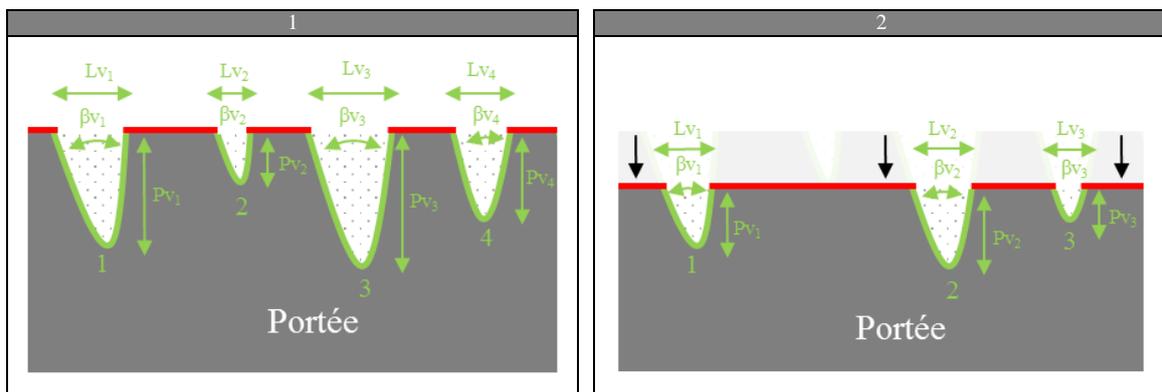
La nécessité de relier, à terme, la fonctionnalité des paliers aux caractéristiques texturales des surfaces nous amène naturellement à nous interroger en amont sur notre façon de caractériser les textures. Les critères ISO 13565 donnent une information globale de l'état de surface, tant sur l'aspect vertical (amplitude) par le biais du triplet  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$ , que sur l'aspect horizontal (espacement) par le biais du couple  $Mr1$  et  $Mr2$ . Pertinents, dans une première approche, on remarque cependant que ces paramètres et leurs combinaisons ne permettent pas de quantifier certaines données clés des textures « plateaux/vallées » (**Figure IV.4**). Or, la majorité des articles scientifiques traitant de la texturation spécifient très finement les espaces de rétention présents sur la surface (profondeur, largeur, longueur, densité ou nombre de cavités, volume, angle). Nous avons donc souhaité aller plus loin que les simples critères ISO 13565.

Afin d'avoir une vision plus complète des textures obtenues, nous avons développé une routine permettant de calculer plusieurs paramètres clés depuis des surfaces mesurées par interférométrie. Après correction de la forme et identification des vallées les plus significatives (i.e. dont la profondeur est supérieure à  $0,02 \mu\text{m}$ ), ladite routine permet l'évaluation de :

- la densité de vallées  $d_v$  qui quantifie le nombre de vallées par unité de longueur ;

- la densité rétention des vallées  $dr$  qui quantifie le volume de lubrifiant pouvant être piégé dans la rugosité de la surface par unité de surface ;
- la largeur  $L_v$  et la profondeur moyenne  $P_v$  des vallées ;
- l'angle d'ouverture des vallées  $\beta_v$ .

Au-delà de la simple quantification, il est possible, avec cette routine, de quantifier les paramètres  $dv$ ,  $dr$ ,  $L_v$ ,  $P_v$  et  $\beta_v$  en fonction d'une hauteur de coupe virtuelle (**Figure IV.4**) à la manière de la méthode utilisée pour la construction de la courbe de portance ISO 13565. Cet algorithme nous permet de simuler le processus d'enlèvement matière tout en nous renseignant sur l'évolution probable des paramètres texturaux ci-dessus abordés.



**Figure IV.4 : Évolution des caractéristiques en fonction de la hauteur de coupe virtuelle, profil initial (1), profil coupé (2)**

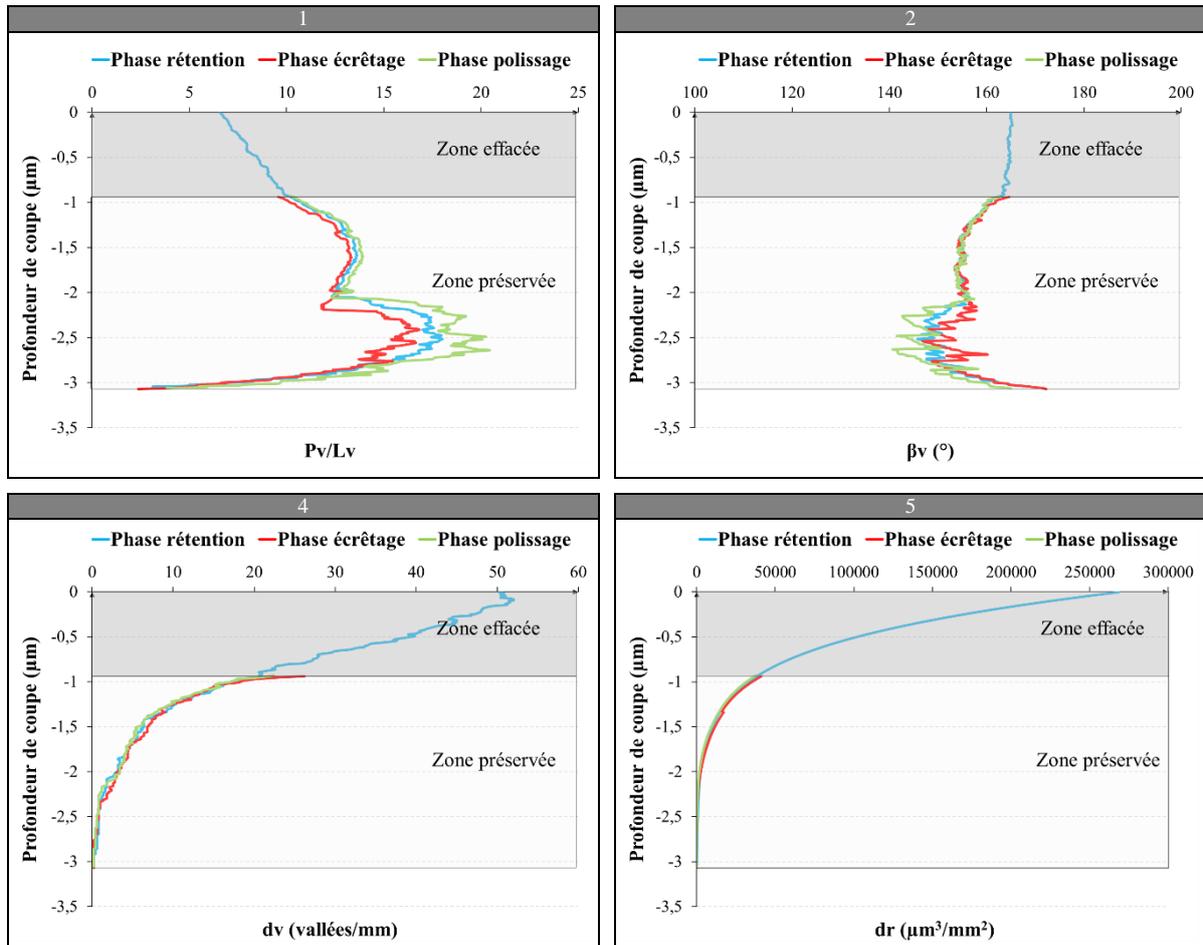
Ce programme a été appliqué avec succès sur une surface « plateaux/vallées » obtenue par toilage texturant. Après chaque passe, nous avons observé que les différents paramètres texturaux concordaient et évoluaient en se juxtaposant à partir d'une profondeur de coupe seuil (**Figure IV.5**). Cela traduit incontestablement la préservation des vallées initiales. Dans la pratique, la valeur de cette profondeur seuil est assimilable à l'enlèvement de matière engendré par la passe d'écritage. On peut ainsi distinguer deux zones :

- une zone « effacée », au-dessus de la profondeur seuil, dans laquelle seules les caractéristiques des textures issues de la phase de striation existent ;
- et une zone « préservée », en dessous de la profondeur seuil où les caractéristiques des textures issues des trois phases se superposent.

Autrement, ces différents graphes nous permettent de constater que :

- le rapport  $P_v/L_v$  croît légèrement avec la profondeur de coupe pour décroître subitement à l'approche de la profondeur maximale (**Figure IV.5.1**) ;
- l'angle d'ouverture, partant de  $165^\circ$ , décroît faiblement jusqu'à environ  $150^\circ$  puis croît subitement jusqu'à  $180^\circ$  à l'approche de la profondeur maximale (**Figure IV.5.2**) ;

- et enfin, que la densité de vallée et la densité de rétention décroissent selon une tendance similaire (*Figure IV.5.3* et *Figure IV.5.4*).



*Figure IV.5 : Évolution des caractéristiques texturales en fonction de la profondeur de coupe virtuelle, rapport  $P_v/L_v$  (1), angle d'ouverture (2), densité de vallées (3), densité de rétention (4)*

### IV.1.3. Conclusion

De manière synthétique, nous notons que le toilage texturant garantit à la fois la préservation des vallées et la planéité des plateaux. Par ailleurs, l'étude fine des surfaces générées suggère que la maîtrise de l'enlèvement de matière pourrait permettre de modifier la densité de vallée et la densité de rétention sans modifier radicalement le rapport profondeur/largeur  $P_v/L_v$  et l'angle d'ouverture  $\beta_v$ .

## IV.2. Étude statistique des capacités du procédé de toilage texturant

Nous avons réalisé une étude statistique afin d'étudier l'étendue des caractéristiques texturales possibles par le procédé de toilage texturant. Le plan d'essai a été effectué en faisant varier un nombre réduit de paramètres process. Les critères standards 2D ISO 13565, le rapport profondeur/largeur, l'angle d'ouverture, la densité de vallée et la densité de rétention ont été retenus pour caractériser les textures générées.

### IV.2.1. Définition du plan d'expérience et modélisation statistique

#### IV.2.1.a. Définition du plan d'expérience

Les variables prises en compte dans cette nouvelle étude ont été sélectionnées par empirisme et en considérant les résultats obtenus en **III.1.2**. Nous avons retenu :

- la granulométrie de la phase de striation  $G_s^*$ . Très influente dans notre première étude d'optimisation, on s'attend à ce qu'elle permette une modification conséquente des vallées (profondeur, angle d'ouverture et densité) ;
- la granulométrie de la phase d'écrêtage  $G_s^{**}$ . Du fait de son effet sur l'enlèvement de matière, il est attendu que celle-ci permette d'ajuster dans une certaine mesure les profondeurs et la densité des vallées ;
- la vitesse d'oscillations  $N_2^*$  de la phase de striation dont la sélection est indispensable du fait de la nécessité de maîtriser les angles de striation.

L'ensemble des facteurs simples et leurs niveaux sont donnés en **Table IV.1**. Comme en **III.1.1.a**, les exposants \* sont relatifs aux facteurs de la première passe (phase de striation) et les exposants \*\* aux facteurs de la seconde passe (phase d'écrêtage).

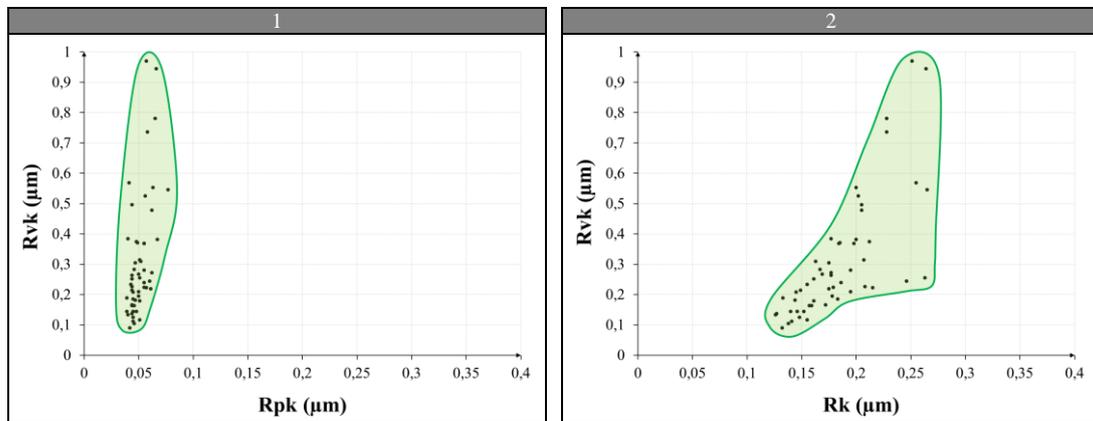
**Table IV.1 : Facteurs simples et niveaux associés de l'étude d'optimisation du toilage texturant**

Paramètres	Not.	Striation*	Écrêtage**	Polissage***
Granulométrie	$G_s$	30 / 40 / 80 $\mu\text{m}$	20 / 30 / 40 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$
Mâchoires	-	Enveloppantes dures	Enveloppantes souples	Enveloppantes souples
Vitesse des oscillations	$N_2$	0 / 225 / 550 cycles/min	550 cycles/min	
Force normale	$F$	600 N	200 N	
Bande abrasive	-	Conventionnelle	Polissage	
Temps de cycle	$t_c$		10 s	
Vitesse de rotation	$N_l$		32 tr/min	
Amplitude des oscillations	$A$		1 mm	
Avance de la bande	$A_v$		Complète	
Lubrification	-		Avec	
Pièce	-		Éprouvette de toilage	
État initial	-		État après rectification	
Rugosité initiale	-	$Ra = 0,292 \pm 0,030 \mu\text{m}$	$Rpk = 0,213 \pm 0,020 \mu\text{m}$ $Rk = 0,891 \pm 0,042 \mu\text{m}$	$Rvk = 0,659 \pm 0,052 \mu\text{m}$
Circularité initiale	-		$C = 2,104 \pm 0,120 \mu\text{m}$	

Le plan d'expérience réalisé ici est un plan complet. Chaque configuration process a été répétée deux fois afin d'assurer la robustesse des tendances observées. Au total, 54 portées ont été toilées.

#### IV.2.1.b. Distribution des paramètres standards $Rpk$ , $Rk$ et $Rvk$

La distribution des paramètres standards dans les plans  $Rvk/Rpk$  et  $Rvk/Rk$  permet d'apprécier de manière synthétique la diversité des rugosités obtenues et les caractéristiques réalisables en toilage texturant (**Figure IV.6**). On note en particulier l'indépendance des amplitudes de pics  $Rpk$  qui demeurent comprises entre  $0,04 \mu\text{m}$  et  $0,07 \mu\text{m}$ . L'amplitude du cœur des rugosités  $Rk$  croît, quant à elle, légèrement avec les profondeurs de vallées  $Rvk$  mais reste contenue entre  $0,13$  et  $0,26 \mu\text{m}$ . L'étendue des  $Rvk$  est particulièrement remarquable, la valeur maximale est ainsi 10 fois supérieure à la valeur minimale.



**Figure IV.6 : Distribution des paramètres standards, dans le plans  $Rvk/Rpk$  (1), dans le plan  $Rvk/Rk$  (2)**

#### IV.2.1.c. Modélisation statistique du lien entre les facteurs et les réponses

La modélisation statistique du lien entre les facteurs et les réponses a été effectuée suivant la même procédure qu'en **III.1.1.c**. Elle nous a permis de quantifier les réponses prédites dans l'ensemble du domaine d'étude. La **Figure IV.7** présente l'adéquation des différents modèles au sens des critères statistiques  $R^2$  et  $Q^2$ . Excepté le modèle propre à la réponse  $Rpk$ , tous les modèles présentent une bonne voire une très bonne adéquation avec les mesures expérimentales.

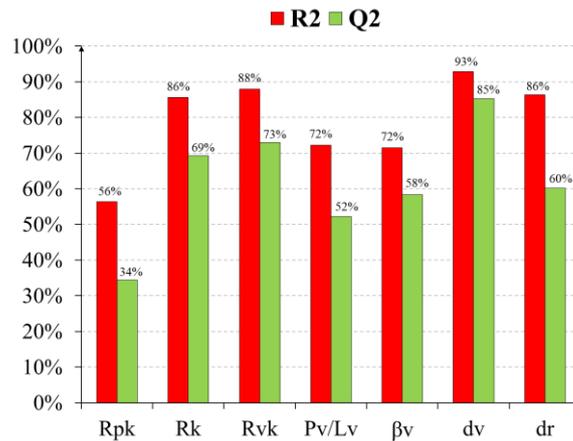


Figure IV.7 : Adéquation des différents modèles statistiques en toilage texturant

#### IV.2.2. Évolution des paramètres standards $Rpk$ , $Rk$ et $Rvk$

L'évolution des  $Rpk$ ,  $Rk$  et  $Rvk$  prédits nous informe de plusieurs éléments (**Figure IV.8**). On observe premièrement que l'augmentation de la vitesse d'oscillations  $N_2^*$  de la phase de striation engendre une diminution globale de l'amplitude des trois paramètres. Cet effet est particulièrement visible sur la profondeur  $Rvk$  des vallées qui peut être réduite, dans certains cas, de moitié. Cette observation est la conséquence indirecte de la diminution de l'amplitude des rugosités en présence d'oscillations (voir **III.2.2.**). On observe deuxièmement que la granulométrie de la phase de striation  $G_s^*$  permet d'ajuster avec efficacité la valeur des  $Rvk$ . Le passage d'une bande 30 à 80  $\mu\text{m}$  permettra ainsi de multiplier par deux ou trois les  $Rvk$  de la texture finale, ce qui confirme là encore le caractère conservatif des bandes de polissage. Elle engendre toutefois une légère augmentation de la rugosité des plateaux, principalement des  $Rk$ . La granulométrie de la phase d'écîtage  $G_s^{**}$  est par contre beaucoup moins influente. Le passage d'une granulométrie de 20 à 40  $\mu\text{m}$  modifiera en moyenne d'environ 0,05  $\mu\text{m}$  la valeur des  $Rvk$  et  $Rk$ .

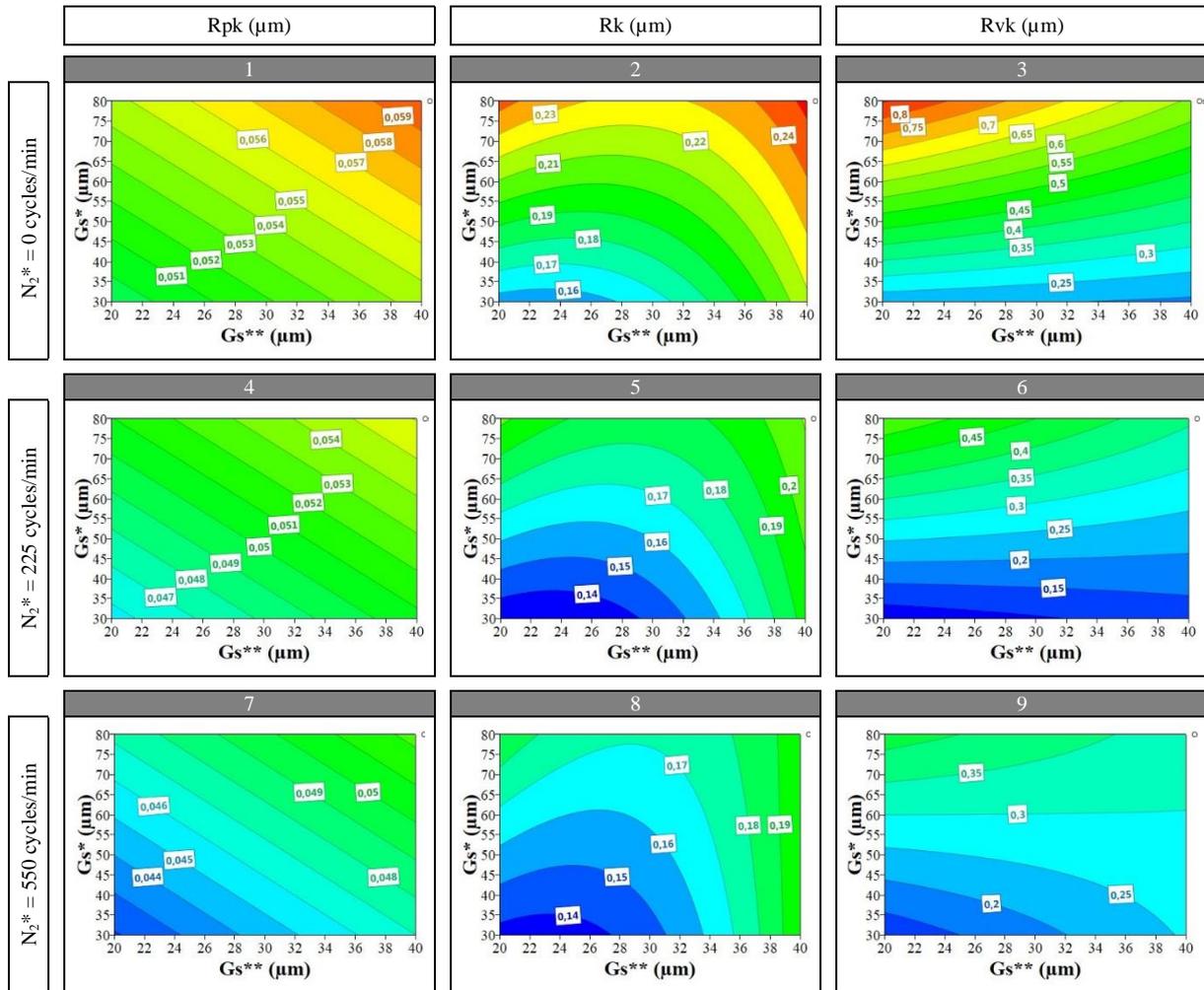


Figure IV.8 : Effets des trois variables sur les paramètres standards  $R_{pk}$ ,  $R_k$  et  $R_{vk}$

### IV.2.3. Évolution des caractéristiques texturales avancées

#### IV.2.3.a. Évolution du rapport profondeur/largeur $P_v/L_v$ et de l'angle d'ouverture $\beta_v$ des vallées

De manière tout à fait générale et en parfaite logique avec les résultats de la **Figure IV.5**, on constate que la modification des trois variables n'a qu'un effet mineur sur le rapport profondeur/largeur et sur l'angle d'ouverture des vallées (**Figure IV.9**). Toutefois, on peut observer de très légères tendances. Le rapport profondeur/largeur  $P_v/L_v$  croît avec  $G_s^*$  et diminue quand  $G_s^{**}$  et  $N_2^*$  augmentent, tandis que l'angle d'ouverture  $\beta_v$  décroît très légèrement avec la  $G_s^*$  et augmente avec  $G_s^{**}$  et  $N_2^*$ .

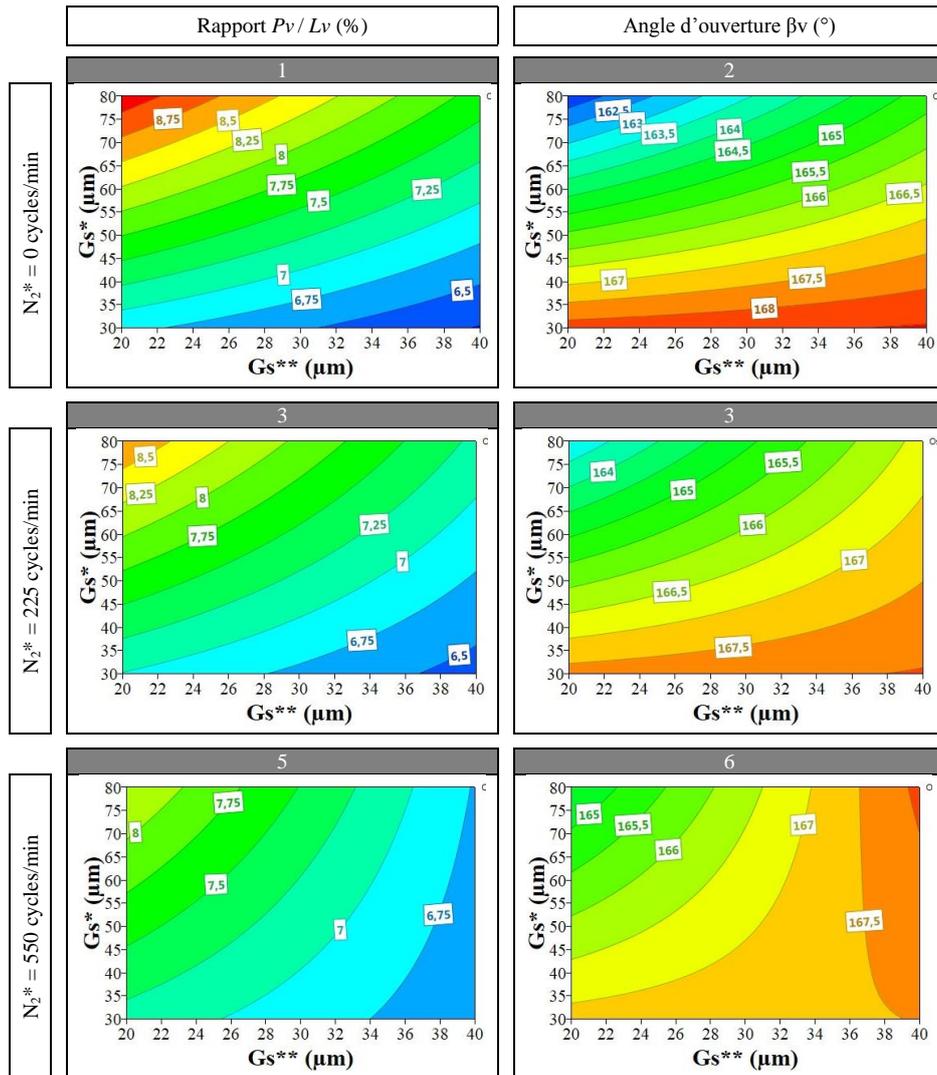


Figure IV.9 : Effets des trois variables sur le rapport profondeur/largeur  $Pv/Lv$  et l'angle d'ouverture  $\beta$

IV.2.3.b. Évolution de la densité des vallées  $dv$  et de la densité de rétention  $dr$

À l'opposé, on distingue des tendances significatives sur la densité des vallées et la densité de rétention (Figure IV.10). Lorsque la phase de striation est effectuée sans oscillation, une augmentation de  $G_s^*$  peut multiplier par trois le nombre de vallées et par dix la densité de rétention de la texture finale. En présence d'oscillations et excepté pour les fortes granulométries  $G_s^{**}$  (ou une génération de stries significatives semble s'opérer lors de la phase d'écîtage), la densité de vallée  $dv$  est peu ou prou inchangée alors que la densité de rétention chute brusquement. À 550 cycles/min, la densité de rétention  $dr$  atteignable est ainsi jusqu'à 20 fois moins élevée que la densité maximale observée sans oscillation. Les vallées sont alors égales en nombre mais ont un volume de rétention moins élevé. Des essais menés en parallèle ont d'ailleurs montré que l'ajout de passes supplémentaires d'écîtage et de polissage pouvaient permettre l'obtention d'une surface poli miroir, sans aucun espace de rétention et avec une rugosité plateaux extrêmement basse ( $Ra < 0,015 \mu m$ ).

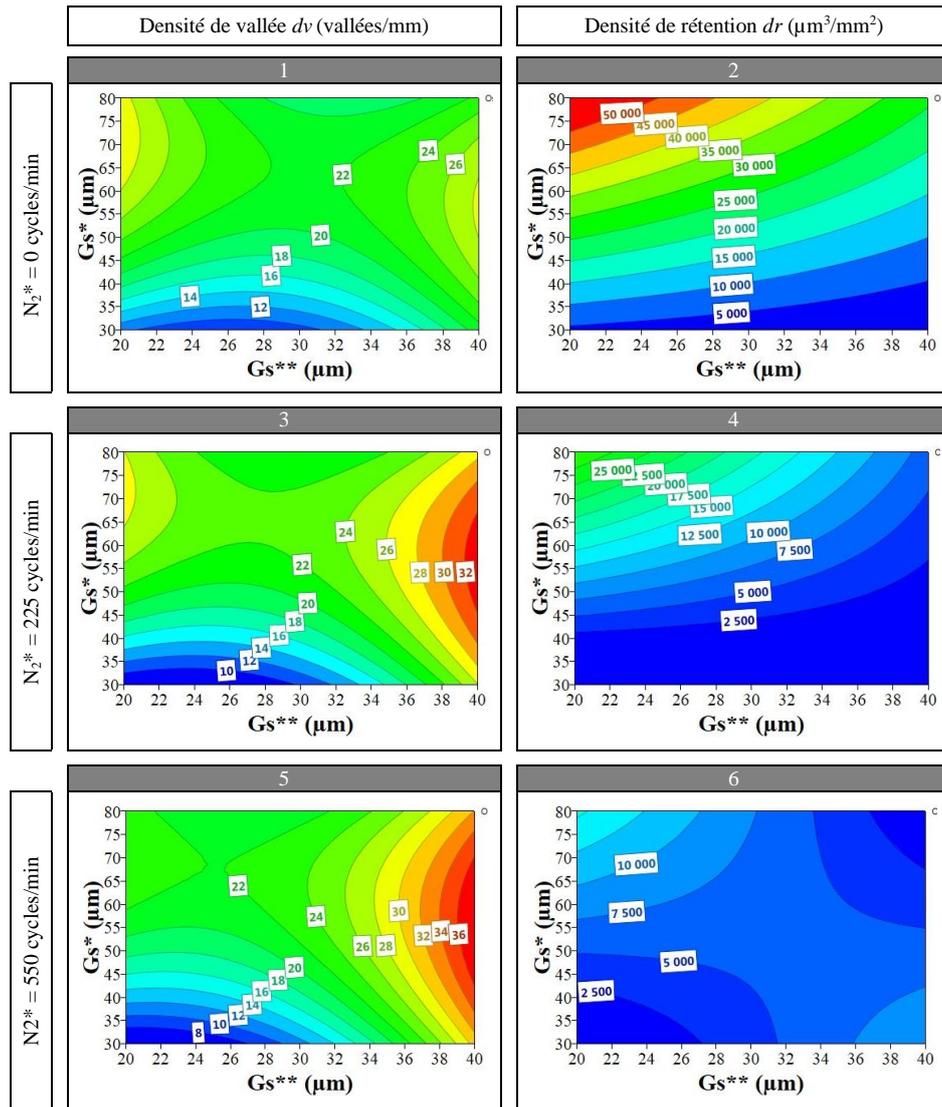


Figure IV.10 : Effets des trois variables sur la densité de vallées  $dv$  et la densité de rétention  $dr$

#### IV.2.4. Comparaison avec les textures conventionnelles

Il est intéressant de comparer les surfaces obtenues par toilage texturant avec les surfaces obtenues par toilage conventionnel en combinant les résultats ci-dessus avec ceux issus de notre étude en III.1.1. La Figure IV.11 révèle toute l'étendue de la diversité texturale offerte par le toilage texturant. Pourtant réalisées par modification de seulement trois variables sur seulement cinquante-quatre essais, les distributions des mesures en toilage texturant occupent un espace beaucoup plus important que les mesures effectuées en toilage conventionnel, alors que celles-ci sont issues de la modification de dix variables et de 140 essais. Le toilage texturant permet également de multiplier jusqu'à dix fois les  $Rvk$  tout en permettant de maintenir constants les  $Rpk$  et de contenir les  $Rk$  dans des valeurs plus faibles qu'en toilage conventionnel.

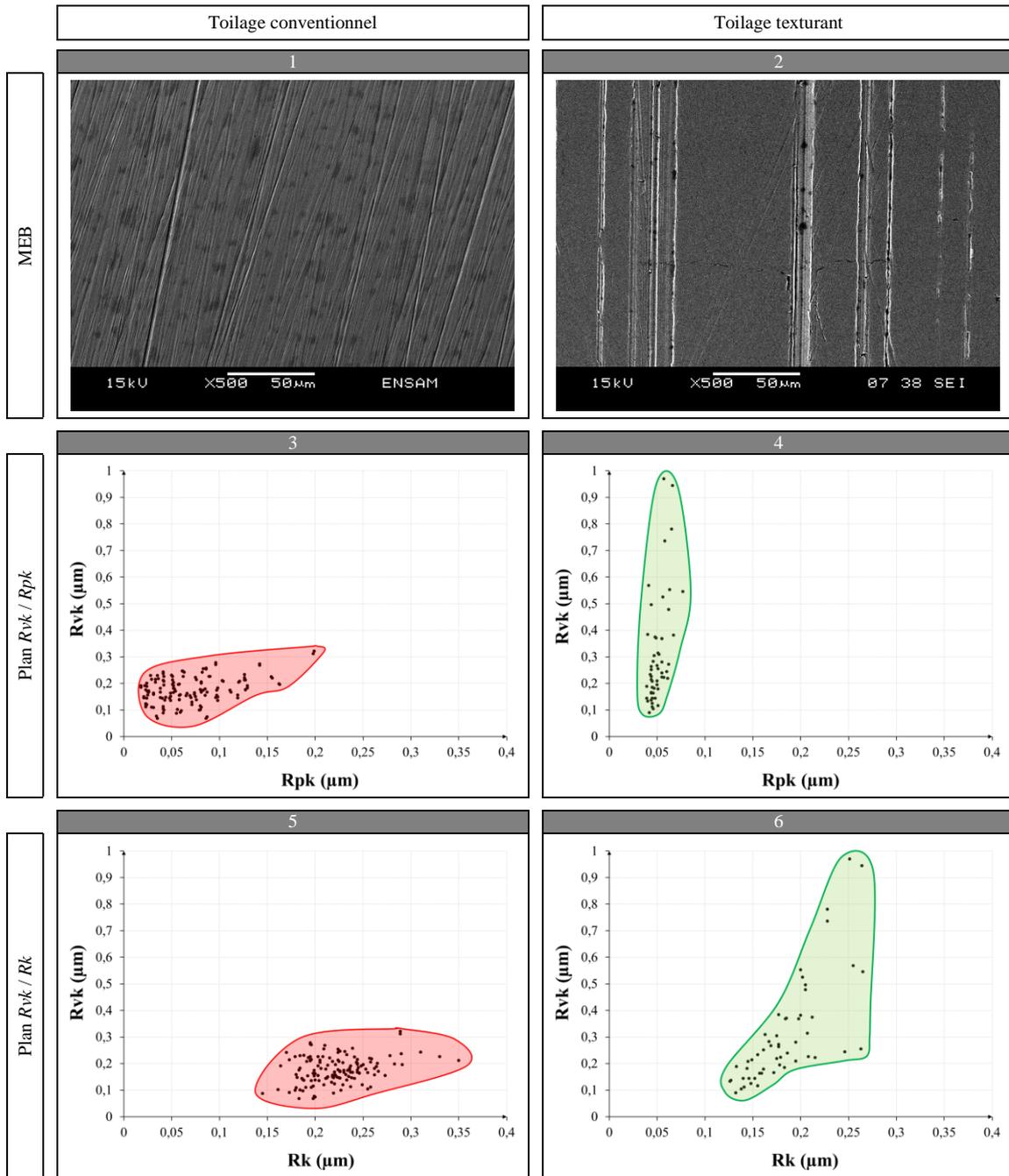


Figure IV.11 : Comparaison de la capacité texturale du toilage conventionnel et du toilage texturant

#### IV.2.5. Conclusion

Comme nous pouvons le constater, le toilage texturant permet un degré de maîtrise texturale accru. Nous avons vu que la densité de vallées et la densité de rétention pouvaient être ajustées précisément par la modification de seulement trois variables : la granulométrie, la vitesse d'oscillation en phase de striation et la granulométrie en phase d'écrêtage. L'analyse comparative avec les textures conventionnelles a permis de mettre en avant toute l'étendue de la diversité texturale atteignable en toilage texturant. Selon

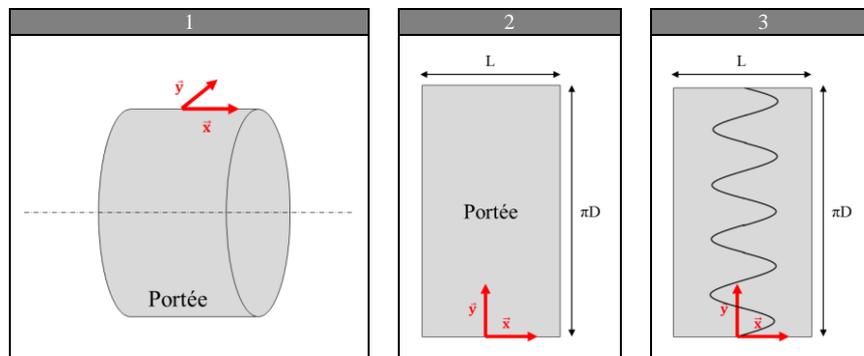
les configurations, nous avons observé qu'il était même possible d'obtenir des textures s'apparentant à des polis miroir.

### IV.3. Étude théorique et expérimentale de la cinématique d'impression texturale

Que ce soit pour chercher une uniformité process ou pour étudier ultérieurement l'influence fonctionnelle des angles de striation, la notion de toilage texturant nécessite également implicitement de maîtriser la trajectoire des stries. Dans la pratique, celles-ci sont imprimées lors de la phase de striation et dépendent des paramètres cinématiques choisis. En parallèle de l'étude précédente, nous avons modélisé ces trajectoires afin de montrer l'aspect déterministe des caractéristiques sous-jacentes et affiner ainsi, notre maîtrise des textures obtenues.

#### IV.3.1. Équations de trajectoire

La strie générée par un unique grain est l'union de toutes ses positions. De manière pratique, celles-ci peuvent être exprimées par ses coordonnées  $(x, y)$  dans le plan de la surface développée. Ces coordonnées sont exprimées d'une part suivant l'axe  $\vec{x}$  parallèle au vecteur vitesse induit par le mouvement d'oscillation de la bande et d'autre part suivant l'axe  $\vec{y}$  parallèle au vecteur vitesse induit par le mouvement de rotation de la portée. Nous définissons alors le repère  $R (O ; \vec{x} ; \vec{y})$  tel représenté en **Figure IV.12.3**.



**Figure IV.12 : Plan de la surface développée et repère associé, portée réelle (1), portée développée, trajectoire sinusoïdale du mouvement grain/pièce lors d'une unique révolution**

Si on considère la cylindricité de la portée et que le mouvement d'oscillations est sinusoïdal, la position d'un grain s'exprime analytiquement en fonction du temps  $tc$  par les équations paramétriques (21) et (22).

$$Xs(tc) = A \sin(\omega_2 tc) \quad (21)$$

$$Ys(tc) = R_1 \omega_1 tc - [n] \pi D_1 \quad (22)$$

Avec  $A$  et  $\omega_2$  l'amplitude et la vitesse des oscillations,  $R_1$  et  $\omega_1$  le rayon la vitesse de rotation de la portée,  $[n]$  la partie entière du nombre de révolutions  $n$  effectuées après un temps  $t_c$  de toilage et enfin  $X_s$  et  $Y_s$  les coordonnées de chaque point de la strie dans le repère de la surface développée.

### IV.3.2. Caractéristiques associées à la trajectoire d'un grain

Il est possible de quantifier la majorité des caractéristiques générales de la striation depuis les équations précédentes. Sa période  $T_s$  selon l'axe  $y$  est ainsi définie par l'équation (23).

$$T_s = \frac{2 \pi R_1 \omega_1}{\omega_2} \quad (23)$$

Nous pouvons également déterminer l'équation des tangentes aux stries  $Y_t$  ainsi que l'angle  $\alpha_t$  qu'elles forment par rapport à la direction de glissement à chaque instant  $t_c$  avec les équations (24) et (25).

$$Y_t(t_c) = \frac{R_1 \omega_1 (X - A \sin(\omega_2 t_c))}{A \omega_2 \cos(\omega_2 t_c)} + R_1 \omega_1 t_c \quad (24)$$

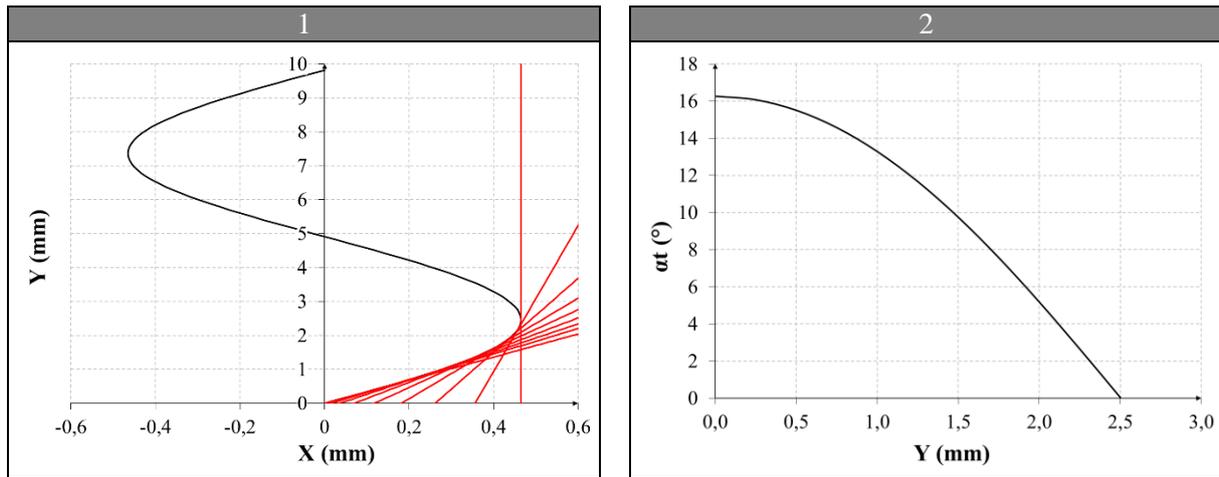
$$\alpha_t(t_c) = \frac{\pi}{2} - \text{Arctan}\left(\frac{R_1 \omega_1}{A \omega_2 \cos(\omega_2 t_c)}\right) \quad (25)$$

Sachant que  $Y_s = R \omega_1 t_c$ , nous pouvons exprimer ces équations en fonction de l'ordonnée  $Y_s$  du point courant sur la strie en effectuant un simple changement de variable. Les deux équations deviennent alors :

$$Y_t(Y_s) = \frac{R_1 \omega_1 \left(X - A \sin\left(\frac{\omega_2 Y_s}{R_1 \omega_1}\right)\right)}{A \omega_2 \cos\left(\frac{\omega_2 Y_s}{R_1 \omega_1}\right)} + Y_s \quad (26)$$

$$\alpha_t(Y_s) = \frac{\pi}{2} - \text{Arctan}\left(\frac{R_1 \omega_1}{A \omega_2 \cos\left(\frac{\omega_2 Y_s}{R_1 \omega_1}\right)}\right) \quad (27)$$

Un exemple d'application de ces équations est donné en **Figure IV.13**.



**Figure IV.13 : Strie générée par un grain pour  $N_1 = 32\text{tr/min}$  et  $N_2 = 550\text{ cycles/min}$ , tangentes (1) et angles de striation (2) sur un quart de la période**

La valeur maximale de  $\alpha_t$ , appelée  $\alpha_{t_{max}}$ , est atteinte lorsque la fonction cosinus du dénominateur atteint la valeur 1. La valeur de  $\alpha_{t_{max}}$  est alors donnée par l'équation (28). En outre et de manière triviale, l'ensemble de la diversité angulaire absolue est atteinte après le parcours du quart de la période. Ainsi, il est possible de quantifier l'angle moyen absolu  $\alpha_{t_{moy}}$  en utilisant l'expression intégrale de la moyenne de  $\alpha_t$  entre les bornes réduites 0 et  $T/4$ . La valeur de  $\alpha_{t_{moy}}$  est alors donnée par l'équation (29).

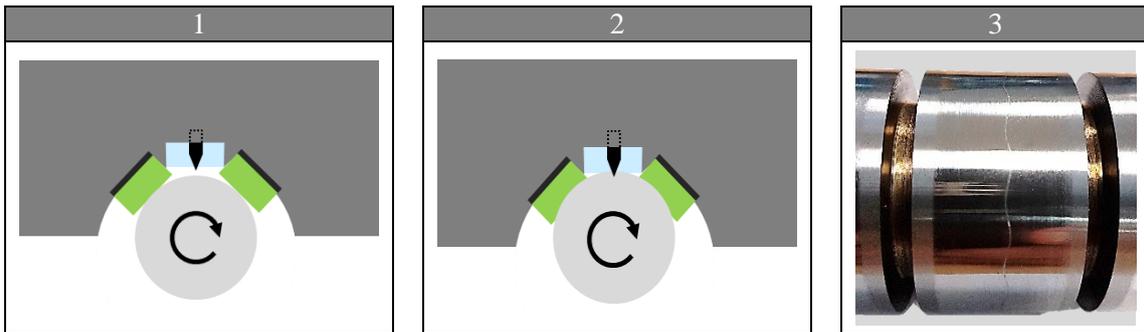
$$\alpha_{t_{max}} = \frac{\pi}{2} - \text{Arctan}\left(\frac{R_1 \omega_1}{A \omega_2}\right) \quad (28)$$

$$\alpha_{t_{moy}} = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} \alpha_t(Y_s) dY_s \quad (29)$$

### IV.3.3. Validation expérimentale

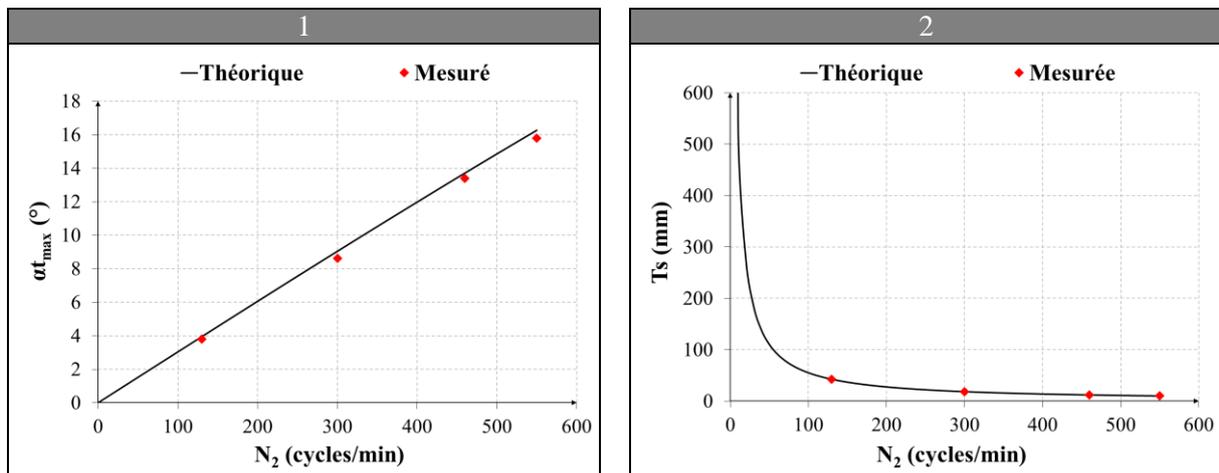
#### IV.3.3.a. Cas d'une strie unique

Nous avons cherché à quantifier le degré d'adéquation de ces équations théoriques avec la réalité expérimentale. Nous avons à ce titre conçu une mâchoire spéciale afin d'isoler une strie unique et faciliter la lecture des caractéristiques relatives à la striation en toilage. Celle-ci est constituée d'une pointe en acier rapide supérieure et de deux inserts d'approche très souples surélevés (**Figure IV.14.1**). Lors du serrage de la mâchoire sur la pièce en rotation, les inserts viennent au contact de la surface, puis se déforment élastiquement (**Figure IV.14.2**). Après un seuil critique de déformation, la pointe vient à son tour au contact de la portée et génère par enlèvement de matière, une strie (**Figure IV.14.3**).



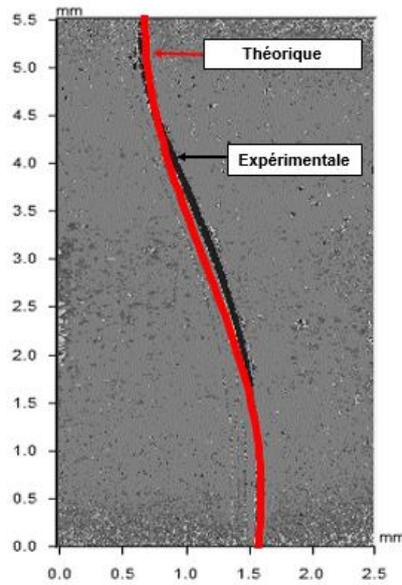
**Figure IV.14 : Mâchoire spéciale mono indent, phase approche (1), phase d'indentation (2), exemple de strie générée (3)**

Nous avons généré avec cette mâchoire des stries pour différentes vitesses d'oscillations  $N_2$  et pour une vitesse de rotation  $N_1$  fixée à 32 tr/min. Nous avons mesuré la période des stries  $T_s$  à l'aide d'un mètre ruban et l'angle maximal  $\alpha_{t_{max}}$  par l'intermédiaire de mesures interférométriques. Les résultats sont donnés en **Figure IV.15**.



**Figure IV.15 : Adéquation entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées, angle de striation maximal  $\alpha_{t_{max}}$  (1), période  $T$  (2)**

Après dépouillement, nous avons observé une très bonne adéquation entre les calculs théoriques et les valeurs mesurées. On constate toutefois un infime écart sur l'angle maximal  $\alpha_{t_{max}}$  de striation. Celui-ci est la preuve indirecte que la consigne d'oscillation n'est pas parfaitement sinusoïdale. Ce constat est encore plus évident si l'on superpose directement les trajectoires théoriques et expérimentales (**Figure IV.16**).



**Figure IV.16 : Superposition des trajectoires théoriques et expérimentales**

#### IV.3.3.b. Cas de stries multiples

Les équations théoriques énoncées plus haut sont, comme nous venons de le voir, hautement prédictives dans le cas d'une strie unique. Bien évidemment, la comparaison avec des surfaces toilées est plus complexe. Du fait du grand nombre de grains en contact (donc du grand nombre de stries) et des multiples révolutions effectuées, les stries générées en toilage finissent toujours par se recouvrir et se superposer, ce qui rend délicate la lecture des caractéristiques propres aux trajectoires. Dans la pratique, la période  $T_s$  et l'angle maximal  $\alpha_{max}$  ne sont pas ou très difficilement quantifiables, et l'un des rares paramètres pouvant être encore évalué est l'angle moyen  $\alpha_{moy}$ , mais ce n'est pas une tâche aisée. Plusieurs méthodes existent cependant pour l'évaluer. En rodage, dont la problématique est très similaire au cas du toilage, les méthodes basées sur la densité spectrale de puissance ou sur la transformée de Radon sont souvent utilisées [129]. Nous avons appliqué cette dernière méthode dans notre cas.

Cette transformée nous permet de convertir une image interférométrique 3D en une série de projections 1D par balayage angulaire. Chaque projection, à un angle donné  $\alpha$ , est obtenue comme la somme des hauteurs de rugosité sur toutes les lignes parallèles. La distance de ces lignes par rapport à l'origine de l'image est alors habituellement notée  $\rho$ . Sans rentrer davantage dans le détail, cette méthode a pour effet de transformer une ligne en un point dans le domaine dit de Radon, constitué en ordonnée de l'angle  $\alpha$  et en abscisse de la distance  $\rho$  (Figure IV.17.1 et Figure IV.17.2). En sommant la valeur des points pour chaque angle  $\alpha$  du sinogramme de Radon, il est alors possible de tracer la distribution angulaire générale des stries de l'image interférométrique initiale, ce résultat est souvent appelé rose d'anisotropie (Figure IV.17.3). La moyenne est ensuite facilement accessible. Différents exemples de résultats sont donnés en Figure IV.17.

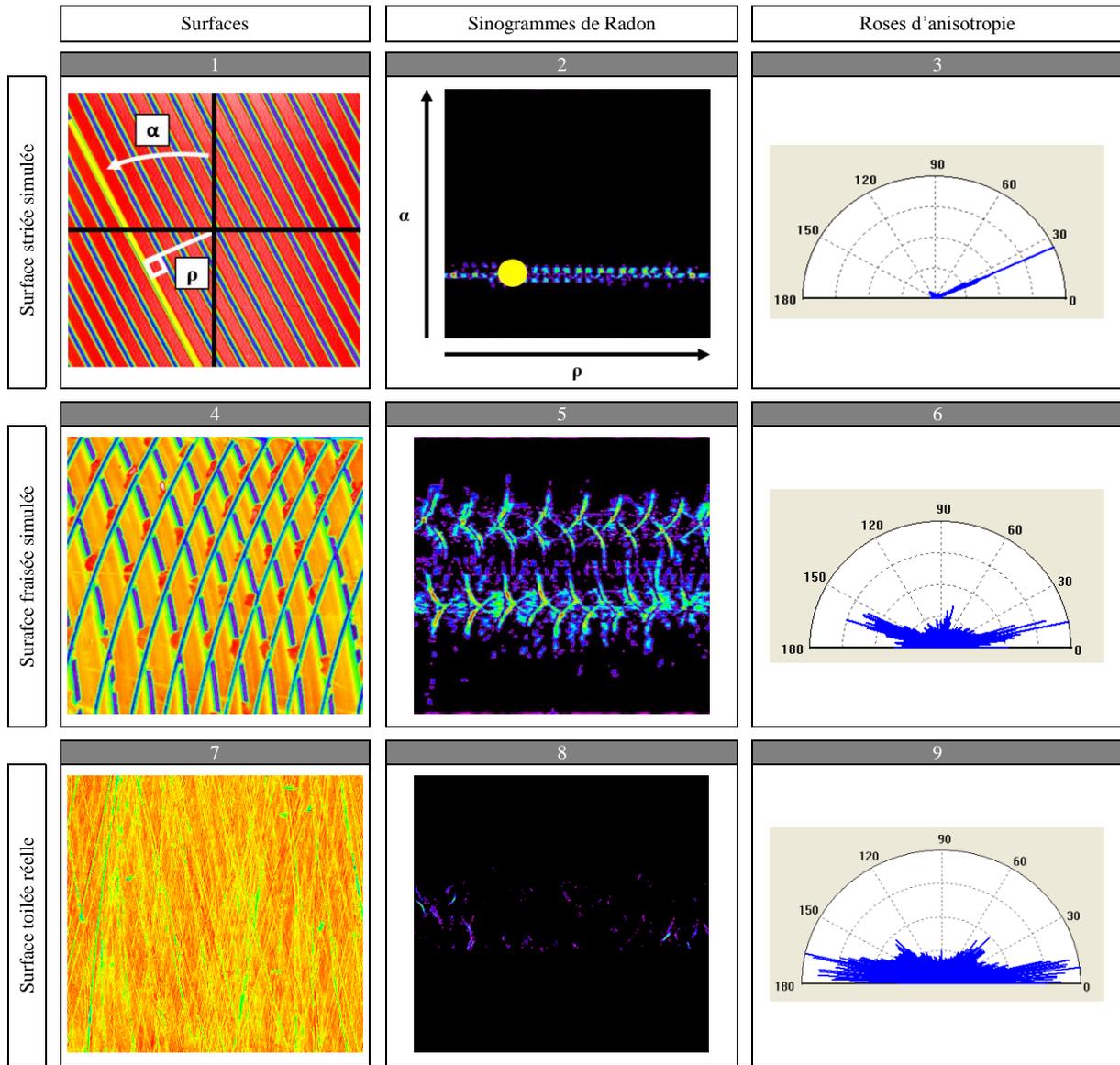


Figure IV.17 : Détermination de la distribution angulaire des stries par la transformée de Radon

L'application de cette méthode nous a permis de vérifier la bonne adéquation des angles moyens théoriques avec les angles moyens réels (*Figure IV.18*), ceux-ci ayant été quantifiés pour chaque configuration sur un lot de cinq images interférométriques. Les écarts types, relativement grands reflètent le fait que la taille des images interférométriques est trop petite pour piéger en une fois la diversité angulaire de la striation. Rajoutons ici qu'il était impossible avec nos moyens de réaliser une image assez grande pour remplir cette condition (cela aurait en effet nécessité de pouvoir réaliser une mesure sur un quart de la période de la striation, soit environ 10 mm dans le cas le plus défavorable).

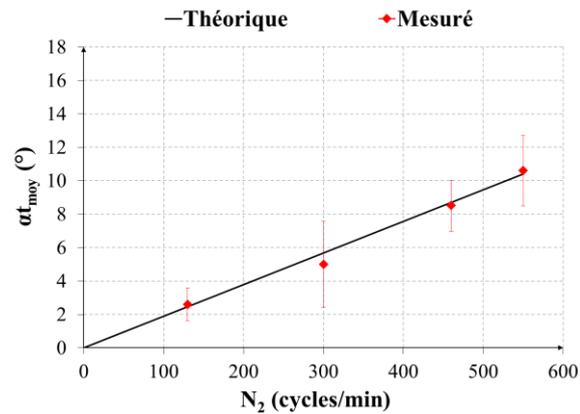


Figure IV.18 : Adéquation entre la valeur théorique et la valeur mesurée de l'angle moyen  $\alpha_{t\ moy}$  pour  $N_1=32$  tr/min en fonction de  $N_2$

#### IV.3.4. Conclusion

Cette étude montre que l'anisotropie des portées toilées est à la fois prévisible et mesurable. Elle est quasiment déterministe dans le cas d'un contact mono-grain (contact simplifié), et peut être approchée dans le cas d'un contact multigrain (cas réel) par quantification, via l'application de la transformée de Radon, de l'angle moyen  $\alpha_{t\ moy}$  de striation. Ceci démontre la robustesse anisotropique du procédé de toilage.

## Conclusion

Ce chapitre a montré le potentiel texturant du toilage. Après des campagnes d'essais exploratoires, il s'est avéré que les bandes de polissage étaient particulièrement bien adaptées et permettaient une maîtrise poussée des caractéristiques texturales. Sa combinaison avec les bandes conventionnelles au sein du cycle de toilage a permis la fabrication de textures de type « plateaux/vallées » inatteignables avec les configurations classiques. Par l'ajustement de seulement trois variables, ce véritable toilage texturant a permis de multiplier jusqu'à dix fois la profondeur des vallées et ce, sans altération des rugosités relatives aux plateaux. Pour des configurations bien définies, il a également été possible de générer des surfaces de type poli miroir. En parallèle, nous avons vu que l'angle de striation moyen  $\alpha_{t_{moy}}$  des surfaces toilées pouvait être totalement maîtrisé. Cette maîtrise poussée des surfaces toilées va nous permettre d'étudier expérimentalement l'influence des textures de surfaces sur les performances fonctionnelles des paliers de vilebrequin.

# **Chapitre V.**

## **Performances fonctionnelles « début de vie »**

## Introduction

Un certain nombre de choix stratégiques dédiés à la baisse des émissions de polluants ont engendré ou engendreront à terme une sévèrisation des conditions de fonctionnement des paliers de vilebrequin. Le downsizing, le système « Stop and Start » et l'arrivée des huiles basse viscosité font sans aucun doute partie des choix les plus impactants. L'application concrète de ces solutions technologiques élève indirectement le niveau d'exigence fonctionnelle. Dans ce contexte, les surfaces « plateaux/vallées », produites en toilage texturant (*Chapitre III* et *Chapitre IV*), ou les surfaces hybrides, produites par combinaison du toilage et du procédé laser, pourraient possiblement accroître la robustesse fonctionnelle des paliers.

Les essais fonctionnels réalisés dans ce chapitre répondent à un double objectif pour l'industriel. Ils permettent d'une part de déterminer une texture optimale (c'est-à-dire celle ayant le meilleur compromis entre fonctionnalité et faisabilité) et d'autre part, d'étudier la pertinence des spécifications d'état de surfaces actuelles. Nous définirons dans une première partie les textures testées, en détaillant à la fois leurs gammes de fabrication, leurs défauts de forme ainsi que leurs caractéristiques texturales. Nous étudierons ensuite, en seconde partie, la réponse fonctionnelle des textures toilées et hybrides en chargement statique sévère croissant par palier. Nous tracerons et analyserons en particulier les courbes de Stribeck, quantifierons la charge de grippage et chercherons, par analyse des coussinets et des portées usées, à comprendre les tendances observées. Enfin et dans une dernière partie, un lot de textures toilées, de morphologies identiques à celles de la seconde partie, seront passées pendant 30 heures sur un banc dynamique simulant la charge réelle appliquée par un moteur en fonctionnement nominal. Nous analyserons alors l'effet de la texturation par l'observation combinée du couple de frottement, de la température en dos de coussinet, de la résistance électrique puis de l'usure des coussinets et des portées.

## V.1. Définition et caractéristiques des textures testées

Les textures testées se décomposent en deux catégories :

- les textures toilées, intégralement fabriquées sur le banc de toilage du POLE PROCESS ECO<sup>2</sup>. Elles font l'objet d'essais en charge statique et dynamique.
- les textures hybrides, constituées d'une texture toilée fabriquée sur le banc de toilage du POLE PROCESS ECO<sup>2</sup> et d'un réseau de cavités hémisphériques fabriquées dans le laboratoire de la société TRUMPF.

### V.1.1. Textures toilées

En tout, cinq configurations texturales toilées ont été testées. On retrouve parmi elles deux textures « référence » striées morphologiquement proches. On retrouve ensuite une texture « poli miroir » et deux textures « plateaux/vallées », dont l'une est composée de vallées peu profondes et l'autre de vallées très profondes. La gamme de fabrication de ces textures a été extraite des résultats du *Chapitre III* et du *Chapitre IV*. Chaque texture toilée a été appliquée sur quatre portées afin d'accroître la robustesse des tendances observées.

#### V.1.1.a. Gamme de fabrication

La première texture de référence est fabriquée en trois étapes suivant une configuration usine. Celle-ci est rappelée en *Table V.1*. Cette gamme est directement issue des gammes de fabrication des vilebrequins dédiés aux moteurs DCI du groupe au moment de nos travaux de recherche. La deuxième texture de référence est fabriquée selon une configuration très similaire. En fait, seule la finition est modifiée. Une bande de polissage de 5 µm est alors utilisée en lieu et place de la bande conventionnelle 9 µm. Cette modification permet d'écarter très superficiellement les pics les plus hauts sans générer pour autant de plateaux.

**Table V.1 : Configuration process associée aux textures de référence**

Paramètres	Not.	Référence 1			Référence 2		
		Ébauche*	Demi-finition**	Finition***	Ébauche*	Demi-finition**	Finition***
Nombre de cycles	-	1	1	1	1	1	1
Granulométrie	$G_s$	40 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
Mâchoires	-	Env. dures	Env. souples		Env. dures	Env. souples	
Bande abrasive	-		Conventionnelle		Conventionnelle		Polissage
Force normale	$F$			600 N			
Avance de la bande	$A_v$			Complète			
Temps de cycle	$t_c$			10 s			
Vitesse de rotation	$N_1$			32 tr/min			
Vitesse des oscillations	$N_2$			550 cycles/min			
Amplitude des oscillations	$A$			1 mm			
Lubrification	-			Avec			
Pièce	-	Éprouvettes MAPS et MAPD					
État initial	-	État après toilage conventionnel ébauche 80 $\mu\text{m}$					
Rugosité initiale	-	$R_a = 0,660 \pm 0,019 \mu\text{m}$	$R_{pk} = 0,253 \pm 0,017 \mu\text{m}$	$R_k = 1,942 \pm 0,101 \mu\text{m}$	$R_{vk} = 1,380 \pm 0,145 \mu\text{m}$		
Circularité initiale	-	$C = 1,953 \pm 0,358 \mu\text{m}$					

La texture « poli miroir » est fabriquée à partir de configurations de toilage texturant en doublant les cycles d'écrêtage et de polissage (voir **Table V.2**). L'augmentation de l'enlèvement de matière permet alors d'éliminer les vallées les plus profondes. Afin d'assurer un fini d'exception, la phase de polissage a été effectuée en trois passes en utilisant des granulométries de plus en plus fines.

**Table V.2 : Configuration process associée à la texture « poli miroir »**

Paramètres	Not.	Poli miroir		
		Striation*	Écrêtage**	Polissage***
Nombre de cycles	-	1	2	2
Granulométrie	$G_s$	40 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	9, 3, 1 $\mu\text{m}$
Mâchoires	-	Enveloppantes dures	Enveloppantes souples	
Bande abrasive	-	Conventionnelle	Polissage	
Force normale	$F$	600 N	200 N	
Avance de la bande	$A_v$		Complète	
Temps de cycle	$t_c$		10 s	
Vitesse de rotation	$N_1$		32 tr/min	
Vitesse des oscillations	$N_2$		550 cycles/min	
Amplitude des oscillations	$A$		1 mm	
Lubrification	-		Avec	
Pièce	-	Éprouvettes MAPS et MAPD		
État initial	-	État après toilage conventionnel ébauche 80 $\mu\text{m}$		
Rugosité initiale	-	$R_a = 0,660 \pm 0,019 \mu\text{m}$	$R_{pk} = 0,253 \pm 0,017 \mu\text{m}$	$R_k = 1,942 \pm 0,101 \mu\text{m}$
Circularité initiale	-	$R_{vk} = 1,380 \pm 0,145 \mu\text{m}$ $C = 1,953 \pm 0,358 \mu\text{m}$		

Enfin, les deux textures « plateaux/vallées » sont issus directement des configurations discutées en **Chapitre IV**. On retrouve ainsi les trois phases de toilage texturant. L'ajustement de la profondeur des vallées est réalisé en modifiant la granulométrie de la phase de striation. Comme pour la gamme de fabrication de la texture « poli miroir », les textures « plateaux/vallées » sont réalisées avec une phase de polissage en trois passes. La différence avec celle-ci se fait principalement sur le nombre de cycle par passe.

**Table V.3 : Configuration process associée aux textures « plateaux/vallées »**

Paramètres	Not.	Plateaux vallées 1 (vallées peu profondes)			Plateaux vallées 2 (vallées très profondes)		
		Striation*	Écrêtage**	Polissage***	Striation*	Écrêtage**	Polissage***
Nombre de cycles	-	1	1	1	1	1	1
Granulométrie	$G_s$	40 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	9, 3, 1 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	9, 3, 1 $\mu\text{m}$
Mâchoires	-	Env. dures	Enveloppantes souples		Env. dures	Enveloppantes souples	
Bande abrasive	-	Conventionnelle	Polissage		Conventionnelle	Polissage	
Force normale	$F$	600 N	200 N		600 N	200 N	
Avance de la bande	$A_v$	Complète 10 s 32 tr/min 550 cycles/min 1 mm Avec					
Temps de cycle	$t_c$						
Vitesse de rotation	$N_1$						
Vitesse des oscillations	$N_2$						
Amplitude des oscillations	$A$						
Lubrification	-	Avec					
Pièce	-	Éprouvettes MAPS et MAPD					
État initial	-	État après toilage conventionnel ébauche 80 $\mu\text{m}$					
Rugosité initiale	-	$Ra = 0,660 \pm 0,019 \mu\text{m}$	$Rpk = 0,253 \pm 0,017 \mu\text{m}$	$Rk = 1,942 \pm 0,101 \mu\text{m}$	$Rvk = 1,380 \pm 0,145 \mu\text{m}$		
Circularité initiale	-	$C = 1,953 \pm 0,358 \mu\text{m}$					

### V.1.1.b. Écarts de forme

Notre investigation sur les effets fonctionnels de la texturation implique implicitement de maîtriser et de contenir les écarts de formes et les diamètres des portées. L'idéal étant, bien sûr, de les garder constants. La **Figure V.1** donne les variations des diamètres, de la circularité, de la rectitude et de la cylindricité des portées texturées par toilage et pour les deux types d'éprouvettes. Après observation, nous constatons que les écarts sont faibles sur les trois critères. Aucune tendance ne semble se dégager, ce qui confirme la non corrélation process entre l'état de surface et la forme, déjà abordée brièvement en **III.1.1**.

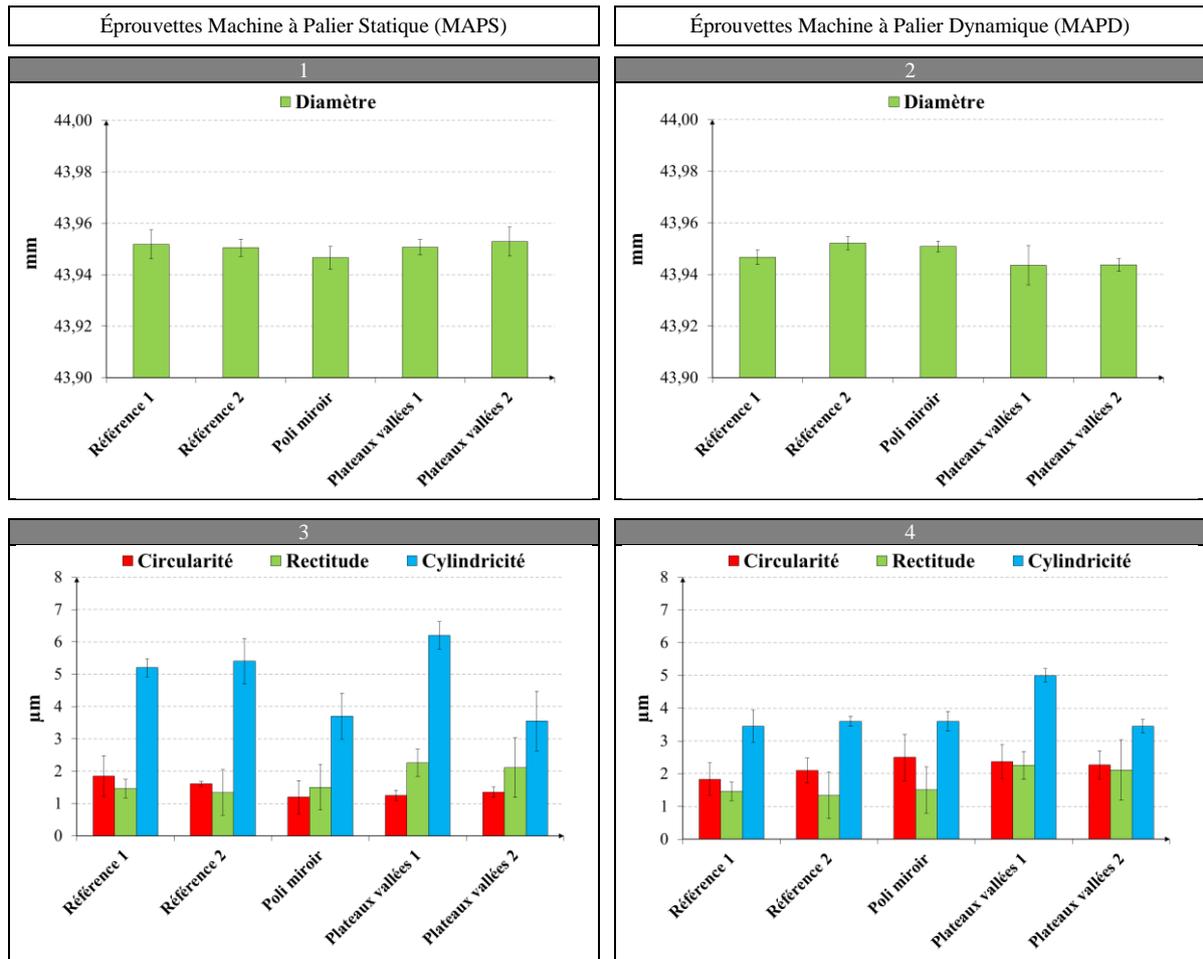


Figure V.1 : Écarts de forme des portées texturées toilées

V.1.1.c. Rugosités, caractéristiques texturales et aspects

La mesure des rugosités est bien entendu centrale dans cette étude. La distribution des paramètres ISO 13565 dans les plan  $Rvk/Rpk$  et  $Rvk/Rk$  est donnée en **Figure V.2**. On remarque que les mesures associées aux différentes textures sont bien distinguables, en particulier dans le plan  $Rvk/Rk$ .

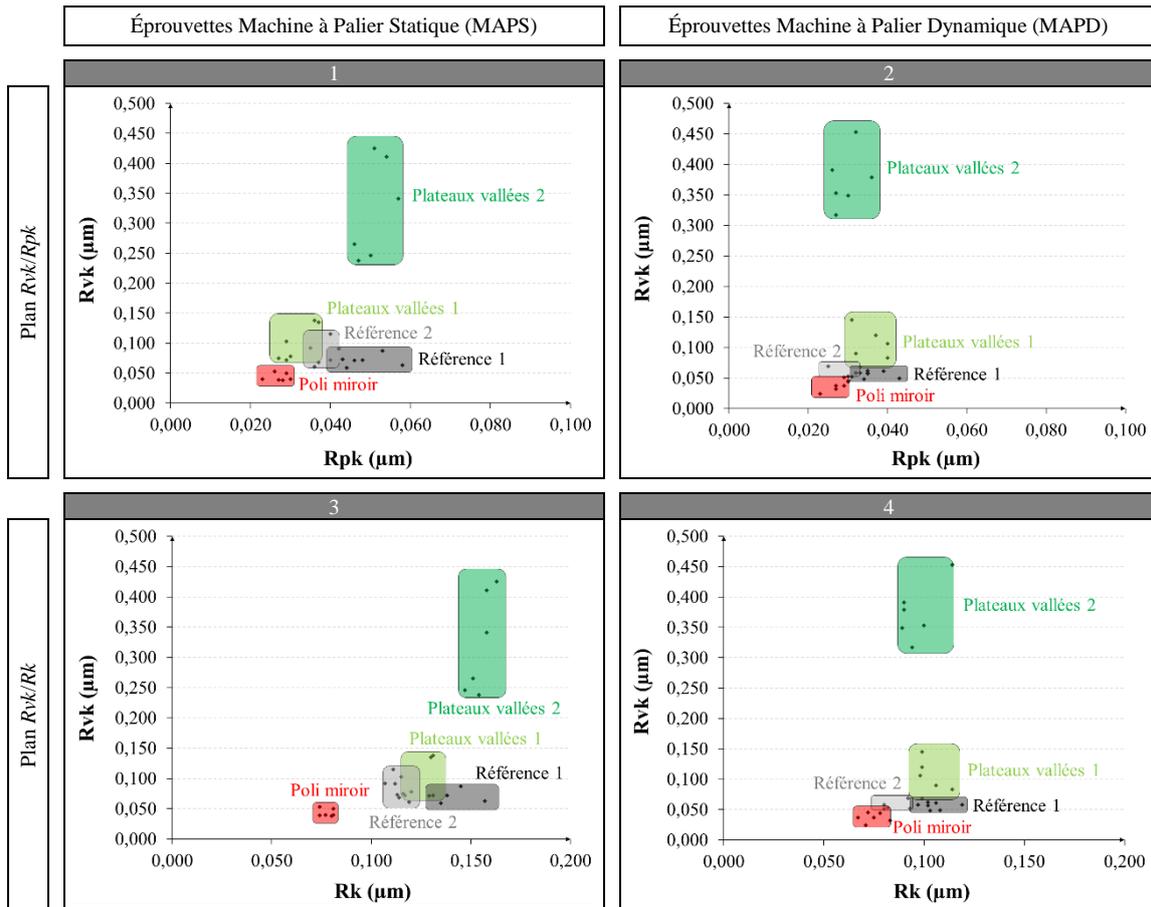
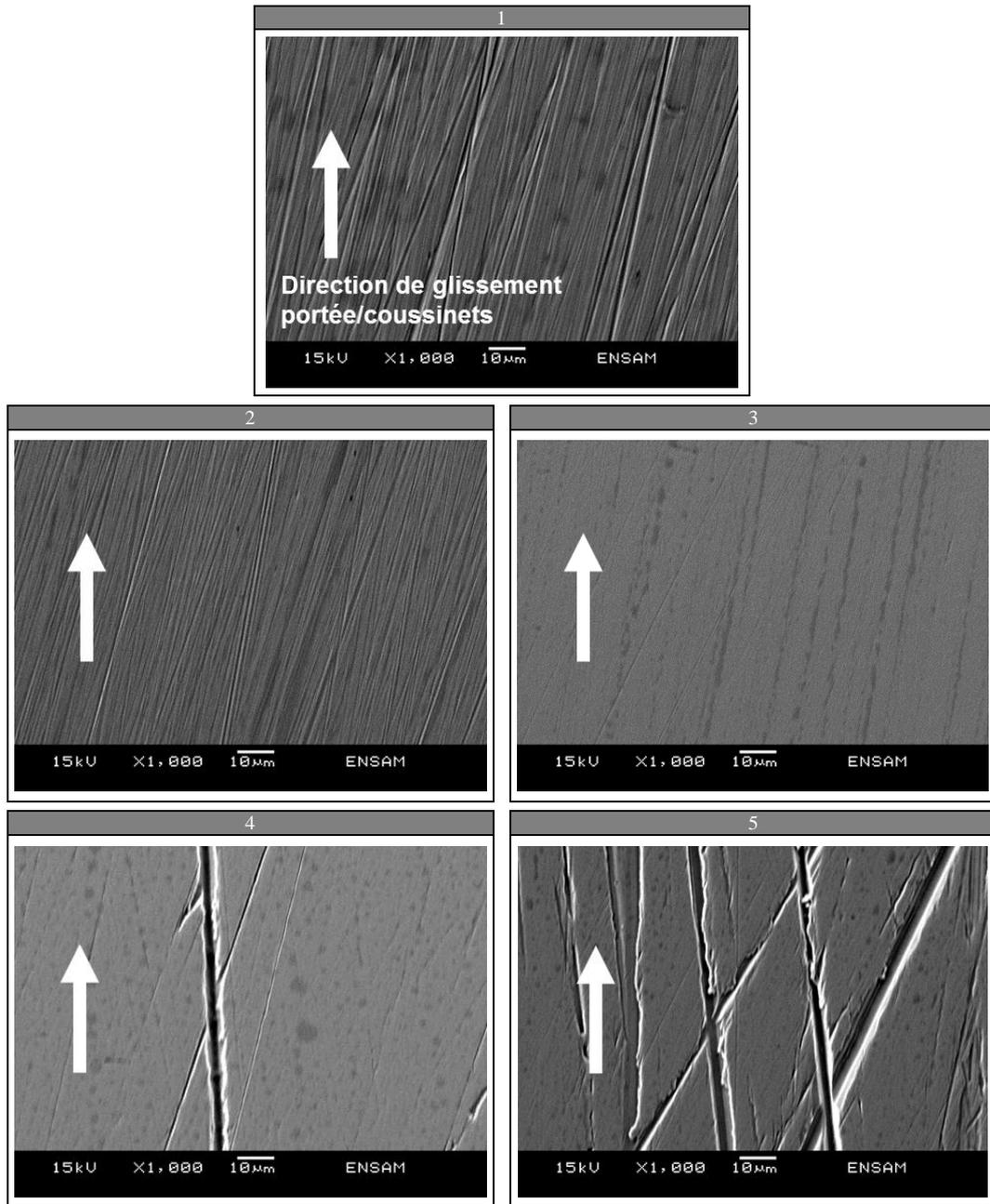


Figure V.2 : Distribution des rugosités ISO 13565

Nous avons souhaité contrôler par MEB l'aspect des surfaces afin d'apprécier les différences morphologiques entre les différentes textures. Les résultats sont donnés en *Figure V.3*. Comme attendu, les textures de référence 1 et 2 ont une très forte densité de stries et ne présentent aucun plateau. À l'opposé, la texture « poli miroir » présente des plateaux quasi uniformes et seules quelques très fines vallées éparses sont observables. Enfin, il est intéressant de signaler, sur les textures « plateaux/vallées », des zones déformées plastiquement aux abords des vallées. Celles-ci sont la conséquence de l'étalement des crêtes de rugosité durant les phases d'écrêtage et de polissage. Excepté ces zones, les liaisons entre vallées et plateaux forment des arêtes plus ou moins vives.



**Figure V.3 :** Clichés MEB des textures toilées, référence 1 et 2 (1) (2), poli miroir (3), plateaux vallées 1 et 2 (4) (5)

### V.1.2. Textures hybrides

Comme pour les textures toilées, plusieurs textures hybrides ont été réalisées. En tout neuf morphologies de textures ont été produites en variant, dans un plan complet, la densité et la profondeur du réseau de cavités selon trois niveaux. Chaque texture hybride a été appliquée sur deux portées afin, là encore, d'accroître la robustesse des tendances observées.

V.1.2.a. Gamme de fabrication

Les textures hybrides sont composées d'une surface toilée de type référence 2 et d'un réseau de cavités fabriqué par LST. Dans la pratique, l'opération laser est réalisée juste avant l'étape de toilage finition afin d'éviter tout potentiel bourrelet en périphérie des cavités. L'obtention de la diversité des textures hybrides est obtenue par la seule modification du temps de maintien du faisceau et des paramètres de déplacement du faisceau. Le détail des configurations process est donné en **Table V.4**.

**Table V.4 : Configuration process associée aux textures hybrides**

		Textures hybrides			
Paramètres	Not.	Ébauche*	Demi-finition**	LST	Finition***
Toilage	Nombre de cycle	1	1		1
	Granulométrie	40 µm	15 µm		5 µm
	Mâchoires	Env. dures	Env. souples		Env. souples
	Bande abrasive	Conventionnelle	Polissage		Polissage
	Force normale	600 N			600 N
	Avance de la bande	Complète		-	Complète
	Temps de cycle	10 s			10 s
	Vitesse de rotation	32 tr/min			32 tr/min
	Vitesse des oscillations	550 cycles/min			550 cycles/min
	Amplitude des oscillations	1 mm			1 mm
Lubrification	Avec			Avec	
LST	Durée d'impulsion			900 fs	
	Energie d'impulsion			2,5 µJ	
	Temps de maintien			1x5 / 2x5 / 3x5 ms	
	Distance inter cavité			100 / 200 / 400 µm	
	Fréquence du faisceau	-		800 KHz	-
	Mise en forme du faisceau			Gaussien	
	Distance de texturation			Au point focal	
	Diamètre du faisceau			≈ 30 µm	
	Soufflage et aspiration			Avec	
Pièce		Éprouvettes MAPS			
État initial		État après toilage conventionnel ébauche 80 µm			
Rugosité initiale		$Ra = 0,660 \pm 0,019 \mu\text{m}$	$Rpk = 0,253 \pm 0,017 \mu\text{m}$	$Rk = 1,942 \pm 0,101 \mu\text{m}$	$Rvk = 1,380 \pm 0,145 \mu\text{m}$
Circularité initiale		$C = 1,953 \pm 0,358 \mu\text{m}$			

V.1.2.b. Écarts de forme

Comme pour les portées texturées par toilage, les écarts de forme des textures hybrides ont été contrôlés afin de garantir la relative constance de ces derniers. Ceux-ci sont donnés en **Figure V.4**. Aucune tendance n'est visible et les valeurs sont là encore en deçà des tolérances du groupe RENAULT.

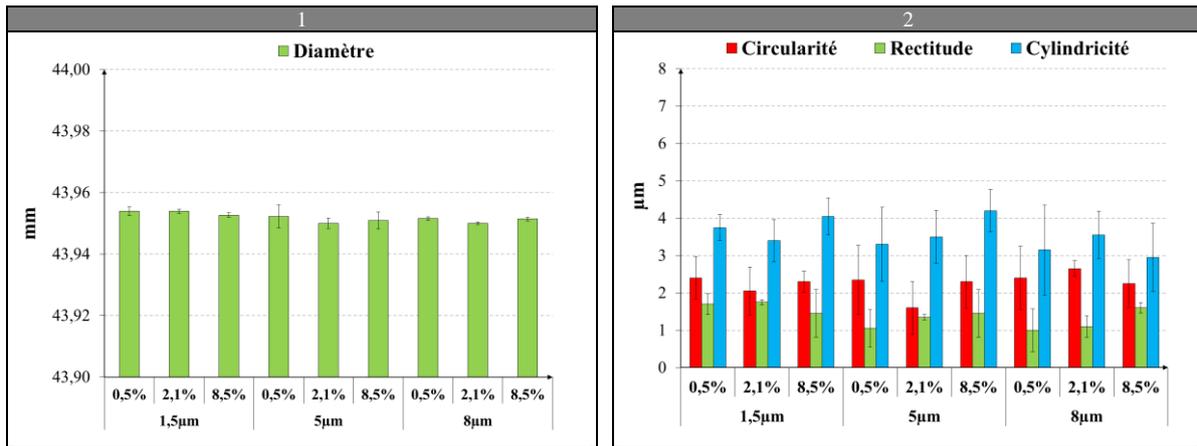


Figure V.4 : Écarts de forme des portées texturées hybrides

V.1.2.c. Rugosités, caractéristiques texturales et aspects

Trois niveaux de densité de texturation *LST* ont été réalisés (0,5 %, 2,1 % et 8 %). Le choix de ces niveaux résulte d'un compromis entre les critères de productivité et la pertinence fonctionnelle, en lien avec les tendances observées dans la littérature. Les différents réseaux ont été analysés au microscope optique (Figure V.5). Après de multiples observations, aucune anomalie particulière n'est à noter. L'espace inter-cavité est apparu constant quelle que soit la zone observée.

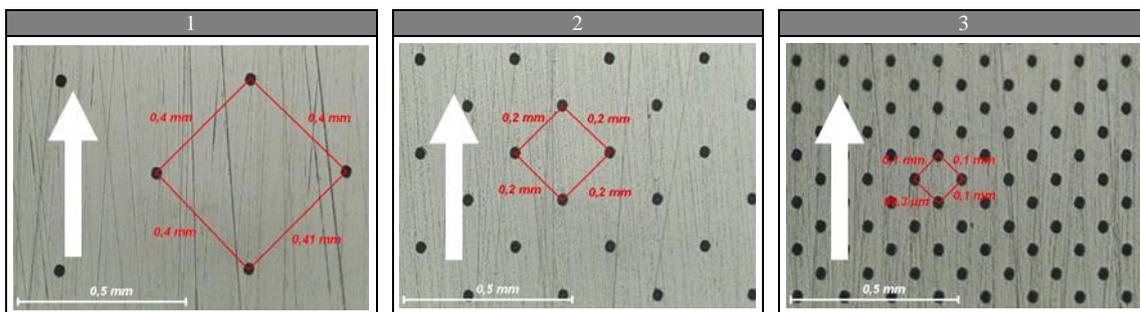
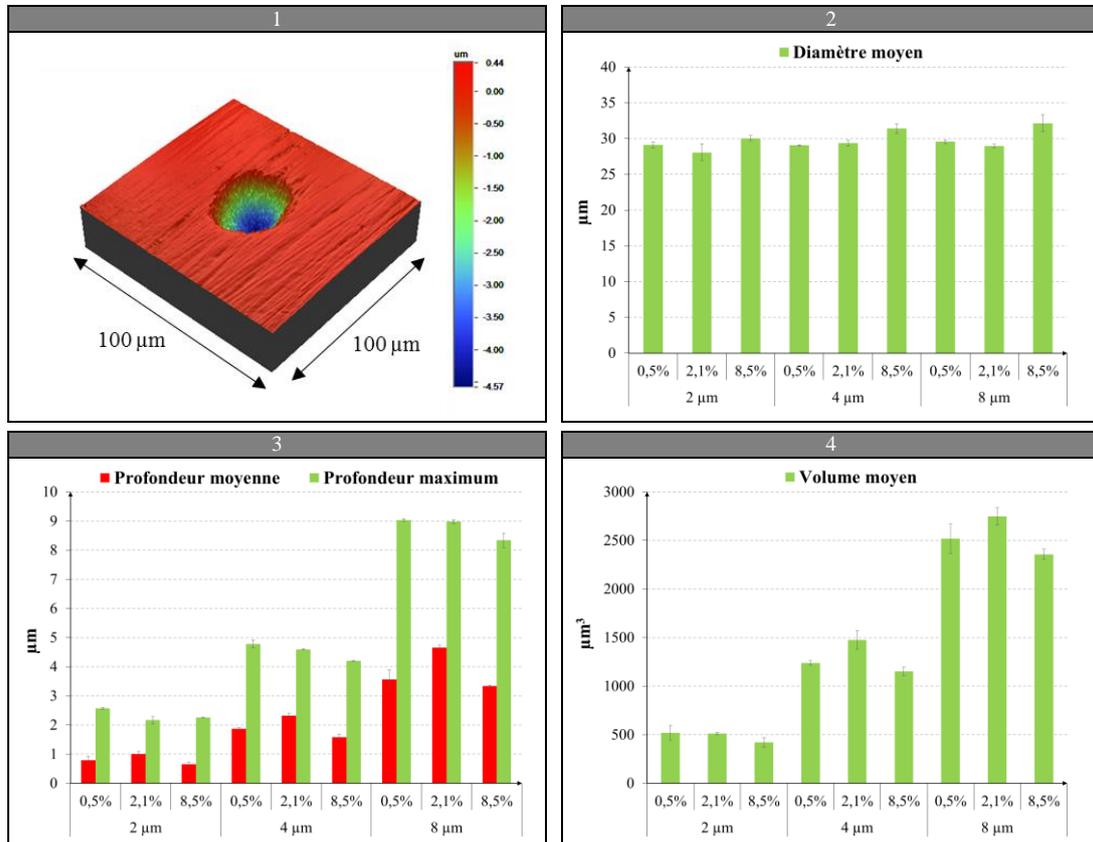


Figure V.5 : Réseau de cavités des textures hybrides vu au microscope optique, 0,5 % (1), 2,1 % (2), 8 % (3)

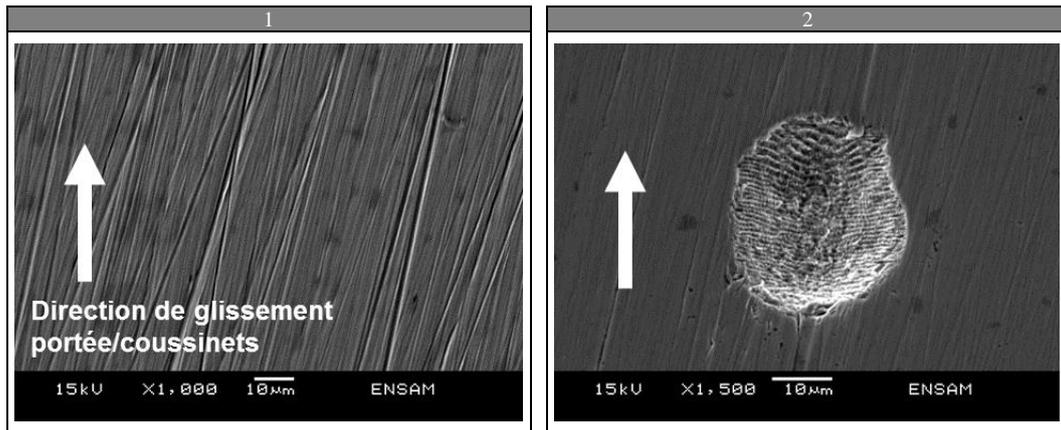
Étant donné l'aspect discret du réseau de cavités, la rugosité des textures hybrides n'est pas mesurable par une acquisition de profil. C'est pourquoi, des mesures interférométriques ont donc été effectuées. Comme attendu, elles ont révélé que la rugosité de la composante toilée de la texture était peu ou prou identique à celle de la texture « référence 2 » étudiée plus haut. Par ailleurs, ces mesures 3D ont également rendu possible la caractérisation fine des cavités *LST* par l'intermédiaire d'une routine MATLAB. Ce code permet d'isoler le contour des cavités via un algorithme de segmentation, puis de quantifier leurs diamètres moyens, leurs profondeurs moyenne et maximale ainsi que leurs volumes de rétention. Les résultats sont présentés en Figure V.6. Ces données très utiles nous permettent de visualiser la variabilité des caractéristiques de cavités en fonction des caractéristiques cibles (densité de recouvrement et profondeur maximale) et de quantifier, au besoin, les possibles interactions. Après de multiples mesures, on ne distingue aucune tendance significative sur le diamètre moyen. D'un point de

vue process, nous pouvons en conclure que la profondeur et la densité sont indépendantes du diamètre des cavités. À l’opposé, nous observons bien entendu une évolution des profondeurs et des volumes de rétention en fonction des profondeurs cibles. Par ailleurs, la densité de recouvrement apparaît avoir un impact très faible sur les valeurs obtenues.



**Figure V.6 : Caractéristiques moyennes des cavités, cliché interférométrique (1), diamètre moyen (2), profondeur moyenne et maximum (3), volume de rétention (4)**

Comme pour les textures toilées, les clichés *MEB* des textures nous ont permis de compléter les analyses précédentes. Celles-ci sont données en **Figure V.7**. On constate la présence d’une rugosité bien particulière sur la surface formant la cavité. Cette morphologie, appelée « ripples », est le résultat de la réorganisation de la matière suite à la sublimation de l’acier. Beaucoup de travaux tentent aujourd’hui d’expliquer et de fonctionnaliser cette morphologie. Au-delà de cette observation, il est important de constater visuellement l’absence de « bourrelet » en bord de cavité.



*Figure V.7 : Clichés MEB des textures hybrides*

### V.1.3. Conclusion

Ce travail dédié à la définition et à la caractérisation des portées texturées destinées aux essais fonctionnels nous a permis d'apprécier les différences morphologiques des textures et de contrôler les caractéristiques géométriques. Nous n'avons noté aucune anomalie dans les mesures, ce qui nous permet de garantir la viabilité des tendances fonctionnelles observables par la suite.

## V.2. Effets de la texturation en chargement statique sévère

Au vu de la littérature, les effets potentiels de la texturation devraient être observables et impacter sensiblement les critères fonctionnels, en particulier dans le régime de fonctionnement mixte. Nous effectuons dans cette partie des essais de grippage « début de vie » visant à étudier le comportement fonctionnel des paliers. Nous étudions des exemples d'évolution du couple de frottement  $C_f$ , de la température en dos de coussinet  $T_c$  et de courbe de Stribeck puis calculerons la valeur moyenne des critères ( $W_{\text{grippage}}$ ,  $T_{c \text{ grippage}}$ ,  $S_{\text{grippage}}$ ,  $f_{\text{grippage}}$ ) associés au départ en grippage de chaque configuration texturale. Des analyses MEB sur les portées et les coussinets usés viendront compléter ces données. Afin d'améliorer la robustesse des tendances observables, ces essais fonctionnels, menés sur la MAPS, ont été quadruplés concernant les textures toilées et doublées pour les textures hybrides. La procédure et la configuration de la machine sont rappelées en **II.4.2**.

### V.2.1. Effets de la texturation sur les grandeurs fonctionnelles « *in process* »

À des fins de compréhension générale, nous avons tout d'abord suivi et enregistré les évolutions « *in process* » du triplet couple de frottement  $C_f$ , température  $T_c$  et courbe de Stribeck pour chaque configuration puis avons calculé les paramètres associés au départ en grippage des paliers.

#### V.2.1.a. Observations générales

La **Figure V.8** nous donne un exemple type de suivi « *in process* » durant un essai. Notons que les évolutions expérimentales du couple  $C_f$  et du coefficient de frottement  $f$  observées ici suivent les tendances théoriques calculées en **Chapitre I** dans le cadre de l'hypothèse « palier lisse court » en **Figure I.4**.

D'une manière tout à fait générale, l'augmentation de la charge normale  $W$  engendre une croissance du couple de frottement  $C_f$  (**Figure V.8.1**) ainsi qu'une évolution croissante en deux segments de la température coussinet  $T_c$ , avec une rupture franche généralement située entre 500 et 1000 daN (**Figure V.8.2**). Lorsque les conditions de contact deviennent plus difficiles et qu'un seuil critique de chargement  $W_{\text{grippage}}$  est franchi, il advient une divergence du couple de frottement  $C_f$ , ce qui signe le départ en grippage du palier. Il est intéressant de souligner, à cet instant, la non-divergence de la température coussinet  $T_c$ .

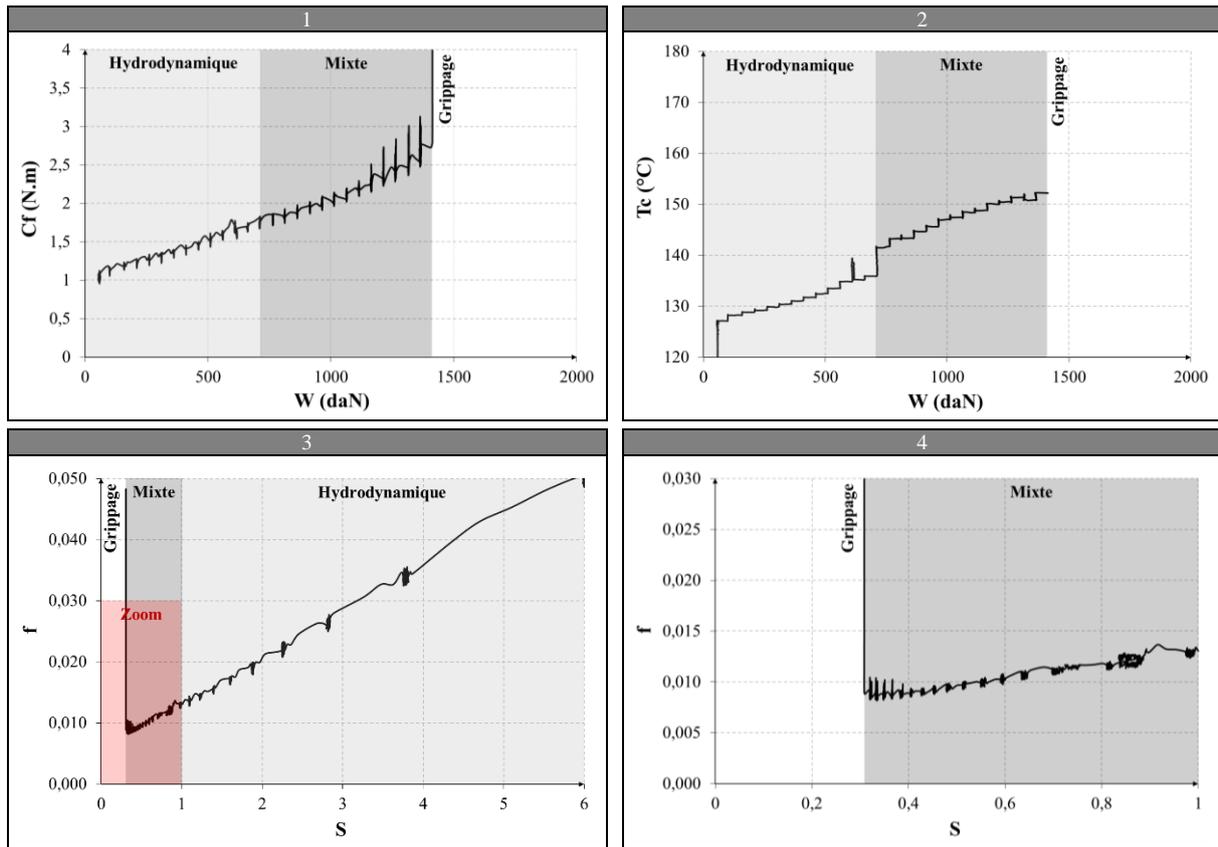


Figure V.8 : Exemple type de suivi « in process » lors des essais de grippage en chargement statique

Le calcul des courbes de Stribeck (Figure V.8.3 et Figure V.8.4) nous a permis de synthétiser le comportement fonctionnel en combinant, par l'intermédiaire du nombre de Sommerfeld, l'augmentation couplée de la charge  $W$  et de la température  $T_c$ . Les courbes de Stribeck ont été calculées en considérant la loi de viscosité  $\mu(T_c)$  (Figure II.17). L'interprétation est celle d'une courbe de Stribeck classique :

- en dehors de la zone à proximité du grippage (ici  $S > 1$ ), le palier fonctionne en régime hydrodynamique. Rien ne nous permet de présager de contacts solide/solide puisqu'aucune croissance anormale n'est détectée sur la température  $T_c$ . Les surfaces sont, sans nul doute, intégralement séparées par le film d'huile ( $h \gg R_{pk} + R_k + R_{vk}$ ). Physiquement, l'augmentation de la charge  $W$  entraîne une diminution de l'épaisseur du film  $h$ , ce qui a pour effet de diminuer le coefficient de frottement  $f$  et d'augmenter le taux du cisaillement de l'huile, provoquant une faible élévation de la température de contact  $T_c$  (premier segment linéaire de la Figure V.8.2) ;
- plus proche de la zone de grippage (ici  $S < 1$ ), le palier fonctionne en régime mixte. On remarque une montée soudaine de la température  $T_c$ . Cette dernière, marque la transition du régime hydrodynamique vers le régime mixte. Physiquement, l'épaisseur  $h$  devient plus petite que l'amplitude des rugosités et des défauts de formes, ce qui implique que le film d'huile est partiellement rompu ( $h \approx R_{pk} + R_k + R_{vk}$ ). Des contacts solide/solide apparaissent, l'adhésion s'initie et engendre une augmentation du coefficient de frottement  $f$ . Malgré la montée en

température, l'équilibre énergétique thermique demeure assuré. Dans cette phase, toute augmentation de la charge  $W$  accroît le taux de contact solide/solide, ce qui a pour conséquence d'augmenter davantage la température de contact  $T_c$ . (deuxième segment linéaire de la **Figure V.8.2**) ;

- enfin, au moment du départ en grippage (ici  $S \approx 0,3$ ), les contacts entre aspérités sont tels que l'équilibre énergétique du palier n'est plus assuré. Physiquement, le palier ne parvient plus à évacuer, par convection, conduction et rayonnement, la quantité de chaleur qu'il produit. Il rentre dans un processus divergent caractérisé par une élévation très forte et de plus en plus rapide de la température (non observable ici du fait de l'arrêt des essais).

#### *V.2.1.b. Effets des textures sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process »*

Suite aux essais, il est advenu que l'évolution des grandeurs fonctionnelles apparaît sensiblement impactée par la configuration texturale. Que ce soit pour les textures toilées (**Figure V.9**) ou hybrides (**Figure V.10**), le choix de la texture engendre une modification de l'évolution du couple de frottement, de la température ainsi que de la courbe de Stribeck. Aussi bien en termes de couple  $C_f$  qu'en coefficient de frottement  $f$ , on remarque que les textures à faible rétention (« poli miroir » et « plateaux/vallées 1 ») présentent le plus bas frottement hydrodynamique (**Figure V.9.1**, **Figure V.9.3**, **Figure V.10.1** et **Figure V.10.3**) alors que les textures à forte capacité de rétention (« plateaux/vallées 2 » et les « hybrides » à forte profondeur) présentent celui le plus haut. En régime mixte et hors grippage, les courbes de frottement, initialement bien distinctes, se confondent davantage et il devient plus difficile de distinguer un quelconque effet textural. Malgré ce fait, le départ en grippage apparaît pourtant être dépendant des textures choisies. Il est en particulier très précoce sur les textures hybrides à forte profondeur alors qu'il est sensiblement repoussé avec les textures toilées « référence 2 », « poli miroir », « plateaux/vallées 1 » et « plateaux/vallées 2 ».

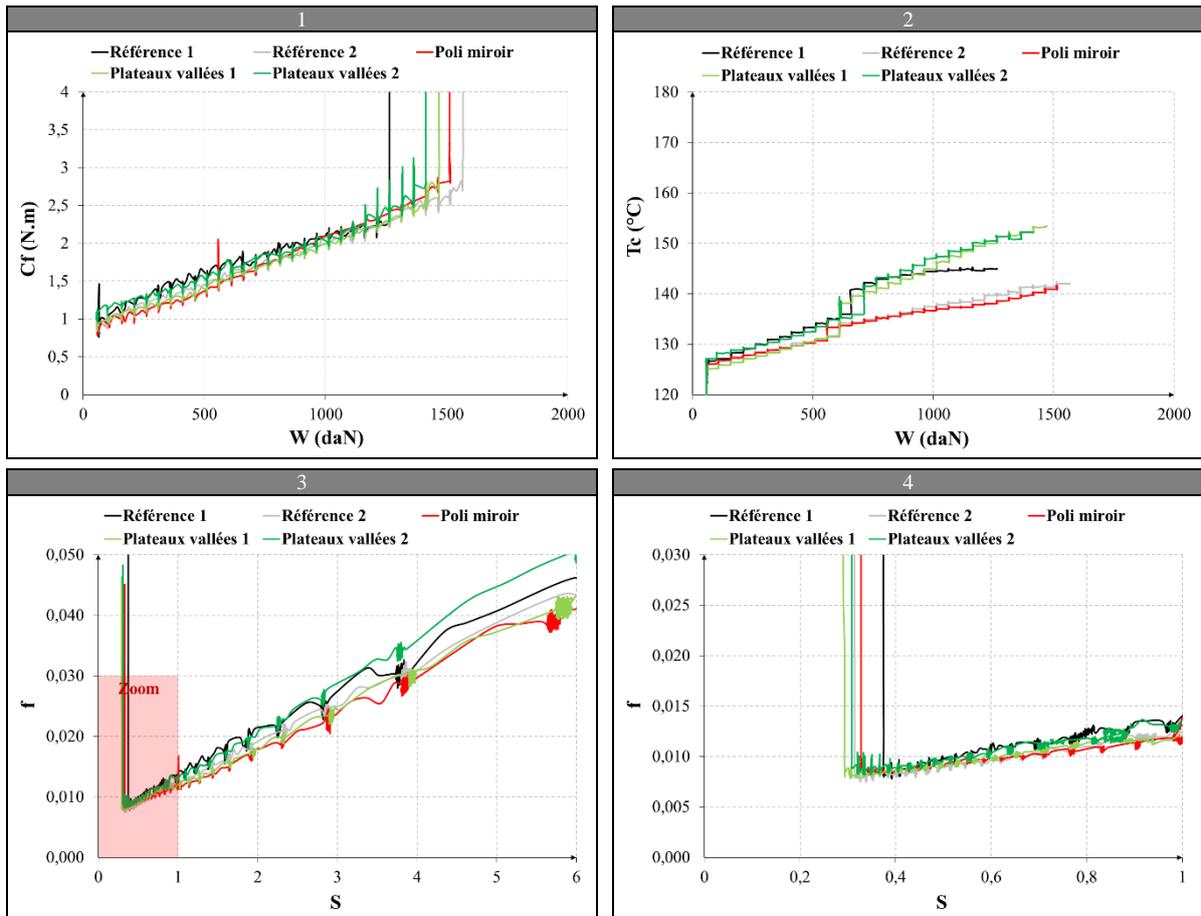
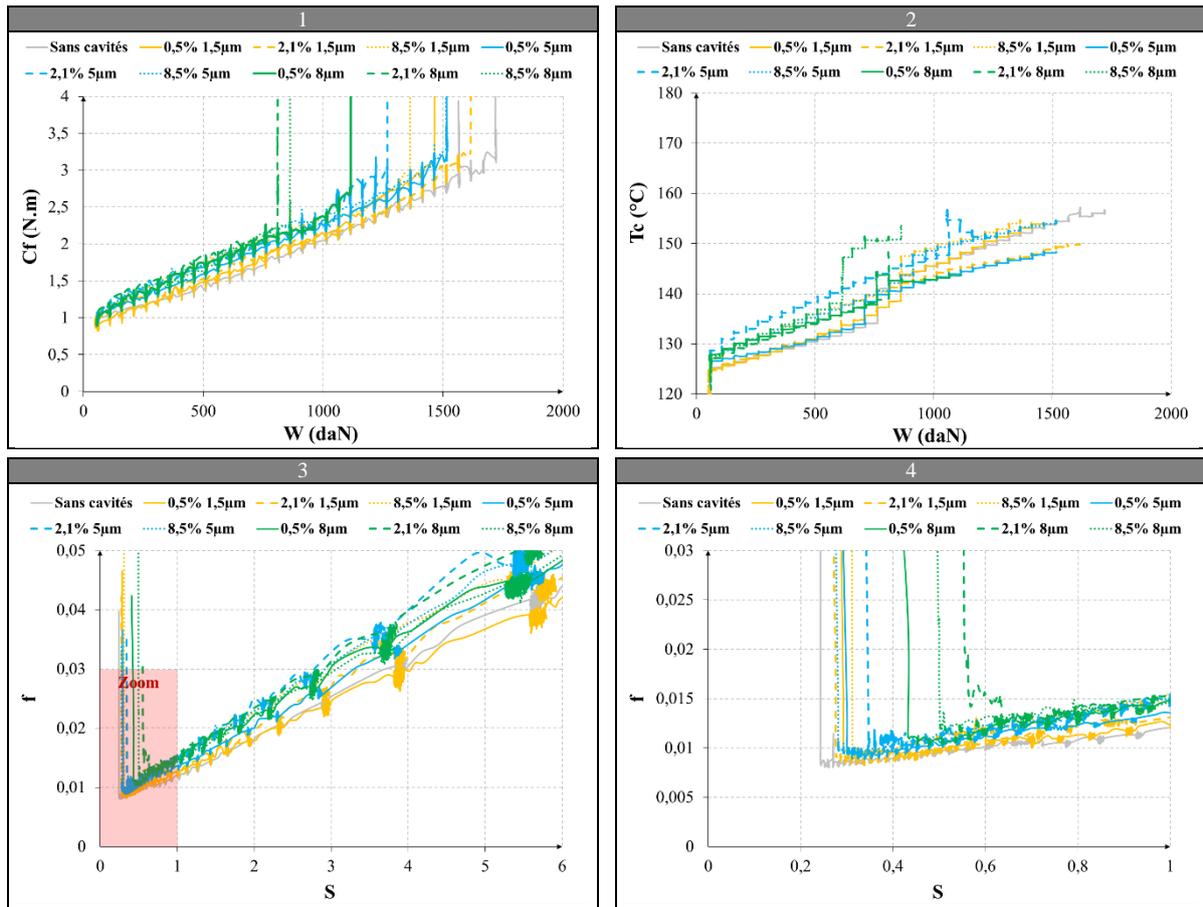


Figure V.9 : Effets des textures toilées sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process » lors des essais de grippage en chargement statique



**Figure V.10 : Effets des textures hybrides sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process » lors des essais de grippage en chargement statique**

### V.2.1.c. Effets des textures sur les critères fonctionnels associés au départ en grippage

Nous allons par la suite calculer les valeurs moyennes de quatre critères fonctionnels issus directement de ces courbes en considérant, cette fois, l'intégralité des essais. Ces critères sont les suivants :

- la charge admissible  $W_{grippage}$  qui correspond à la charge normale critique applicable sur le palier associé au départ en grippage ;
- la température de grippage  $T_{C_{grippage}}$  qui correspond à la température mesurée en dos de coussinet au moment du grippage ;
- le Sommerfeld de grippage  $S_{grippage}$  qui correspond au nombre de Sommerfeld associé au départ en grippage et qui se calcule à l'aide de  $W_{grippage}$  et  $T_{C_{grippage}}$  ;
- le frottement de grippage  $f_{grippage}$  qui correspond au frottement mesuré au moment du grippage.

Les résultats confirment les tendances observées précédemment. Dans l'ensemble, les textures toilées apparaissent les plus pertinentes. En particulier, les quatre nouvelles textures toilées améliorent le comportement en « grippage début de vie » par rapport aux textures actuelles « référence 1 ». Elles permettent toutes de repousser la charge de grippage  $W_{grippage}$  et de minimiser le  $S_{grippage}$  de manière significative (**Figure V.11.1** et **Figure V.11.3**). Bien que toutes avantageuses, il est toutefois délicat de

discriminer la meilleure configuration texturale du fait de la dispersion de mesure sur les différents critères. Leurs charges de grippage  $W_{grippage}$  et leurs Sommerfeld  $S_{grippage}$  associés sont expérimentalement peu ou prou identiques. Toutefois, d'un point de vue thermique et frottement (**Figure V.11.2** et **Figure V.11.4**), les textures « poli miroir », et dans une moindre mesure, les textures « plateaux/vallées 1 », partent en grippage en produisant une chaleur et un frottement plus faibles que la texture « référence 2 » et « plateaux/vallées 2 ». Cela peut physiquement s'expliquer du fait de leurs morphologies (**Figure V.3.3**, **Figure V.3.4** et **Figure V.3.5**). Leurs rugosités présentent très peu de crêtes et d'arêtes vives, elles pourraient donc être logiquement moins agressives en cas de contact solide/solide, et pourraient permettre, ainsi, d'atténuer les chocs et la génération de chaleur.

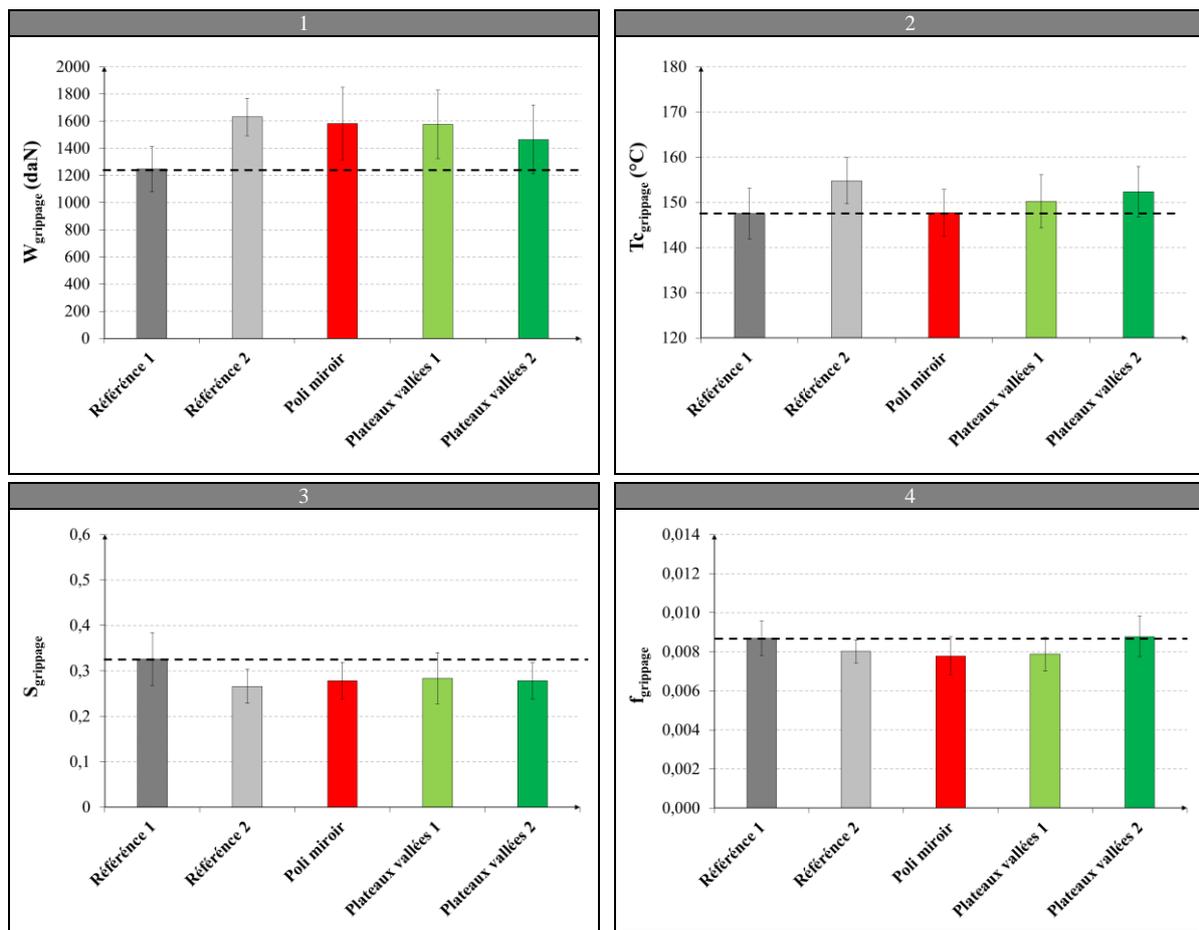


Figure V.11 : Critères fonctionnels associés au départ en grippage des textures toilées

À l'opposé, les textures hybrides ont tendance à faciliter l'apparition du grippage (**Figure V.12.1** et **Figure V.12.3**). Alors que les cavités à faibles profondeurs semblent n'avoir aucun effet, les textures à cavités profondes provoquent une chute notable de la charge de grippage  $W_{grippage}$  et une augmentation du Sommerfeld  $S_{grippage}$ . En comparaison, la densité de recouvrement semble peu impacter le départ en grippage. Il semblerait toutefois qu'une densité proche de 2,1 % soit préférable.

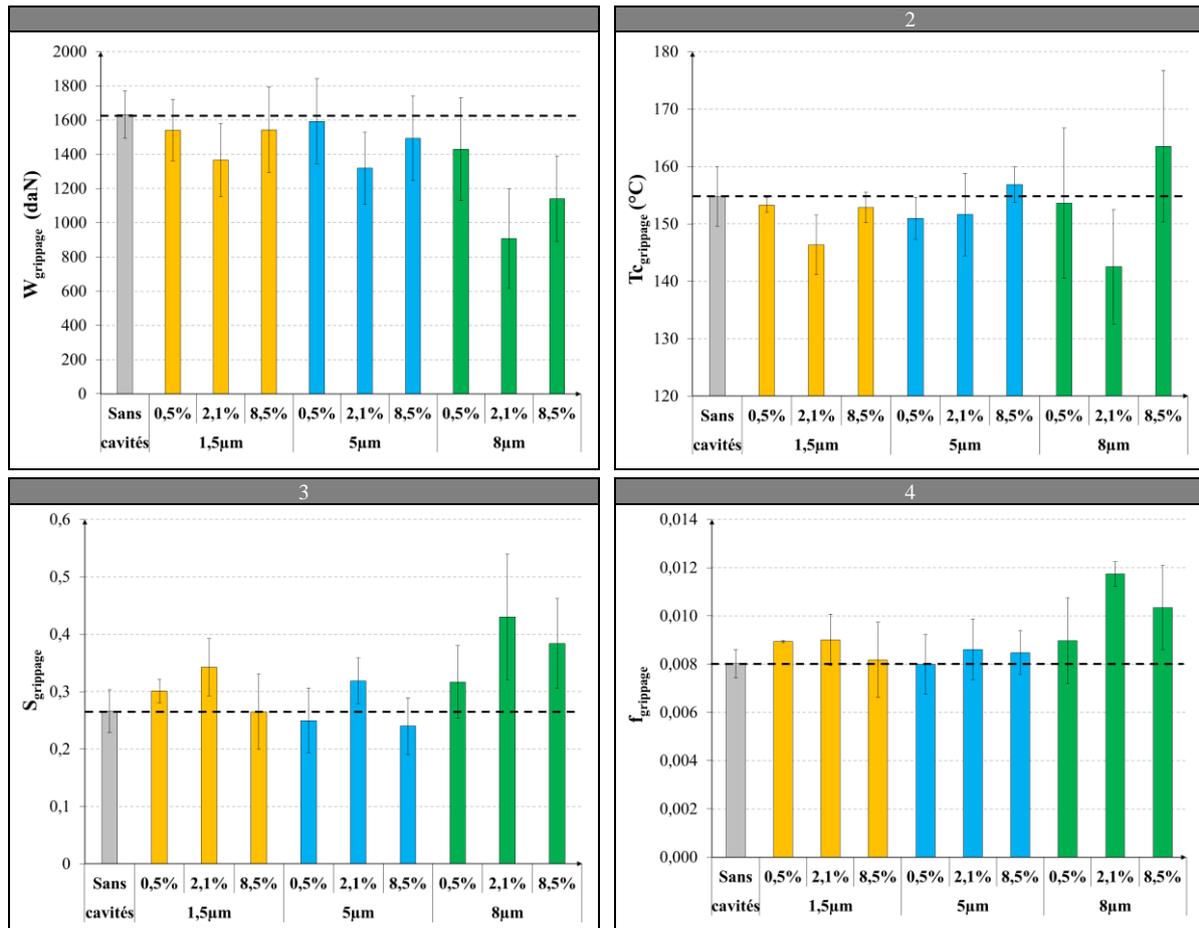


Figure V.12 : Critères fonctionnels associés au départ en grippage des textures hybrides

## V.2.2. Analyse de l'usure sur les portées

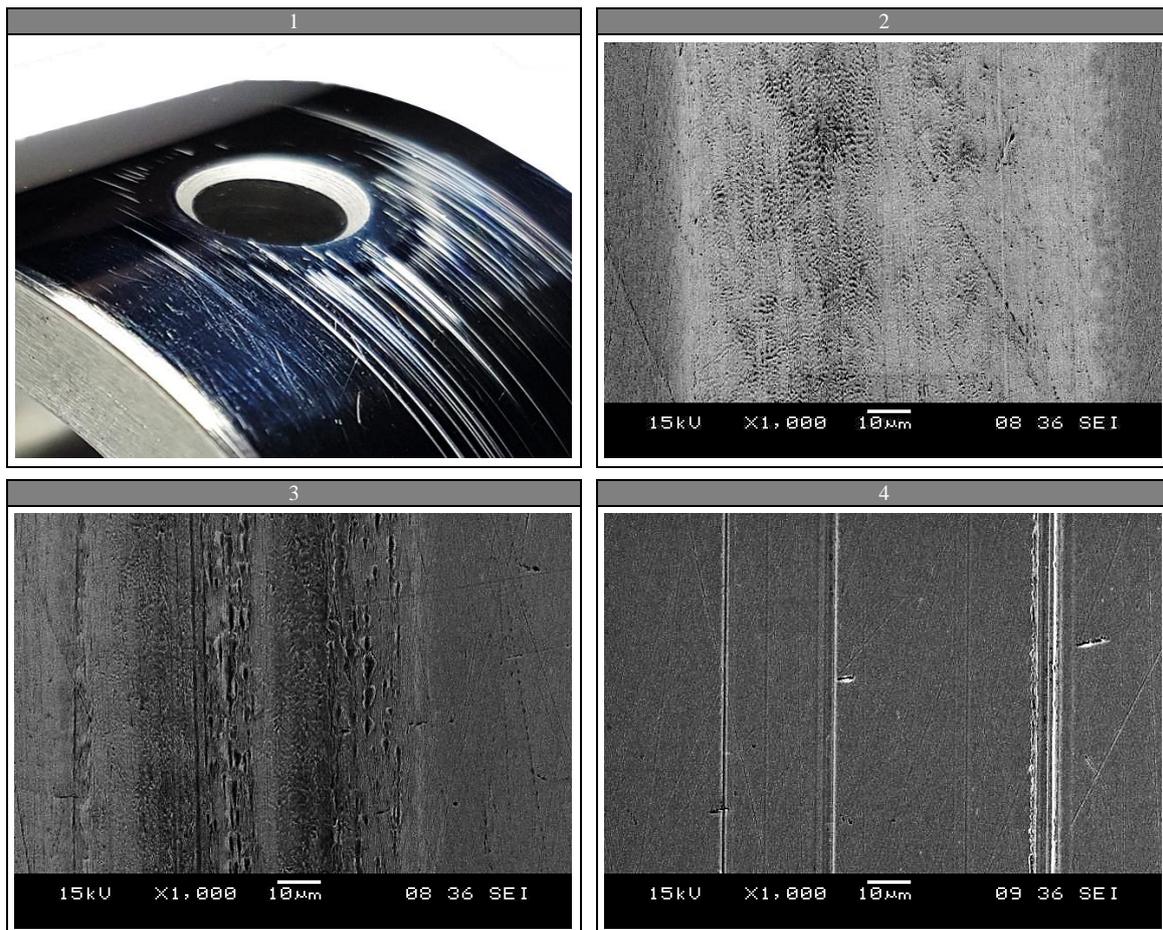
Au-delà de ces critères purement fonctionnels, l'expertise des portées nous a permis de quantifier le degré d'usure engendré sur différentes textures et de mieux comprendre le lien entre fonctionnalité grippage et texture de surface.

### V.2.2.a. Modes d'usure

Les observations *MEB* des portées ont révélé la présence de trois modes d'usure spécifique, chacun ayant un scénario phénoménologique bien précis. Toutes les portées sont impactées. On retrouve :

- l'usure adhésive, très fréquente, qui provient du contact direct et continu entre le coussinet et la portée. Elle est le résultat de la déformation plastique des aspérités et, si rien est fait pour stopper le processus, de la fusion en surface d'un ou des deux matériaux suivi d'un soudage complet. Dans la pratique, nous n'atteignons jamais ce dernier stade du fait de l'insolubilité du bismuth dans l'acier et de l'arrêt prématuré de l'essai. Ce mode d'usure a généré sur nos surfaces des traces lisses et/ou en vaguelettes étirées issues des seules déformations plastiques et des possibles fusions locales (*Figure V.13.2*) ;

- l'usure érosive, peu fréquente, qui est le résultat de la circulation libre de particules solides issues de la pollution de l'huile dans l'interface du contact. Elle est le résultat de la pénétration anarchique et successive des particules dans la portée. Ce mode d'usure a généré sur les surfaces des cavités de formes quelconques et plus ou moins grandes (**Figure V.13.3**) ;
- l'usure abrasive, également peu fréquente, est la prolongation directe de l'usure érosive suite à l'incrustation des particules solides libres dans le coussinet. Dans ce scénario, les particules, désormais en glissement pur par rapport à la portée, vont générer des sillons circonférentiels de tailles variables (**Figure V.13.4**).

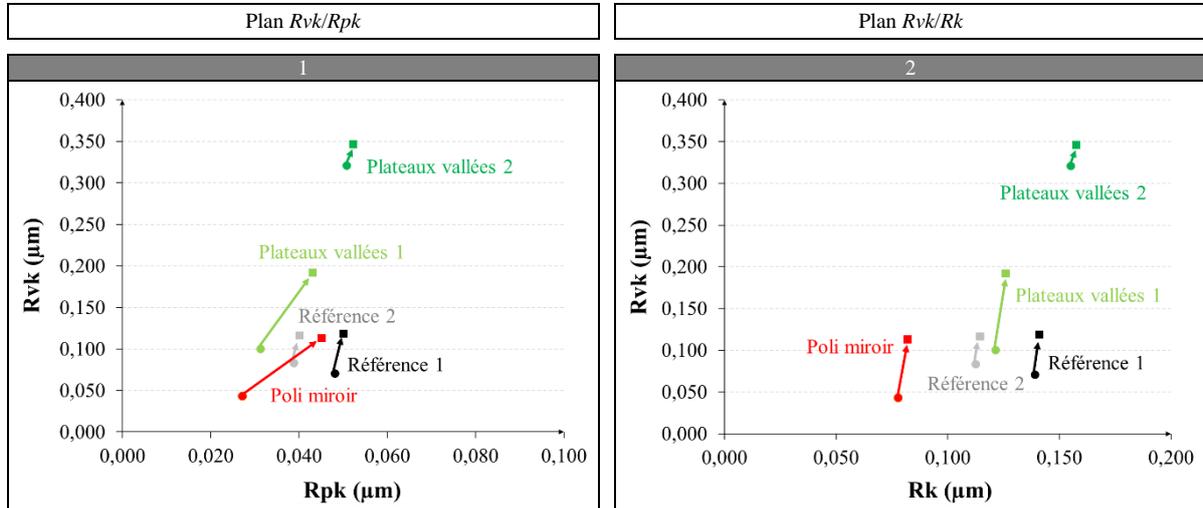


**Figure V.13 : Les principaux modes d'usure observés sur les portées après les essais de grippage en chargement statique, aspect général (1), adhésion (2), érosion (3), abrasion (3)**

#### V.2.2.b. Modifications texturales

Ces différents modes d'usure ont localement engendré de légères modifications texturales de la portée, en particulier dans la zone en amont du trou de lubrification. La comparaison avant/après des rugosités ISO 13565 nous a permis de quantifier macroscopiquement ces altérations (**Figure V.14**). De manière tout à fait générale, nous avons observé une augmentation des profondeurs de vallées  $Rvk$ , des hauteurs des pics  $Rpk$  et une très légère croissance de l'amplitude du cœur de rugosité  $Rk$ . Ceci est à mettre en lien avec la création de cavités/sillons par abrasion et érosion et la génération de bourrelets en bord, bien

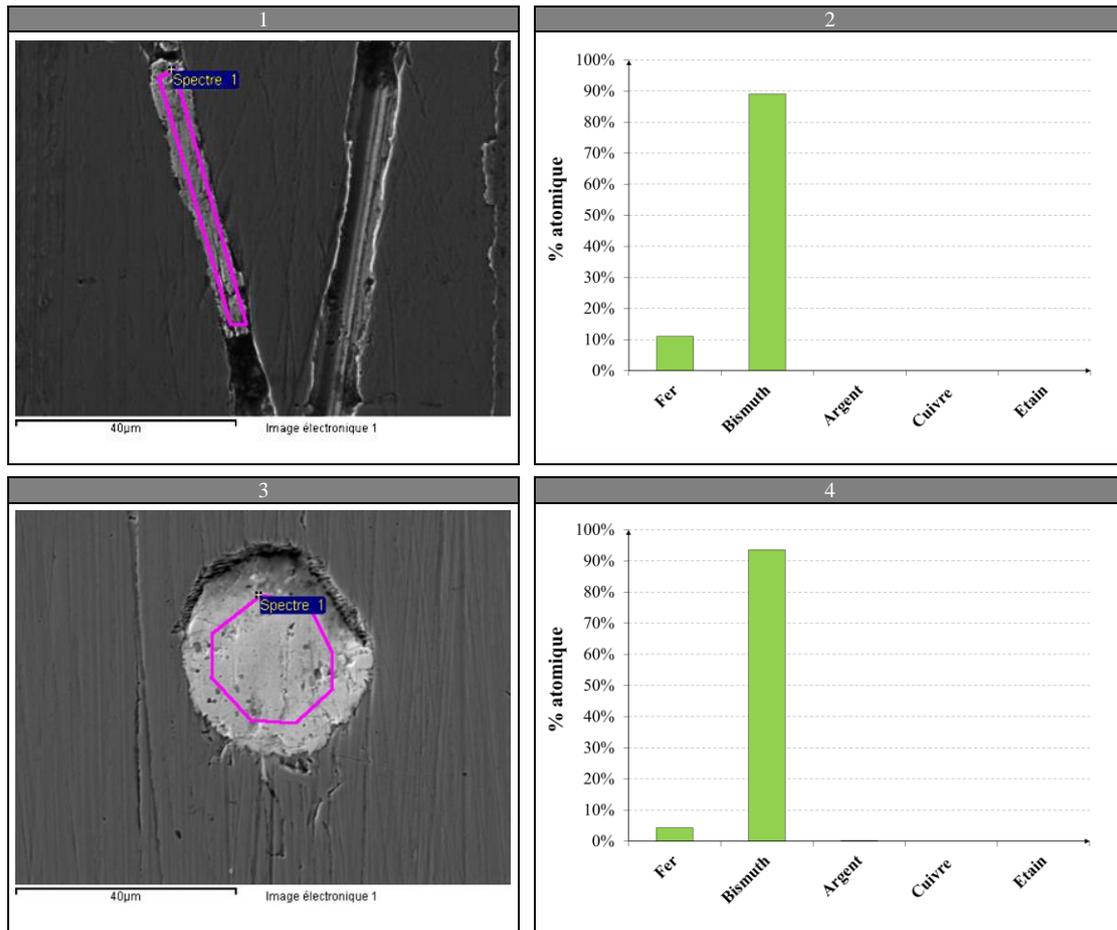
observables sur la **Figure V.13.3**. Très utile pour avoir une quantification globale, ces critères de rugosité ne doivent cependant pas dissimuler l'inhomogénéité de l'altération texturale. En dehors des zones touchées par l'usure, les textures ont en effet été totalement préservées. De la même façon, les essais en tant que tels n'ont pas engendré d'enlèvement de matière généralisé ni chiffrable sur la portée.



**Figure V.14 : Usure texturale des portées toilées après les essais de grippage en chargement statique**

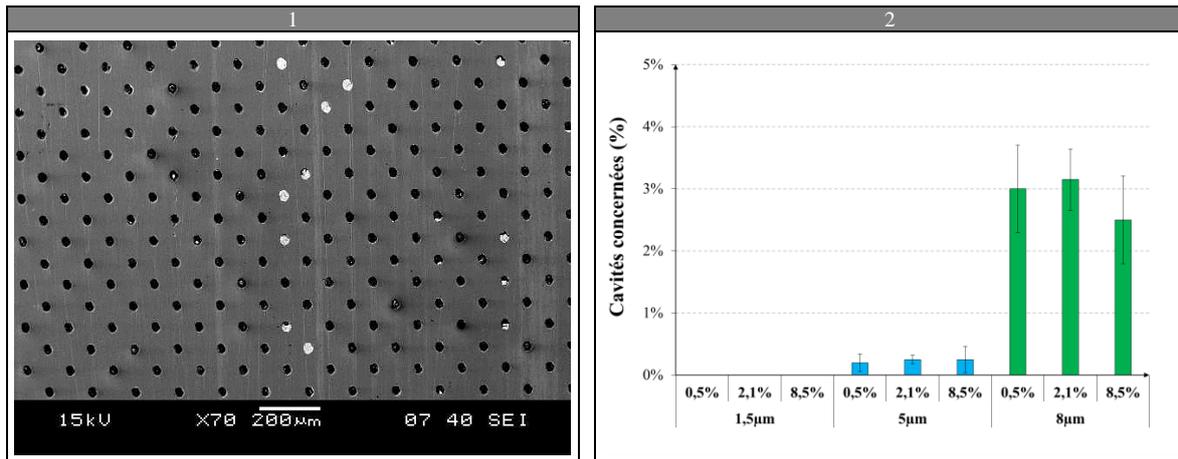
#### V.2.2.c. Transfert de la couche sacrificielle de bismuth

En dehors de ces modes d'usure, nous avons constaté par EDS la présence d'un phénomène de transfert de la couche de Bismuth dans les vallées des textures « plateaux/vallées » ainsi que dans les cavités des textures hybrides (**Figure V.15**). Ce phénomène, bien que très peu présent, est probablement initié par la présence d'arêtes vives aux liaisons entre les espaces de rétention (vallées ou cavités) et les plateaux.



**Figure V.15 : Observations MEB du phénomène de transfert après les essais de grippage en chargement statique, sur une texture « plateaux/vallées » (1) (2), sur une texture hybride (3) (4)**

Aucun moyen efficace n'a été trouvé pour quantifier ce transfert sur les textures de type « plateaux/vallées ». Cependant, il a été possible de le quantifier pour les textures hybrides en dénombrant manuellement les cavités touchées (**Figure V.16**). Nous avons pour cela effectué, sur chaque portée, 18 mesures interférométriques de grandes tailles (15 mm × 1 mm), équitablement réparties le long de la circonférence. Les résultats montrent que le phénomène touche moins de 4 % de la totalité des cavités et que celui-ci est fonction croissante de la profondeur des cavités.



**Figure V.16 : Quantification du transfert de bismuth sur les textures hybrides après les essais de grippage en chargement statique, cliché MEB (1), taux de cavités concernées (2)**

### V.2.3. Analyse de l'usure sur les coussinets

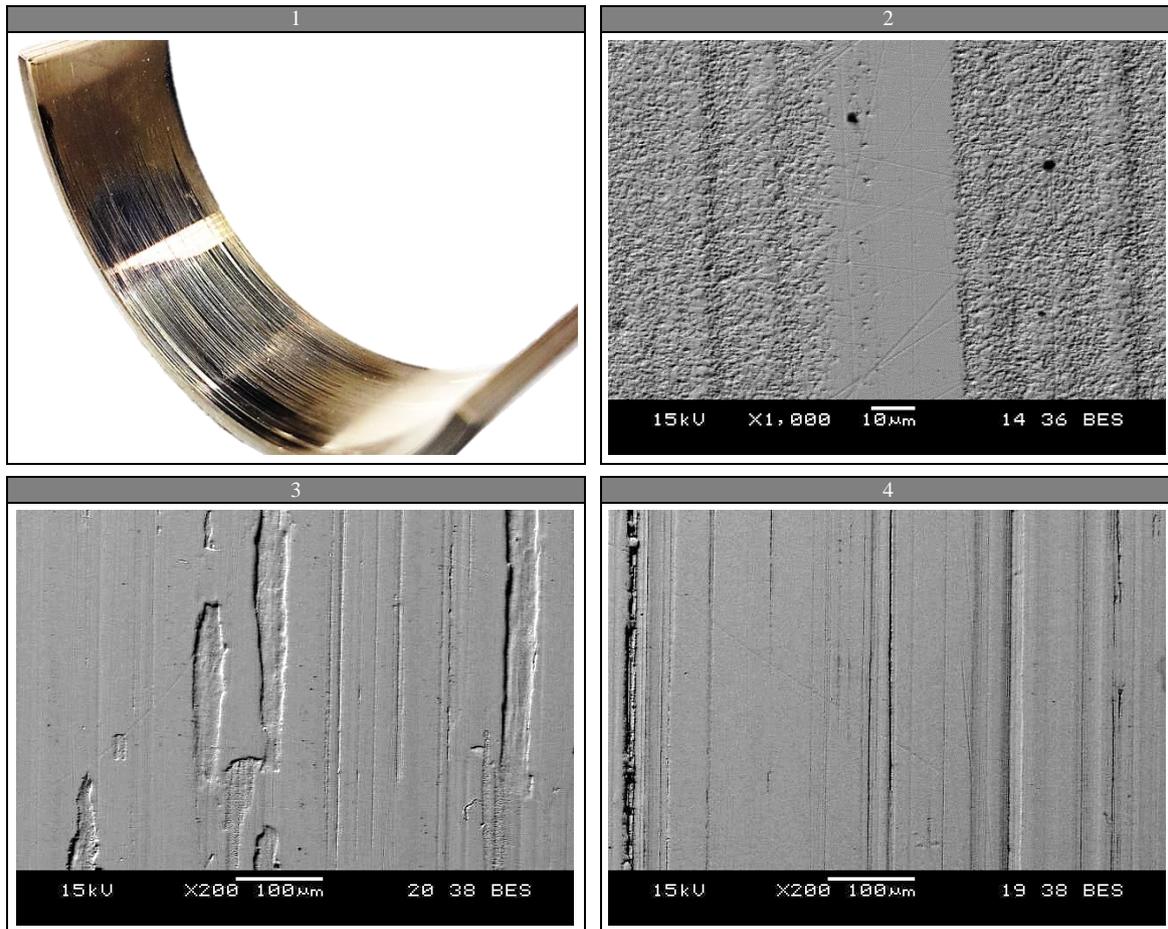
Du fait de leur inscrutabilité et de leur fusibilité, l'analyse des coussinets offre souvent des indices essentiels à la compréhension des phénomènes tribologiques au sein des paliers. Ces analyses permettent de contrôler indirectement la pollution de l'huile, les défauts de montage, les anomalies de formes (circularité, rectitude, etc.) ainsi que les dysfonctionnements machine [130].

#### V.2.3.a. Modes d'usure

La face active des coussinets triple couches (bronze, argent, bismuth) utilisés ici est extrêmement tendre et donc très marquée par l'usure. On constate trois modes d'usure :

- l'usure adhésive, très fréquente. Elle se manifeste par un aplatissement plastique progressif des sillons de microboring. Contrairement à l'usure adhésive des portées, on ne distingue pas ici de « vaguelette » (*Figure V.17.1*).
- l'usure combinée adhésive suite au transfert de bismuth, fréquente et spécifique aux textures hybrides à cavités profondes. Ce type très particulier d'usure est la conséquence, sur le coussinet, du phénomène de transfert de bismuth observé en *Figure V.16*. Le bismuth transféré dans les cavités adhère au bismuth du coussinet, il se forme alors, ponctuellement et localement, des soudures adhésives (le bismuth étant soluble dans lui-même) qui finissent par se rompre par rupture cohésive en arrachant, en sous couche et de manière discontinue, une certaine quantité de bismuth du coussinet. On distingue nettement en *Figure V.17.3* la présence de ces arrachements, dont la largeur (30 µm) est égale au diamètre des cavités des textures hybrides.
- l'usure abrasive, très peu fréquente dans le cas des textures toilées et très fréquente dans le cas des textures hybrides. Comme pour les portées, elle se manifeste par la génération de sillons parallèles au déplacement (*Figure V.17.3*). Au vue des analyses MEB, il semblerait que la

présence des cavités favorise ce mode d'usure. Physiquement, il se pourrait que celles-ci piègent certaines particules solides et entraînent ainsi l'initiation de l'abrasion.



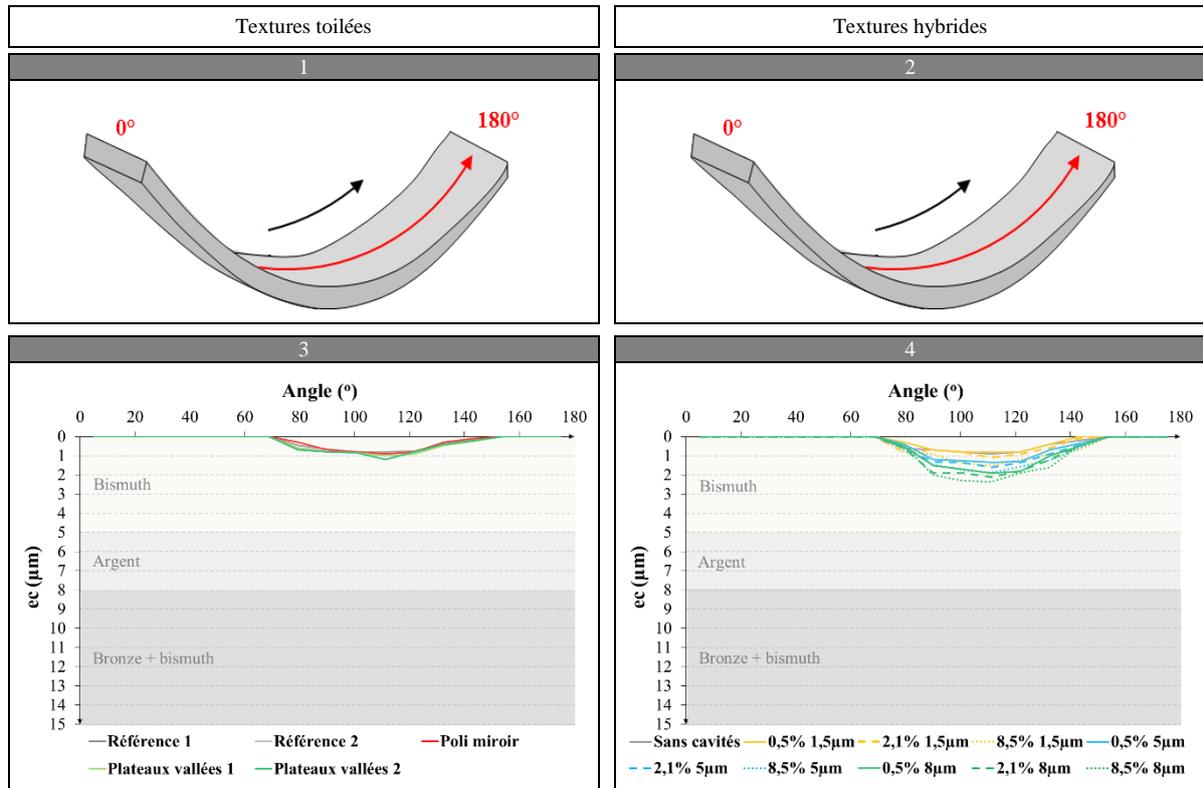
**Figure V.17 : Les principaux modes d'usure observés sur les coussinets après les essais de grippage en chargement statique, aspect général (1), adhésion (2), arrachements (3), abrasion (4)**

Il est intéressant de noter l'absence d'usure érosive sur les coussinets. Du fait de la tendreté des matériaux, il se pourrait que ce phénomène ponctuel existe mais qu'il soit rapidement dissimulé par l'aplatissement plastique continu du bismuth par usure adhésive.

### V.2.3.b. Modifications texturales

L'analyse des coussinets montre que toutes les portées sont parties en grippage sur la couche sacrificielle de bismuth. L'enlèvement de matière, quoique négligeable, se concentre visuellement au milieu et dans une zone angulaire bien précise. La quantification précise de l'enlèvement de matière sur la circonférence du coussinet indique que seuls quelques microns ont été retirés localement, dans un secteur angulaire compris en 60° et 150°. On remarque que les coussinets ayant été en contact avec les textures hybrides apparaissent plus profondément usés (**Figure V.18.3** et **Figure V.18.4**), ce qui semble confirmer l'agressivité, en régime mixte, de ce genre de texture. En toute logique, avec les tendances

précédemment observées (précocité du grippage et phénomène de transfert), on note que l'usure croît sensiblement avec la profondeur des cavités.



**Figure V.18 : Enlèvement de matière moyen sur les coussinets après les essais de grippage en chargement statique, paramétrage angulaire (1) (2), pour des textures toilées (3), pour des textures hybrides (4)**

Une analyse plus détaillée des faces et des profils le long de la circonférence nous a permis d'apprécier l'évolution morphologique de la surface et les possibles transformations en sous-couches (**Figure V.19**). En totale correspondance avec les mesures d'enlèvement de matière, on remarque que la zone comprise entre 90° et 135° (**Figure V.19.7** et **Figure V.19.10**) est la plus touchée alors que les extrémités sont épargnées de toute usure (**Figure V.19.1** et **Figure V.19.13**). Excepté les modes d'usure habituels, on note, dans la zone de charge, la présence de fines fissures dans la couche sacrificielle de bismuth. Ce phénomène de fissuration reste toutefois marginal au vue de l'ensemble des analyses *MEB* qui ont été réalisées.

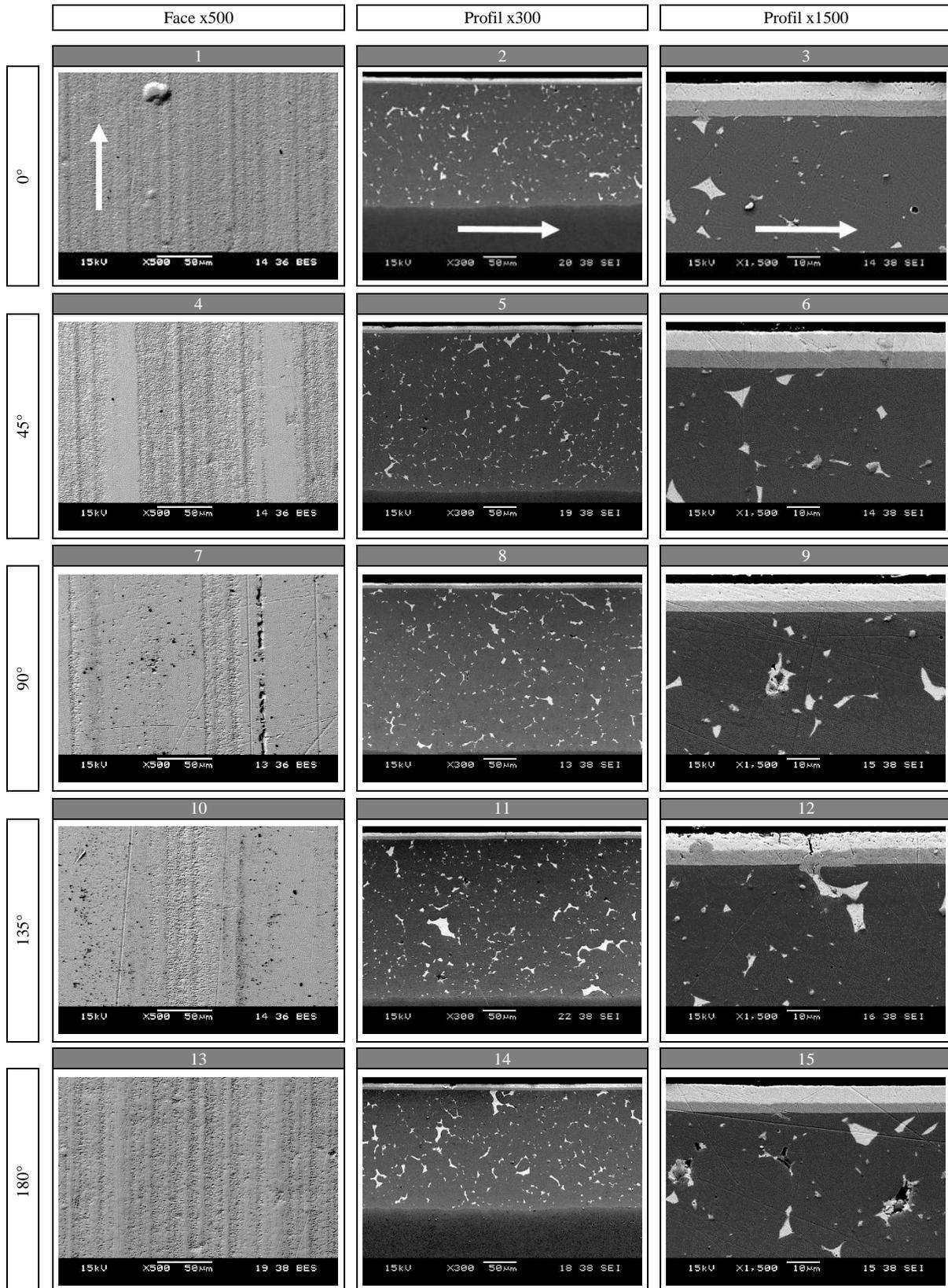


Figure V.19 : Évolution de l'usure coussinets le long de la demi-circonférence après les essais de grippage en chargement statique

#### **V.2.4. Conclusion**

Les essais réalisés ici sont riches en résultats et nous ont permis de révéler l'effet textural sur le comportement en « grippage début de vie » des paliers. Dans l'ensemble, et en prenant comme référence la texture actuelle « référence 1 », nous avons remarqué que les textures toilées « référence 2 », « poli miroir », « plateaux/vallées 1 » et « plateaux/vallées 2 » permettaient de repousser sensiblement le grippage, alors que les textures hybrides, en particulier les plus profondes, avaient tendance à le rendre plus précoce. En toute cohérence avec cette dernière observation, nous avons révélé, après analyse de l'usure, la présence d'un transfert de la couche de bismuth dans les cavités les plus profondes des textures hybrides. Ce phénomène, qui pourrait être initié par la présence d'arêtes vives aux bords des cavités, a généré des arrachements récurrents sur les faces actives de coussinets et semble avoir favorisé un enlèvement de matière excessif sur ce dernier. En dehors de la tenue en grippage, nous avons observé un lien étroit entre le frottement en régime hydrodynamique et la capacité de rétention des textures. Nous avons observé que les textures à forte rétention, telles que les textures « plateaux/vallées 2 » ou les textures « hybrides » profondes, présentaient les frottements hydrodynamiques les plus hauts alors que les textures à faible capacité de rétention, telles que les textures « poli miroir » et « plateaux/vallées 1 », présentaient ceux les plus bas.

### V.3. Effets de la texturation en chargement dynamique

Nous effectuons dans cette partie des essais en chargement dynamique nominal « début de vie » visant à étudier le comportement fonctionnel des portées texturées. Nous étudions l'évolution du couple de frottement  $C_f$ , de la température en dos de coussinet  $T_c$ , et de la résistance de contact  $R_c$ . Des analyses *MEB* sur les portées et les coussinets usés viendront compléter ces données. Afin d'améliorer la robustesse des tendances observables, ces essais fonctionnels, menés sur la *MAPD*, ont été doublés. La procédure et la configuration de la machine sont rappelées en **II.4.3**. Du fait de la contrainte temporelle, seules les portées toilées ont fait l'objet de cette étude.

#### V.3.1. Effets de la texturation sur les grandeurs fonctionnelles « *in process* »

À des fins de compréhension générale, nous avons tout d'abord suivi et enregistré les évolutions « *in process* » du triplet couple de frottement  $C_f$ , résistance électrique de contact  $R_c$  et température  $T_c$ , pour chaque configuration.

##### V.3.1.a. Observations générales

Selon la procédure, chaque essai se déroule en deux cycles de quinze heures sous un chargement dynamique, formé de la répétition d'un motif de charge élémentaire typique des chargements de bielle. Dans chaque cycle, le palier subit une phase de rodage d'une heure, au cours de laquelle une rampe de température de 70°C à 145°C est effectuée, puis une phase de maintien de quatorze heures, appelée phase nominale. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux phases de rodage, car elles sont le lieu de l'accommodation des surfaces portées/coussinets lors des premiers contacts solides/solides, donc potentiellement celles où l'effet textural est prédominant. La **Figure V.20** nous donne un exemple type de suivi « *in process* » durant les premières cent minutes de fonctionnement. Chaque point constitutif des courbes est calculé comme étant la moyenne des valeurs obtenues pour un motif de chargement élémentaire, soit deux révolutions d'éprouvettes. Après analyse, on observe deux zones bien distinctes selon la température d'entrée de l'huile  $T_h$  :

- en dessous d'une valeur critique de température  $T_h$  ( $< 130^\circ\text{C}$ ), le fonctionnement du palier s'apparente à un régime hydrodynamique. L'augmentation de la température d'entrée  $T_h$  entraîne la décroissance du couple de frottement  $C_f$  et la croissance linéaire de la température de contact  $T_c$ . La résistance de contact  $R_c$ , relativement stable, est importante mais sans être maximale. D'un point de vue physique, l'augmentation de la température d'entrée de l'huile a entraîné la chute de sa viscosité, ce qui a pour effet de diminuer l'épaisseur de film  $h$  et d'augmenter le taux de cisaillement de l'huile au sein du contact. Le pic de la consigne de charge, dans un premier temps amoindri par la forte portance hydrodynamique créée, engendre,

dans un second temps, la rupture du film et la génération de contacts solides/solides temporaires et très brefs. Dans l'ensemble, l'influence fonctionnelle de ces contacts reste marginale. Ce mode de fonctionnement est appelé par la suite « régime hydrodynamique équivalent ».

- au-dessus d'une valeur critique de température d'huile  $Th$  ( $> 130^{\circ}\text{C}$ ), le fonctionnement du palier se dégrade et s'apparente à un régime mixte. L'augmentation de la température d'entrée d'huile  $Th$  entraîne des perturbations sur le couple de frottement  $Cf$  et sur la température de contact  $Tc$ . La résistance de contact  $Rc$  chute brusquement mais sans atteindre zéro. D'un point de vue physique, la pression hydrodynamique est de plus en plus faible et l'influence des contacts solides/solides de moins en moins marginale. Le pic de charge est de moins en moins amorti. Le coussinet subit la majorité de la charge à cet instant et tend à se conformer à la surface de la portée en provoquant une montée en température au sein du contact et une augmentation du couple de frottement. Ce mode de fonctionnement est appelé par la suite « régime mixte équivalent ».

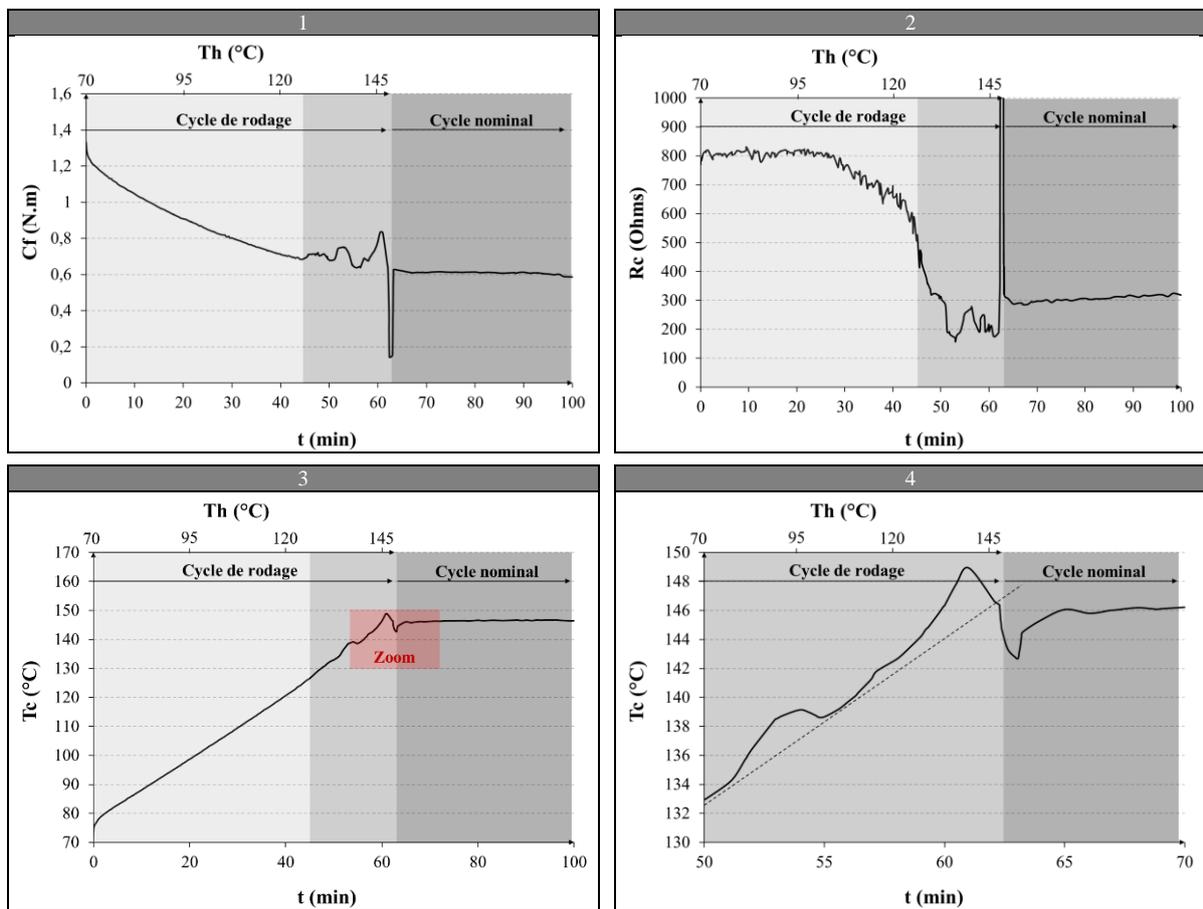


Figure V.20 : Exemple type de suivi « in process » lors des essais en chargement dynamique

L'accommodation peut continuer au-delà de la phase de rodage mais elle dépasse très rarement les cent premières minutes de fonctionnement. Après celle-ci, les différentes grandeurs restent stables.

V.3.1.b. Effets des textures sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process »

Les évolutions des principales grandeurs fonctionnelles « in process » pour les cinq configurations texturales sont données en **Figure V.21**. Les caractéristiques de couples de frottement  $C_f$  et de température de contact  $T_c$  sont très semblables mais semblent se distinguer, lors du premier cycle, par la précocité d'apparition du « régime mixte équivalent ». En particulier, l'analyse des résistances électriques de contact  $R_c$  montre que la transition du « régime hydrodynamique équivalent » vers le « régime mixte équivalent » est plus rapide pour la texture de « référence 1 » que pour les autres textures (**Figure V.21.5**). Cette tendance, également observée lors d'essais de mise au point, est toutefois à relativiser car elle n'est pas systématique. Le doublement des essais a d'ailleurs montré des résultats légèrement différents, avec une transition de la texture « référence 1 » beaucoup plus tardive, au même niveau que les autres textures. En dehors de ces considérations et en toute logique, le second cycle apparaît encore moins discriminant. Aucune perturbation soudaine assimilable à de l'accommodation de surfaces, et donc au « régime mixte équivalent », n'est observable sur les trois grandeurs fonctionnelles. Les différentes configurations texturales présentent des caractéristiques pour le moins semblables. Excepté ce fait, la résistance électrique de contact  $R_c$  est légèrement plus haute que dans le premier cycle du fait de l'accommodation des surfaces portées/coussinets entre elles.

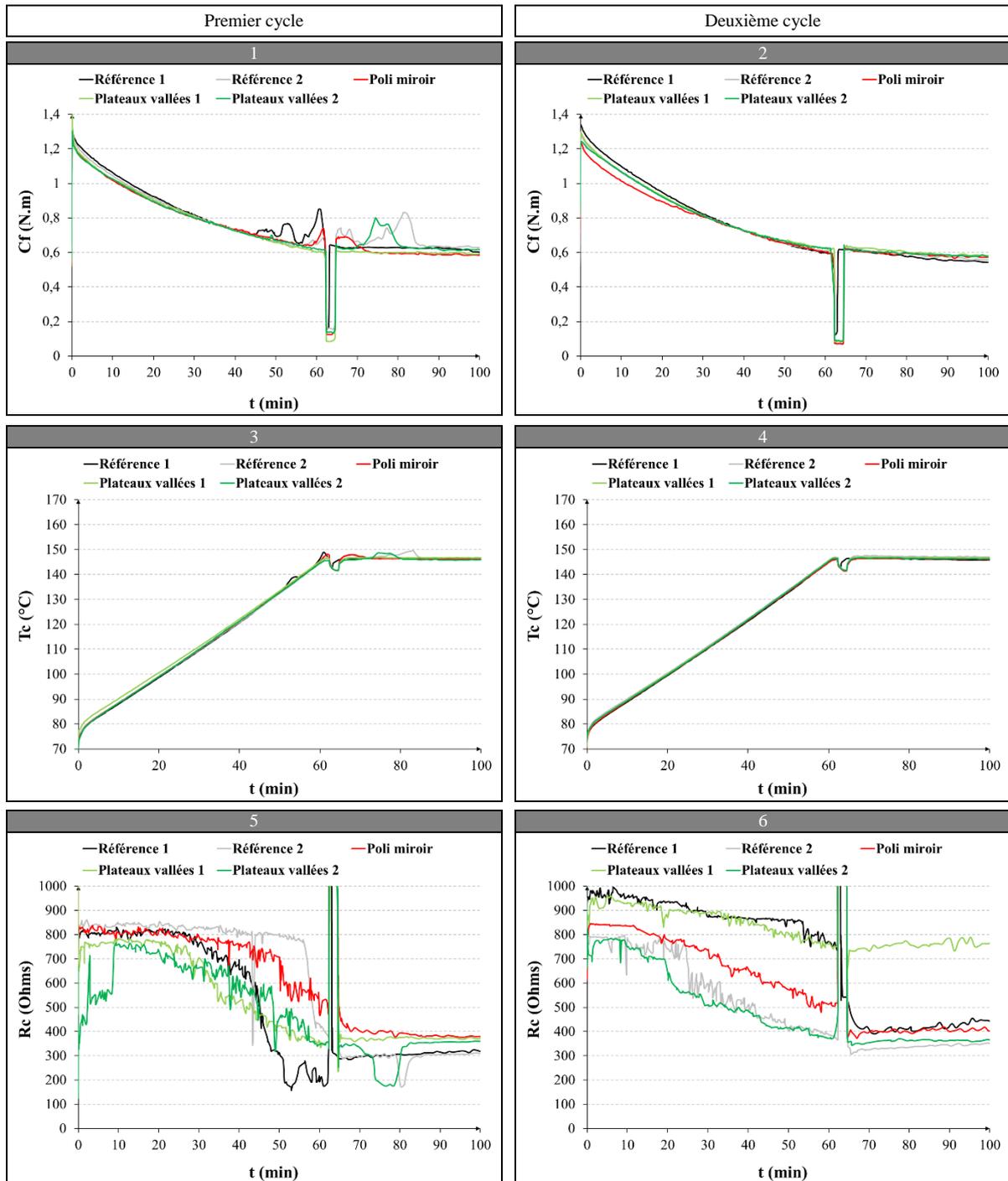


Figure V.21 : Effets des textures toilées sur l'évolution des grandeurs fonctionnelles « in process » lors des essais en chargement dynamique

### V.3.2. Analyse de l'usure sur les portées

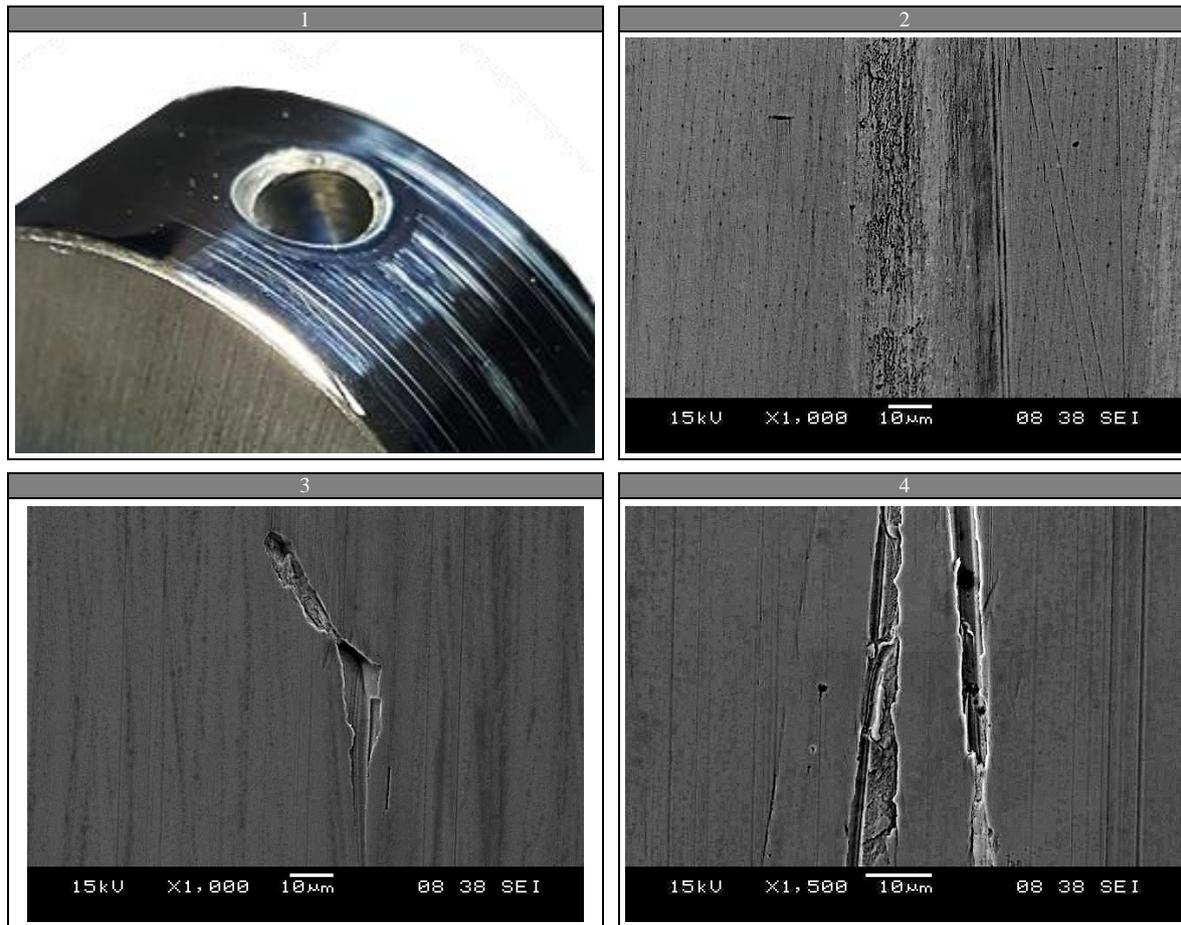
Au-delà de ces grandeurs fonctionnelles « in process », l'expertise des portées nous a permis de quantifier le degré d'usure engendré sur les différentes textures et de mieux comprendre le lien physique entre la fonctionnalité en chargement dynamique et les textures de surface.

### V.3.2.a. Modes d'usure

De manière tout à fait générale et en toute logique, les portées issues des essais en chargement dynamique sont nettement moins usées que les portées issues des essais de grippage en chargement statique. Les observations MEB des portées ont révélé la présence de trois modes d'usure.

On retrouve :

- l'usure adhésive, très fréquente, qui suit le même scénario qu'en **V.2.2.a (Figure V.22.2)** ;
- l'usure érosive, peu fréquente, qui suit là aussi le même scénario qu'en **V.2.2.a**. Comparées aux essais en chargement statique, les zones touchées par l'érosion sont plus éparées (**Figure V.22.3**) ;
- l'usure par écaillage, également peu fréquente et spécifique aux textures « plateaux/vallées », est la conséquence de la répétition des contacts solides/solides et de la fatigue du matériau dans les zones à proximité des arêtes vives. Dans le scénario le plus probable, la concentration de contraintes à la liaison entre plateaux et vallées favoriserait la génération de micro fissures, induisant, à terme, une destruction très localisée par écaillage (**Figure V.22.4**).



**Figure V.22 : Les principaux modes d'usure observés sur les portées après les essais en chargement dynamique, aspect général (1), adhésion (2), érosion (3), écaillage (3)**

Contrairement aux essais de grippage en chargement statique, nous n'avons pas relevé d'usure abrasive. D'un point de vue physique, l'instantanéité du pic de charge, et donc des contacts solides/solides entre la portée et le coussinet, pourrait permettre aux particules solides libres d'être rapidement évacuées du contact.

### V.3.2.b. Modifications texturales

Comme pour les essais de grippage, ces différents modes d'usure ont localement engendré de légères modifications texturales de la portée, en particulier dans la zone en amont du trou de lubrification. Contrairement aux résultats issus des essais menés en chargement statique, la comparaison avant/après des rugosités ISO 13565 montre qu'il n'y eu aucune altération majeure de l'état de surface. Seule une très faible augmentation de la profondeur de vallées  $Rvk$  et de la hauteur de pic  $Rpk$  est observée (**Figure V.23.2**).

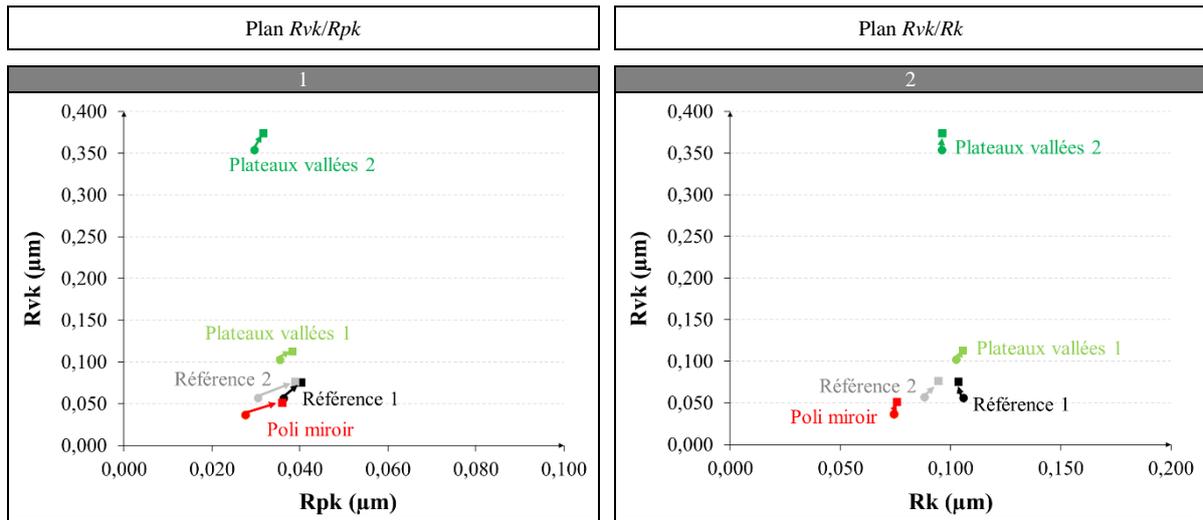


Figure V.23 : Usure texturale des portées toilées après les essais en chargement dynamique

### V.3.2.c. Transfert de couches sacrificielles de bismuth et d'argent

Les analyses MEB ont permis de révéler un transfert des couches sacrificielles des textures de type « plateaux/vallées ». Contrairement aux essais de grippage, le transfert a impacté à la fois la couche de bismuth et celle d'argent (Figure V.24.2). Ce constat traduit indirectement le fait que le coussinet est plus profondément usé en chargement dynamique. Nous n'avons noté aucun transfert du substrat en bronze.

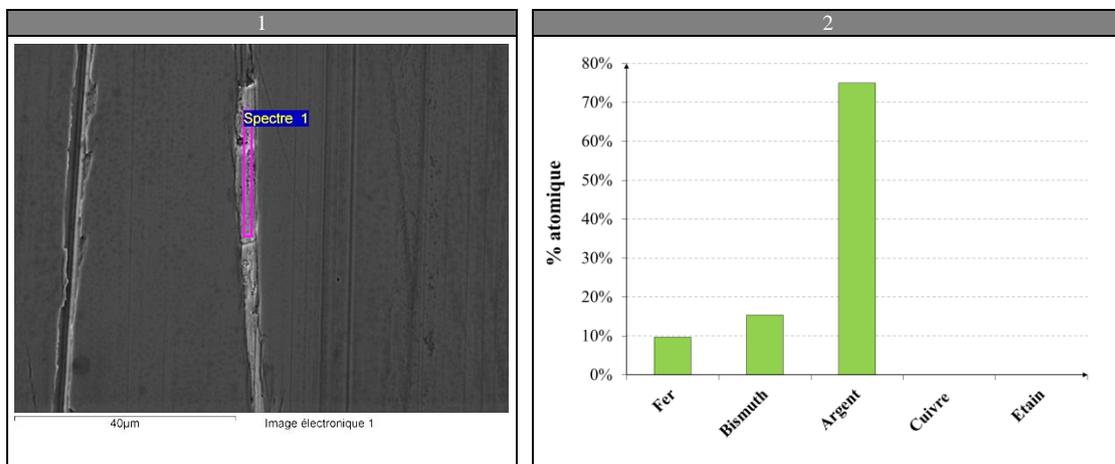


Figure V.24 : Observations MEB du phénomène de transfert sur une texture « plateaux/vallées » après les essais en chargement dynamique

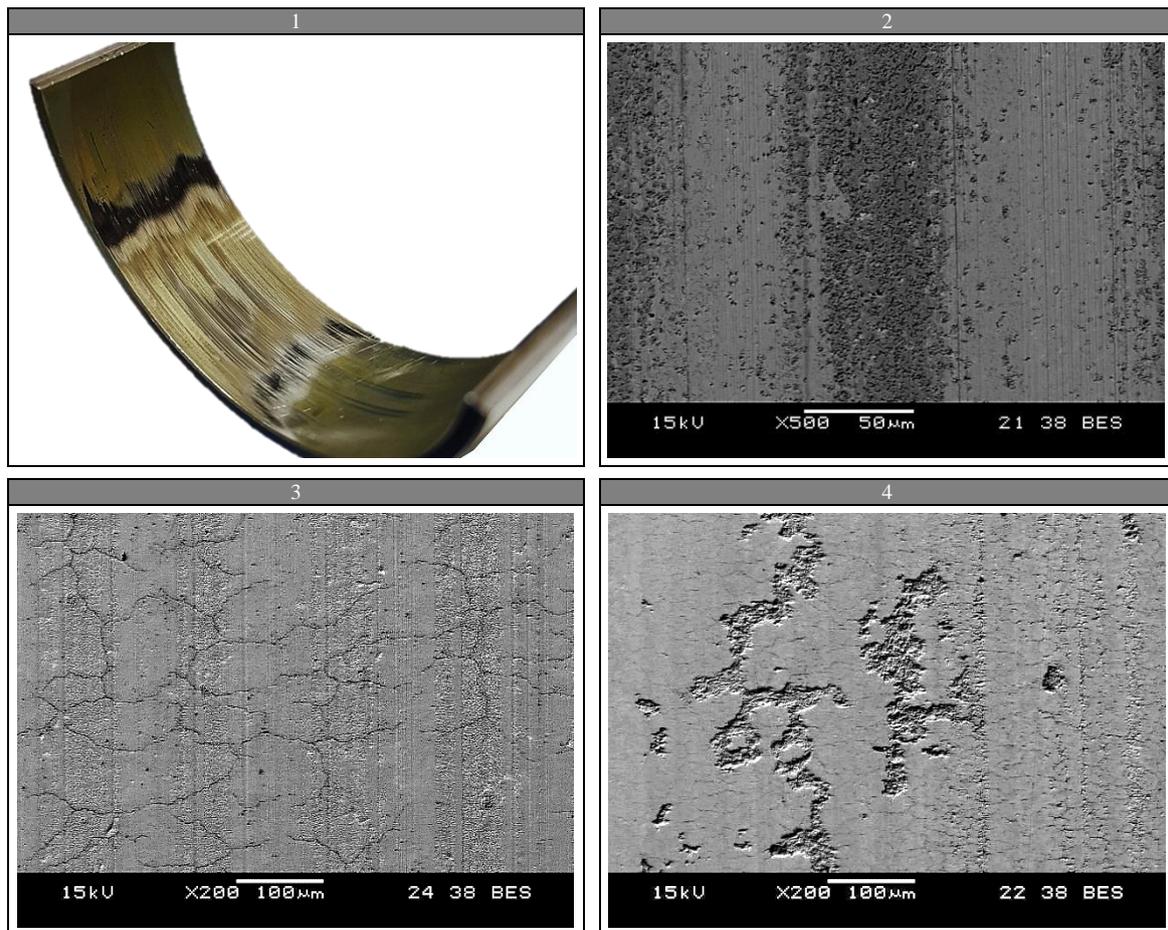
### V.3.3. Analyse de l'usure des coussinets

Là encore, l'analyse des coussinets nous a permis de mieux tracer l'évolution de l'usure et de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu.

### V.3.3.a. Modes d'usure

Après une analyse détaillée des faces de coussinets, on constate deux modes d'usure principaux :

- l'usure adhésive, très fréquente, qui suit le même scénario qu'en V.2.3.a (*Figure V.25.2*) ;
- l'usure par fatigue, très fréquente, qui est la conséquence de la répétition des contacts solides/solides entre la portée et les deux couches anti-friction des coussinets. Ce mode d'usure, qui n'est pas observé en chargement statique, a pour conséquence de fissurer (*Figure V.25.3*) puis d'écailler progressivement le bismuth et l'argent (*Figure V.25.4*).

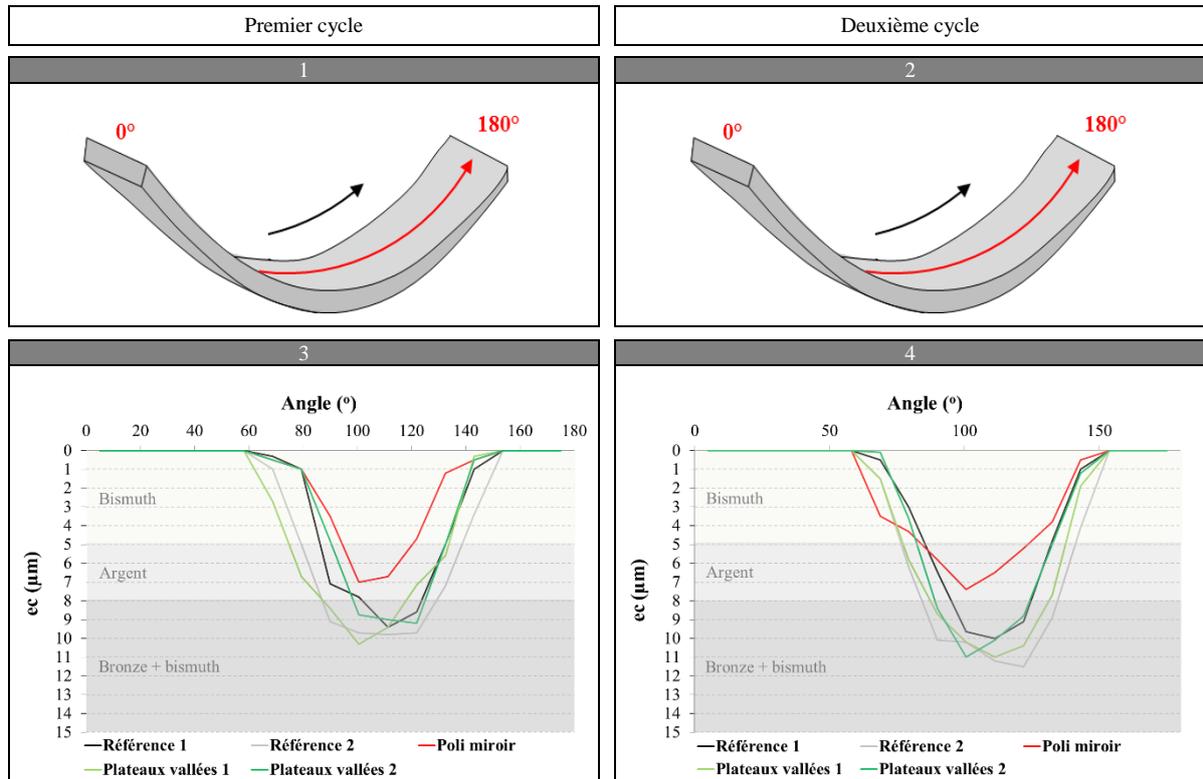


*Figure V.25 : Les principaux modes d'usure observés sur les coussinets après les essais en chargement dynamique, aspect général (1), adhésion (2), fissuration par fatigue (3), écaillage par fatigue (3)*

### V.3.3.b. Modifications texturales

Dans l'ensemble, l'analyse des coussinets montre que les couches sacrificielles ont été fortement consommées par les contacts répétés. L'enlèvement de matière, quoique négligeable, se concentre visuellement au centre et dans une zone angulaire bien précise, à environ  $110^\circ$  du plan de joint. La quantification précise de l'enlèvement moyen de matière sur la circonférence du coussinet semble indiquer un réel effet textural. Alors que les autres textures engendrent un enlèvement de matière sur le

coussinet *ec* équivalent, la texture « poli miroir » quant à elle, permet de le minimiser d'environ 3  $\mu\text{m}$ , que ce soit après le premier ou le deuxième cycle.



**Figure V.26 : Enlèvement de matière moyen sur les coussinets après les essais en chargement dynamique, paramétrage angulaire (1) (3), après le premier cycle (2), après le deuxième cycle (4)**

L'analyse plus détaillée des faces et des profils le long de la circonférence nous a permis, après les essais, d'apprécier l'évolution morphologique de la surface et les possibles transformations en sous-couches (**Figure V.27**). Celles-ci sont là aussi en totale correspondance avec les mesures d'enlèvement de matière. On constate effectivement la disparition des couches de bismuth et d'argent entre 90° et 135° (**Figure V.27.9** et **Figure V.27.12**). Le substrat, composé de bronze et de bismuth (tâches blanchâtres) est alors partiellement voire totalement découvert (**Figure V.27.10**).

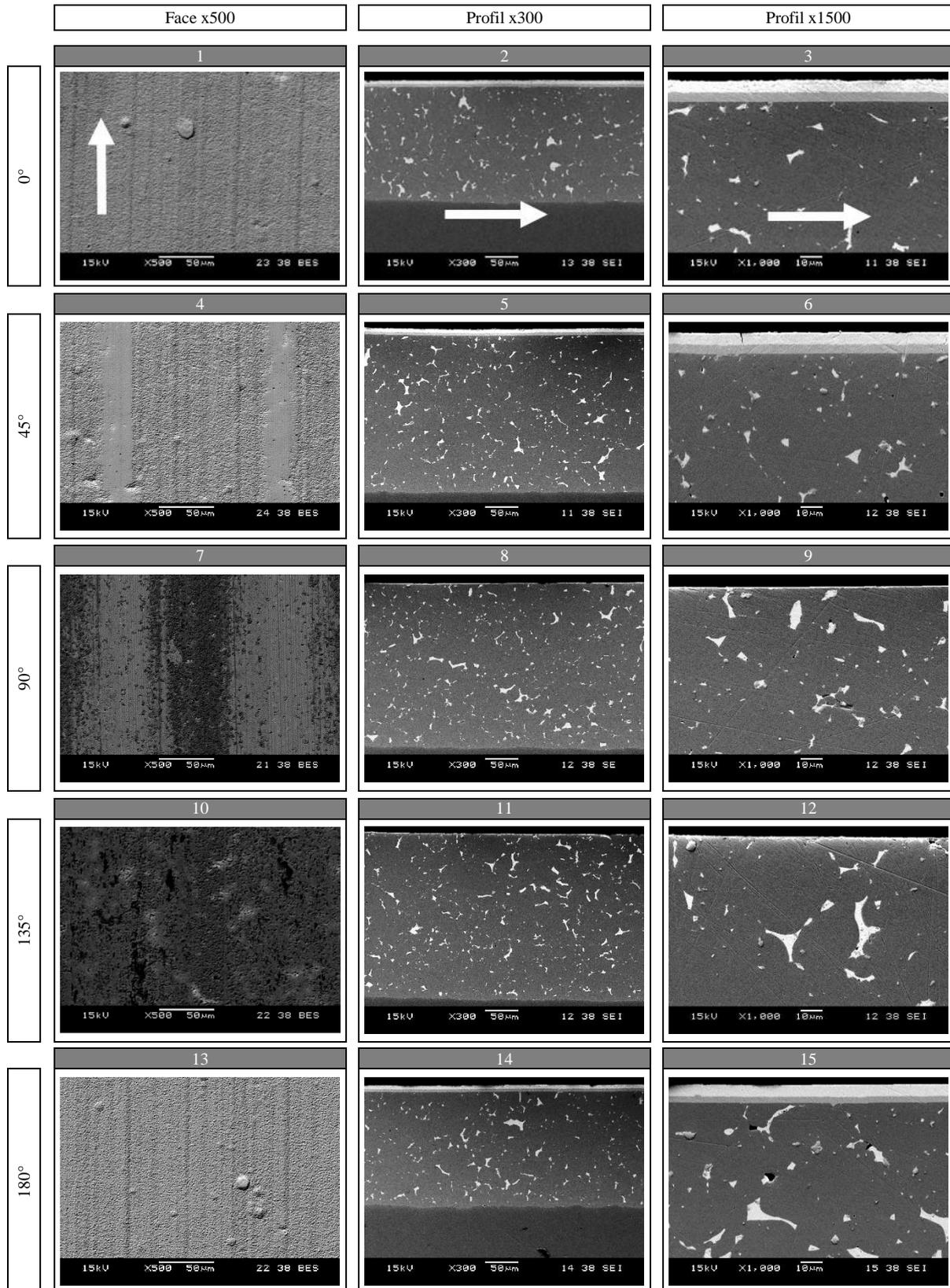


Figure V.27 : Évolution de l'usure de coussinets le long de la demi-circonférence après les essais en chargement dynamique

### V.3.4. Conclusion

Nous avons observé dans cette partie que les grandeurs fonctionnelles « *in process* » étaient peu impactées par les différentes configurations texturales en chargement dynamique. Dans l'ensemble, seule l'usure coussinet semble être discriminante. À travers elle, nous avons pu observer que les textures « poli miroir » étaient moins agressives pour le coussinet. En dehors de l'usure, et en considérant nos multiples essais de mise au point, nous avons pu en outre noter que l'apparition en phase de rodage du « régime mixte équivalent » était globalement légèrement plus précoce dans le cas des textures « référence 1 » que pour les autres textures. Ces effets étayent les tendances et les hypothèses émises suite aux essais de grippage en chargement statique.

## Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'étude fonctionnelle « début de vie » des portées de vilebrequins texturées. En lien avec les attentes industrielles, nous nous sommes concentrés sur des textures innovantes réalisables à court ou moyen terme par les lignes de production. Ce travail a été l'opportunité de montrer la faisabilité du procédé laser à produire un réseau de cavités homogènes, plus ou moins dense et profond, sur l'intégralité d'une surface cylindrique.

Quatre familles de morphologie de textures ont été étudiées :

- les textures de « référence », fabriquées en toilage conventionnel ;
- les textures « poli miroir », fabriquées en toilage texturant en multipliant le nombre de passes ;
- les textures « plateaux/vallées », fabriquées en toilage texturant ;
- les textures « hybrides », fabriquées par une combinaison entre le toilage conventionnel et le procédé laser.

Parmi l'ensemble des textures testées, les textures « poli miroir » sont à prioriser sur les portées de vilebrequins. Elles repoussent l'apparition du grippage et permettent de réduire l'usure sur le coussinet lors d'un chargement nominal représentatif. Bien que très prometteuses d'un point de vue process, les configurations texturales à fortes rétention, telles que les « hybrides », n'améliorent pas voire dégradent fortement la fonctionnalité. L'augmentation de la profondeur des cavités laser des textures hybrides a ainsi réduit la charge admissible de grippage  $W_{grippage}$  jusqu'à environ un tiers de sa valeur de référence, tout en augmentant fortement l'usure sur le coussinet *ec*. Les textures à plus faibles rétentions, telles que les textures « plateaux/vallées », qui présentent pourtant un comportement en grippage semblable à la texture « poli miroir », tendent à accroître l'usure sur le coussinet. Par ailleurs, l'analyse des pièces usées a révélé que les espaces de rétention (cavités ou vallées) favorisaient les phénomènes de transfert des couches anti-frictions sur la portée et engendraient des arrachements sur les coussinets.

Ces essais de caractérisation fonctionnelle, qui ont été conçus et réalisés afin d'être les plus représentatifs des conditions de fonctionnement réelles (huile, charge, température, matériaux, diamètre des portées et défauts de forme), ont ainsi permis de montrer expérimentalement la non pertinence fonctionnelle d'une texturation complète de la portée au niveau des échelles de rugosité.

# Conclusion générale et perspectives

Ces travaux de recherche expérimentaux se sont articulés en trois axes :

- un premier relatif à l'identification des limites du procédé de toilage dans des configurations usines (toilage conventionnel) ;
- un second relatif au développement de la texturation par toilage par combinaison de plusieurs structures abrasives (toilage texturant) ;
- et enfin un troisième dédié à l'étude fonctionnelle d'un lot de textures produites par toilage et *LST*.

Notre synthèse bibliographique a mis en lumière les différentes problématiques qui entourent actuellement la texturation. Nous avons recensé peu d'études expérimentales sur la texturation des portées et celles déjà existantes se sont révélées peu représentatives des conditions de contact vilebrequin/bielle. Plusieurs travaux numériques sur le sujet tendent à montrer que la texturation n'apporte pas de gain voire dégrade la fonctionnalité. Plus largement, pour tout type de contact confondu, la texturation est souvent présentée comme pouvant être aussi bien bénéfique que néfaste, selon les paramètres texturaux et les conditions de fonctionnement. Élément notable, aucune étude portant spécifiquement sur les capacités de texturation du toilage n'a été trouvée.

Suite à ce travail de synthèse, une large étude a permis d'identifier statistiquement les variables influentes et les limites, en terme textural, des configurations de toilage industrielles actuelles (toilage conventionnel). Nous avons montré que ces configurations étaient fortement régénératrices et ne permettaient, de facto, le dégroupage entre les pics et les vallées de la rugosité. Après analyse croisée des signatures abrasives des bandes conventionnelles et de l'enlèvement de matière, nous avons émis l'hypothèse que les limites texturales du procédé pouvaient être levées en utilisant des structures abrasives moins agressives. Un benchmarking des différentes technologies d'abrasifs nous a ensuite permis d'identifier un certain nombre de produits potentiellement adaptés à notre problématique. Parmi elles, les bandes de polissage, généralement dédiées à l'industrie de la fibre optique, se sont révélées particulièrement pertinentes.

Le travail engagé sur le développement des capacités de texturation du toilage a montré qu'il était possible de produire une véritable diversité de surfaces en combinant intelligemment, passe après passe, les structures conventionnelles aux structures de polissage. Ces configurations innovantes, que nous avons désignées sous le terme « toilage texturant », ont permis de fabriquer des surfaces toilées « plateaux/vallées » et « poli miroir » (par duplication des passes). Un code de calcul a été développé afin de caractériser au mieux ces surfaces atypiques. Celui-ci nous a permis de quantifier finement un certain nombre de paramètres texturaux (rapport largeur sur profondeurs des vallées  $L_v/P_v$ , angle

d'ouverture des vallées  $\beta_v$ , angle de striation moyen  $\alpha_{t_{moy}}$ , densité de vallées de la surface  $dv$ , densité de rétention de la surface  $dr$ ), très difficilement quantifiables avec les paramètres standards.

Des essais de caractérisation fonctionnelle statique et dynamique ont été ensuite réalisés afin de quantifier les possibles gains offerts par de telles textures. En plus des textures toilées, des textures hybrides, produites par combinaison du toilage et du *LST*, ont été considérées. Malgré les dispersions de mesures observées, des gains sont observables par rapport à la configuration texturale actuelle. Sur l'ensemble des textures testées, il s'est avéré que les surfaces « poli miroir » étaient celles présentant les meilleurs résultats. Celles-ci ont montré une meilleure tenue en grippage tout en permettant de réduire l'usure sur le coussinet. En comparaison, les textures « plateaux/vallées » ont présenté des charges en grippage équivalentes mais n'ont pas permis de réduire l'usure sur les coussinets. Bien à l'opposé, il s'est avéré que les textures « hybrides » n'améliorent pas, voire dégradent fortement la tenue en grippage et augmentent l'usure du coussinet. L'analyse des pièces usées a révélé que la présence des cavités et, dans une moindre mesure, des vallées, favorisait les phénomènes de transfert des couches anti-friction sur la portée et engendrait des arrachements sur les coussinets.

L'influence de la texturation dans le cas des portées de vilebrequins est une problématique particulièrement délicate, principalement du fait de la cylindricité du contact, de la complexité des coussinets et de l'effet difficilement quantifiable d'un certain nombre de paramètres, comme les erreurs de formes, les additifs ou encore la contamination de l'huile. Malgré ces éléments, ce travail expérimental a réussi à atteindre les objectifs fixés initialement. Le toilage texturant ouvre la voie à bon nombre d'études ultérieures. Certaines sont déjà identifiées. Ainsi, des études « Start and Stop » et d'endurance devraient prochainement compléter les tendances fonctionnelles observées ici. D'autres encore devront s'intéresser à l'effet fonctionnel de l'angle de striation et des défauts de forme. Par ailleurs, et considérant certains travaux récents de la littérature, la texturation partielle des coussinets devrait également être traitée.

---

# Références

- [1] **J. Frêne, D. Nicolas, B. Degueurce, D. Berthe, M. Godet**, Lubrification hydrodynamique, paliers et butées, *EYROLLES*. (1990).
- [2] **J.L. Ligier**, Lubrification des paliers moteurs, *TECHNIP*. (1997).
- [3] **K. Holmberg, P. Andersson, A. Erdemir**, Global energy consumption due to friction in passenger cars, *Tribology International*. 47 (2012) 221–234.
- [4] **Airparif**, Inventaire régional des émissions en Ile de France, *Année de Référence 2012*. (2016).
- [5] **R. Stribeck**, Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, (1902).
- [6] **J. Ayel, M. Born**, Lubrifiants et fluides pour l'automobile, *TECHNIP*. (1998).
- [7] **A. Sommerfeld**, Zur hydrodynamischen theorie der schiermittelreibung, *Z. Angew. Math. Phys.* 50 (1904) 97–155.
- [8] **F. Ocvirk, G. Dubois**, Analytical derivation and experimental evaluation of short bearing approximations of full journal bearing, *NACA, Tech. Rep.* (1953) 1157.
- [9] **Renault**, Politique technique coussinet, *SCI*. (2015).
- [10] **D. Bechert, M. Bruse, W. Hage**, Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin, *Experiments in Fluids*. 28 (2000) 403–412.
- [11] **W. Barthlott, C. Neinhuis**, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*. 202 (1997) 1–8.
- [12] **D. Hamilton, J. Walowit, C. Allen**, A theory of lubrication by micro-irregularities, *Journal of Basic Engineering*. (1966) 177–185.
- [13] **D. Moore**, Drainage criteria for runway surface roughness, *Royal Aeronautical Society*. 3 (1965).
- [14] **J. Williamson, R. Hunt**, Relocation profilometry, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1 (1968) 749.
- [15] **S. Tzeng, E. Saibel**, Surface roughness effect on slider bearing lubrication, *ASLE Transactions*. 10 (1967) 334–338.
- [16] **H. Christensen**, Stochastic models for hydrodynamic lubrication of rough surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 184 (1969) 1013.
- [17] **H. Christensen, K. Tønder**, The hydrodynamic lubrication of rough bearing surface of finite width, *Journal of Lubrication Technology*. 93 (1971) 324.

- 
- [18] **K. Tønder, H. Christensen**, Waviness and roughness in hydrodynamic lubrication, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 186 (1972) 807.
- [19] **L. Chow, H. Cheng**, Influence of surface roughness on average film thickness between lubricated rollers, *Journal of Lubrication Technology*. 98 (1976) 117.
- [20] **N. Patir, H. Cheng**, An average flow model for determining effects of three dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication, *Journal of Lubrication Technology*. 100 (1978) 12–18.
- [21] **N. Patir, H. Cheng**, Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces, *Journal of Lubrication Technology*. 101 (1979) 220–230.
- [22] **T. Kato, S. Obara**, Improvement in dynamic characteristics of circular journal bearings by means of longitudinal microgrooves, *Tribology Transactions*. 39 (1996) 462–468.
- [23] **Y. Kumada, K. Hashizume, Y. Kimura**, Performance of plain bearings with circumferential micro-grooves, *Tribology Transactions*. 39 (1996) 81–86.
- [24] **D. Gropper, L. Wang, T. Harvey**, Tribology International Hydrodynamic lubrication of textured surfaces : A review of modeling techniques and key findings, *Tribology International*. 94 (2016) 509–529.
- [25] **N. Saka, M. Lio, N. Suh**, The role of tribology in electrical contact phenomena, *Wear*. 100 (1984) 77–105.
- [26] **M. Varenberg, G. Halperin, I. Etsion**, Different aspects of the role of wear debris in fretting wear, *Wear*. 252 (2002) 902–910.
- [27] **U. Pettersson, S. Jacobson**, Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts, *Tribology International*. 36 (2003) 857–864.
- [28] **A. Borghi, E. Gualtieri, D. Marchetto, L. Moretti, S. Valeri**, Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications, *Wear*. 265 (2008) 1046–1051.
- [29] **E. Gualtieri, A. Borghi, L. Calabri, N. Pugno, S. Valeri**, Increasing nanohardness and reducing friction of nitride steel by laser surface texturing, *Tribology International*. 42 (2009) 699–705.
- [30] **H. Tian, N. Saka, N. Suh**, Boundary lubrication of undulated metal surfaces at elevated temperatures, *Tribology Transactions*. 32 (1989) 289–296.
- [31] **I. Křupka, M. Hartl**, The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films, *Tribology International*. 40 (2007) 1100–1110.
- [32] **I. Křupka, M. Vrbka, M. Hartl**, Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts, *Tribology International*. 41 (2008) 1063–1073.
- [33] **I. Křupka, R. Poliščuk, M. Hartl**, Behavior of thin viscous boundary films in lubricated contacts between micro-textured surfaces, *Tribology International*. 42 (2009) 535–541.

- 
- [34] **I. Křupka, P. Svoboda, M. Hartl**, Effect of surface topography on mixed lubrication film formation during start up under rolling / sliding conditions, *Tribology International*. 43 (2010) 1035–1042.
- [35] **Y. Uehara, M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki, S. Sakaguchi**, Tribological properties of dimpled silicon nitride under oil lubrication, *Journal of the European Ceramic Society*. 24 (2004) 369–373.
- [36] **P. Pawlus, L. Galda, A. Dzierwa, W. Koszela**, Abrasive wear resistance of textured steel rings, *Wear*. 267 (2009) 1873–1882.
- [37] **S. Mishra, A. Polycarpou**, Tribological studies of unpolished laser surface textures under starved lubrication conditions for use in air-conditioning and refrigeration compressors, *Tribology International*. 44 (2011) 1890–1901.
- [38] **M.H. Cho, S. Park**, Micro CNC surface texturing on polyoxymethylene ( POM ) and its tribological performance in lubricated sliding, *Tribology International*. 44 (2011) 859–867.
- [39] **W. Ze, D. Jianxin, X. Youqiang, C. Hongwei, Z. Jun**, Effect of surface texturing on friction properties of WC / Co cemented carbide, *Material and Design*. 41 (2012) 142–149.
- [40] **Z. Wu, Y. Xing, P. Huang, L. Liu**, Tribological properties of dimple-textured titanium alloys under dry sliding contact, *Surface & Coatings Technology*. 309 (2017) 21–28.
- [41] **A. de Kraker, R. a. J. van Ostayen, A. van Beek, D.J. Rixen**, A multiscale method modeling surface texture effects, *Journal of Tribology*. 129 (2007) 221.
- [42] **R. Ausas, P. Ragot, J. Leiva, M. Jai, G. Bayada, G. Buscaglia**, The impact of cavitation model in the analysis of microtextured lubricated journal bearings, *Journal of Tribology*. 129 (2007) 868–875.
- [43] **I. Etsion, L. Burstein**, A model for mechanical seals with regular microsurface structure, *Tribology Transactions*. 39 (1996) 677–683.
- [44] **I. Etsion, Y. Kligerman, G. Halperin**, Analytical and experimental investigation of laser textured mechanical seal faces, *Tribology Transactions*. 42 (1999) 511–516.
- [45] **P. Bradjic, A. Gosman, E. Ionnides, H. Spikes**, CFD analysis of a low friction pocketed pad bearing, *Journal of Tribology*. 127 (2005) 803–812.
- [46] **M. Fowell, S. Medina, A. Olver, H. Spikes, I. Pegg**, Parametric study of texturing in convergent bearings, *Tribology International*. 52 (2012) 7–16.
- [47] **H. Wang, S. Yang, F. Guo**, Modeling of a grooved parallel bearing with a mass-conserving algorithm, *Tribology Transactions*. 64 (2011) 227–236.
- [48] **L. Mourier, D. Mazuyer, A. Lubrecht, C. Donnet**, Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts, *Tribology International*. 39 (2006) 1745–1756.
- [49] **M. Geiger, S. Roth, W. Becker**, Influence of laser-produced microstructures on the tribological behaviour of ceramics, *Surface and Coatings Technology*. 101 (1998) 17–22.

- 
- [50] **S. Cupillard, M.J. Cervantes, S. Glavatskih**, Pressure buildup mechanism in a textured inlet of a hydrodynamic contact, *Journal of Tribology*. 130 (2008) 021701.
- [51] **S. Cupillard, M.J. Cervantes, S. Glavatskih**, A cfd study of a finite textured journal bearing, *IAHR 24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*. (2008).
- [52] **H. Costa, I. Hutchings**, Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions, *Tribology International*. 40 (2007) 1227–1238.
- [53] **M. Arghir, N. Roucou, M. Helene, J. Frene**, Theoretical analysis of the incompressible laminar flow in a macro-roughness cell, *Journal of Tribology*. 125 (2003) 309.
- [54] **F. Sahlin, A. Almqvist, R. Larsson, S. Glavatskih**, Two-dimensional CFD-analysis of micro-patterned surfaces in hydrodynamic lubrication, *Journal of Tribology*. 127 (2005) 96–102.
- [55] **M. Dobrica, M. Fillon**, About the validity of Reynolds equation and inertia effects in textured sliders of infinite width, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 223 (2009) 69–78.
- [56] **M. Suh, Y. Chae, S. Kim, T. Hinoki, A. Kohyama**, Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction, *Tribology International*. 43 (2010) 1508–1517.
- [57] **X. Lu, M. Khonsari**, An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings, *Tribology Letters*. 27 (2007) 169–176.
- [58] **L. Galda, A. Dzierwa, J. Sep, P. Pawlus**, The effect of oil pockets shape and distribution on seizure resistance in lubricated sliding, *Tribology Letters*. 37 (2009) 301–311.
- [59] **H. Adatepe, A. Biyıklıoglu, H. Sofuoğlu**, An experimental investigation on frictional behavior of statically loaded micro-grooved journal bearing, *Tribology International*. 44 (2011) 1942–1948.
- [60] **W. Koszela, A. Dzierwa, L. Galda, P. Pawlus**, Experimental investigation of oil pockets effect on abrasive wear resistance, *Tribology International*. 46 (2012) 145–153.
- [61] **A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fenske**, Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact, *Wear*. 271 (2011) 1719–1725.
- [62] **D. Sander, H. Allmaier, H. Priebsch, M. Witt, A. Skiadas**, Simulation of journal bearing friction in severe mixed lubrication – Validation and effect of surface smoothing due to running-in, *Tribology International*. 96 (2016) 173–183.
- [63] **L. Abdel-latif, S. Tzeng, E. Saibel, H. Christensen, H. Elrod, S. Rhow, N. Patir, H. Cheng, M. Ammam**, Analysis of Finite Journal Bearings with Longitudinal and Transversal Rough Surfaces, *Forschung Im Ingenieurwesen*. 52 (1986) 1–6.
- [64] **A. Raj, P. Sinha**, Surface roughness effects in dynamically loaded short bearings, *Acta Mechanica*. 213 (1993) 199–213.
- [65] **H. Chiang, J. Lin, C. Hsu, Y. Chang**, Linear stability analysis of a rough short journal bearing lubricated with non-Newtonian fluids, *Tribology Letters*. 17 (2004) 867–877.

- 
- [66] **J.R. Lin**, The influences of longitudinal surface roughness on sub-critical and super-critical limit cycles of short journal bearings, *Applied Mathematical Modelling*. 38 (2014) 392–402.
- [67] **J.R. Lin**, Application of Hopf bifurcation theory to limit cycle prediction of short journal bearings with isotropic roughness effects, *Journal of Tribology*. 221 (2007) 869–879.
- [68] **J.R. Lin**, The surface roughness effects of transverse patterns on Hopf bifurcation behaviors of short journal bearings, *Ind. Lubr. Tribol.* 64 (2012) 265–270.
- [69] **R. Turaga, A.S. Sekhar, B.C. Majumdar**, The effect of roughness parameter on the performance of hydrodynamic journal bearings with rough surfaces, *Tribology International*. 32 (1999) 231–236.
- [70] **M. Dobrica, M. Fillon, P. Maspeyrot**, Mixed elastohydrodynamic lubrication in a partial journal bearing—comparison between deterministic and stochastic models, *Journal of Tribology*. 128 (2006) 778.
- [71] **M. Mongkolwongrojn, C. Aiumpronsin**, Stability analysis of rough journal bearings under TEHL with non-Newtonian lubricants, *Tribology International*. 43 (2010) 1027–1034.
- [72] **N. Tala-Ighil, M. Fillon, P. Maspeyrot**, Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing, *Tribology International*. 44 (2011) 211–219.
- [73] **V. Brizmer, Y. Kligerman**, A laser surface textured journal bearing, *Journal of Tribology*. 134 (2012) 031702.
- [74] **K. Gupta, R. Kumar, H. Kumar, M. Sharma**, Study on effect of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 3 (2013) 49–54.
- [75] **Y. Lu, Y. Liu, J. Wang**, Experimental investigation into friction performance of dimples journal bearing with phyllotactic pattern, *Tribology Letters*. 55 (2014) 271–278.
- [76] **C. Sinanoğlu, F. Nair, M.B. Karamış**, Effects of shaft surface texture on journal bearing pressure distribution, *Journal of Materials Processing Technology*. 168 (2005) 344–353.
- [77] **M. Dobrica, M. Fillon**, Performance degradation in scratched journal bearings, *Tribology International*. 51 (2012) 1–10.
- [78] **A. Quiñonez, G. Morales-espejel**, Surface roughness effects in hydrodynamic bearings, *Tribology International*. 98 (2016) 212–219.
- [79] **E. Sura**, Analyse tribo-energetique du procédé de toilage des portées cylindriques en acier traité et en fonte a graphite sphéroïdal, *PhD*. (2007).
- [80] **M.C. Shaw**, Principles of abrasive processing, *Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford*. (1996).
- [81] **W.R. Backer, E.R. Marshall, M.C. Shaw**, The size effect in metal cutting, *Trans. ASME*. 74 (1952) 61–72.
- [82] **M.C. Shaw, D.A. Farmer, K. Nakayama**, Mechanics of the abrasive cut-off operation, *Trans. ASME J. Eng. Ind.* 89 (1967) 495–502.
-

- [83] **M.C. Shaw**, Fundamentals of the grinding process., *Proceedings of the International Grinding Conference, Carnegie Press, Pittsburgh, PA.* (1972) 220–258.
- [84] **A. Jourani, M. Dursapt, H. Hamdi, J. Rech, H. Zahouani**, Effect of the belt grinding on the surface texture : Modeling of the contact and abrasive wear, *Wear.* 259 (2005) 1137–1143.
- [85] **A. Khellouki, J. Rech, H. Zahouani**, The effect of abrasive grain 's wear and contact conditions on surface texture in belt finishing, *Wear.* 263 (2007) 81–87.
- [86] **S. Mezghani, E. Sura, M. El Mansori**, The effect of belt finishing process variables on the topography of finished surfaces, *Tribology Transactions.* 51 (2008) 413–421.
- [87] **S. Mezghani, M. El Mansori, E. Sura**, Wear mechanism maps for the belt finishing of steel and cast iron, *Wear.* 267 (2009) 86–91.
- [88] **M. El Mansori, E. Sura, P. Ghidossi, S. Deblaise, T. Dal, H. Khanfir**, Toward physical description of form and finish performance in dry belt finishing process by a tribo-energetic approach, *Journal of Materials Processing Technology.* 182 (2007) 498–511.
- [89] **P. Andersson, J. Koskinen, S. Varjus, Y. Gerbig, H. Haefke, S. Georgiou, B. Zhmud, W. Buss**, Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces, *Wear.* 262 (2007) 369–379.
- [90] **B. Raeymaekers, I. Etsion, F.E. Talke**, Enhancing tribological performance of the magnetic tape/guide interface by laser surface texturing, *Tribology Letters.* 27 (2007) 89–95.
- [91] **L. Rapoport, A. Moshkovich, V. Perfilyev, I. Lapsker, G. Halperin, Y. Itovich, I. Etsion**, Friction and wear of MoS<sub>2</sub> films on laser textured steel surfaces, *Surface and Coatings Technology.* 202 (2008) 3332–3340.
- [92] **L.M. Vilhena, M. Sedlaček, B. Podgornik, J. Vižintin, A. Babnik, J. Možina**, Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser, *Tribology International.* 42 (2009) 1496–1504.
- [93] **B. Kim, Y.H. Chae, H.S. Choi**, Effects of surface texturing on the frictional behavior of cast iron surfaces, *Tribology International.* 70 (2014) 128–135.
- [94] **G. Dumitru, V. Romano, H.P. Weber, H. Haefke, Y. Gerbig, E. Pfluger**, Laser micro structuring of steel surfaces for tribological applications, *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 70 (2000) 485–487.
- [95] **G. Dumitru, V. Romano, H.P. Weber, M. Sentis, W. Marine**, Femtosecond ablation of ultrahard materials, *Applied Physics A.* 739 (2002) 729–739.
- [96] **G. Dumitru, B. Lüscher, M. Krack, S. Bruneau, J. Hermann, Y. Gerbig**, Laser processing of hardmetals : physical basics and applications, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 23 (2005) 278–286.
- [97] **I. Etsion**, State of the art in laser surface texturing, *Journal of Tribology.* 127 (2005) 248.
- [98] **H. Costa, I. Hutchings**, Development of a maskless electrochemical texturing method, *Journal of Materials Processing Technology.* 209 (2009) 3869–3878.

- 
- [99] **L.S. Stephens, R. Siripuram, M. Hayden, B. McCartt**, Deterministic micro asperities on bearings and seals using a modified LIGA process, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 126 (2004) 147.
- [100] **C.K. Malek, V. Saile**, Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and -systems: a review, *Microelectronics Journal*. 35 (2004) 131–143.
- [101] **P. Stepien, M. Szafarczyk**, Generation of regular patterns on ground surfaces, *Annals of the CIRP*. 38 (1989) 561–566.
- [102] **P. Stępień**, Deterministic and stochastic components of regular surface texture generated by a special grinding process, *Wear*. 271 (2011) 514–518.
- [103] **P. Stępień**, Grinding forces in regular surface texture generation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47 (2007) 2098–2110.
- [104] **A. Ghobeity, H. Getu, T. Krajac, J. Spelt, M. Papini**, Process repeatability in abrasive jet micro-machining, *Journal of Materials Processing Technology*. 190 (2007) 51–60.
- [105] **A. Greco, S. Raphaelson, K. Ehmman, Q.J. Wang, C. Lin**, Surface texturing of tribological interfaces using the vibromechanical texturing method, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 131 (2009) 061005.
- [106] **T. Katoh, N. Tsuda, M. Sawabe**, One piece compound parallel spring with reduction flexure levers, *Bull. Jpn Soc. Precision Eng.* 18 (1984) 329–334.
- [107] **Y. Hara, S. Motonishi, K. Yoshida, K.S. Ltdjapan**, A new micro-cutting device with high stiffness and resolution, *Annals of the CIRP*. (1990) 375–378.
- [108] **F. Brito, A. Miranda, J. Claro, J. Teixeira, L. Costa, M. Fillon**, The role of lubricant feeding conditions on the performance improvement and friction reduction of journal bearings, *Tribology International*. 72 (2014) 65–82.
- [109] **B. Denkena, J. Kästner, B. Wang**, Advanced microstructures and its production through cutting and grinding, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 59 (2010) 67–72.
- [110] **B. Denkena, B. Boehnke, J. Kastner**, Microstructuring of functional surfaces by means of cutting processes, *Production Engineering Research and Development*. 2 (2008) 21–25.
- [111] **S. Swirad**, The surface texture analysis after sliding burnishing with cylindrical elements, *Wear*. 271 (2011) 576–581.
- [112] **J. Sep, P. Pawlus, L. Galda**, The effect of helical groove geometry on journal abrasive wear, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 13 (2013) 150–157.
- [113] **L. Galda, W. Koszela, P. Pawlus**, Surface geometry of slide bearings after percussive burnishing, *Tribology International*. 40 (2007) 1516–1525.
- [114] **L. Galda, D. Stadnicka**, Possibilities of creation of regular microgeometry of crankshafts in percussive burnishing process, *Tribologia*. 3 (2004) 111–9.

- 
- [115] **W. Koszela, P. Pawlus, E. Rejwer, S. Ochwat**, Possibilities of oil pockets creation by the burnishing technique, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 13 (2013) 465–471.
- [116] **D. Stadnicka**, **The effect of percussive burnishing on steel surface layer**, 2004.
- [117] **G. Schneider**, Formation of surfaces with uniform micropatterns on precision machine and instrument parts, *Production Point*. 6 (1984) 219–225.
- [118] **U. Pettersson, S. Jacobson**, Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique, *Tribology International*. 39 (2006) 695–700.
- [119] **U. Pettersson, S. Jacobson**, Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors, *Tribology International*. 40 (2007) 355–359.
- [120] **O. Samanek, M. Zimmerman, P. Svoboda, I. Krupka, O. Sam, M. Vrbka**, Influence of surface texturing on lubricant film formation and surface fatigue, *Engineering Mechanics*. 17 (2010) 27–36.
- [121] **K. Thomsen, P. Klit**, A study on compliant layers and its influence on dynamic response of a hydrodynamic journal bearing, *Tribology International*. 44 (2011) 1872–1877.
- [122] **A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fenske, I. Etsion**, The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact, *Tribology International*. 38 (2005) 219–225.
- [123] **G. Ryk, I. Etsion**, Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction, *Wear*. 261 (2006) 792–796.
- [124] **G. Ryk, Y. Kligerman, P. Rings, S. Texturing**, Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components, *Tribology Transactions*. 45 (2002) 444–449.
- [125] **I. Etsion, E. Sher**, Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings, *Tribology International*. 42 (2009) 542–547.
- [126] **T. Kawanaka, S. Kato, M. Kunieda, J. Murray, A. Clare**, Selective surface texturing using electrolyte jet machining, *Procedia CIRP*. 13 (2014) 345–349.
- [127] **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Multiscale assessment of structured coated abrasive grits in belt finishing process, *Wear*. 332-333 (2015) 780–787.
- [128] **V. Belaud**, Structuration de surfaces au moyen d'un traitement laser femtoseconde : applications à la fonctionnalisation de surface du polypropylène en vue de sa métallisation, *PhD*. (2014).
- [129] **L. Sabri**, Développement et mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse multi-échelle du procédé de rodage en production de série, *PhD*. (2010).
- [130] **J.L. Ligier**, Avaries en lubrification : application aux paliers, *TECHNIP*. (2004).

# Production scientifique

## Publications dans des revues internationales

- **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Multiscale assessment of structured coated abrasive grits in belt finishing process, *Wear*. 332–333 (2015) 780-787.
- **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Wear study of Structured Coated Belts in advanced Abrasive Belt Finishing, *Surface and Coatings Technology*. 284 (2015) 365-376.

## Communications dans des congrès internationaux

- **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Multiscale assessment of structured coated abrasive grits in belt finishing process, *Wear Of Materials*. (2015), Toronto, Canada.
- **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Functional roughness parameters relevance in belt finishing process, *Metrology and Properties of Engineering Surfaces*. (2015), Charlotte, États -Unis.
- **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Wear study of structured coated belts in advanced abrasive belt finishing, *International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films*. (2015), San Diego, Etats Unis.
- **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Wear of new coated abrasive belt structures in automotive crankshaft multiscale finishing, *Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. (2015), Lyon, France.

## Communications dans des congrès nationaux

- **S. Mezghani, K. Serpin, M. El Mansori**, Impact multi-échelle de la rigidité et du matériau de grains en super finition par toilage, *Journées Internationales Francophones de la Tribologie*. (2014), Mulhouse, France.
- **K. Serpin, S. Mezghani, M. El Mansori**, Étude de la signature morphologique d'abrasifs en procédé de toilage : effet multi-échelle et performance fonctionnelle, *Journées Internationales Francophones de la Tribologie*. (2015), Mulhouse, France.

## TEXTURATION ANTI-FRICTION DES PORTEES CYLINDRIQUES DE VILEBREQUINS

**RÉSUMÉ :** Les récentes sévèrisations des normes d'émission a indirectement conduit le groupe RENAULT à durcir et optimiser les spécifications appliquées aux surfaces en contact. Les portées de vilebrequins sont particulièrement concernées. À l'instar des développements produit/process liés au rodage des fûts de cylindre, il est envisagé depuis peu d'appliquer une texturation anti-friction sur les tourillons et manetons. Ces portées de paliers sont actuellement superfinies par toilage, un procédé d'abrasion à la fois robuste et économique. Malheureusement, le toilage produit, en usine du moins, une unique morphologie de surface, à savoir, une striation circumférentielle intégrale. Il apparaît, en ce sens, très limité. La présente étude a pour objectif d'investiguer plus finement les capacités de texturation du toilage. Elle propose un ensemble d'analyses expérimentales visant à comprendre les limites texturales observées en production série et offre des solutions innovantes afin d'accroître très sensiblement le potentiel texturant du procédé. S'articulant autour du triptyque Procédé/Texture/Fonctionnalité, ce travail se positionne également dans une démarche globale en s'intéressant à la fois à la texturation laser, la caractérisation des surfaces texturées et à l'influence des textures sur la fonctionnalité statique et dynamique des paliers. Les résultats montrent en particulier que le procédé de toilage est capable de produire, de manière robuste, une véritable diversité de textures. Ils montrent également que la recherche de « poli miroir » pourraient être à prioriser sur les portées de vilebrequins.

**Mots clés :** texturation; frottements; grippage; vilebrequin; toilage; laser; usure; états de surface.

## ANTI-FRICTION TEXTURING OF THE CYLINDRICAL BEARINGS OF CRANKSHAFTS

**SUMMARY:** The recent introduction of tougher emissions standards has indirectly led the RENAULT group to tighten up and optimize specifications applied to surfaces in contact. Crankshafts journals are particularly concerned. Like product/process developments linked to the honing of cylinder liners, there have been recent plans to apply anti-friction texturing to crankshaft journals and crank pins. These bearing surfaces are currently super-finished by belt-grinding, an abrasion procedure that is both robust and economical. Unfortunately, belt-grinding produces a unique surface morphology, in the factory at least, i.e. integral circumferential striation. In this sense it appears very limited. The purpose of this study is to investigate in more detail the texturing capacities of belt-grinding. It provides a set of experimental analyses aiming to understand the textural limits observed in the factory and offer innovative solutions to significantly improve the texturing potential of the procedure. Focusing on the three-pronged Process/Texture/Functionality approach, this work is also part of a global process by looking both at laser texturing, characterization of the textured surfaces and the influence of textures on the static and dynamic function of the bearings. The results show in particular that the belt-grinding procedure is capable of robustly producing a real diversity of textures. They also show that striving to achieve a « mirror-polish » finish may be something to prioritize for crankshafts journals.

**Keywords:** texturing; friction; seizing; crankshaft; belt-grinding; laser; wear; surface finishes.