



Modélisation du processus de polissage : identification des effets et des phénoménologies induits par l'usinage abrasif

François Goossens

► To cite this version:

François Goossens. Modélisation du processus de polissage : identification des effets et des phénoménologies induits par l'usinage abrasif. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2015. Français. NNT : 2015BORD0335 . tel-01286157

HAL Id: tel-01286157

<https://theses.hal.science/tel-01286157>

Submitted on 10 Mar 2016

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.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DE
SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR
SPÉCIALITÉ MECANIQUE

Par **François GOOSSENS**

Modélisation du processus de polissage
Identification des effets et des phénoménologies induits
par l'usinage abrasif

Sous la direction de : Olivier CAHUC

Soutenue le 30 novembre 2015

Membres du jury :

M. LAGARRIGUE Pierre	Professeur des Universités, Centre Univ. JF Champollion	Président
M. FURET Benoît	Professeur des Universités, Université de Nantes	Rapporteur
M. TOURNIER Christophe	Professeur des Universités, Ecole Normale Sup. de Cachan	Rapporteur
M. CAHUC Olivier	Professeur des Universités, Université de Bordeaux	Directeur de thèse
M. DARNIS Philippe	Professeur des Universités, Université de Bordeaux	Examineur
M. CHERIF Mehdi	Maitre de conférences, Université de Bordeaux	Examineur

Titre : Modélisation du processus de polissage - Identification des effets et des phénoménologies induits par l'usinage abrasif

Résumé :

Le polissage est un procédé d'usinage par abrasion qui vise à établir une micro-géométrie précise sur les surfaces de solides. Pour introduire les spécificités de ce procédé, un tour d'horizon sur l'usinage par abrasion est proposé. Il en découle les paramètres pouvant caractériser une opération de polissage. Les études scientifiques existantes sont synthétisées et analysées au regard des objectifs poursuivis. De manière à faire émerger une méthodologie pour établir des modèles et des bases de données dédiées au polissage, un banc expérimental a été mis en place et des essais ont été menés sur une tôle en inox 316L avec un abrasif structuré de forme pyramidale. Une méthode de mesure de l'usure des pyramides abrasives a été mise au point. Les premiers essais ont mis en évidence la nécessité pour les grains abrasifs d'exercer sur la matière une pression supérieure à une valeur minimale. Un modèle de consommation matière issu de la loi de Preston a été présenté et validé par des essais. L'étude par des plans d'expériences factoriels complets des efforts induits, de la rugosité au travers des critères proposés par la norme ISO et de la mouillabilité a permis de mettre en évidence l'influence prépondérante de la taille des grains abrasifs. Par contre, la pression exercée par les grains, leur vitesse de défilement et le taux d'usure des pyramides abrasives n'ont qu'un rôle secondaire sur ces critères. Ces résultats constituent de précieuses indications pour les bureaux des méthodes devant établir des gammes de polissage.

Mots clés : polissage, abrasion, abrasif structuré, inox 316L, PRESTON, rugosité, mouillabilité, plan d'expériences

Title : Modelling of the polishing process - Identification of the induced effects and the phenomenology of the abrasive material removal

Abstract :

The polishing is a process of manufacturing by abrasion which aims at establishing a precise micro-geometry on the surfaces of solids. To introduce the specificities of this process, an overview on the manufacturing by abrasion is proposed. As a result, the parameters which can characterize an operation of polishing are identified. The existing scientific studies are synthesized and analysed with regard to the pursued objectives. For the testing, an experiment test bench was developed. The proposed methodology is applied on the polishing process of the AISI 316L using pyramidal abrasive belts. A measurement method of the abrasive pyramids wear is finalized. A method of measuring the abrasive pyramids wear is provided. A removing material rate model based on the Preston's law is presented and experimentally validated. A study based on the design of experiment is conducted using as output the cutting forces, the roughness and the wettability criteria. The results point out the dominating influence of the size of the abrasive grains. On the other hand, the study indicates the fact that the applied pressure on the abrasive grains, the belt speed and the abrasive level do not play an important role on the previously cited characteristics. On the other hand, the study highlights that the applied pressure on the abrasive grains, the belt speed and the abrasive level do not have a significant effect on the previously cited characteristics. These results constitute valuable indications for the industrial polishing process optimization.

Keywords : polishing, abrasion, structured abrasive, AISI 316L, PRESTON, roughness, wettability, design of experiment

Unité de recherche :

I2M – UMR 5295 – 351 cours de la Libération – 33400 TALENCE

Remerciements

En tant que professeur agrégé de Génie Mécanique à l'Université de Bordeaux, je suis cantonné à un rôle de spectateur des activités de recherche qui sont développées dans cet établissement. Aussi, j'ai le plaisir de côtoyer quotidiennement des enseignants-chercheurs qui font progresser les connaissances dans des domaines qui me sont familiers ou pas. L'instinct de curiosité et le côté routinier des enseignements m'ont incité à me lancer dans une activité de recherche. Préparer une thèse constitue sans aucun doute la forme la plus appropriée pour découvrir les différentes facettes du travail de recherche, acquérir de nouvelles démarches de travail et des compétences supplémentaires, partager la vie d'un laboratoire et appréhender le fonctionnement de la Recherche aussi bien au niveau national qu'international. Aussi, pour réussir une tâche de cette ampleur, l'Université m'a accordé un aménagement de service (décharge de 192 heqtd/an) en s'appuyant sur le décret n°2000-552 du 16 juin 2000.

C'est donc, avec Olivier CAHUC, responsable du Département Matériaux Procédés Interaction (MPI) de l'I2M de Bordeaux, et Mehdi CHERIF, maître de Conférences de ce département, que nous avons établi un sujet de thèse qui répond à mes attentes scientifiques.

Je remercie Olivier CAHUC d'avoir prêté son concours à la réalisation de mon projet en m'accueillant au sein de son équipe, en conduisant les démarches nécessaires à sa concrétisation auprès des instances universitaires concernées. Je lui adresse toute ma gratitude pour avoir dirigé mes travaux de recherche en participant régulièrement aux réunions de travail, en faisant part de son expertise sur le domaine étudié et en validant mes différentes productions.

J'adresse toute ma reconnaissance à Mehdi CHERIF pour la qualité du suivi de mon travail, de son analyse sur les questions traitées et de son expertise dans l'élaboration de mes communications.

J'exprime toute ma gratitude à Eric ARQUIS, directeur de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M), de m'avoir soutenu dès le début dans mon projet professionnel axé sur la recherche. Je le remercie de m'avoir accueilli au sein de l'I2M. J'ai pu ainsi mesurer toute la force d'un grand laboratoire en menant des actions de recherche ambitieuses.

Je remercie vivement Geneviève DUCHAMP, directrice de l'UFR de Physique au début de ma thèse, d'avoir prêté une attention toute particulière à ma démarche et de m'avoir soutenu auprès des instances dirigeantes de l'Université dans cette période compliquée sur le plan financier.

J'exprime toute ma gratitude à Yves COUETARD pour les précieux conseils prodigués dans la mise au point de mon banc expérimental.

Je remercie les différents collègues de l'équipe MPI et des autres composantes de l'I2M pour l'appui et les conseils précieux fournis ici et là dans le déroulement de mes travaux.

Je remercie l'ensemble des collègues de la filière de Génie Mécanique de l'UF Sciences de l'Ingénieur d'avoir supporté la charge de travail occasionnée par mon aménagement de service.

J'exprime ma reconnaissance aux techniciens des départements GMP et SGM de l'IUT de Bordeaux. Grâce à leur appui, j'ai pu réaliser des équipements expérimentaux de qualité et utiliser des matériels pointus très utiles à mes productions scientifiques.

J'ai une pensée toute particulière pour les membres de l'I2M site IUT et tout particulièrement pour ceux qui ont partagé mon bureau. Le fait d'appartenir à une équipe est essentiel pour mener à bien un travail aussi long que celui de préparer une thèse. Je regrette de ne pas avoir eu plus de temps à leur consacrer.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux.....	xi
Introduction	1
Chapitre 1 : L'usinage par abrasion	5
1 Généralités.....	5
2 Les grains abrasifs.....	8
3 Les abrasifs agglomérés	10
3.1 Généralités.....	10
3.2 La rectification et l'affûtage	11
3.3 Le tronçonnage	12
3.4 Reprise de forme : ébarbage, arasage, ébavurage, chanfreinage	13
4 Les abrasifs « souples »	14
4.1 Les différentes technologies d'abrasifs.....	14
4.1.1 Les abrasifs appliqués	14
4.1.2 Les abrasifs structurés.....	15
4.1.3 Les abrasifs non-tissés.....	16
4.1.4 Les abrasifs moulés	16
4.1.5 Les pâtes abrasives.....	17
4.2 Les opérations courantes.....	17
4.2.1 Reprise de forme : ébarbage, arasage, chanfreinage.....	17
4.2.2 Recherche d'un état de surface	18
4.3 Les outillages associés	19
5 Synthèse des procédés d'usinage par abrasion	21
6 Gamme de polissage.....	22
7 Conclusion	24
Chapitre 2 : Etat de l'art	25
1 Etude d'une rayure	25
1.1 Mise en oeuvre	25
1.2 Principaux résultats	27

1.3	Etudes numériques	30
1.4	Bilan des essais de rayage	31
2	Etude de la consommation matière	32
2.1	Approches empiriques	33
2.2	Approches analytiques	34
2.3	Approches numériques	35
2.4	Bilan des travaux sur la consommation matière	35
3	Etude de la cinématique du polissage	35
4	Rugosité des surfaces polies	37
5	Conclusion	40
Chapitre 3 : Cadre de l'expérimentation		43
1	Cas d'espèce retenu	43
2	Caractérisation d'une surface polie	43
2.1	Normes ISO	44
2.2	Qualité « poli-miroir »	46
2.3	Mouillabilité	47
3	Caractérisation de l'outil abrasif sélectionné	49
4	Paramétrage du process	54
5	Consommation matière	55
6	Banc expérimental	57
6.1	Expression du besoin	57
6.2	Composition du banc expérimental de polissage	58
6.3	Echangeurs thermiques	59
6.4	Caractéristiques géométriques du patin presseur	60
6.5	Courbes caractéristiques de la ponceuse	61
7	Conclusion	62
Chapitre 4 : Essais, résultats et analyse		63
1	Plans d'expériences	63
2	Mise en œuvre des essais	65
2.1	Vitesse de défilement des grains abrasifs (V)	65
2.2	Taux d'usure (k)	65
2.3	Pression exercée par les grains abrasifs (p)	66
2.4	Mesure de la consommation matière	67
3	Pression minimale d'abrasion	67
3.1	Mise en évidence de ce phénomène	68
3.2	Protocole expérimental pour déterminer la pression minimale d'abrasion	70
3.3	Résultats expérimentaux	72
3.4	Conclusion	75

4	Consommation matière	75
4.1	Essais	75
4.2	Résultats et analyse	77
4.3	Conclusion	79
5	Coefficient tangentiel de coupe	79
6	Rugosité	82
6.1	Objectifs et démarche de travail	82
6.2	Résultats et analyse des paramètres caractérisant la hauteur des stries du profil	83
6.3	Résultats et analyse des paramètres caractérisant les stries d'une surface polie	85
6.4	Résultats et analyse des paramètres issus de la courbe d'Abbott	87
6.5	Prolongements	91
6.6	Conclusion	95
7	Mouillabilité	96
8	Conclusion	98
	Conclusion et perspectives	99
1	Synthèse du mémoire	99
2	Perspectives	102
	Bibliographie	105
	Annexe A : PROTOCOLE DE CARACTÉRISATION DE LA GEOMETRIE DES PYRAMIDES ABRASIVES	109
1	Objectif	109
2	Démarche	109
3	Topographie d'une portion de bande	109
4	Extraction du profil des pyramides	110
5	Extraction du profil de chaque pyramide	112
6	Calcul des paramètres géométriques de chaque pyramide	112

Liste des figures

Figure 1 : Arrachement du métal par un grain abrasif [1]	6
Figure 2 : Les différents modes d'abrasion.....	6
Figure 3 : Différentes présentations de grains abrasifs (source PASCO) – (a) : oxyde d'aluminium – (b) : carbure de silicium – (c) zirconium.....	7
Figure 4 : Une sélection d'outils abrasifs (source KLINGSPOR, NORTON, 3M, PFERD).....	8
Figure 5 : Grains en céramique d'alumine (source 3M)	10
Figure 6 : Meules compactes (a,b) et meules super-abrasives (c) (source NORTON).....	11
Figure 7 : Opérations de rectification (source NORTON, PFERD)	11
Figure 8 : Opération de tronçonnage (source PFERD).....	13
Figure 9 : Meules d'ébarbage (source NORTON)	13
Figure 10 : Outillage pour les opérations de reprise de forme (source NORTON, PFERD, DINABRADE)	14
Figure 11 : Organisation structurale d'un abrasif aggloméré (source PENTAR).....	14
Figure 12 : Différentes présentations d'abrasifs appliqués (source 3M, NORTON).....	15
Figure 13 : Organisation des abrasifs structurés.....	15
Figure 14 : Structure des abrasifs non-tissés.....	16
Figure 15 : Différentes présentations d'outils abrasifs non-tissés (source 3M)	16
Figure 16 : Abrasifs moulés axiaux et radiaux (source 3M)	16
Figure 17 : Supports applicateurs de pâte abrasive (source 3M).....	17
Figure 18 : Opérations de reprise de forme - (a) arasage de soudure (b) ébarbage (source 3M, PFERD).....	17
Figure 19 : Synthèse des applications nécessitant un état de surface particulier	19
Figure 20 : Différentes machines de ponçage/polissage (source 3M, DINABRADE)	20
Figure 21 : Robot poly-articulé (a) - Dispositif compliant (b) (source ABB, FERROBOTICS).....	21
Figure 22 : Paramètres considérés lors de la mise en place d'un process de polissage	23
Figure 23 : Géométrie des indenteurs utilisés pour l'essai de rayage	26
Figure 24 : Paramètres d'un essai de rayage [3].....	26
Figure 25 : Banc de rayage de M. Barge [4].....	27
Figure 26 : Superposition des efforts modélisés et des efforts mesurés sur le banc de M. Barge [4]	27
Figure 27 : Comportement de la matière devant l'indenteur - (a) labourage - (b) coupe du métal [5]	27
Figure 28 : Différents modes d'interaction [6]	28
Figure 29 : Facteur d'enlèvement de matière (f).....	28
Figure 30 : Evolution de la fraction enlevée pour différentes duretés de matériaux [8]	29
Figure 31 : Différents écoulements de la matière identifiés par H. Petryk [9]	29

Figure 32 : Représentation du maillage utilisé pour simuler un essai de rayage [10].....	30
Figure 33 : Simulation de l'écoulement matière sous FORGE 2 [14]	30
Figure 34 : Distribution des déformations plastiques dans la région traversée par la rayure [14]	31
Figure 35 : Photos de rayures sur une surface polie [15], [16].....	32
Figure 36 : Evolution de la profondeur polie en fonction du temps [24].....	33
Figure 37 : Influence de l'effort presseur sur la distribution des particules abrasives [25]	34
Figure 38 : Paramétrage de l'étude de F. Klocke s'appuyant sur la loi de Hertz [27].....	34
Figure 39 : Différents stratégies de balayage - (a) cartésien - (b) courbes de Lissajous - (c) courbes de Peano [34].....	36
Figure 40 : Trajectoire issue des algorithmes de Hilbert pour le polissage d'un dôme [32].....	36
Figure 41 : Trajectoire optimale d'après J. Chaves-Jacob [33] avec un mouvement élémentaire triangulaire.....	37
Figure 42 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour deux efforts presseurs distincts [37].....	38
Figure 43 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour deux vitesses de défilement distinctes [37]	38
Figure 44 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour plusieurs tailles de grains - [37].....	39
Figure 45 : Différents profils extraits à partir d'un même relevé [50].....	44
Figure 46 : Représentation graphique du filtre à phase correcte [47]	45
Figure 47 : Rugosimètre 3D ALTISURF 500.....	46
Figure 48 : Profil filtré d'une surface polie	46
Figure 49 : Paramètres décrivant le phénomène de mouillabilité	47
Figure 50 : Banc de mouillage KRUS.....	48
Figure 51 : Image d'une goutte déposée sur l'échantillon et les éléments géométriques associés	48
Figure 52 : Exemple de distribution des mesures de l'angle de contact (θ) au cours du dépôt d'une goutte	49
Figure 53 : Portion d'une bande abrasive structurée à base pyramidale.....	50
Figure 54 : Différentes solutions pour fermer une bande (source PFERD)	50
Figure 55 : Physionomie des pyramides à différents stades d'usure des bandes abrasives.....	51
Figure 56 : Dispositif assurant le relevé de profil d'une rangée de pyramides.....	52
Figure 57 : Relevé d'un alignement de pyramides	52
Figure 58 : Paramètres géométriques des pyramides.....	52
Figure 59 : Répartition fréquentielle de la largeur des pyramides (α).....	53
Figure 60 : Répartition fréquentielle de l'angle au sommet des pyramides (β)	54
Figure 61 : Solutions pour plaquer la bande abrasive sur la surface.....	54
Figure 62 : Surface apparente - Surface effective	55
Figure 63 : Composition du banc de polissage.....	58
Figure 64 : Dispositif de polissage.....	59
Figure 65 : Relevé des principaux paramètres réalisé avec la baie DEWETRON	59
Figure 66 : Echangeur thermique intégré au porte-échantillon	60
Figure 67 : Patin presseur principal.....	60
Figure 68 : Patin rapporté (sabot).....	60
Figure 69 : Courbes caractéristiques de la ponceuse	61

Figure 70 : Bornes du coefficient d'usure (k)	65
Figure 71 : Evolution des paramètres lors de l'apparition du phénomène de beurrage	68
Figure 72 : Dépôts observés sur la surface polie	69
Figure 73 : Relevé des constituants présents sur la surface polie (a) avant beurrage - (b) après beurrage	69
Figure 74 : Evolution de (C_p) en fonction de la pression d'abrasion	71
Figure 75 : Paramètres du plan d'expériences	71
Figure 76 : Evolution de la constante de Preston - bande A100.....	72
Figure 77 : Evolution de la constante de Preston - bande A30.....	72
Figure 78 : Evolution de la constante de Preston - bande A6.....	73
Figure 79 : Evolution de la constante de Preston pour le couple ($V-k$) = (10-0,7)	73
Figure 80 : Valeurs moyennes de la pression minimale d'abrasion	74
Figure 81 : Valeurs moyennes des coefficients du plan d'expériences caractérisant la pression minimale.....	74
Figure 82 : Paramètres de l'étude.....	76
Figure 83 : Domaine de l'étude et position des test réalisés	76
Figure 84 : Constantes C_p obtenues expérimentalement	78
Figure 85 : Ecart entre résultats expérimentaux et modèle de PRESTON modifié.....	78
Figure 86 : Paramétrage de la mesure du torseur d'action des abrasifs sur l'échantillon	80
Figure 87 : Paramètres du plan d'expériences pour l'étude du coefficient tangentiel de coupe (f)	81
Figure 88 : Valeurs moyennes du coefficient tangentiel de coupe (f)	82
Figure 89 : Paramètres du plan d'expériences pour l'étude de la rugosité	83
Figure 90 : Moyennes des paramètres caractérisant la hauteur des stries d'une surface polie	84
Figure 91 : Moyennes des paramètres caractérisant la morphologie des stries d'une surface polie.....	85
Figure 92 : Coefficients d'effet et d'interaction du plan d'expériences portant sur le facteur d'asymétrie (R_{sk}).....	86
Figure 93 : Interprétation du facteur d'asymétrie (R_{sk}).....	86
Figure 94 : Interprétation du facteur d'aplatissement (R_{ku}).....	87
Figure 95 : Courbe de taux de longueur portante et ses paramètres associés	88
Figure 96 : Valeurs moyennes des paramètres R_{pk} , R_k et R_{vk}	89
Figure 97 : Evolution des rapports de R_{pk} , R_k et R_{vk} avec R_a	90
Figure 98 : Valeurs moyennes des paramètres $MR1$ et $MR2$	90
Figure 99 : Evolution des paramètres caractérisant la hauteur des stries des surfaces polies	93
Figure 100 : Evolution des paramètres (R_{sk}) et (R_{ku})	93
Figure 101 : Evolution et tendance des paramètres issus de la courbe d'Abbott.....	94
Figure 102 : Evolution des rapports entre les paramètres issus de la courbe d'Abbott et (R_a).....	94
Figure 103 : Evolution des paramètres ($MR1$) et ($MR2$) de la courbe d'Abbott	95
Figure 104 : Valeurs moyennes de l'angle de contact (θ)	97
Figure 105 : Coefficients d'effet et d'interaction pour l'angle de contact (θ)	97
Figure 106 : Repère réalisé sur le réseau de pyramides et la pointe de palpéage	110
Figure 107 : Surfaces considérées pour créer le profil caractéristique des pyramides.....	110

Figure 108 : Représentation de la surface digitalisée	111
Figure 109 : Caractéristiques du profil utilisé pour l'analyse	111
Figure 110 : Paramètres de l'algorithme	112

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classement établi par Friedrich MOHS.....	9
Tableau 2 : Classification par taille des grains abrasifs établie par la FEPA	9
Tableau 3 : Critères de rugosité d'après [45], [46], [48], [48], [49].....	45
Tableau 4 : Incertitudes du processus de mesure de l'angle de contact (θ).....	49
Tableau 5 : Taille moyenne des grains abrasifs retenus pour l'étude	51
Tableau 6 : Largeur et angle au sommet des pyramides et leur écart type	53
Tableau 7 : Paramètres du relevé de la Figure 71.....	68
Tableau 8 : Paramètres de l'étude visant à déterminer la pression minimale d'abrasion	72
Tableau 9 : Pression minimale d'abrasion (unité : 10^4 Pa).....	74
Tableau 10 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A100.....	77
Tableau 11 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A30	77
Tableau 12 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A6	77
Tableau 13 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A100.....	81
Tableau 14 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A30	81
Tableau 15 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A6	81
Tableau 16 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le coefficient tangentiel de coupe (f)	82
Tableau 17 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A100	83
Tableau 18 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A30	84
Tableau 19 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A6	84
Tableau 20 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre de rugosité (R_a).....	85
Tableau 21 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre de rugosité (R_z)	85
Tableau 22 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre de rugosité (R_t)	85
Tableau 23 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (R_{ku}).....	87
Tableau 24 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A100	88
Tableau 25 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A30	88
Tableau 26 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A6	89
Tableau 27 : Valeurs moyennes des paramètres relevés sur la courbe d'Abbott.....	89
Tableau 28 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (R_{pk}).....	91
Tableau 29 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (R_k).....	91
Tableau 30 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (R_{vk})	91
Tableau 31 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (MR_1)	91
Tableau 32 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (MR_2)	91

Tableau 33 : Taille des grains abrasifs pour le polissage des échantillons.....	92
Tableau 34 : Niveau des paramètres opératoires pour le polissage des échantillons.....	92
Tableau 35 : Niveaux des paramètres de rugosité.....	92
Tableau 36 : Paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences sur l'essai de mouillabilité – bande A100.....	96
Tableau 37 : Paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences sur l'essai de mouillabilité - bande A30.....	96
Tableau 38 : Paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences sur l'essai de mouillabilité - bande A6.....	96
Tableau 39 : Coefficients d'effet et d'interaction du plan d'expériences portant sur l'essai de mouillabilité	97

Introduction

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont pour cadre l'usinage par abrasion. Ce procédé d'enlèvement de matière utilise le frottement intense entre des grains abrasifs et la surface à travailler pour détacher des microparticules de matière. Différentes manières de procéder ont vu le jour au fil du temps et couvrent un grand nombre d'applications dans différents secteurs d'activité. Aujourd'hui, une large palette d'outils aux caractéristiques très différentes est proposée sur le marché.

Ce procédé est globalement bien connu et utilisé dans les entreprises car bon nombre d'opérations sont manuelles et faciles à mettre en œuvre. Aussi, le rôle de l'opérateur est prépondérant pour l'obtention de la qualité recherchée car, de l'observation visuelle de la surface polie, il a la capacité d'ajuster en temps réel l'enlèvement de matière réalisé par l'outil abrasif. Aujourd'hui, la plupart des opérations de polissage reposent sur l'expérience et l'empirisme. Il en va que l'automatisation de telles opérations est délicate à mettre en place alors qu'elle permettrait de limiter la réalisation de tâches longues et fastidieuses propices au développement des troubles musculo-squelettiques (TMS), de réduire les dispersions du résultat obtenu et bien-sûr d'améliorer la productivité et la rentabilité de ce type de process.

Pour sortir de cette situation, les bureaux des méthodes doivent disposer d'indications permettant de prédire le comportement des outils abrasifs de manière à comparer différents process envisagés et à réduire le temps de mise au point de la solution retenue. Les travaux présentés dans ce mémoire se placent dans cette logique.

Le premier chapitre a pour objectif de présenter les principales solutions d'usinage par abrasion pratiquées dans le secteur de la fabrication des pièces métalliques. Il vise à identifier les conditions nécessaires pour créer un enlèvement de matière avec des grains abrasifs et les caractéristiques de ces particules abrasives. Les différentes familles d'outils seront présentées en fonction de la rigidité de la liaison entre les grains. Pour chacune d'elles, il sera mis en avant le principe d'association des grains abrasifs. Les spécificités du process de fabrication des outils abrasifs utiles à une meilleure connaissance du produit seront fournies. Les utilisations les plus courantes seront abordées en précisant les préconisations pour les différents usages identifiés, les moyens nécessaires à leur mise en œuvre, les principaux paramètres, les points forts et les limites de chaque process. Ce chapitre sera donc l'occasion de préciser le vocabulaire propre à ce domaine d'activité et de mettre en avant la diversité des outils abrasifs disponibles, des applications possibles et des paramètres à maîtriser. De là, le domaine retenu pour les travaux

développés dans ce mémoire sera identifié. Il s'agit des opérations de polissage qui visent essentiellement à fournir les caractéristiques micro-géométriques aux surfaces métalliques traitées.

Ayant une connaissance suffisante des techniques possibles pour les opérations de polissage, le bureau des méthodes peut envisager un ou plusieurs process en fonction du cahier des charges à respecter, des ressources humaines et matérielles disponibles et des quantités à produire. Il lui faut alors déterminer les caractéristiques opératoires de chaque process envisagé. Si ces éléments sont développés en fin de chapitre 1, précisons ici que pour chaque séquence de travail, il doit tout d'abord préciser la référence de l'abrasif retenu, la machine utilisée et les paramètres de fonctionnement, le degré de compétence de l'opérateur, les caractéristiques de la pièce en fin d'opération et la durée de l'opération. Or, à ce jour, les éléments fournis par les fabricants d'outils abrasifs ou proposés par la communauté scientifique sont loin de couvrir ce besoin. C'est pour identifier la nature des travaux nécessaires à la production de ce type d'informations ainsi qu'à leurs conditions de mises en œuvre que nous avons cherché à les réaliser en mettant en œuvre une méthodologie précise pour un cas d'espèce industriel.

Le chapitre 2 a pour objectif de présenter une étude bibliographique des travaux scientifiques réalisés dans le domaine du polissage et de comprendre l'origine des verrous scientifiques associés à cette problématique. Cette présentation est composée de plusieurs items. Le premier est de voir quels sont les enseignements issus de l'étude du rayage d'une surface à l'aide d'un indenteur unique. Elle met en évidence les différents comportements de la matière ainsi que les paramètres géométriques des grains qui jouent un rôle prépondérant dans le processus d'enlèvement de matière. Le deuxième se concentre sur la consommation matière. Ce sujet est essentiel pour connaître la durée des opérations. Différents types de modèles sont proposés. Certains sont issus d'une approche empirique alors que d'autres viennent de l'application de théories générales comme la plasticité ou la pression de contact. La troisième partie porte sur le balayage appliqué à l'outil abrasif par rapport à la surface à polir. Pour avoir un résultat de qualité, le mode opératoire doit limiter autant que possible les dispersions liées à l'usure de l'outil, à la géométrie de la surface et aux performances dynamiques de la machine. Enfin, nous terminons par les travaux qui visent à prédire la rugosité des surfaces réalisées.

Le chapitre 3 a pour objectif de préciser les différentes données du cadre expérimental de notre étude. Tout d'abord, nous avons retenu un process industriel à savoir le polissage de tôles inox 316L avec des bandes abrasives structurées. Les différentes caractéristiques de ce process de fabrication sont identifiées. Une connaissance précise des surfaces de contact abrasif-surface polie étant nécessaire pour l'exploitation des modèles proposés par la suite, un mode opératoire pour caractériser géométriquement les bandes sélectionnées est développé et analysé. Un nouveau modèle de consommation de matière est proposé pour le cas d'espèce étudié. Pour le valider, identifier les paramètres numériques associés et caractériser le

comportement du process pour d'autres paramètres comme la rugosité et la mouillabilité, un banc d'essai instrumenté a été conçu et réalisé. Son architecture et sa composition sont précisées en fin de chapitre 3.

Le chapitre 4 présente les résultats expérimentaux et leur analyse. Les différents essais ont été conduits suivant une méthodologie basée sur les plans d'expériences factoriels complets. Les principes de cette méthode sont rappelés et les spécificités propres à notre étude sont précisées. Les premiers essais menés ont mis en évidence un phénomène de « beurrage » qui se caractérise par le dépôt de matières organiques venant principalement du liant des bandes abrasives sur les surfaces polies bloquant le process d'enlèvement de matière, empêchant alors d'atteindre la rugosité visée et donnant un aspect très éloigné des attentes émises par le prescripteur. La compréhension de ce processus inattendu s'imposait pour identifier les conditions opératoires d'un polissage de qualité. Une analyse des conditions propices à l'apparition de ce processus de beurrage fait ressortir que la pression exercée par les grains abrasifs joue un rôle déterminant. Pour caractériser la pression dite minimale d'abrasion, un plan d'expériences a été mis en place pour les différentes bandes abrasives retenues dans notre étude. Les résultats obtenus sont présentés et analysés.

Une fois les conditions de succès des opérations de polissage établies, le domaine de l'étude est défini et des essais sont conduits en vue d'apprécier la validité du modèle de consommation matière introduit au chapitre 3. Les valeurs issues du modèle sont comparées aux valeurs produites expérimentalement. Les résultats étant satisfaisants, les paramètres du modèle sont précisés pour chaque cas d'espèce étudié. L'analyse des résultats permet de préciser l'influence des paramètres considérés dans nos travaux.

L'étude des efforts induits sur la pièce, de la rugosité et de la mouillabilité est développée. Là aussi, une approche basée sur les plans d'expériences a été suivie pour caractériser le rôle joué par les différents paramètres du process.

Pour terminer ce mémoire, une synthèse des résultats obtenus est présentée. Elle permet de dresser des perspectives pour mener l'étude de nouveaux couples abrasifs-matériaux.

Chapitre 1 : L'usinage par abrasion

Depuis fort longtemps, il a été reconnu que le frottement intense entre deux corps solides se traduit par un enlèvement de matière dans la zone de contact sur le volume ayant la dureté la plus faible. L'affûtage des outils et des armes à l'aide de pierres a longtemps été la principale déclinaison de ce phénomène physique sur les pièces métalliques. C'est au milieu du XIX^{ème} siècle que la première meule agglomérée a été fabriquée marquant ainsi le point de départ du processus industriel de l'usinage par abrasion. Parce que ce procédé est le seul à offrir certaines facultés dans le travail des métaux, les industriels ont développé des outils de plus en plus performants pour des usages de plus en plus larges.

Pour mieux situer le domaine de l'étude, il est proposé un tour d'horizon de ce procédé de fabrication. Il a pour objectif de faire connaître la composition et l'organisation des outils abrasifs proposés par les industriels, les applications les plus courantes réalisées avec ces outils, les préconisations pour les différents usages identifiés et les moyens nécessaires à leur mise en œuvre. Cette présentation permet de préciser le vocabulaire dévolu à ce procédé, les principaux paramètres qui le régissent, ses atouts et ses limites. Elle a pour but de mettre en avant la diversité des usages et la difficulté à concevoir et à mettre au point certains processus d'usinage par abrasion.

1 Généralités

L'usinage par abrasion est un procédé d'enlèvement de matière où celle-ci est coupée, arrachée par une multitude de particules très dures (Figure 1).

Leurs trajectoires sont telles qu'elles permettent d'appliquer à la fois un effort pour qu'elles pénètrent légèrement dans le matériau et une action tangentielle à la surface de frottement pour détacher la matière du volume de départ. Ainsi, la matière est enlevée sous forme de micro-copeaux ou de poussières. Les micro-outils sont des grains abrasifs. Ils doivent être très durs pour supporter les pressions de contact et, dans le même temps, être tranchants et se fragmenter pour offrir de nouvelles arêtes de coupe saillantes et faire disparaître ainsi les arêtes émoussées par les passages successifs des grains sur la surface polie. De proche en proche, ils sont arrachés de la structure de l'abrasif pour laisser la place à de nouveaux outils.

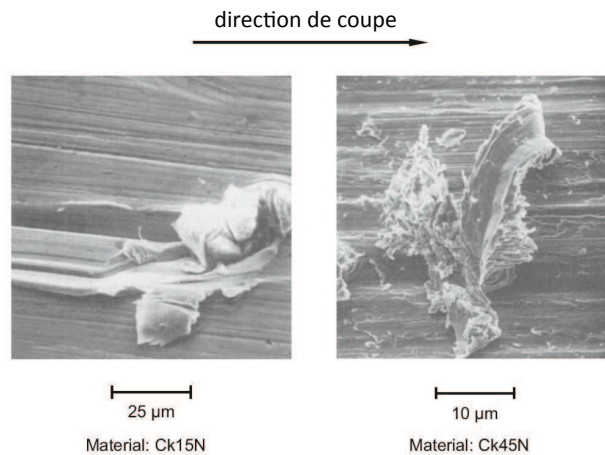


Figure 1 : Arrachement du métal par un grain abrasif [1]

Pour obtenir les mécanismes de coupe décrits ci-dessus, deux solutions sont envisageables : l'abrasion 2 corps et l'abrasion 3 corps (Figure 2). Dans le premier cas, les grains abrasifs sont solidaires d'un support, rigide ou non, assurant leur cheminement et le transfert de l'effort presseur. Dans le deuxième cas, les particules abrasives sont libres tout en étant pressées par une contre-pièce. Grâce au frottement, à l'effort presseur et au déplacement du support, le processus d'abrasion se traduit par le roulement des grains abrasifs conjointement avec leur pénétration. Un fluide assure leur renouvellement et l'évacuation des déchets générés.

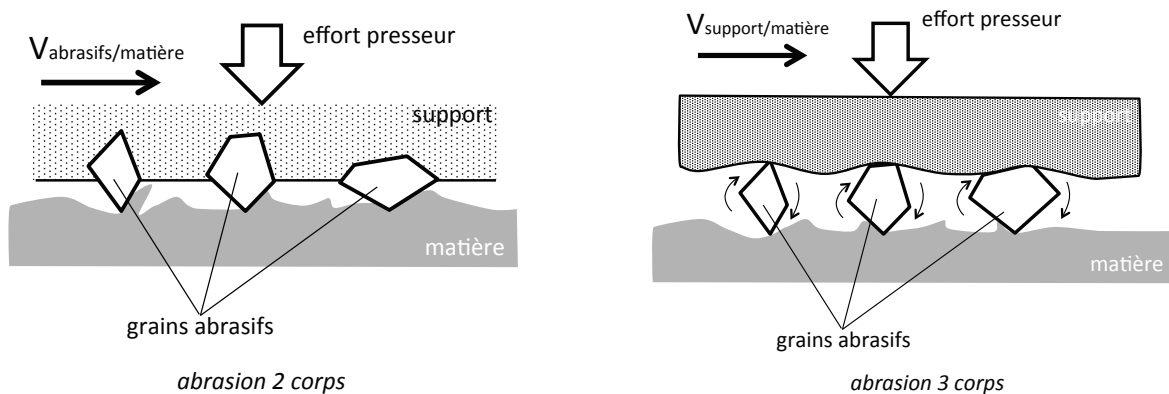


Figure 2 : Les différents modes d'abrasion

Malgré les faibles débits d'enlèvement matière et la durée de vie des abrasifs limitée par la régénération de leurs arêtes, l'usinage par abrasion a connu un développement industriel grâce à trois points forts : le travail des matériaux de grande dureté, la capacité à obtenir des surfaces ayant une rugosité minime et une grande précision dimensionnelle et géométrique. D'autres avantages sont venus compléter la liste : la grande diversité de formes pour les pièces et les surfaces y compris les surfaces gauches, la flexibilité d'usage de certaines solutions. La proximité de l'opérateur avec le processus permet de réaliser un contrôle permanent du travail réalisé et un ajustement en temps réel des conditions opératoires.

Ainsi les industriels ont développé au fil du temps une gamme de produits abrasifs permettant de répondre à des besoins très variés dans les domaines entre autres du génie mécanique, du génie civil et de la construction bois. Dans ce mémoire, nous nous limiterons aux solutions utilisées dans la fabrication de pièces industrielles métalliques.

Les produits abrasifs proposés aujourd'hui sont basés principalement sur l'abrasion deux corps. Les grains abrasifs, fines particules minérales à l'état brut (Figure 3), sont liés entre eux par un agglomérant sur un support qui permet de faire l'interface avec la machine. Les principaux modes d'association des grains abrasifs ont pour dénomination : abrasifs agglomérés, abrasifs appliqués, abrasifs structurés, abrasifs non tissés, abrasifs moulés. La Figure 4 laisse entrevoir la grande diversité des outils proposés sur le marché. Les différents modes d'élaboration donnent une souplesse plus ou moins importante à l'outil abrasif. Chacun d'eux sera présenté en détail dans la suite de ce manuscrit.

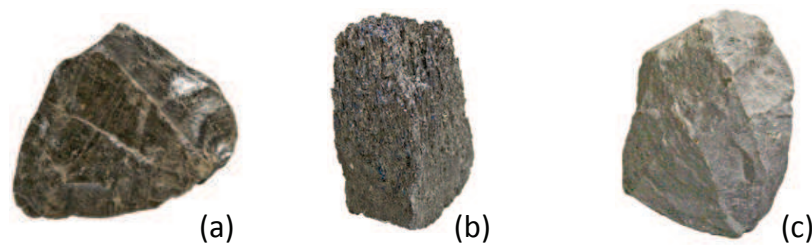


Figure 3 : Différentes présentations de grains abrasifs (source PASCO) – (a) : oxyde d'aluminium – (b) : carbure de silicium – (c) zirconium

Cette grande diversité des produits permet de répondre à des problématiques bien identifiées comme la rectification, le tronçonnage, la reprise de forme, le polissage, etc. Un grand nombre d'éléments sont pris en compte dans leur élaboration : la nature des abrasifs, la nature et les performances mécaniques du liant, la proportion abrasifs-liant, la nature du support, etc. D'autres paramètres complètent la description du process comme l'état de surface et la précision dimensionnelle résultants. Ainsi, l'utilisateur doit préciser les éléments suivants : le type d'abrasif, le mode opératoire, la taille des grains, les paramètres d'usinage (vitesse de coupe, effort presseur le cas échéant), la trajectoire de l'outil sur la surface à traiter, etc. En définitive, la mise au point d'un usinage par abrasion requiert une bonne connaissance des produits existants, des moyens de les mettre en œuvre, des phénomènes qui régissent le résultat final, des règles pour déterminer les paramètres d'emploi et sûrement d'une bonne dose d'expérience.

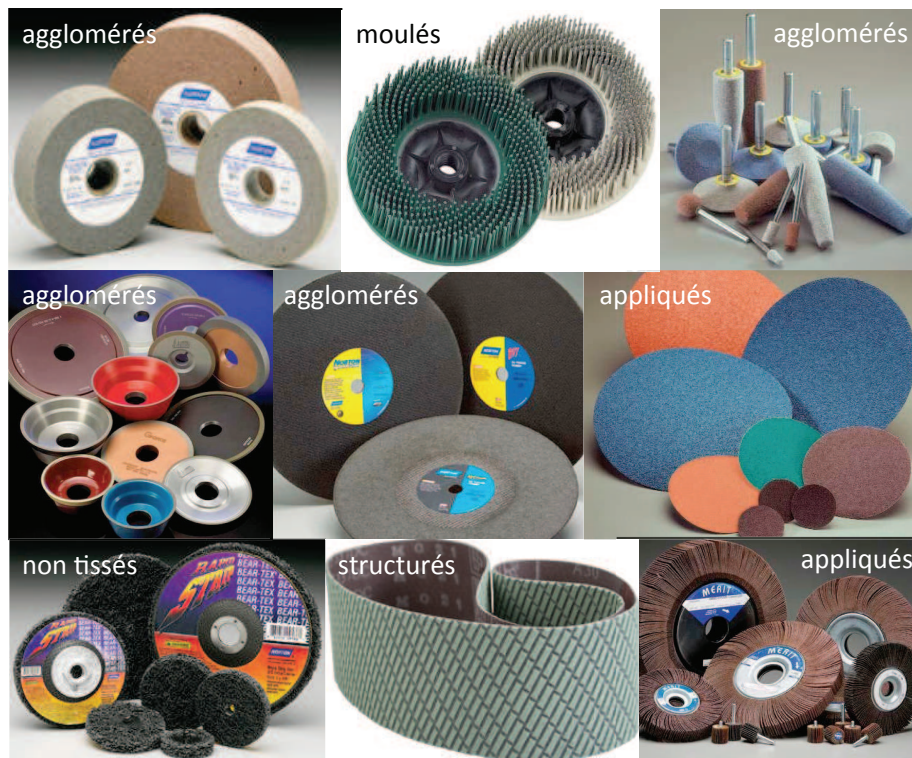


Figure 4 : Une sélection d'outils abrasifs (source KLINGSPOR, NORTON, 3M, PFERD)

2 Les grains abrasifs

Les grains abrasifs à l'état naturel sont le quartz, l'émeri, le grenat, le corindon. Ils ont cédé la place aux abrasifs industriels plus performants et de caractéristiques plus homogènes. Ces derniers sont composés d'oxyde d'aluminium, de carbure de silicium, de zirconium, de nitrure de bore cubique ou de diamant.

La principale caractéristique du matériau qui compose un grain abrasif est sa dureté. C'est Friedrich MOHS (Allemagne, 1773 - 1839) qui a mis en évidence le premier cette propriété en établissant un classement des matériaux suivant leur dureté en observant l'aptitude d'un matériau A à réaliser une rayure dans un matériau B (Tableau 1). Le matériau le plus friable est le talc (indice 1) et le plus dur est le diamant (indice 10). Depuis de nouvelles techniques d'indentation ont été mises en place (essais BRINELL, VICKERS, ROCKWELL) et cette table a été complétée avec de nouveaux matériaux.

Minéral	Indice de dureté MOHS	Comportement matériau	dureté Vickers (kgf/mm ²)
Talc	1	Friable sous l'ongle	2,4
Gypse	2	Rayable avec l'ongle	36
Calcite	3	Rayable avec une pièce de cuivre	109
Fluorite	4	Rayable facilement au couteau	189
Apatite	5	Rayable au couteau	536
Orthose	6	Rayable à la lime	795
Quartz	7	Raye une vitre	1120
Topaze	8	Rayable au carbure de tungstène	1427
Corindon	9	Rayable au carbure de silicium	2060
Diamant	10	Rayable avec un autre diamant	10060
Indice de l'oxyde d'aluminium = 9, du carbure de silicium et du nitrure de bore cubique = 9,5			

Tableau 1 : Classement établi par Friedrich MOHS

Afin de réaliser un abrasif, ces différents matériaux sont réduits à l'état de grains voire de poudre. Un outil est composé de grains homogènes en taille. La dimension moyenne des grains est une donnée essentielle dans le choix d'un outil abrasif. La FEPA (Fédération Européenne des Producteurs d'Abrasifs) a mis en place un indice de granulométrie en fonction de la taille moyenne des particules abrasives (Tableau 2).

Indice	Diamètre moyen (μm)	Indice	Diamètre moyen (μm)
Triage par tamisage		Triage par sédimentation	
P12	1815	P240	58,5±2
P16	1324	P280	52,2±2
P20	1000	P320	46,2±1,5
P24	764	P360	40,5±1,5
P30	642	P400	35,0±1,5
P36	538	P500	30,2±1,5
P40	425	P600	25,8±1
P50	336	P800	21,8±1
P60	269	P1000	18,3±1
P80	201	P1200	15,3±1
P100	162	P1500	12,6±1
P120	125	P2000	10,3±0,8
P150	100	P2500	8,4±0,5
P180	82		
P220	68		

Tableau 2 : Classification par taille des grains abrasifs établie par la FEPA

Pour un indice compris entre P12 et P220, les grains abrasifs sont séparés en tailles de particules normalisées à l'aide de tamis confectionnés avec des fils de soie. La granulométrie représente le nombre d'ouvertures par pouce linéaire du tamis. A partir de P240, des techniques hydrauliques (sédimentation) sont utilisées pour classer les abrasifs par taille.

Les grains obtenus par différents procédés métallurgiques en fonction de leur nature sont de formes quelconques présentant des facettes et donc des arêtes de coupe très variées (Figure 3). Pour mieux contrôler la géométrie des grains abrasifs, des industriels ont élaboré des procédés de fabrication de « plaquettes » débouchant sur des formes présentant des arêtes saillantes (Figure 5).

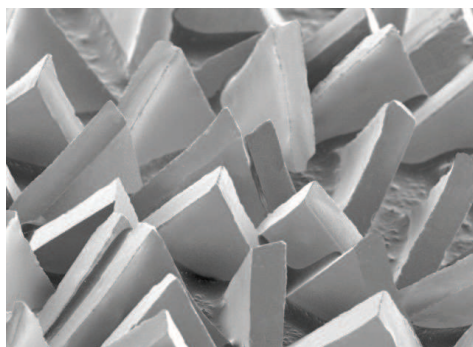


Figure 5 : Grains en céramique d'alumine (source 3M)

Enfin, la capacité d'un matériau à se fracturer et à générer de nouvelles facettes (auto-affûtage), est une propriété essentielle pour l'usinage par abrasion. Néanmoins, elle est très délicate à estimer en pratique.

3 Les abrasifs agglomérés

3.1 Généralités

Un outil abrasif aggloméré a comme propriété d'être massif et rigide. Il est essentiellement composé d'un mélange solide de grains abrasifs de taille uniforme et d'un agglomérant minéral (argile, silice, etc.), organique (résines synthétiques ou caoutchouc) ou métallique (bronze).

Sa fabrication consiste à réaliser successivement : un mélange homogène des grains abrasifs et du liant à température ambiante, le moulage de la meule à la géométrie et aux dimensions souhaitées, la cuisson et la mise aux cotes définitives. La cuisson des liants minéraux se fait à une température comprise entre 900 et 1300°C. On obtient ainsi leur vitrification. La polymérisation d'autres liants tels que les résines synthétiques et la vulcanisation du caoutchouc s'obtiennent à une température voisine de 180°C. Une fois cuite, la meule présente une structure poreuse. La Figure 6a et la Figure 6b présentent ce type de meule.

Pour utiliser les abrasifs les plus performants mais aussi les plus coûteux que sont le diamant et le nitrure de bore cubique centré (CBN), la conception des outils a été revue de manière à concentrer la présence des particules abrasives uniquement sur la partie active de la meule (Figure 6c). On parle alors de super-abrasifs. Les agglomérants sont des résines ou des métaux comme le bronze. Le choix du matériau des supports découle d'un compromis entre légèreté, conductivité thermique, facilité de mise en forme et prix de revient. Ils sont principalement dédiés à l'usinage des matériaux très durs comme les carbures de tungstène et certains aciers traités.

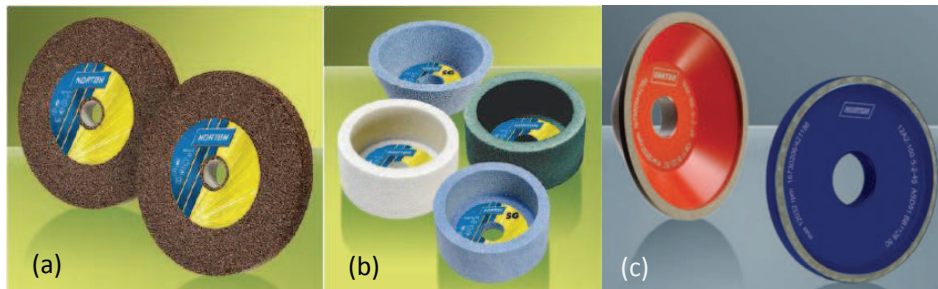


Figure 6 : Meules compactes (a,b) et meules super-abrasives (c) (source NORTON)

Trois applications industrielles font appel aux abrasifs agglomérés : la rectification, le tronçonnage et la reprise de forme.

3.2 La rectification et l'affûtage

La rectification est un procédé permettant de réaliser des surfaces planes ou de révolution (Figure 7). Ce procédé est employé sur des matériaux durs, pour la qualité de l'état de la surface obtenue et la précision dimensionnelle. A l'instar de l'usinage grande vitesse (UGV), la rectification a su tirer profit des dernières évolutions technologiques sur les abrasifs (CBN) et sur la technologie des broches de rectifieuses pour offrir des niveaux de productivité améliorés [2]. Néanmoins, la rectification reste cantonnée à des géométries de pièces beaucoup plus simples que celles réalisables par fraisage ou tournage.



Figure 7 : Opérations de rectification (source NORTON, PFERD)

Néanmoins, certaines opérations comme le taillage des goujures des fraises monoblocs donnent lieu à des géométries élaborées. Les opérations de rectification et d'affûtage se font couramment sous arrosage

pour évacuer les particules détachées de la pièce et de la meule et les calories produites par le processus d'enlèvement de matière.

La composition des agglomérants dépend avant tout du travail à réaliser par la meule : matériau usiné (dureté, résistance mécanique, conductibilité thermique, etc.), tenue du profil de la meule, débit matière recherché, etc. Le fabricant établit différents dosages pour prendre en compte : la résistance mécanique du liant, la conductivité thermique de la meule, la capacité d'accroche de l'abrasif sélectionné, la concentration optimale des particules abrasives.

Au final, l'utilisateur doit réaliser un choix dans la gamme des fabricants de meules sur la nature de l'abrasif (alumineux, CBN, carbure de silicium, diamant), la taille des grains, le grade (résistance mécanique de la meule), la concentration d'abrasifs et le liant (vitrifié, résines synthétiques, caoutchouc). Il devra enfin fixer une vitesse de coupe à la périphérie de la meule ainsi qu'une vitesse de déplacement de la meule par rapport à la pièce (vitesse d'avance).

Les rectifieuses s'apparentent beaucoup aux machines de fraisage ou de tournage. Compte tenu de la grande précision dimensionnelle recherchée, leurs organes comme le bâti, les guidages et la broche sont particulièrement massifs et robustes (absorption des vibrations, stabilité mécanique et thermique). Elles sont pilotées par une commande numérique capable de gérer le $1/10^{\text{ème}}$ de μm . Le mouvement de la meule par rapport à la pièce est défini par programmation. Compte tenu de la rigidité des éléments en place, l'effort presseur nécessaire à la pénétration des grains dans la matière et à l'arrachement du métal découle de l'interférence volumique entre la pièce et la meule et des paramètres cinématiques. Aucune information n'est fournie à l'utilisateur pour en connaître l'intensité exacte. Seule, l'observation des jets d'étincelles, du bruit, des éventuelles brulures sur la pièce, de l'état de surface résultant, de l'usure plus ou moins rapide de la meule donne des indications à l'opérateur sur le déroulement du process.

3.3 Le tronçonnage

L'opération de tronçonnage vise à partager un volume en deux parties en retirant le métal qui lie ces deux ensembles de matière (Figure 8). Cette opération est largement répandue dans l'industrie. Elle se réalise sur une très grande variété de matériaux métalliques ou non, sur des petites pièces ou des pièces de grandes dimensions. Son gros atout est d'être souvent réalisable avec une machine portative facilitant ainsi sa mise en œuvre. Les limites sont alors la précision et la profondeur de découpe. Les principales applications sont : la découpe des barres, tubes, profilés en vue de leur usinage, soudage ou assemblage, la découpe de tôle, la séparation des masselottes et canaux de coulée des pièces moulées, etc.



Figure 8 : Opération de tronçonnage (source PFERD)

Les disques à tronçonner sont appelés des abrasifs agglomérés à base d'oxyde d'aluminium ou de carbure de silicium. L'agglomérant est composé de résines synthétiques pour la souplesse qu'elles apportent au disque. Pour tolérer un effort transversal, les disques de tronçonnage sont renforcés avec une armature tissée en fibre de verre incorporée au moment du moulage des abrasifs. Le débit matière est là aussi le principal critère de choix dans la conception de ces outils abrasifs.

3.4 Reprise de forme : ébarbage, arasage, ébavurage, chanfreinage

Bon nombre de procédés de fabrication ne sont pas capables de fournir des pièces exemptes de défauts géométriques : les bavures sur une pièce usinée par outil coupant, les cordons de soudure pour les pièces mécano-soudées, les bavures sur le plan de joint d'une pièce moulée ou forgée, etc. L'usinage par abrasion offre des solutions pour corriger ces défauts. Ces opérations sont pour la plupart manuelles car pour des questions d'accessibilité et de mise en œuvre, l'opérateur utilise un appareillage portatif. Aussi, pour des raisons analogues, les mêmes outils sont utilisés pour réaliser des petits usinages (chanfrein, méplats, etc.) sur des pièces de grandes dimensions.

Pour les opérations lourdes (ébarbage de pièces de fonderie ou de forge), les meules ont une géométrie très sommaire (Figure 9).



Figure 9 : Meules d'ébarbage (source NORTON)

Les performances des abrasifs agglomérés sont orientées dans ce cas vers le débit matière. Ces mêmes opérations peuvent être réalisées par des disques à tronçonner capables de supporter des efforts transversaux importants.

Pour les opérations de moins grandes envergures, les compagnons disposent d'un large panel de formes de meules (Figure 10). Elles sont entraînées en rotation par des petites machines très maniables.



Figure 10 : Outillage pour les opérations de reprise de forme (source NORTON, PFERD, DINABRADE)

4 Les abrasifs « souples »

4.1 Les différentes technologies d'abrasifs

4.1.1 Les abrasifs appliqués

L'abrasif appliqué est certainement le plus connu du grand public. Il se compose d'un support souple et d'une couche de grains abrasifs de taille homogène fixée sur ce support par des résines synthétiques (Figure 11). Le support peut être du papier d'un grammage compris entre 70 et 250 g/m² ou un textile en coton ou en polyester. Ainsi, ces supports sont plus ou moins résistants, plus ou moins rigides et plus ou moins résistants à l'eau.

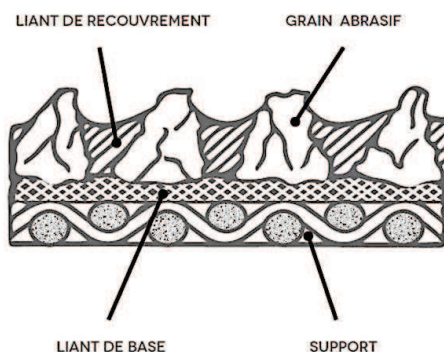


Figure 11 : Organisation structurelle d'un abrasif aggloméré (source PENTAR)

C'est dans cette catégorie d'outils abrasifs qu'est proposée une large palette d'abrasifs allant des particules naturelles comme l'émeri, le quartz jusqu'aux plus performants comme le diamant. Néanmoins, pour des raisons de coût et de maîtrise des procédés de fabrication, les plus utilisés sont les oxydes d'aluminium et le carbure de silicium.

Seules les résines synthétiques sont utilisées comme liant car les produits finis doivent avoir une certaine souplesse. Les fabricants optimisent leur composition et leur fabrication pour obtenir des caractéristiques précises dans l'accroche des abrasifs sur le support et dans la résistance mécanique et thermique du produit.

Les abrasifs appliqués se présentent de différentes manières : en feuilles rectangulaires, en disques circulaires, en bandes, en lamelles rapportées sur disque (Figure 12).



Figure 12 : Différentes présentations d'abrasifs appliqués (source 3M, NORTON)

Les abrasifs appliqués sont utilisés à sec ou bien dans un environnement humide (polissage carrosserie peinte de voiture par exemple).

4.1.2 Les abrasifs structurés

Basés sur une technologie datant de la fin des années 90, les abrasifs structurés se positionnent entre les abrasifs agglomérés et les abrasifs appliqués. Leur fabrication vise à constituer sur un support souple des petites portions de meules (Figure 13a). Ces dernières sont de géométries pyramidales (Figure 13b) ou parallélépipédiques (Figure 13c). L'avantage de ces produits est d'offrir la souplesse du support tout en mettant une quantité d'abrasifs plus importante que celle en place dans les abrasifs appliqués. Ainsi, par rapport aux abrasifs appliqués, leur durée de vie est plus grande et la taille de grains peut être plus petite.

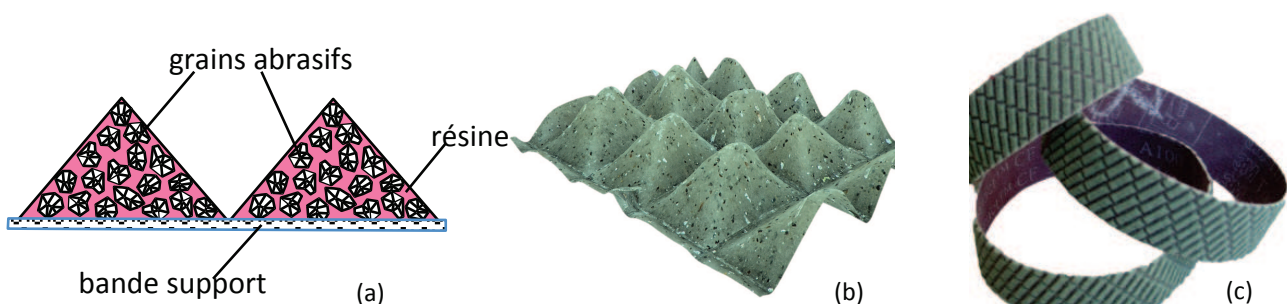


Figure 13 : Organisation des abrasifs structurés

4.1.3 Les abrasifs non-tissés

Les abrasifs non-tissés sont composés d'une structure faite de fibres synthétiques entremêlées sur lesquelles sont solidarisés des amalgames de grains abrasifs enrobés de résine (Figure 14). Le réseau de fibres peut être plus ou moins compact. Le gros atout de cette technologie est de maîtriser l'agressivité de l'enlèvement de matière que ce soit sur des géométries élémentaires de pièce ou bien des surfaces complexes et parfois d'accès difficile. Les supports peuvent prendre différentes formes : feuilles rectangulaires, disques, bandes, roues, etc. (Figure 15)

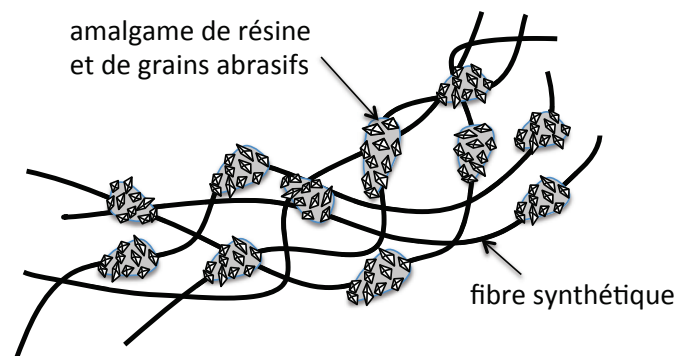


Figure 14 : Structure des abrasifs non-tissés



Figure 15 : Différentes présentations d'outils abrasifs non-tissés (source 3M)

4.1.4 Les abrasifs moulés

Les abrasifs moulés sont composés de branches synthétiques souples chargées d'abrasifs. Ces outils sont uniquement rotatifs. Leurs branches peuvent être parallèles à l'axe de rotation ou bien orientées radialement (Figure 16).



Figure 16 : Abrasifs moulés axiaux et radiaux (source 3M)

Ces produits sont appréciés pour leur souplesse et leur capacité à atteindre des zones difficiles d'accès.

4.1.5 Les pâtes abrasives

Les pâtes abrasives sont un mélange constitué de grains abrasifs, le plus souvent de diamant et d'un liant visqueux. La taille des grains est de quelques microns. Elles sont destinées à la finition qualité poli-miroir des surfaces. Elles fonctionnent suivant le mode d'abrasion trois corps. Leur application se fait par l'intermédiaire d'un feutre ou d'une mousse alvéolée (Figure 17).



Figure 17 : Supports applicateurs de pâte abrasive (source 3M)

4.2 Les opérations courantes

Les opérations réalisables avec des abrasifs « souples » se divisent en deux catégories : les opérations de reprise de forme ou de correction de la géométrie et les process orientés vers l'état de surface.

4.2.1 Reprise de forme : ébarbage, arasage, chanfreinage

A l'instar des abrasifs agglomérés, les opérations de reprise de forme sont envisageables avec des outils abrasifs appliqués, structurés ou non-tissés. Le débit offert par ces derniers est moins important mais ils permettent à l'opérateur de réaliser un travail plus soigné grâce à la souplesse des produits abrasifs.

Les opérations couramment menées sont le chanfreinage en vue du soudage de tôles ou de profilés, l'arasage des soudures (Figure 18a), l'ébavurage des pièces moulées ou matricées (Figure 18b), l'ébavurage et le rayonnage des arêtes des pièces usinées et la suppression des traces laissées par une fraise boule sur une surface gauche.

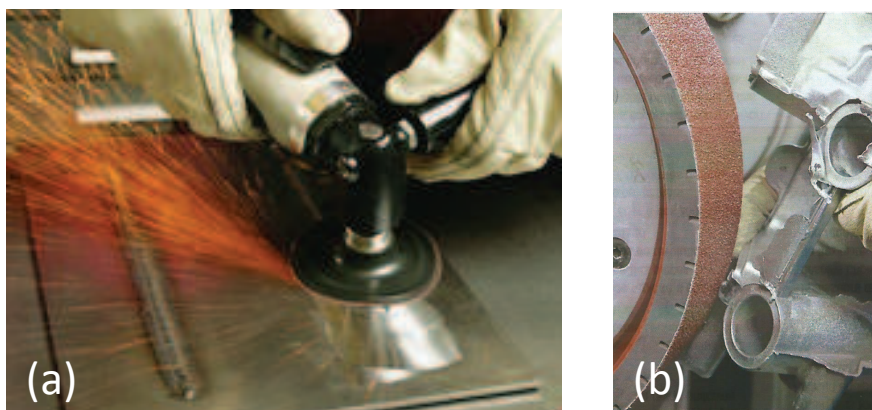


Figure 18 : Opérations de reprise de forme - (a) arasage de soudure (b) ébarbage (source 3M, PFERD)

4.2.2 Recherche d'un état de surface

L'usinage par abrasion est réputé pour donner des caractéristiques micro-géométriques précises aux surfaces des pièces métalliques. Le recours à de telles surfaces pour une pièce peut se justifier vis à vis de critères esthétiques ou fonctionnels (tenue à la fatigue, réduction du frottement, etc.)

L'éclat dégagé par une surface est essentiel pour les pièces de bijouterie, de mobilier urbain, de cuve alimentaire, de cartérisation, etc. La palette des éclats recherchés est très large. Cela peut aller d'un aspect brossé ou satiné pour un panneau inox d'un plan de travail de cuisine à un poli miroir pour un bijou ou un bord d'attaque d'aile d'avion. Toujours pour des raisons esthétiques, il est parfois nécessaire de faire disparaître des dégradations apparues au cours du processus de fabrication de la pièce (rayures, brûlures, etc.).

La deuxième raison pour un bureau d'études d'établir une spécification portant sur l'état de surface d'une pièce est fonctionnelle. Ici, on entend par fonctionnel la capacité de la surface à jouer pleinement sa mission au sein d'un produit grâce à ses caractéristiques micro-géométriques. En vue d'un traitement électrochimique de surface (galvanisation, anodisation, etc.) ou la dépose d'une peinture, la qualité du résultat est conditionnée par les aspérités présentes sur la surface. Une préparation de surface permet d'élaborer une accroche pour le revêtement envisagé. Les caractéristiques optimales sont alors définies par des critères de rugosité et de mouillabilité. Ces propriétés sont essentielles quand il s'agit d'un outillage de production de pièces. La qualité des surfaces des cavités des moules d'injection de pièces plastiques jouent un rôle direct sur la qualité des pièces fabriquées. Elles doivent avoir un aspect poli-miroir si la transparence est recherchée pour les pièces plastiques. De même, la qualité des cavités des moules métalliques de fonderie ou des matrices d'estampage a un impact sur l'aspect des surfaces des pièces produites par ces outils industriels. Aussi, les prothèses médicales (du genou ou de la hanche par exemple) ont besoin de réduire autant que possible le frottement entre les pièces en mouvement afin de limiter la génération de particules non assimilables par l'organisme et qui finiront tôt ou tard par dégrader le fonctionnement du mécanisme en place. Pour ces raisons, la qualité poli-miroir est recherchée sur les surfaces de contact. Pour des raisons similaires, cette propriété est recherchée sur les arbres à cames et leurs paliers dans un moteur à explosion. Enfin, pour améliorer la tenue à la fatigue ou à la corrosion, la surface des pièces peut être polie pour réduire ou refermer les criques logées sur leur surface périphérique voire les supprimer.

La Figure 19 donne une vue synthétique des cas de figures où la rugosité des surfaces a une importance esthétique et/ou fonctionnelle.

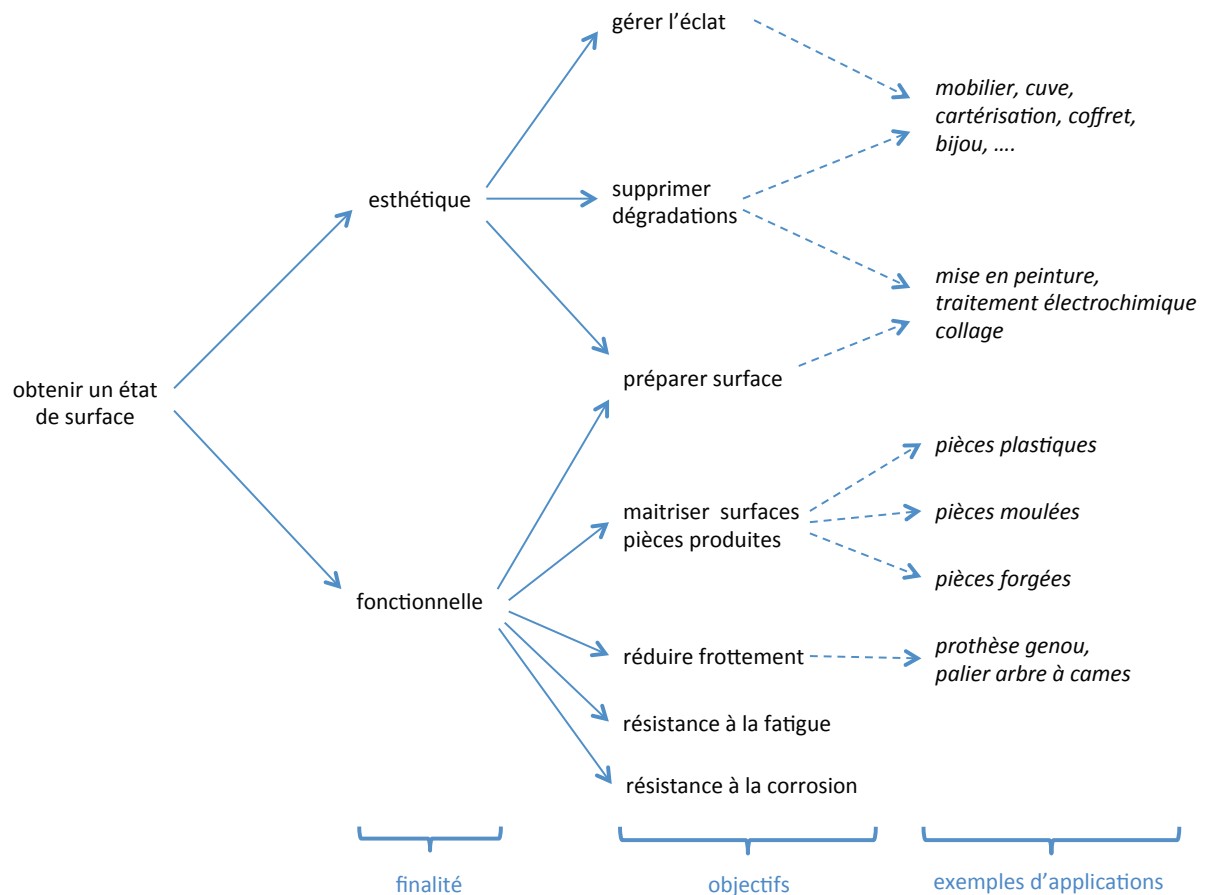


Figure 19 : Synthèse des applications nécessitant un état de surface particulier

Toutes ces opérations qui donnent les caractéristiques micro-géométriques des surfaces sont couramment regroupées sous le vocable de polissage. Elles clôturent le cycle de fabrication qui vise à agir mécaniquement sur la surface des pièces.

Les outils abrasifs « souples » sont les mieux placés pour amener une surface produite au niveau de qualité souhaitée. Les différentes raideurs proposées par ces outils permettent de maîtriser leur agressivité pour assurer une productivité acceptable sans pour autant dégrader la géométrie de la pièce polie. La variété des produits en termes de géométrie, de principes de fonctionnement et d'abrasifs utilisés permet de répondre à une grande diversité de situations.

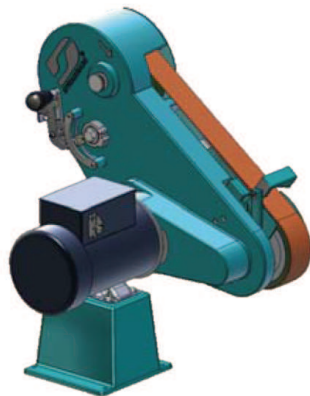
4.3 Les outillages associés

Le polissage est une tâche essentiellement manuelle assurée par des opérateurs qualifiés. Ils ont besoin de machines capables de mettre en mouvement l'outil abrasif. Celui-ci peut être linéaire, rotatif ou oscillant. Le déplacement de l'outil par rapport à la pièce est assuré par l'opérateur. Il a aussi pour mission d'exercer un effort presseur entre l'outil abrasif et la surface à polir et de valider la qualité des opérations. La gestion de l'effort presseur constitue une originalité majeure du polissage comparé aux autres procédés

d'enlèvement de matière. Elle permet de régler l'agressivité du processus d'enlèvement de matière ou de gérer la déformation de ce dernier de manière à épouser les formes de la pièce sans la dégrader.

La Figure 20 présente un panel des multiples outils utilisés : ponceuses à bandes (a), ponceuse rotative (b), meuleuse d'angle (c), ponceuse orbitale (d). Leur taille dépend de la productivité recherchée, de l'accessibilité des zones à polir, de la maniabilité nécessaire à un résultat de qualité et du confort de l'opérateur, etc.

Les tâches de parachèvement et de polissage ayant recours à une main d'œuvre qualifiée voire très qualifiée (poli miroir dans la cavité d'un moule) ont un impact significatif sur le coût de revient des pièces. Aussi se pose le problème de la répétabilité de ces opérations qui peut différer sensiblement dans le temps et d'un opérateur à l'autre.



(a) Ponceuses à bandes



(b) Ponceuse rotative



(c) Ponceuse à renvoi d'angle



(d) Ponceuse orbitale

Figure 20 : Différentes machines de ponçage/polissage (source 3M, DINABRADE)

Si certaines opérations ont pu être mécanisées comme le polissage des tôles, le recours aux robots poly-articulés est la voie la plus souvent suivie pour automatiser les postes de travail (Figure 21a). Des dispositifs compliant permettent à l'outil abrasif d'appliquer un effort constant sur la surface à polir (Figure 21b). Les trajectoires doivent se rapprocher de celles réalisées par un compagnon. Leur programmation et leur mise au point constituent une phase essentielle de l'industrialisation du procédé d'autant plus que le contrôle visuel en temps réel du processus n'existe plus.

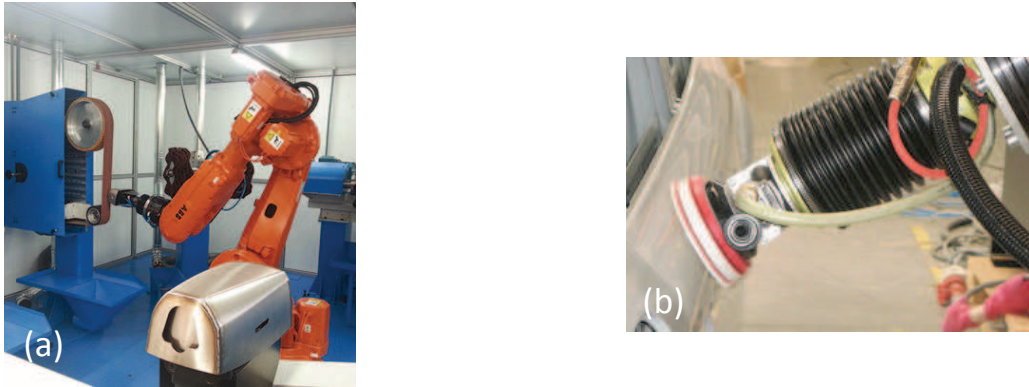


Figure 21 : Robot poly-articulé (a) - Dispositif compliant (b) (source ABB, FERROBOTICS)

5 Synthèse des procédés d'usinage par abrasion

Ce premier chapitre nous a permis de préciser les éléments clés qui caractérisent l'usinage par abrasion. Ce procédé a su bénéficier des progrès technologiques dans l'élaboration des grains abrasifs afin d'obtenir des performances de coupe et de résistance à l'usure de plus en plus élevées. Aujourd'hui, les grains en oxyde d'aluminium et en carbure de silicium sont les constituants les plus utilisés pour ce procédé. Deux propriétés caractérisent ces grains. Il s'agit de leur dureté et de leur taille. Aussi, l'industrie chimique a joué un rôle déterminant dans ces progrès pour obtenir des liants de plus en plus robustes pour des contextes de production toujours plus variées et difficiles.

Nous avons vu qu'il existe plusieurs manières d'associer les grains entre eux. Deux modes se distinguent. Le premier concerne les abrasifs agglomérés proposés sous forme de meules qui se caractérisent par une liaison rigide entre les grains. La rectification, le tronçonnage et l'ébarbage utilisent ces outils abrasifs. Leur principe de fonctionnement s'apparente pour beaucoup à l'usinage par outils coupants. L'enlèvement de matière résulte d'un mouvement de coupe obtenu par la rotation de la meule et d'un mouvement d'avance pour enlever la matière de proche en proche. Un effort de coupe intense nécessaire à la coupe du métal est présent à l'interface entre la pièce et la meule mais à aucun moment il ne rentre en jeu dans le pilotage du processus d'usinage. Le process est piloté en position mais pas en effort.

Le deuxième mode d'association se caractérise par une certaine souplesse dans la liaison entre les grains abrasifs. Différentes technologies permettent de proposer une graduation de cette souplesse. Ces outils permettent de corriger une géométrie et de donner un état de surface précisé par un bureau d'études. Les principaux cas de figures couramment rencontrés dans l'industrie ont été identifiés en fonction de la finalité recherchée des travaux. La mise en oeuvre des abrasifs « souples » est essentiellement réalisée par des opérateurs qualifiés. Ils doivent appliquer des trajectoires entre la pièce et

l'outil abrasif et dans le même temps gérer l'effort presseur de l'abrasif sur la surface polie. Cette deuxième fonction est un élément fondamental pour les opérations de polissage.

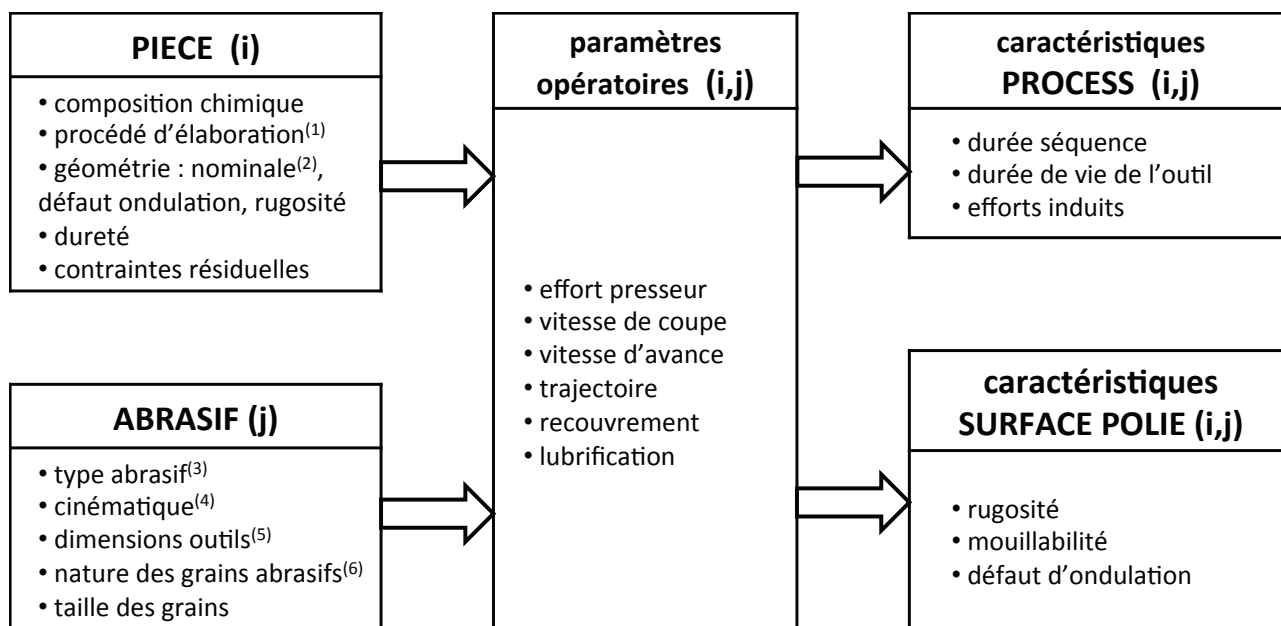
6 Gamme de polissage

C'est au bureau des méthodes qu'incombe la mission de concevoir le processus de polissage capable de réaliser les surfaces demandées au coût le plus réduit possible. Comme nous venons de le voir, il existe une large palette de solutions. De plus, pour mener à bien le polissage d'une surface, il est courant de faire appel à plusieurs outils abrasifs. A titre d'exemple, différentes tailles de grains sont souvent utiles pour passer d'une rugosité grossière à une rugosité plus fine. Un processus de polissage est donc composé de plusieurs séquences élémentaires, chacune faisant appel à un outil abrasif distinct et à un mode opératoire spécifique. L'élaboration d'une gamme de polissage se fait alors en deux temps. Tout d'abord, il est imaginé un enchaînement de séquences élémentaires caractérisées chacune par un outil abrasif, une machine associée, une trajectoire et une organisation du poste de travail. Cette tâche est avant tout une question de savoir-faire et d'expérience. Bien souvent, plusieurs scénaris peuvent être envisagés pour un même besoin. Dans un deuxième temps, en se basant sur le cahier des charges de la surface à polir, il est nécessaire de préciser le niveau des paramètres de fonctionnement comme l'effort presseur, la vitesse de défilement des grains, le recouvrement, la durée de l'opération. De là, les avant-projets imaginés peuvent être comparés et la solution la plus pertinente retenue.

La Figure 22 donne une vue synthétique de la démarche proposée et des entités pouvant être utiles pour mener à bien l'élaboration d'une gamme de polissage. Les données d'entrée concernent l'état de la pièce avant le processus de polissage et la référence de l'outil abrasif envisagé pour la séquence de polissage.

Concernant la pièce à polir, la nature du matériau de la pièce et sa géométrie nominale (plan, cylindre, surface gauche, etc.) sont essentielles pour rechercher un processus de polissage. Ces informations doivent être complétées par l'historique des opérations réalisées sur la pièce préalablement au polissage. En effet, ces dernières peuvent avoir un impact sur la structure cristalline de la pièce, sur sa dureté et les contraintes résiduelles présentes en surface. Elles ont aussi une incidence sur les défauts d'ondulation et de rugosité des surfaces à polir.

La référence d'un outil abrasif donne accès au type d'abrasif (aggloméré, structuré, non-tissé, etc.), à la cinématique de la machine, à ses dimensions et à la taille des grains abrasifs. D'autres éléments peuvent se révéler utiles pour connaître les performances de l'outil comme la nature du liant et la proportion entre les grains abrasifs et les résines synthétiques mais ils ne sont pas fournis spontanément par leurs fabricants.



(1) : fonderie, forgeage, laminage, usinage, traitements thermiques,...

(2) : plan, cylindre, surface gauche,...

(3) : abrasif appliqué, structuré, non-tissé,...

(4) : linéaire, circulaire, trochoïdal,...

(5) : largeur/longueur des bandes, diamètres des disques

(6) : oxyde d'aluminium, carbure de silicium,...

Figure 22 : Paramètres considérés lors de la mise en place d'un processus de polissage

Avec ces données, les paramètres opératoires comme l'effort presseur, la vitesse de défilement des grains, la trajectoire, le recouvrement et la lubrification sont fixés dans les plages d'utilisation recommandées. De ces choix résultent : la rugosité et la mouillabilité de la surface, la durée minimale de polissage, la consommation d'abrasif et les efforts induits sur la pièce.

Aujourd'hui, force est de constater le déficit de documentation et d'outils numériques dédiés aux opérations de polissage. Il est difficile de connaître les plages d'utilisation des paramètres opératoires et leurs valeurs optimales, ainsi que les propriétés des surfaces obtenues avec les choix réalisés. C'est ici que l'empirisme évoqué précédemment prend racine.

Pour mesurer la difficulté à identifier les paramètres influents dans un processus de polissage et leur plage de travail et à élaborer des modèles permettant de prédire le niveau des paramètres de sortie, nous proposons d'explorer sur un cas industriel la mise en place de ces informations. Notre objectif est d'élaborer les protocoles expérimentaux nécessaires à ces travaux et de produire les modèles et données associées pour le cas d'espèce sélectionné.

7 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de présenter l'étendue des solutions offertes par l'usinage par abrasion et tout particulièrement par le polissage. Il a été mis en avant les modes opératoires les plus couramment retenus et les paramètres à prendre en compte pour atteindre les objectifs de qualité prescrits par les donneurs d'ordres. Les opérations de polissage souffrent d'un recours trop fréquent à des opérateurs hautement qualifiés. Cette situation découle de la difficulté à prédire les résultats d'une séquence de polissage en termes de rugosité et de durée des opérations. Nos travaux ont pour but d'examiner la possibilité de mettre en place pour un cas d'espèce industriel, les plages de travail pour les paramètres d'entrée ainsi que les modèles et les données associées nécessaires à l'estimation des paramètres de sortie.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Différents travaux ont été menés par la communauté scientifique pour comprendre les phénomènes physiques propres à l'usinage par abrasion, identifier les paramètres nécessaires à la description du comportement de la matière et des outils, proposer des lois qui permettent de prédire les performances du procédé et définir des stratégies pour permettre l'obtention d'un niveau de qualité de surface conforme aux attentes des donneurs d'ordres tout en maîtrisant les coûts de revient. Nous proposons ici de faire le point sur ces travaux qui permettent de répondre à certaines questions soulevées au chapitre précédent.

A cet effet, les premières réflexions qui viennent à l'esprit sur le sujet visent à comprendre les mécanismes d'enlèvement de matière. Pour cela, l'outil de coupe est réduit à un grain unique de géométrie connue. Le travail consiste à comprendre le devenir de la matière au cours d'un essai de rayage. Nous verrons donc les principaux résultats apportés par ces travaux et les verrous scientifiques qui entravent une compréhension exhaustive de l'usinage par abrasion.

Néanmoins, pour fournir des réponses aux questions posées, différentes lois ont été proposées pour caractériser certains phénomènes mis en jeu. Nous les présenterons en prenant soin de préciser les domaines pour lesquels elles ont été imaginées et quelles sont les limites de leur application.

Enfin, le recours au polissage se justifie pour l'obtention de caractéristiques micro-géométriques sur toute l'étendue d'une surface de forme élémentaire comme un plan, un cylindre ou bien une surface gauche, avec une accessibilité parfois délicate. Nous présenterons les travaux qui visent à tirer le meilleur profit des technologies actuelles autant sur les outils abrasifs que sur les machines de production pour répondre aux exigences toujours plus poussées des utilisateurs en terme de qualité, de répétabilité et de productivité. Ces études sont déterminantes pour réussir l'automatisation de ce procédé.

1 Etude d'une rayure

1.1 Mise en oeuvre

Pour comprendre les mécanismes d'enlèvement de matière par des grains abrasifs, la solution la plus courante est de réaliser un essai de rayage à l'aide d'un indenteur en diamant. Alors que les grains abrasifs ont une géométrie quelconque car ils sont laissés à l'état brut après leur concassage, la géométrie de l'indenteur, quant à elle, est volontairement prédéfinie de manière à renouveler les essais dans des

conditions identiques voire à intégrer l'impact de la géométrie dans la modélisation de l'enlèvement de matière. En pratique plusieurs formes ont été retenues : la sphère, le cône avec une terminaison sphérique plus ou moins importante, pyramidale à trois ou quatre faces (Figure 23). Si le diamant est généralement retenu pour ses propriétés de dureté, il a pour inconvénient d'imposer un coefficient de frottement entre l'indenteur et la matière rayée. Ce choix oblige à des corrections sur les études où ce paramètre est pris en compte et quand les grains abrasifs sont en réalité en carbure de silicium ou en oxyde d'aluminium.

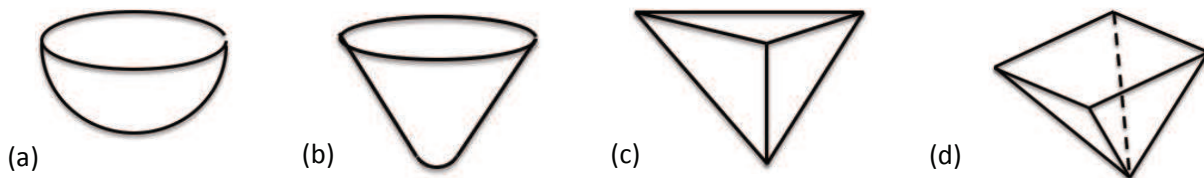


Figure 23 : Géométrie des indenteurs utilisés pour l'essai de rayage

(a) sphérique – (b) conique – (c) pyramidale 3 faces – (d) pyramidale 4 faces

Les principaux paramètres du processus de rayage sont présentés sur la Figure 24. On y trouve les paramètres géométriques : la profondeur de la pénétration de l'indenteur (δh) et l'angle formé entre la surface de l'échantillon et la face de l'indenteur en contact avec la matière (β). Les paramètres du processus sont la pression exercée par l'indenteur de manière à obtenir sa pénétration dans la matière (p) et l'effort transversal (F) pour obtenir le déplacement de l'indenteur dans la matière à une vitesse (v).

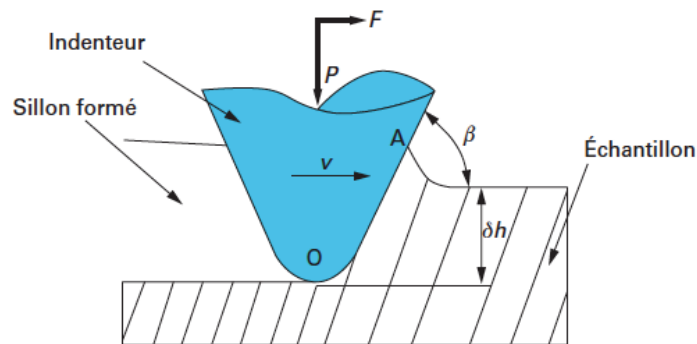


Figure 24 : Paramètres d'un essai de rayage [3]

Différentes installations ont été imaginées pour mettre en œuvre les essais de rayage. Elles se différencient par la cinématique de l'indenteur par rapport à l'échantillon (linéaire ou circulaire), sa vitesse de déplacement et par la profondeur de l'indentation. Le dispositif expérimental doit être capable de relever avec précision la géométrie de la rayure, l'effort de pénétration appliqué et les efforts induits au cours du processus de rayage. Certains équipements permettent la répétition du processus au cours d'un même essai pour disposer d'un grand nombre de relevés élémentaires. A titre d'exemple, la Figure 25 présente l'installation de M. Barge [4] où l'indenteur est placé sur un disque animé d'un mouvement de rotation.

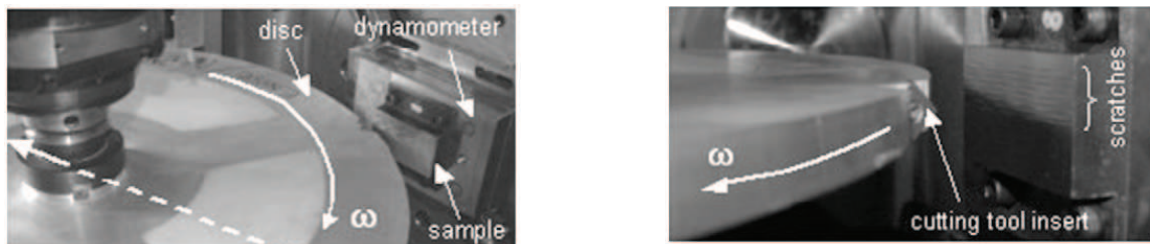


Figure 25 : Banc de rayage de M. Barge [4]

Les réponses obtenues avec ce type de dispositif sont intéressantes et permettent d'établir des modèles pertinents sur les efforts appliqués par l'indenteur sur la matière. La Figure 26 présente la mesure des efforts normal et tangential réalisée dans les travaux de M. Barge.

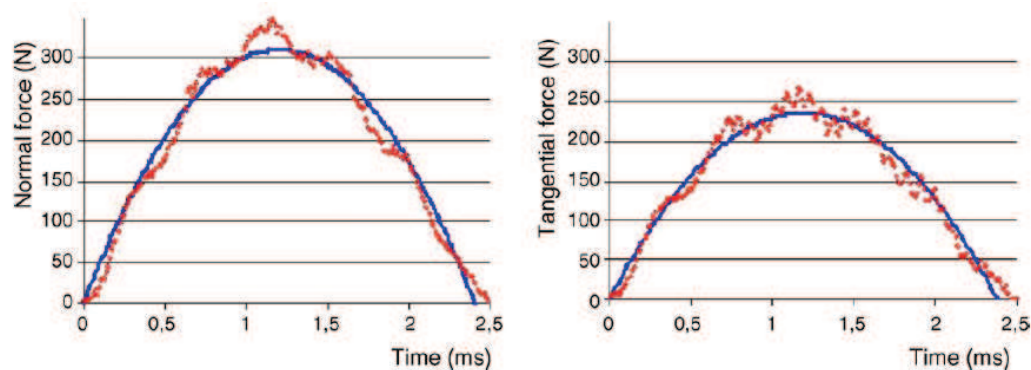


Figure 26 : Superposition des efforts modélisés et des efforts mesurés sur le banc de M. Barge [4]

1.2 Principaux résultats

Les essais de rayage ont tout d'abord permis de mettre en évidence les différents comportements possibles de la matière. Les clichés réalisés à l'aide d'un MEB par K. Hokkirigawa [5] mettent en évidence plusieurs comportements de la matière devant l'indenteur. La Figure 27a met en évidence un comportement de labourage et la Figure 27b un processus de coupe du métal.

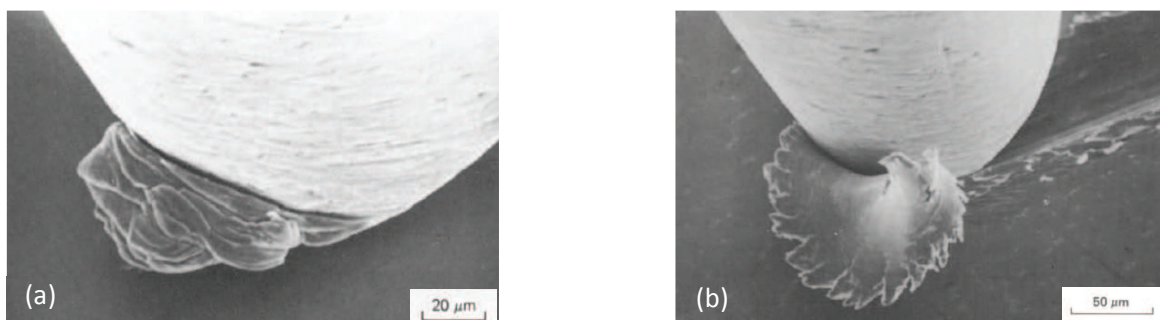


Figure 27 : Comportement de la matière devant l'indenteur - (a) labourage - (b) coupe du métal [5]

KH. Zum Gahr [6] propose plusieurs modes d'interaction (Figure 28).

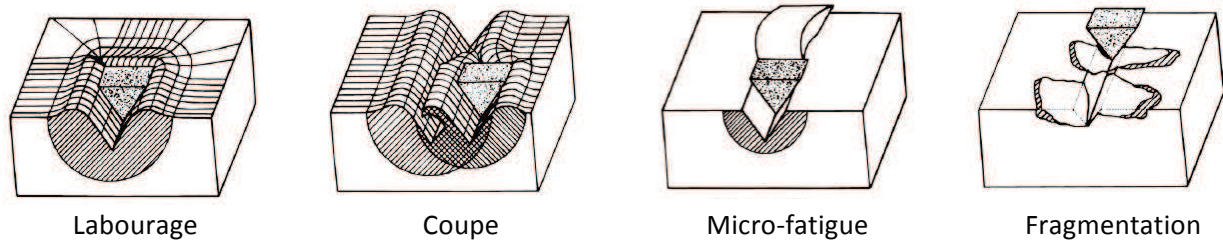


Figure 28 : Différents modes d'interaction [6]

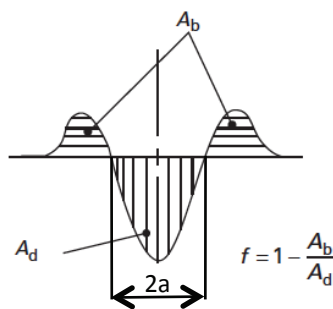
Le premier s'apparente à un labourage. La matière est déplacée mais pas détachée de la pièce de départ. Un bourrelet existe de part et d'autre du sillon formé ainsi qu'à l'avant de l'indenteur. Si l'opération est répétée sur la même zone à maintes reprises, la matière finit par se détacher, c'est alors de la micro-fatigue. Une autre possibilité est d'obtenir la coupe du métal. C'est le mode recherché par excellence. Enfin, la matière peut se détacher par fragmentation. Les caractéristiques mécaniques du matériau (élasticité, plasticité, dureté, ductilité, etc.) sont au centre des considérations pour justifier ces différents comportements.

J. Goddart et H. Wilman [7] ont proposé une approche analytique du phénomène de rayage pour exprimer le volume de matière déplacé (V_d) sur une distance parcourue (L) :

$$(Eq. 1) \quad V_d = \frac{2 \cdot \tan \beta}{\pi} \cdot \frac{P \cdot L}{H_s},$$

où P est la pression exercée suivant la normale à la surface et H_s est la dureté du matériau rayé.

Pour mettre en évidence l'écoulement latéral de la matière déplacée par l'indenteur, il a été mis en place le facteur d'enlèvement de matière (f). Il est présenté Figure 29.



A_d : aire de la rayure
 A_b : aire totale des bourrelets

Figure 29 : Facteur d'enlèvement de matière (f)

K. Hokkirigawa a mis en évidence l'évolution de la fraction enlevée (f) avec le rapport de pénétration $\delta h/a$ pour un acier 100C6 [8]. (a) est la demi-largeur de la rayure formée (Figure 30). L'importance des bourrelets est fortement liée à la ductilité du matériau. Elle est d'autant plus réduite que le matériau est dur.

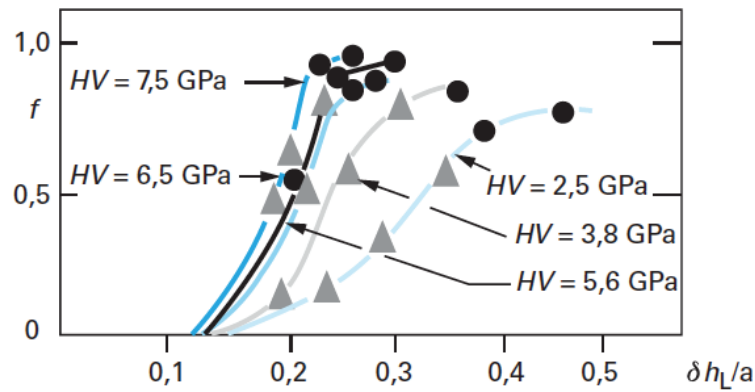
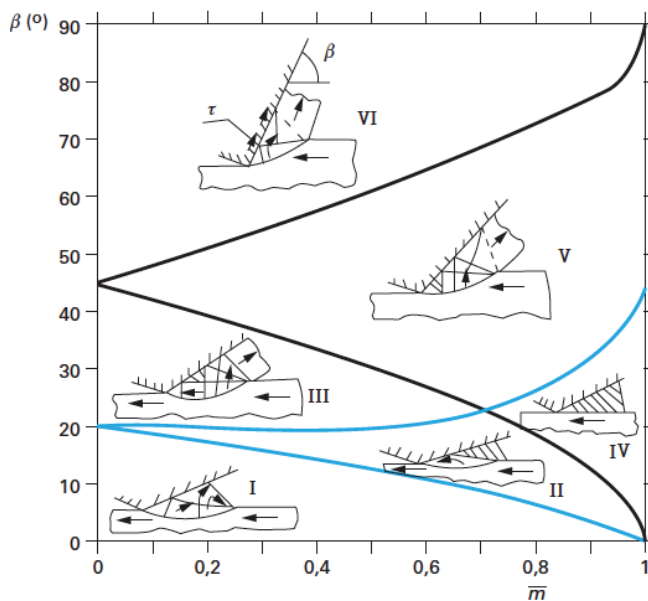


Figure 30 : Evolution de la fraction enlevée pour différentes duretés de matériaux [8]

Un autre sujet d'intérêt est le comportement de la matière suivant la direction de déplacement de l'indenteur. En considérant un matériau rigide parfaitement plastique, il a été mis en évidence que l'angle d'attaque (β) est un paramètre très influent. Les travaux de H. Petryk [9] ont permis de décrire les différents écoulements de la matière en fonction du coefficient de frottement de Tresca ($\bar{m}$) et de l'angle d'attaque (β) (Figure 31).



Les différentes zones identifiées sont :

- I. vague plastique ;
- II. vague + arête rapportée ;
- III. vague + copeau ;
- IV. arête rapportée ou bourrelet adhésif ;
- V. copeau + arête rapportée sous la pointe ;
- VI. copeau

Figure 31 : Différents écoulements de la matière identifiés par H. Petryk [9]

Il a été mis en avant par différents auteurs qu'il existe un angle d'attaque critique en dessous duquel la coupe du matériau ne peut avoir lieu. Une série de passages répétés va, à terme, produire un enlèvement de matière par fatigue. La valeur de cet angle dépend essentiellement du coefficient de frottement du matériau sur l'indenteur ainsi que de sa capacité d'écrouissage.

En conclusion, le recours aux lois de base la Mécanique a permis de décrire avec précision le comportement de la matière lors du passage d'un indenteur en diamant.

1.3 Etudes numériques

Différentes équipes ont abordé la question du rayage en faisant appel aux éléments finis [10], [11], [12]. Les logiciels utilisés sont notamment FORGE 3 ou ABAQUS. Pour les matériaux métalliques, l'hypothèse d'un comportement parfaitement plastique s'avérant satisfaisante, les simulations numériques ont permis de valider le bien fondé des approches analytiques sur l'essai de la rayage [13], [7]. Par contre, le comportement beaucoup plus élastique des polymères complique la modélisation des contraintes au voisinage de la rayure et de sa géométrie.

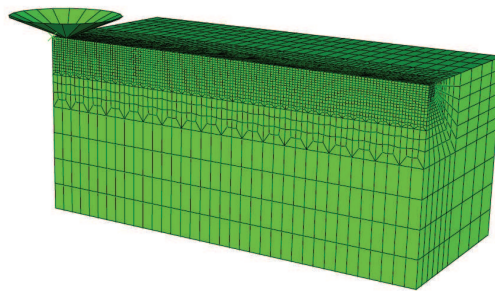


Figure 32 : Représentation du maillage utilisé pour simuler un essai de rayage [10]

F. Wredenberg [10] propose un modèle qui permet de déterminer le rapport entre l'effort tangentiel et l'effort presseur en fonction du coefficient de frottement entre l'indenteur et le métal rayé.

La Figure 33 fournit la simulation sous FORGE 2 de la géométrie de la matière (acier) à l'avant d'un indenteur conique pour différents angles d'attaque de ce dernier. Les angles de 60° et 45° donnent naissance à des copeaux alors que les angles de 30° et 19,7° produisent des bourrelets.

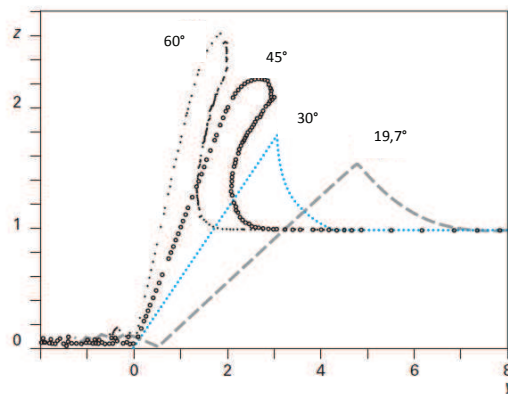


Figure 33 : Simulation de l'écoulement matière sous FORGE 2 [14]

Ces outils permettent aussi d'établir la distribution des déformations plastiques dans la région traversée par la rayure. La Figure 34 donne cette distribution pour l'exemple développé dans la Figure 33.

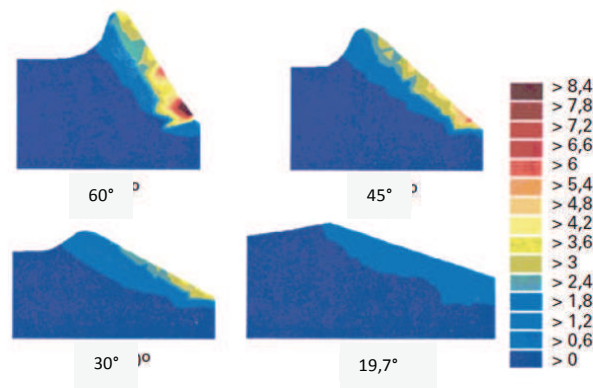


Figure 34 : Distribution des déformations plastiques dans la région traversée par la rayure [14]

1.4 Bilan des essais de rayage

L'idée de comprendre l'impact d'un grain abrasif sur le matériau poli est légitime. De nombreux travaux ont permis de dégager des enseignements utiles à la compréhension des mécanismes de l'usinage par abrasion. Ils portent sur les différents comportements de la matière, les paramètres influents sur le processus comme l'angle d'attaque du grain abrasif, l'effort presseur nécessaire à la pénétration de ce dernier dans la matière et la dureté du matériau. Différents modèles analytiques ont pu être élaborés pour le rayage des métaux car l'hypothèse d'un matériau parfaitement plastique s'est avérée satisfaisante et les théories sur la plasticité ont pu être exploitées ici. Les approches par éléments finis ont permis d'aller plus loin dans la prédiction du déplacement et la coupe du métal et la voie n'est certainement pas épuisée.

Néanmoins certains verrous scientifiques nous empêchent d'atteindre l'objectif visé à savoir disposer de modèles suffisamment précis pour prédire, par exemple, la consommation matière, le rapport entre l'effort tangentiel et l'effort presseur ou encore la rugosité de la surface polie.

Les difficultés sont de différentes natures. La géométrie des grains de par leur mode d'élaboration est aléatoire alors que la géométrie des indenteurs est constante pour un modèle donné. Ensuite, le phénomène de labourage complique très certainement les modélisations élaborées. Les photos de surfaces polies (Figure 35) illustrent cette réalité. En effet, l'enlèvement de matière qui se produit suite à une multitude de micro déplacements de la matière est d'un niveau de complexité difficilement abordable avec les approches et outils actuels. Enfin, le rapport entre la taille des grains abrasifs et la taille des grains du matériau est rarement pris en compte. Les nouvelles technologies d'appareillage, de mesure et d'analyse des rayures permettront certainement un meilleur éclairage sur cette question dans les années à venir. La géométrie initiale de la surface polie devra être alors prise en compte. Pour terminer, le polissage est un process thermomécanique, or, les aspects thermiques sont rarement considérés. Compte tenu des gradients de température en place, leurs incidences dans le processus d'abrasion semble non négligeable.

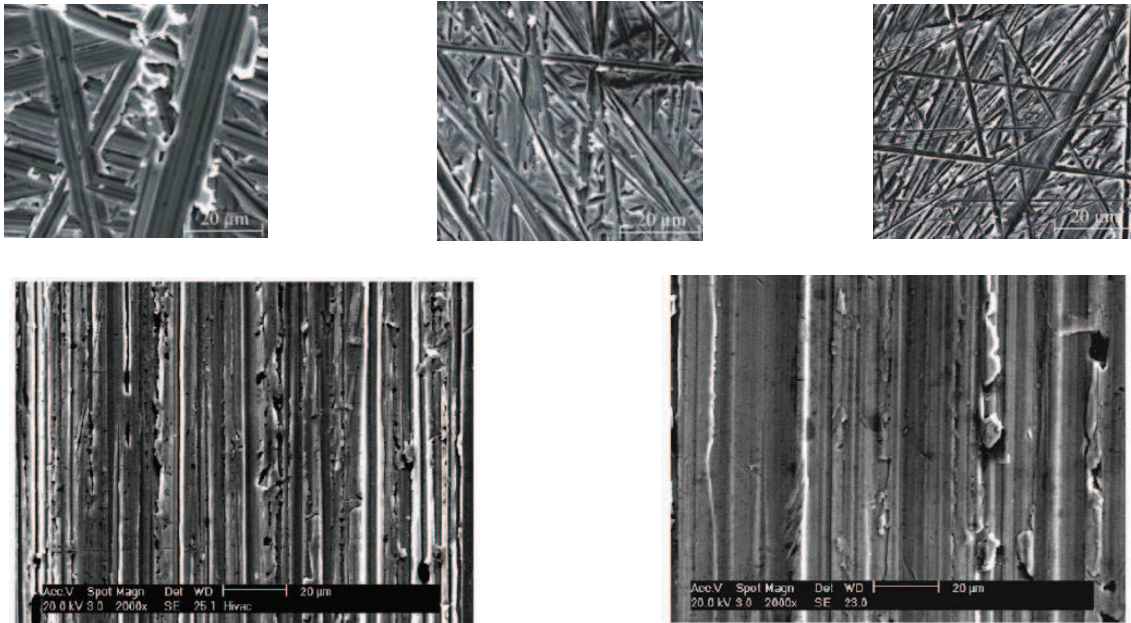


Figure 35 : Photos de rayures sur une surface polie [15], [16]

2 Etude de la consommation matière

Le polissage est un procédé d'enlèvement de matière. La connaissance du débit matière est nécessaire pour estimer la durée des opérations. C'est F.W. Preston, dès 1927, qui a proposé une modélisation du taux d'enlèvement de matière (TEM). Elle était dévolue au polissage du verre. Elle est définie par (Eq. 2). Le TEM ou encore la vitesse d'enfoncement de l'abrasif dans la matière polie (dz/dt) est proportionnelle à la pression exercée par les grains abrasifs sur la matière (p), la vitesse de défilement des grains (V) et à une constante (C_p). Cette dernière est propre à un couple matériau poli – outil abrasif utilisé. Elle dépend notamment des caractéristiques mécaniques du matériau (dureté, résistance mécanique), de la nature et de la taille des grains et de la nature du liant pour les processus abrasifs 2 corps. Elle est régulièrement exprimée en $\text{mm}^3/\text{N.m}$.

$$(Eq. 2) \quad TEM = \frac{dz}{dt} = C_p \cdot p \cdot V \quad .$$

Certains secteurs d'activité comme les industries du composant électronique ou de l'optique ont voulu aller plus loin dans la modélisation de l'usinage abrasif. Le polissage chimico-mécanique (CMP : chemical mechanical polishing) est le processus requis pour la réalisation de surfaces extrêmement lisses pour les composants en cuivre ou en silicium au cœur des composants électroniques, des surfaces de stockage des données dans les disques durs. C'est un processus trois corps où l'enlèvement de matière est obtenu à la fois par abrasion et, suivant les matériaux en présence, par attaque chimique.

Plusieurs approches ont été retenues pour proposer de nouvelles modélisations.

2.1 Approches empiriques

De nombreuses études ont cherché à rapprocher les résultats expérimentaux des principaux paramètres du process. Elles mettent en évidence leur rôle prépondérant dans la consommation matière.

Différentes expressions ont été proposées pour définir le TEM dans des productions basées sur le polissage chimico-mécanique. Les équations (Eq. 3) à (Eq. 6) sont issues des travaux respectivement de CC. Wang [17], FG. Shi [18], CW. Liu [19] et WT. Steng [20]

$$(Eq. 3) \quad TEM = K \cdot P^{\frac{n}{2}} \cdot V^{1-\frac{n}{2}} \quad ,$$

$$(Eq. 4) \quad TEM = K \cdot p^{\frac{2}{3}} \cdot V \quad ,$$

$$(Eq. 5) \quad TEM = K \cdot \left(\frac{2}{E}\right) \cdot P \cdot V \text{ où } E \text{ est le module de Young du matériau poli,}$$

$$(Eq. 6) \quad TEM = K \cdot P^{\frac{5}{6}} \cdot V^{\frac{1}{2}} \quad .$$

LM. Cook [21] a mis en évidence que le TEM est fonction de la taille des grains et du PH du fluide porteur des particules abrasives. J. Warnock [22] poursuit le même objectif en privilégiant la taille des grains et leur concentration. Y. Wang [23], quant à lui, se concentre sur le niveau des contraintes sur le patin presseur. CW. Liu [19] utilise une approche statistique et les lois de l'élasticité pour caractériser le processus d'enlèvement de matière.

Ces différentes propositions sont indépendantes du temps. A. Guiot [24] a mis en évidence que le pouvoir abrasif des disques abrasifs diminue dans le temps à cause des transformations subies par les grains abrasifs (fragmentation, élimination) et la présence des résidus de polissage (Figure 36). Il signale que de grandes disparités existent au tout début de son utilisation. La mise en place d'un modèle passe par une période de rodage de manière à évacuer ces perturbations.

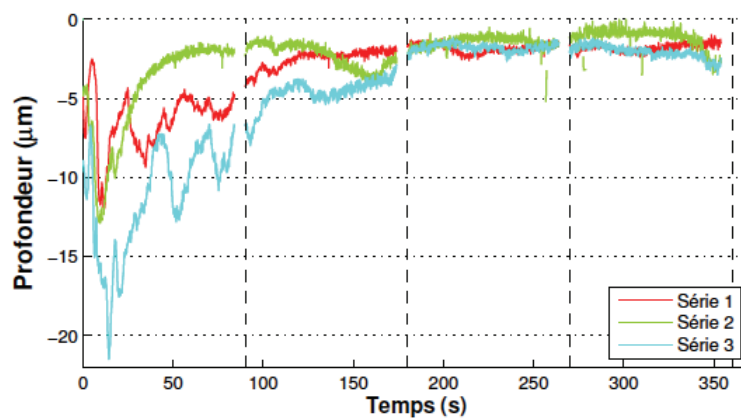


Figure 36 : Evolution de la profondeur polie en fonction du temps [24]

2.2 Approches analytiques

Pour aller plus loin, YR. Jeng [25], J. Luo [26], Y. Wang [23] ont exploité les lois de l'élasticité, intégré des approches statistiques pour prendre en compte une proportion plus ou moins grande de particules en contact avec le matériau à polir en fonction de la force exercée par le patin presseur sur les particules abrasives (cf. Figure 37) et considéré la rugosité de la surface polie.

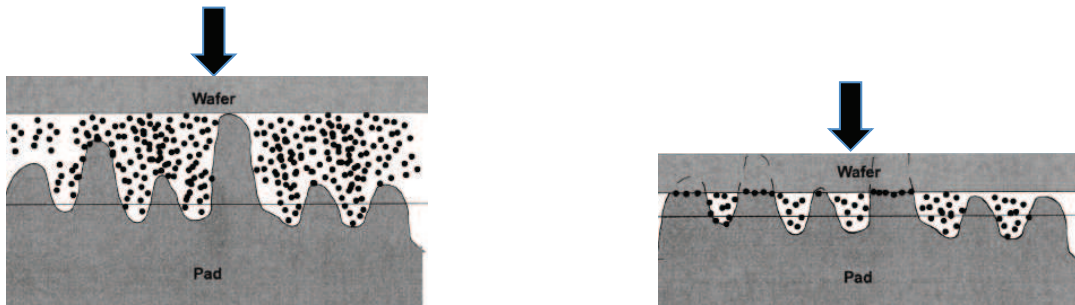


Figure 37 : Influence de l'effort presseur sur la distribution des particules abrasives [25]

Quant à F. Klocke, il s'est appuyé sur la théorie de Hertz (cf. Figure 38) pour fournir un éclairage plus poussé sur les mécanismes du polissage trois corps.

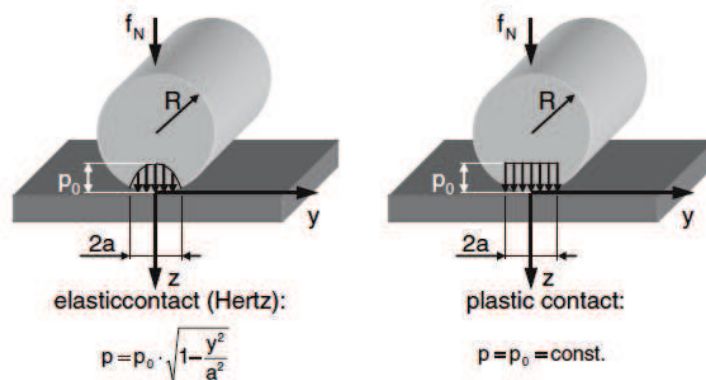


Figure 38 : Paramétrage de l'étude de F. Klocke s'appuyant sur la loi de Hertz [27]

Les expressions issues des travaux de YR. Jeng [25], J. Luo [26], Y. Wang [23] prennent en compte des paramètres ignorés jusque là comme la concentration des particules abrasives, la densité des matériaux impliqués dans le processus de polissage, le diamètre moyen des grains abrasifs, la hauteur moyenne des aspérités de la surface initiale, la profondeur de la pénétration des grains dans la matière et dans le patin presseur.

J. Luo [26] souligne qu'au delà d'une certaine pression de contact, le polissage trois corps s'apparente au polissage deux corps car les grains ne roulent plus entre la pièce et le patin presseur.

2.3 Approches numériques

Différents auteurs ont fait appel aux techniques des éléments finis pour modéliser le polissage. Là encore, c'est dans le domaine du polissage chimico-mécanique que se concentrent les études de YY. Lin [28], SP. Lo [29] et KS. Chen [30]. C'est le modèle de Preston qui est retenu pour modéliser le taux d'enlèvement de matière. Ces études apportent des réponses originales sur la distribution des contraintes sur la surface polie mais pas d'enseignement supplémentaire sur le TEM.

Une autre technique numérique a été exploitée par D. André [31] dans le cadre du polissage du verre. Il s'agit de la méthode des éléments discrets (DEM). La modélisation proposée repose sur la division du matériau en éléments discrets reliés par des liaisons cohésives. Le principe du modèle est de gérer l'évolution de ces liaisons, ruptures comprises. Il permet ainsi de simuler efficacement l'enlèvement des particules de silice.

2.4 Bilan des travaux sur la consommation matière

L'étude des travaux portant sur la consommation de matière fait ressortir que la loi de Preston peut s'appliquer bien au delà du polissage du verre avec un degré de précision satisfaisant. Si certains ont cherché à améliorer ce modèle par des approches empiriques ou analytiques parfois très poussées, elles n'ont pas de caractère générique.

Quant aux approches numériques basées sur les éléments finis, elles n'apportent pas de réponse à la problématique de la consommation de matière. Pour ce qui est de la technique par éléments discrets, elle n'a pas été appliquée à ce jour sur des matériaux métalliques. Il n'est donc pas acquis que cette approche donne des résultats exploitables.

En conclusion, nous nous appuyerons sur la loi de Preston comme point de départ pour développer notre problématique sur la consommation de matière.

3 Etude de la cinématique du polissage

Le polissage est une opération d'enlèvement de matière qui vise à donner des caractéristiques micro-géométriques à toute l'étendue d'une surface. Sa typologie (plan, cylindre, cône ou surface gauche concave ou convexe) conditionne les moyens à mettre en œuvre pour ce process. Aussi, il est rare de disposer d'un outil capable de recouvrir la totalité de la surface à polir. Pour des process de grande série comme le polissage des tôles, des machines spéciales sont couramment mises place. Par contre, le polissage des cavités de moules destinés à l'injection de pièces plastiques est un process de pièces unitaires ou de petites séries. Le polissage de surfaces gauches nécessite le déplacement de l'outil de polissage dans les trois

directions de l'espace et dans le même temps son orientation dans l'espace ce qui requiert deux mobilités en rotation. Les machines les plus utilisées sont les centres d'usinage cinq axes. Ils ont pour avantages d'offrir une structure robuste et de réaliser l'opération de polissage avec la machine ayant réalisé l'usinage à l'outil coupant de la surface gauche. L'autre solution très usitée aussi est le robot poly articulé (Figure 21 au chapitre 1). Il a pour avantage de présenter un coût d'acquisition inférieur à un centre d'usinage cinq axes et offrir un volume de travail plus élevé. Par contre, il n'offre ni la rigidité et ni la précision d'une machine de fraisage.

L'un des principaux challenges de la mise en place d'un processus de polissage est la définition d'une trajectoire de l'outil de polissage sur la surface à traiter. En effet, la trajectoire retenue ne doit impacter en rien l'uniformité de la micro-géométrie de la surface polie. Deux autres paramètres ont un impact sur le résultat, il s'agit de l'effort presseur et du degré d'usure des disques abrasifs. Plusieurs auteurs, X. Pessoles [32], J. Chaves-Jacob [33] et HY Tam [34] ont cherché à se rapprocher du mouvement appliqué par les compagnons chargés de polir les surfaces internes des moules pour l'injection de pièces plastiques. La Figure 39 fournit différentes stratégies étudiées et la Figure 40 donne la trajectoire issue des algorithmes de Hilbert pour le polissage d'un dôme.

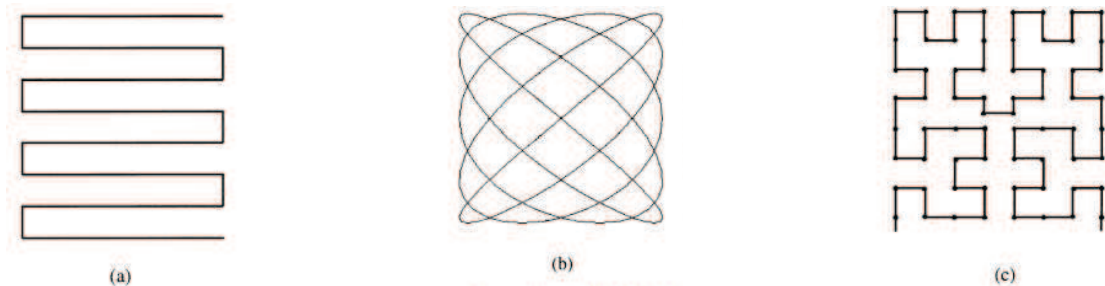


Figure 39 : Différents stratégies de balayage - (a) cartésien - (b) courbes de Lissajous - (c) courbes de Peano [34]

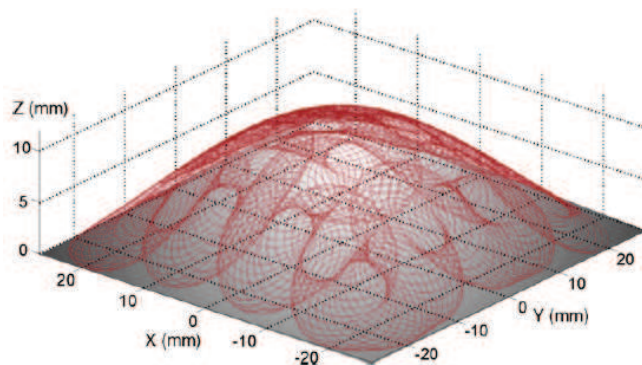


Figure 40 : Trajectoire issue des algorithmes de Hilbert pour le polissage d'un dôme [32]

J. Chaves-Jacob a intégré l'usure de l'outil abrasif dans la recherche de la trajectoire idéale. Après avoir testé différentes stratégies, il arrive à un déplacement optimal avec un mouvement élémentaire triangulaire (Figure 41).

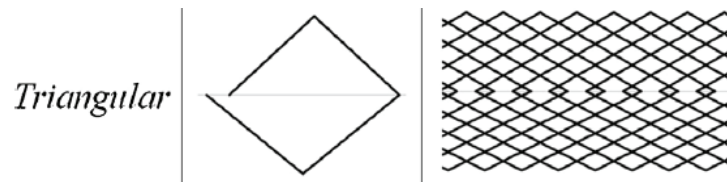


Figure 41 : Trajectoire optimale d'après J. Chaves-Jacob [33] avec un mouvement élémentaire triangulaire

Les auteurs soulignent l'importance de certaines performances nécessaires pour atteindre les objectifs de qualité recherchés, tel que l'aspect poli-miroir. L'effort presseur est mis en avant par MJ Tsai [35], F. Nagata [36] et J. Chaves-Jacob [33]. X. Pessoles [32], quant à lui, attire l'attention sur les performances nécessaires des asservissements des axes rotatifs des centres d'usinage cinq axes pour mener à bien ce type d'opération.

Cette revue des travaux de recherche portant sur les conditions de mise en œuvre des opérations de polissage a permis de mettre en évidence les principaux sujets à maîtriser. Les réponses apportées fournissent des orientations qui peuvent être prises dans l'organisation du process de polissage ainsi que dans la mise en œuvre des outils sélectionnés. Elles constituent donc un complément essentiel aux outils permettant de déterminer le niveau des paramètres opératoires des opérations de polissage.

4 Rugosité des surfaces polies

Le polissage est le procédé requis pour donner des caractéristiques micro-géométriques aux surfaces des pièces métalliques. Nous avons vu que les attentes pouvaient être d'ordre esthétique et/ou fonctionnelles. Les spécifications des donneurs d'ordres sont issues des normes ISO. Elles seront plus amplement présentées au chapitre 3. Elles se placent sur deux plans en fonction des possibilités offertes par les rugosimètres. Les normes 2D se basent sur le relevé d'un profil dans le plan. Plusieurs paramètres sont proposés pour caractériser le profil. Le plus usité est l'écart arithmétique moyen (R_a). Avec l'apparition des rugosimètres 3D capables de relever le profil des surfaces à une résolution suffisamment élevée, des paramètres 3D obtenus par extension des paramètres 2D ont été proposés.

Nous avons vu précédemment que l'enlèvement de matière par rayage était un mélange de coupe et de labourage et que la géométrie résultante était délicate à prédire (Figure 35). Il est donc complexe de connaître a priori la micro-géométrie des surfaces polies.

Néanmoins, E. Felder [3] précise que la hauteur des rayures à la surface de la pièce peut correspondre à la hauteur de pénétration des grains dans la matière. Il estime aussi que la rugosité (R_a) est « à peu près » égale au $1/10^{\text{ème}}$ de la hauteur des rayures. L'équation (Eq. 7) fournit un modèle approximatif du critère (R_a) pour le polissage trois corps d'une surface métallique.

$$(Eq. 7) \quad R_a \approx \frac{1}{10} \cdot \frac{\alpha_a}{1 + \left(\frac{H}{H_b}\right)^2} \cdot \overline{D_a}$$

où α_a est le rapport entre la taille moyenne du grain abrasif et la pénétration totale

$\overline{D_a}$ est le diamètre moyen des grains abrasifs

H et H_b sont les duretés respectives de la pièce et du patin presseur

Il ressort de cette proposition que :

- la rugosité est d'autant plus faible que la taille des grains est petite ;
- la rugosité ne dépend pas de l'effort presseur ni de la vitesse de défilement des grains.

Ces résultats sont confirmés par les travaux de V. Lacharnay [37]. Il met en évidence que la rugosité obtenue est identique avec des efforts presseurs différents (Figure 42). Bien sûr, le temps nécessaire, quant à lui diffère, puisque le taux d'enlèvement de matière est proportionnel à la pression exercée par les grains abrasifs sur la surface. La Figure 43 montre des résultats similaires pour la vitesse de défilement des grains.

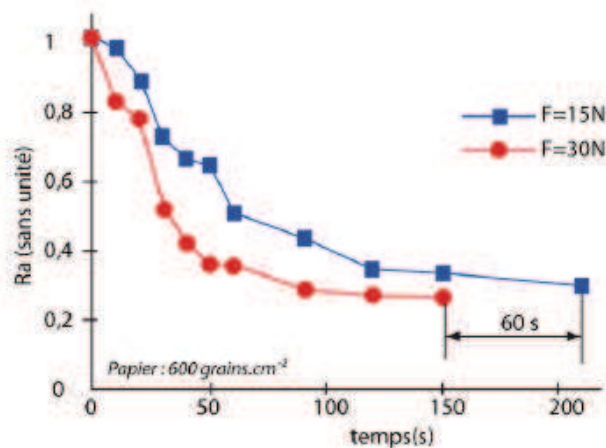


Figure 42 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour deux efforts presseurs distincts [37]

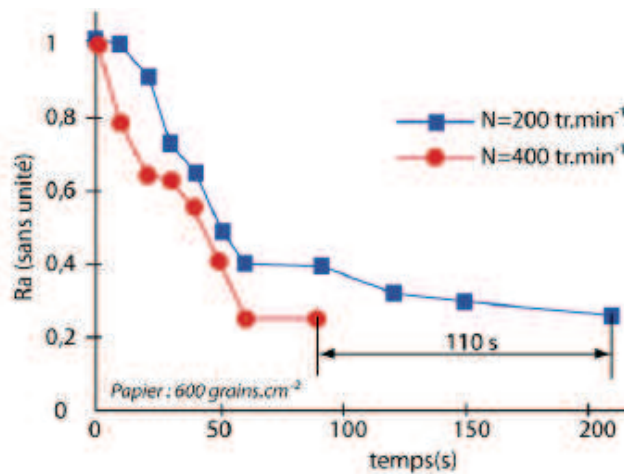


Figure 43 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour deux vitesses de défilement distinctes [37]

Différentes études menées par L. Grandguillaume [38], V. Lacharnay (Figure 44 - [39]) et MJ Tsai [35] mettent en évidence le lien direct entre la taille des grains et la rugosité résultante. Remarquons qu'une fois la rugosité « palier » atteinte, rien ne sert de poursuivre le processus de polissage. V. Lacharnay met clairement en évidence l'intérêt de réduire progressivement la taille des grains pour atteindre la rugosité recherchée (Figure 44).

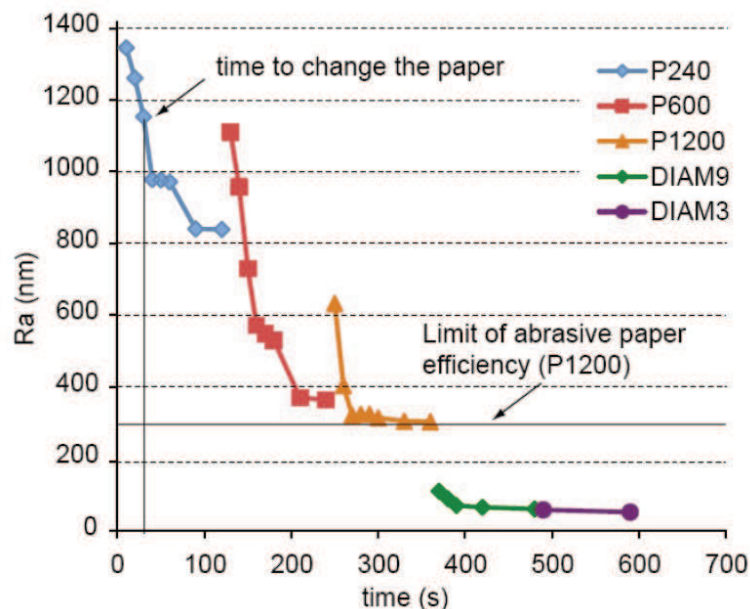


Figure 44 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour plusieurs tailles de grains - [37]

Par contre, JP Huissoon [40] a mis en évidence à l'issue de ses travaux expérimentaux une réelle influence de l'effort presseur sur la rugosité résultante.

D'autres auteurs mettent en avant d'autres paramètres proposés par la norme ISO25178-2. I. Hilerio [41] et AT. Suh [42] ont mis en évidence l'intérêt du facteur d'asymétrie R_{sk} (skewness) et du facteur d'aplatissement du profil évalué R_{ku} (kurtosis) pour caractériser l'effet du polissage sur l'importance des pics ou des creux des surfaces polies. La définition de ces paramètres sera fournie au chapitre 3§2.1.

A signaler, que l'étude menée par Y. Quinsat [43] a permis de préciser les conditions pour réaliser le relevé de la topographie d'une surface polie à l'aide d'une sonde confocale à lumière blanche sur un centre d'usinage cinq axes. En effet, quand les pièces polies sont de grandes tailles comme les matrices d'emboutissage, peu de rugosimètres 3D peuvent accueillir de telles pièces. De plus, le fait de ne pas démonter la pièce permet de réduire les erreurs du processus de mesure.

Enfin, F. Klocke [44] a mis en évidence que la topographie relevée à l'aide d'un rugosimètre ne pouvait révéler à elle seule les caractéristiques des surfaces polies à un niveau de qualité poli-miroir. En effet, des considérations métallurgiques peuvent avoir une incidence sur les propriétés des surfaces. L'auteur met en avant des facteurs influents comme la composition de l'acier avec un poids plus fort pour le taux de

carbone et de chrome, et l'absence de ségrégations dans la structure métallique et d'inclusions non métalliques.

5 Conclusion

Dans la recherche des spécifications nécessaires à l'établissement d'un processus de polissage, il est intéressant de prendre connaissance des travaux menés dans le périmètre de ce procédé.

La première idée qui vient à l'esprit est d'analyser comment se passe l'enlèvement de matière à l'extrémité des grains abrasifs. Cette étude à l'échelle microscopique revient à identifier le comportement de la matière à l'occasion du passage d'un indenteur de géométrie connue. Les différentes évolutions de la matière dans l'espace ont été mises en évidence par les essais de rayage. L'angle d'attaque de l'indenteur et les propriétés mécaniques de la matière sont les principaux paramètres qui influent sur le phénomène étudié. Le comportement le plus courant est le phénomène de labourage. Il permet de détacher des particules de matière grâce aux impacts répétés de grains abrasifs. La modélisation de la répétition de ces sollicitations sur un volume de matière en évolution permanente (géométrie et de caractéristiques mécaniques) étant très complexe à mettre en place, l'étude des rayures ne permet pas de fournir des modèles nécessaires aux calculs des paramètres opératoires d'un process de polissage.

L'étude de la consommation de matière se justifie afin de préciser la durée des séquences de polissage. Différentes approches ont été suivies. L'approche empirique a permis d'identifier les principaux paramètres rentrant en jeu. Il s'agit de la pression exercée par les grains abrasifs sur la matière et leur vitesse de défilement. C'est le modèle de PRESTON qui s'est imposé le plus largement de part sa simplicité et sa bonne représentativité. Des variantes à ce modèle ont été proposées pour des applications bien précises. Des approches analytiques ont été introduites intégrant un plus grand nombre de paramètres. Mises en place pour des applications de polissage trois corps, elles ne peuvent pas être généralisées aux applications deux corps qui constituent le cœur de notre besoin. Enfin, les simulations numériques n'offrent pas à ce jour de solutions opérationnelles et applicables au polissage deux corps.

Différents travaux ont été menés pour observer le comportement d'ensemble d'un processus de polissage et identifier les conditions pour satisfaire les demandes exprimées dans le cahier des charges des surfaces polies. Il en ressort que la trajectoire de l'outil abrasif par rapport à la surface est essentielle pour assurer une régularité du résultat sur toute l'aire polie. Des algorithmes ont été proposés avec succès de manière à se rapprocher du mouvement couramment pratiqué par les compagnons spécialisés dans les tâches de polissage. L'autre élément important dans la bonne marche d'un process est la régularité de l'effort presseur exercé par l'outil abrasif.

Compte tenu de la complexité du processus d'enlèvement de matière, il est difficile de proposer des modèles qui permettent de caractériser la micro-géométrie des surfaces polies. Cependant, il a été mis en avant que la taille des grains est le principal facteur influençant la rugosité des surfaces. Cette dernière est d'autant plus faible que la taille des grains est petite.

Enfin, l'usure des outils abrasifs est elle aussi un sujet complexe à traiter. Il faut à la fois prendre en compte la fragmentation des grains abrasifs de formes hétérogènes et évolutives au cours du processus et la robustesse de la liaison des grains abrasifs sur leur support obtenue couramment par des résines synthétiques. De plus, les caractéristiques mécaniques et chimiques des produits existants ne sont pas fournies par les industriels et sont difficiles à retrouver expérimentalement. N'étant pas informé de leur évolution, les résultats issus d'une quelconque modélisation pourront se révéler faux à l'usage.

Chapitre 3 : Cadre de l'expérimentation

Ayant pour objectif de mieux cerner la difficulté à identifier les plages de travail des paramètres d'entrée d'un process de polissage, à élaborer des modèles permettant d'estimer les valeurs de sortie et les données associées, nous avons focalisé notre travail sur un cas d'espèce industriel. Après l'avoir décrit, les différents éléments nécessaires à notre étude sont développés. Il s'agit des paramètres de sortie permettant de caractériser la micro-géométrie de la surface, des caractéristiques géométriques de l'outil abrasif utilisé pour mieux appréhender le contact de cet outil avec la surface à polir et d'un modèle pour la consommation de matière qui prend en compte ses spécificités. Enfin, nous décrivons le banc expérimental élaboré pour identifier les paramètres influents du process de polissage, valider le modèle de consommation matière, et constituer une base de données sur les performances du cas d'espèce sélectionné.

1 Cas d'espèce retenu

Nous nous sommes intéressés au polissage des tôles inox 316L avec un outil abrasif s'appuyant sur une technologie récente d'abrasifs : le TRIZACT 307EA de chez 3M. Ce choix nous permet de balayer une palette élargie pour les critères de rugosité et de mouillabilité (cf §2). Différentes textures, de l'aspect brossé au poli-miroir, sont en effet couramment recherchées lors du polissage de l'inox 316L avec cet outil. Ce dernier est un abrasif structuré à base pyramidale (Figure 13 – chapitre 1). Les grains abrasifs sont en oxyde d'aluminium. Il est conditionné sous forme de bandes. Le choix de bandes abrasives impose un mouvement linéaire des grains abrasifs sur la surface polie. Ce choix de cinématique est motivé par la simplification de l'analyse de l'impact du mouvement des grains et des efforts mis en jeu.

2 Caractérisation d'une surface polie

Nous avons vu dans le Chapitre 1 que la texture et l'aspect des surfaces de certaines pièces métalliques étaient primordiales d'un point de vue fonctionnel. Les bureaux d'études doivent disposer de critères d'évaluation des surfaces polies pour préciser leurs attentes. Nous présentons ici ceux qui sont dédiés à la rugosité avec un zoom sur la qualité « poli-miroir » et à la mouillabilité.

2.1 Normes ISO

L'Office International de Normalisation a élaboré un ensemble de normes portant sur la Spécification Géométrique des Produits (GPS). Plusieurs d'entre elles portent sur la caractérisation de l'état des surfaces [45], [46], [47], [48], [49]. Il est rappelé ici les principes généraux de ces normes pour préciser ensuite les éléments retenus pour nos travaux.

Même si la spécification des surfaces 3D se développe progressivement, le travail cumulé de plusieurs décennies permet de dégager un consensus fort auprès des différentes parties impliquées dans la caractérisation 2D des surfaces. Elle est basée sur l'identification d'un profil résultant de l'intersection de la surface réelle et d'un plan normal à cette dernière. Une surface réelle cumule les différents défauts possibles. Il s'agit de défauts de forme par rapport à la géométrie nominale de la surface, de défauts d'ordre macroscopique donnant une ondulation plus ou moins prononcée de la surface et enfin des défauts d'ordre microscopique qui déterminent la rugosité des surfaces. Ils sont obtenus en faisant appel à des filtres appropriés et en supprimant l'impact des défauts des niveaux supérieurs. La Figure 45 présente les trois types de profils qui peuvent être identifiés pour une même surface.

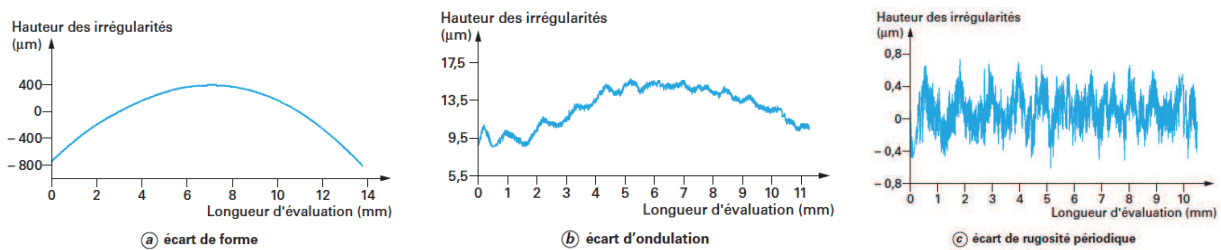


Figure 45 : Différents profils extraits à partir d'un même relevé [50]

Pour le filtrage des relevés, le filtre à phase correcte précisé par l'expression (Eq. 8) correspond à l'équation de la fonction de densité de probabilité gaussienne. Il s'appuie sur la longueur d'onde de coupure λ_{co} .

$$(Eq. 8) \quad s(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_{co}} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_{co}} \right)^2} \quad \text{avec } \alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0,4697 .$$

La Figure 46 est la représentation graphique de cette fonction de pondération. Plus λ_{co} est grande et plus la courbe est évasée. Cela a pour effet de moyennner un plus grand nombre de points ensemble. Les petits écarts sont ainsi gommés. Plus λ_{co} est petite et plus la courbe est resserrée. Les écarts les plus fins ressortent alors beaucoup plus.

Pour nos travaux, nous avons considéré la rugosité des surfaces polies. Même si l'usinage par abrasion peut avoir un impact réel sur les défauts d'ondulation d'une surface, nous ne les avons pas considéré car ils se trouvent à la croisée des chemins de la consommation matière et de la trajectoire suivie par l'outil abrasif sur la surface, ce dernier point étant hors du champ de notre étude.

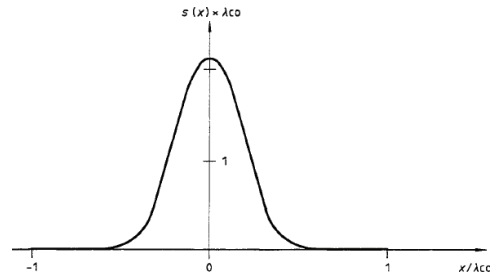


Figure 46 : Représentation graphique du filtre à phase correcte [47]

Ainsi en choisissant des bandes abrasives associées à un mouvement linéaire des grains, nous sommes dans le cadre des normes ISO 2D les mieux maîtrisées pour ce qui concerne la caractérisation de la rugosité. La norme ISO impose de faire les relevés de profils transversalement aux rayures gravées par les grains abrasifs. La longueur d'onde de coupure (ou longueur de base) de la rugosité sera de 0,8 mm si la valeur de R_a est comprise entre 0,1 et 2 μm , et 0,25 mm si la valeur de R_a est comprise entre 0,02 et 0,1 μm . La longueur d'évaluation est de 5 fois la longueur de base. Le Tableau 3 présente l'ensemble des paramètres considérés pour rendre compte des propriétés d'une surface à un niveau microscopique d'observation.

Paramètre	Intitulé	Définition	Unité
R_a	Ecart moyen arithmétique	$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx$	μm
R_z	Hauteur maximale	Hauteur maximale du profil à l'intérieur de la longueur de base	μm
R_t	Hauteur totale	Hauteur maximale du profil à l'intérieur de la longueur d'évaluation	μm
R_{sk}	Skewness Facteur d'asymétrie	$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z(x)^3 dx \right]$	
R_{ku}	Kurtosis Facteur d'aplatissement	$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z(x)^4 dx \right]$	
R_k	Profondeur profil écrêté		μm
R_{pk}	Hauteur des pics éliminés		μm
R_{vk}	Profondeur des pics éliminés		μm
Mr_1	Taux de longueur portante – pics		%
Mr_2	Taux de longueur portante – creux		%

Tableau 3 : Critères de rugosité d'après [45], [46], [48], [48], [49]

La mesure de ces différents paramètres de rugosité est assurée par un rugosimètre 3D ALTISURF 500 de la société ALTIMET (Figure 47). Ce dernier dispose d'une sonde confocale à lumière blanche ALTIPROBE OPTIC avec une profondeur de champ de 350 μm . Sa résolution verticale est de 10 nm. Le traitement des profils relevés (Figure 48) est assuré par le logiciel ALTIMAP UNIVERSAL.

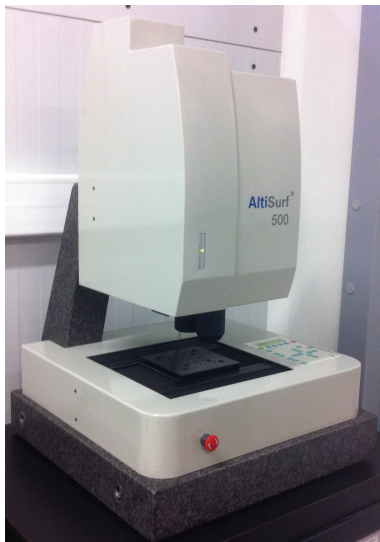


Figure 47 : Rugosimètre 3D ALTISURF 500

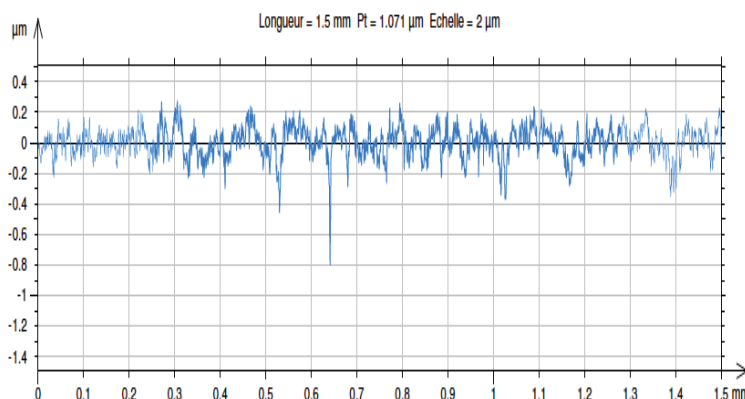


Figure 48 : Profil filtré d'une surface polie

2.2 Qualité « poli-miroir »

Le polissage est le seul procédé par enlèvement de matière, développé industriellement, permettant d'obtenir une qualité poli-miroir sur des pièces métalliques. Les rayures subsistant sur leurs surfaces sont tellement fines que l'image renvoyée par ces dernières est comparable à celle retournée par un véritable miroir. Bien entendu, le défaut de forme (ondulation) de la surface polie rentre en jeu dans la qualité de l'image restituée. Pour arriver à ce phénomène, il faut que les ondes électromagnétiques renvoyées ne soient que faiblement perturbées par l'écart de position existant entre les différentes facettes de la surface sur le parcours du rayon lumineux, sinon l'inversion de phase de l'onde provenant de ces décalages brouille le signal renvoyé. On parle de réflexion spéculaire. En plus de la hauteur des rayures, la longueur d'onde du signal lumineux et l'angle d'incidence ont un impact sur le phénomène de réflexion. P. Beckmann [51] établit une relation précisant la valeur limite pour le critère R_a quand l'angle d'incidence est nul (cas le plus défavorable):

$$(Eq. 9) \quad R_a \ll \frac{\lambda}{4\pi} .$$

La longueur d'onde (λ) d'un signal lumineux appartenant au domaine du visible étant comprise entre 400 et 780 nm, la valeur maximale du critère R_a est de 0,032 μm pour l'obtention d'une surface poli-miroir.

Disposer d'un rugosimètre capable de mesurer de telles valeurs de Ra n'est pas à la portée de tous les ateliers. Néanmoins, le compagnon peut en temps réel identifier la présence de rayures encore trop grossières pour arriver de proche en proche à une réflexion spéculaire sur la surface polie. Cette possibilité d'évaluer en temps réel le travail qui reste à accomplir explique le succès du polissage abrasif manuel pour réaliser ce haut niveau de qualité pour certaines surfaces métalliques.

2.3 Mouillabilité

La mouillabilité est la capacité d'un liquide à s'étaler sur une surface. Elle se caractérise par l'angle de contact (θ) mesuré entre la tangente à la base d'une goutte d'eau distillée et la surface sur laquelle cette dernière est posée (Figure 49). L'équation (Eq. 10) proposée par Young [52] permet d'établir le lien entre les tensions superficielles σ_{solide} , σ_{liquide} , la tension d'interface $\gamma_{\text{liquide/solide}}$ et l'angle de contact (θ) via la relation suivante :

$$(Eq. 10) \quad \sigma_{\text{solide}} = \gamma_{\text{liquide/solide}} + \sigma_{\text{liquide}} * \cos(\theta) \quad .$$

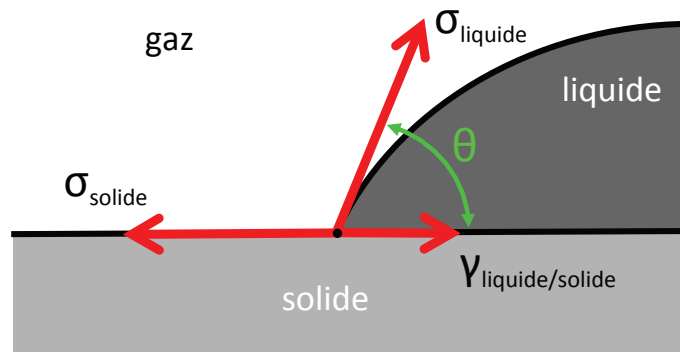


Figure 49 : Paramètres décrivant le phénomène de mouillabilité

Pour mesurer cette propriété, nous avons utilisé un banc de mouillage KRUSS (Figure 50). Ce banc permet de déposer des gouttes d'un liquide, de l'eau distillée par exemple, à l'aide d'une seringue asservie en position suivant la normale à la surface de l'échantillon. Une caméra HD enregistre l'image de la goutte éclairée par une lumière polarisée. L'analyse de la succession des images (fréquence = 1.54 Hz) est réalisée à l'aide du logiciel DROP SHAPE ANALYSIS (version 1.92.1.1). Après une identification de la ligne horizon, sa fonction analyse d'image permet d'identifier le contour de la bulle (Figure 51). De là, la valeur de l'angle de contact (θ) de chaque coté de la goutte et l'aire de sa surface projetée sont déterminées pour chaque image de l'enregistrement.

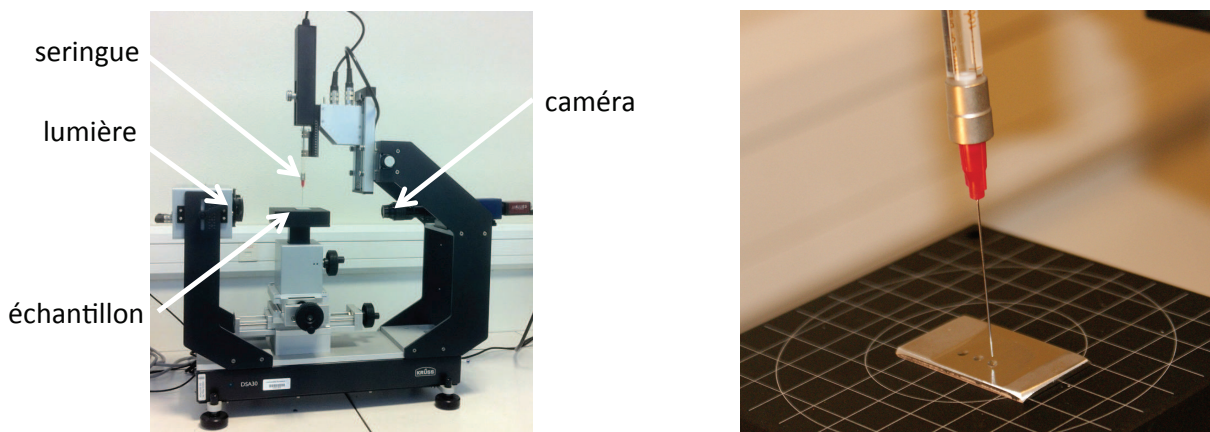


Figure 50 : Banc de mouillage KRUSS

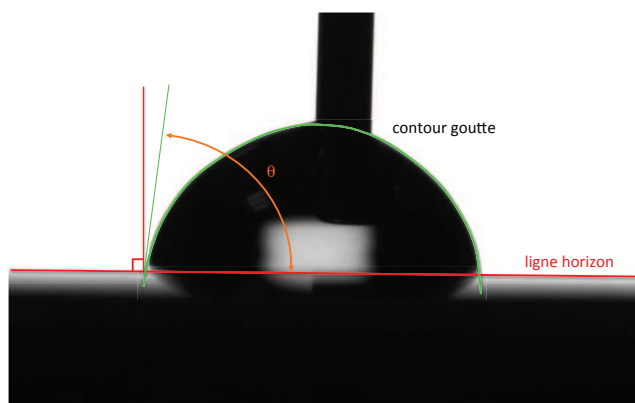


Figure 51 : Image d'une goutte déposée sur l'échantillon et les éléments géométriques associés

Avec ce type d'équipement, plusieurs protocoles peuvent être imaginés pour caractériser la mouillabilité d'un matériau. Le protocole retenu se distingue par une moindre dispersion de mesure. Il consiste à déposer sur l'échantillon, l'aiguille étant très proche de ce dernier (distance environ égale au $\frac{1}{4}$ de la hauteur de la goutte déposée), une goutte d'eau distillée de 2 μl . L'aiguille étant bien au centre de la goutte formée, la caméra filme le remplissage de cette goutte avec un complément d'eau distillée de 8 μl à une vitesse de 2 $\mu\text{l}/\text{mn}$. La durée de l'enregistrement est de 4 mn.

La Figure 52 présente la distribution des valeurs de (θ) pour chaque cliché analysé. Les dispersions sont de plusieurs natures : le profil irrégulier de la surface analysée, les perturbations engendrées par l'apport de liquide, l'évaporation, l'incertitude dans la reconnaissance du pourtour de la goutte. Nous avons régulièrement observé des écarts significatifs en début de mesure. Une explication possible de leur présence est l'effet de l'évaporation sur la gouttelette de départ. Un certain laps de temps sépare la constitution de cette dernière et le démarrage de son remplissage. Pour limiter l'impact de cet écart sur les résultats de mesure, nous avons systématiquement supprimé les 15 premières secondes du processus de mesure.

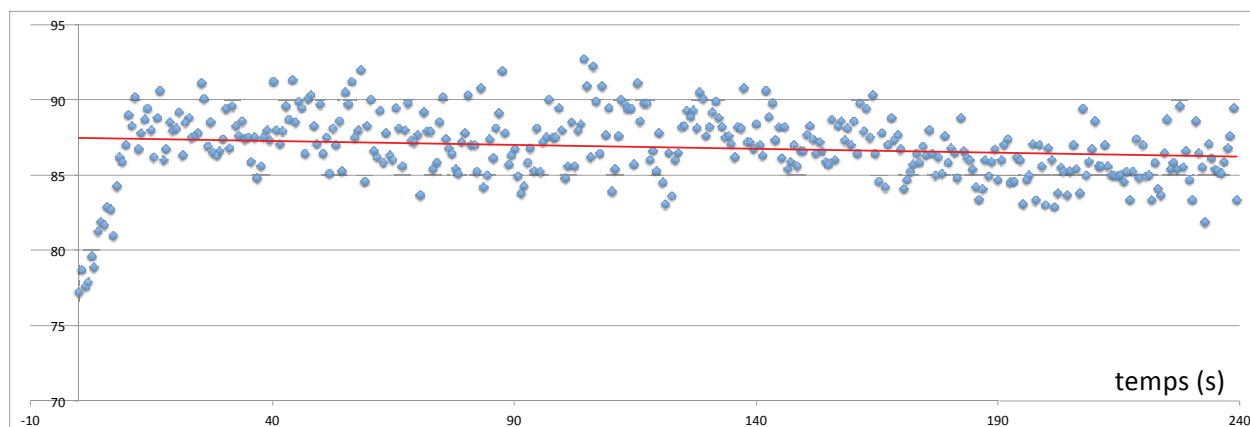


Figure 52 : Exemple de distribution des mesures de l'angle de contact (θ) au cours du dépôt d'une goutte

Une étude de la répétabilité des mesures a été menée afin de caractériser ce procédé de mesure. Nous avons déterminé la dispersion de mesure pour 10 gouttes déposées en un même lieu d'un échantillon puis 9 gouttes réparties sur un quadrillage de 0,5 mm de coté. Trois échantillons ont été utilisés pour ces essais. Ils ont été respectivement polis avec différents abrasifs. Le Tableau 4 fournit les valeurs obtenues. Nous y trouvons : l'erreur statistique du protocole de mesure s'appuyant sur l'équipement décrit ci-dessus (370 valeurs par mesure), l'incertitude de mesure pour un même lieu et l'erreur de mesure globale pour un même échantillon.

taille moyenne des grains	erreur statistique	incertitude de mesure en un même lieu	erreur de mesure sur un même échantillon
82 μm	1,35°	1,68°	1,98°
21,8 μm	0,98°	1,34°	1,71°
8,4 μm	1,27°	1,56°	1,89°

Tableau 4 : Incertitudes du processus de mesure de l'angle de contact (θ)

La mesure de l'angle de contact (θ) fait l'objet de fluctuations qu'il faudra prendre en compte au moment de la caractérisation de la mouillabilité des échantillons polis.

3 Caractérisation de l'outil abrasif sélectionné

Nous proposons ici de fournir les différentes caractéristiques géométriques de l'outil abrasif retenu pour nos travaux.

Les bandes abrasives retenues pour notre étude (TRIZACT 307EA de chez 3M) sont des abrasifs structurés. Les grains abrasifs d'oxyde d'aluminium sont agencés en pyramides, une résine synthétique assurant la cohésion des grains et la liaison avec une bande souple tissée (Figure 53).

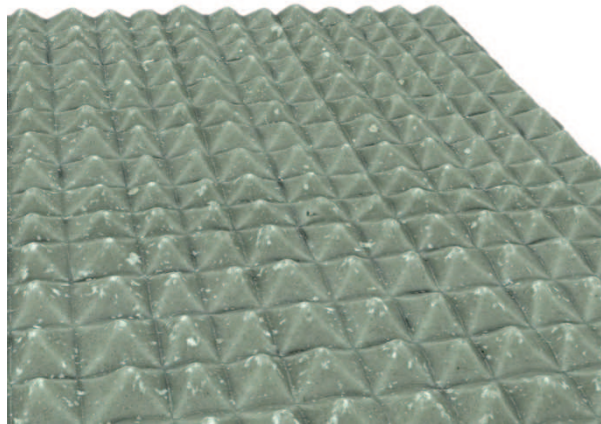


Figure 53 : Portion d'une bande abrasive structurée à base pyramidale

Sa fabrication consiste à étaler uniformément sur des plaques comportant un réseau d'alvéoles pyramidales un mélange de grains abrasifs de taille homogène et de résine synthétique. Cette opération est renouvelée plusieurs fois de manière à constituer une toile abrasive de grandes dimensions. Cette dernière est composée de plusieurs carreaux. Une nette rupture dans l'orientation des alignements de pyramides est observée d'un carreau à l'autre. Aussi, leur direction principale n'est pas parallèle à la trajectoire des grains abrasifs. Une cuisson permet de donner les caractéristiques mécaniques définitives au liant. Ce panneau abrasif est ensuite découpé aux dimensions spécifiques de la ponceuse utilisée pour la séquence de polissage. Un raccordement est nécessaire pour relier les deux extrémités de la bande. Différentes solutions de fermeture des bandes sont proposées par le fabricant (Figure 54). Les bandes livrées pour nos essais correspondent à la référence (b). Cependant, nous avons systématiquement meulé les grains abrasifs au niveau de la jonction de bande afin d'avoir la même épaisseur en tout point de la bande. En effet, une brusque irrégularité dans l'épaisseur de la bande donne lieu à un comportement vibratoire perturbant fortement les observations et les mesures réalisées. Cela a pour effet aussi d'augmenter l'effort presseur à cet endroit.

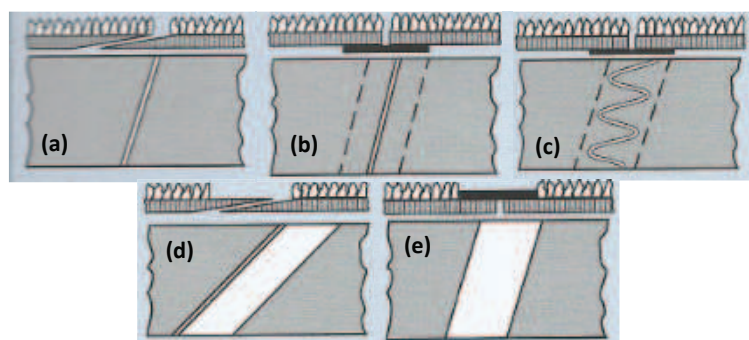


Figure 54 : Différentes solutions pour fermer une bande (source PFERD)

Les tailles de grains retenues pour notre étude couvrent la gamme proposée par 3M. Elles sont précisées dans le Tableau 5.

Référence 3M	Classification FEPA	Taille moyenne des grains d'après FEPA
A100	P180	82 μm
A30	P800	21,8 μm
A6	P2500	8,4 μm

Tableau 5 : Taille moyenne des grains abrasifs retenus pour l'étude

Au cours d'une opération de polissage, les grains abrasifs sont fragmentés avant d'être détachés de leur support. La Figure 55 présente la physionomie des sommets des pyramides pour différentes tailles de grains et à différents stades d'avancement du polissage.

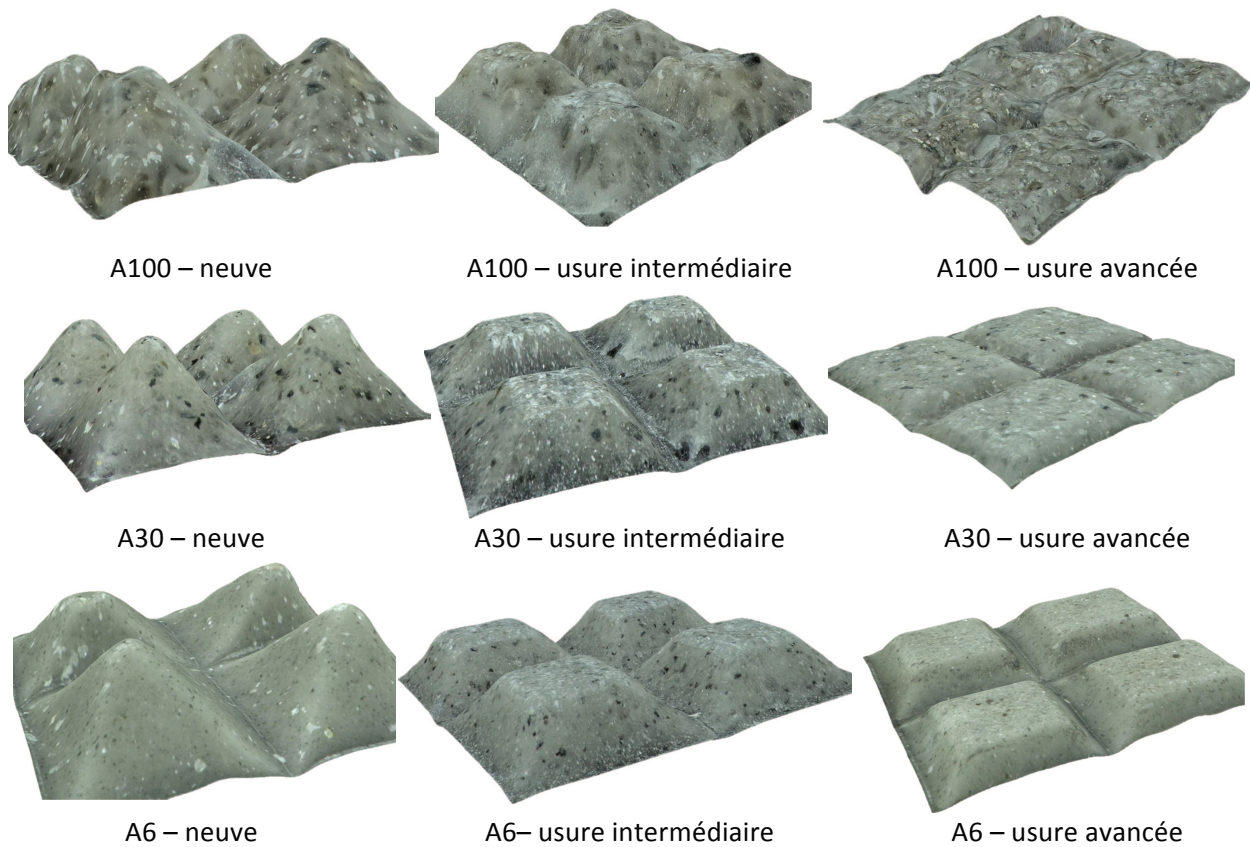


Figure 55 : Physionomie des pyramides à différents stades d'usure des bandes abrasives

La caractérisation géométrique des bandes est obtenue par une numérisation de la surface des pyramides à l'aide d'un rugosimètre 3D ALTISURF 500 muni d'une pointe conique à 60° (Figure 56).

Pour prendre en compte les dispersions dimensionnelles des pyramides, chaque relevé a porté sur un alignement de 10 pyramides. De chaque enregistrement a été extrait le profil des pyramides dans le plan normal à la bande et passant par leur sommet.

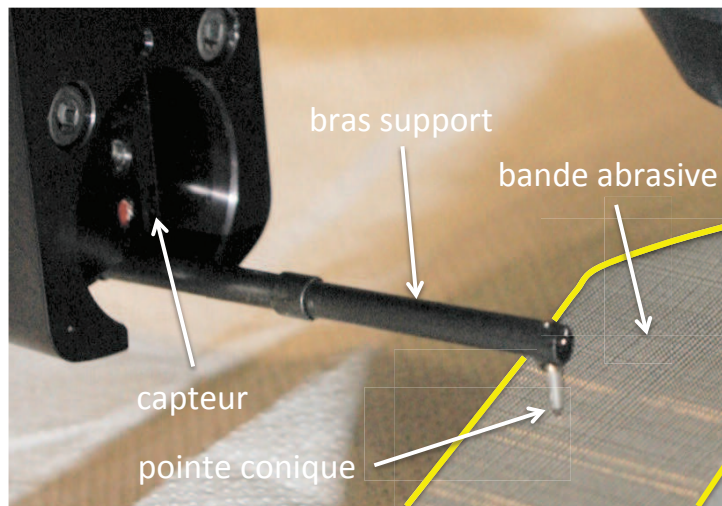


Figure 56 : Dispositif assurant le relevé de profil d'une rangée de pyramides

La Figure 57 présente le profil d'un alignement de pyramides de grade A100 à l'état neuf puis à deux stades d'usure de la bande abrasive. Le protocole d'identification des pyramides est détaillé en Annexe A.

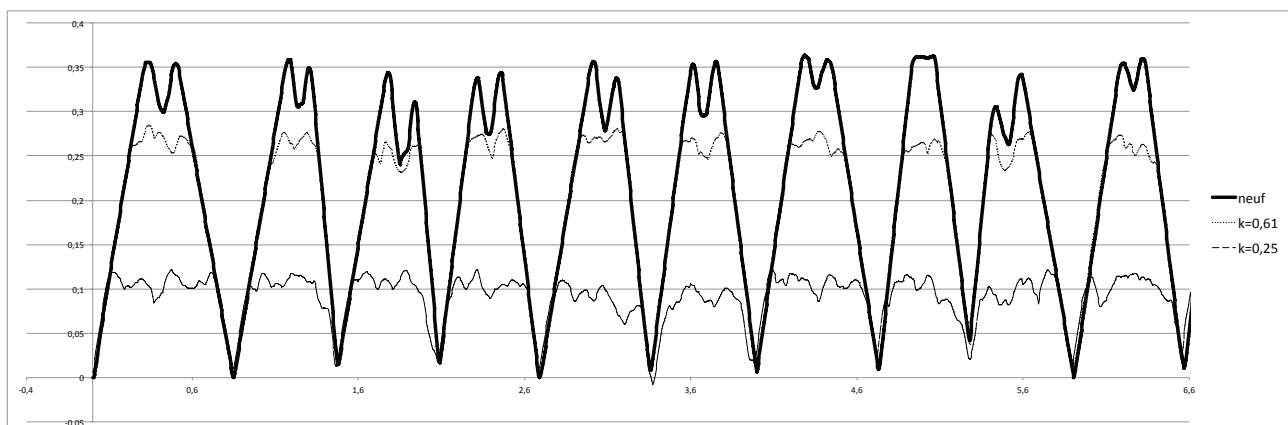


Figure 57 : Relevé d'un alignement de pyramides

La Figure 58 présente les paramètres géométriques d'une pyramide : la largeur de la base (a) et l'angle au sommet (β). Pour caractériser l'usure des pyramides, nous introduisons les paramètres suivants : la hauteur du plateau de la pyramide (z), la largeur du plateau (x), le taux d'usure de la pyramide (k), la hauteur nominale d'une pyramide étant notée (h).

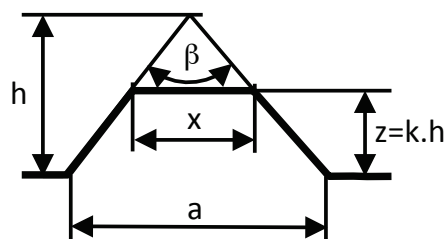


Figure 58 : Paramètres géométriques des pyramides

Les équations (Eq. 11) et (Eq. 12) donnent des relations géométriques entre ces paramètres.

$$(Eq. 11) \quad h = \frac{a}{\tan(\frac{\beta}{2})}$$

$$(Eq. 12) \quad x = (1 - k) \cdot a$$

Le Tableau 2 fournit les dimensions pour les bandes abrasives étudiées et leur écart type, valeurs issues, pour chaque référence de bande, de 100 pyramides : 10 alignements de 10 pyramides prélevés sur des bandes différentes.

	unité	A100	A30	A6
largeur moyenne de la base (a)	mm	0,638	0,483	0,499
écart type sur (a)		0,077	0,070	0,054
angle au sommet moyen (β)	degré	75,68	78,82	75,90
écart type sur (β)		6,96	11,49	5,53
hauteur nominale (h)	mm	0,821	0,587	0,640

Tableau 6 : Largeur et angle au sommet des pyramides et leur écart type

D'autres paramètres comme la concentration des grains, la résistance mécanique et le pouvoir d'adhésion des résines synthétiques rentrent en jeu dans la caractérisation du procédé. Ces données ne sont généralement pas fournies par les industriels et délicates à retrouver expérimentalement.

La Figure 59 donne la répartition fréquentielle du paramètre (a) pour les pyramides étudiées.

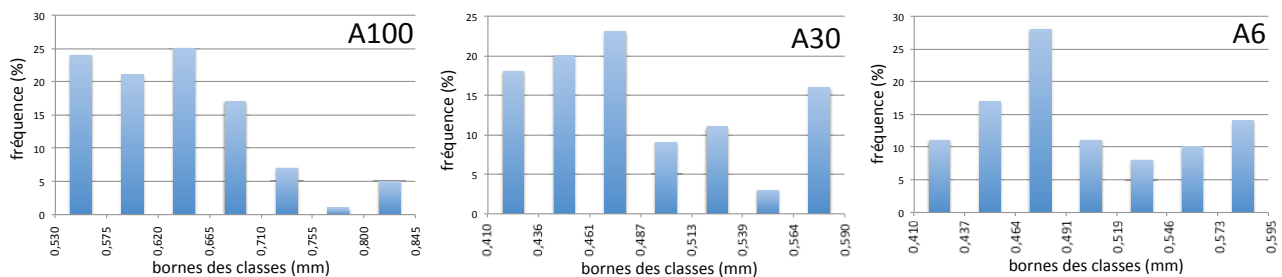


Figure 59 : Répartition fréquentielle de la largeur des pyramides (a)

La Figure 60 donne la répartition fréquentielle du paramètre (β) pour les pyramides étudiées.

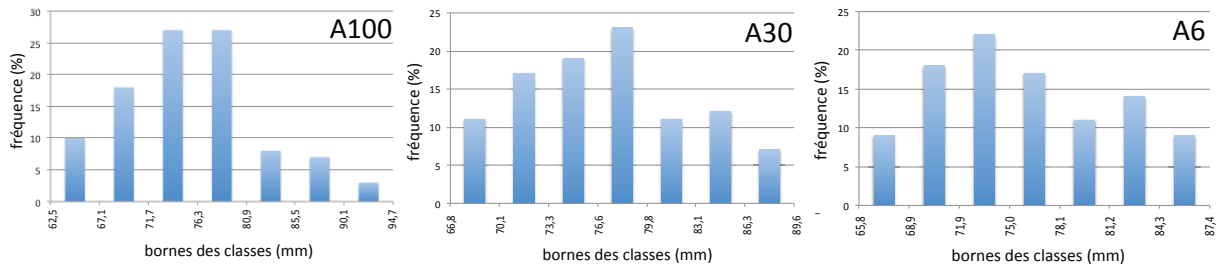


Figure 60 : Répartition fréquentielle de l'angle au sommet des pyramides (β)

En conclusion, la base et l'angle au sommet des pyramides ne sont pas régis par une loi normale.

Le profil du sommet de chaque pyramide dépend pour beaucoup de la taille des grains. Cf Figure 55.

4 Paramétrage du process

Le polissage d'une surface avec la bande retenue pour notre étude nécessite une machine capable d'entraîner la bande abrasive et d'exercer un effort presseur régulé. Deux solutions sont envisageables pratiquement pour cette deuxième fonction. Soit l'opérateur exerce une pression sur la surface en plaquant une portion de la bande sur celle-ci (Figure 61a) ou bien l'effort presseur est fourni par l'intermédiaire d'un patin plan (Figure 61b). Dans le cadre de nos travaux, nous avons privilégié la deuxième solution de manière à contrôler au mieux l'effort presseur appliqué.

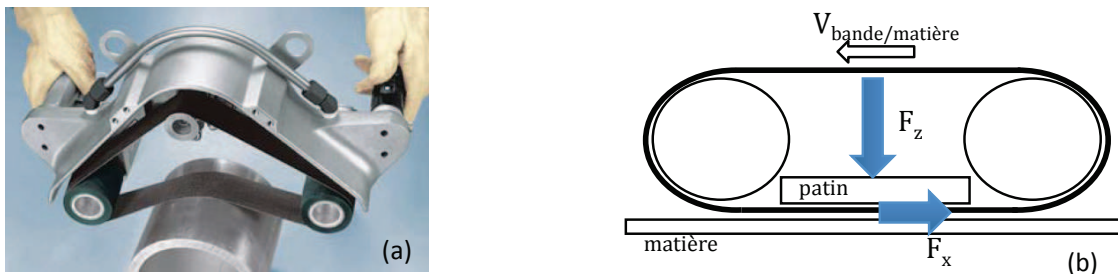


Figure 61 : Solutions pour plaquer la bande abrasive sur la surface

Le paramétrage du process est le suivant :

- F_z : effort presseur normal de la bande adhésive sur la pièce – unité : N
- F_x : composante tangentielle de l'effort abrasif sur la matière ayant pour direction la trajectoire des grains abrasifs – unité : N $\Rightarrow$
- f : coefficient tangentiel de coupe défini par le rapport entre F_x et F_z .

$$(Eq. 13) \quad f = \frac{F_x}{F_z}.$$

- V : vitesse de défilement de la bande par rapport à la matière – unité : m/s
- L : longueur de la surface polie dans le sens de défilement de la bande – unité : mm
- d : largeur de la surface polie – unité : mm

5 Consommation matière

L'un des objectifs de nos travaux est de prédire la durée d'une séquence de polissage. Cette tâche nécessite de connaître notamment l'état initial de la surface et la qualité recherchée au travers d'une séquence de polissage. Avant de traiter cette question, nous proposons d'identifier les paramètres influents sur la consommation de matière indépendamment des conditions initiales et de dégager une loi qui précise la progression de l'outil abrasif dans la matière avec une texture de surface supposée constante.

Nos propositions sont basées sur le modèle de PRESTON (Eq. 14). Il définit le taux d'enlèvement matière (TEM) comme le produit d'une constante (C_p) propre à la matière polie, à la nature et la taille des grains et aux caractéristiques du liant, avec la pression (p) exercée par les grains abrasifs sur la surface polie et avec la vitesse de défilement des grains (V).

$$(Eq. 14) \quad TEM = C_p \cdot p \cdot V \quad .$$

La Figure 62 présente une portion de bande abrasive structurée à un stade intermédiaire de son utilisation. On y distingue les sommets des pyramides qui sont le lieu de l'enlèvement matière. Cette surface est notée $S_{effective}$. Pour chaque pyramide, nous pouvons identifier la surface apparente au niveau de la surface polie correspondant à chaque pyramide. Nous la notons $S_{apparente}$.

Lors d'une opération de polissage, on notera l'orientation aléatoire des pyramides par rapport à la direction du vecteur vitesse de défilement de la bande.

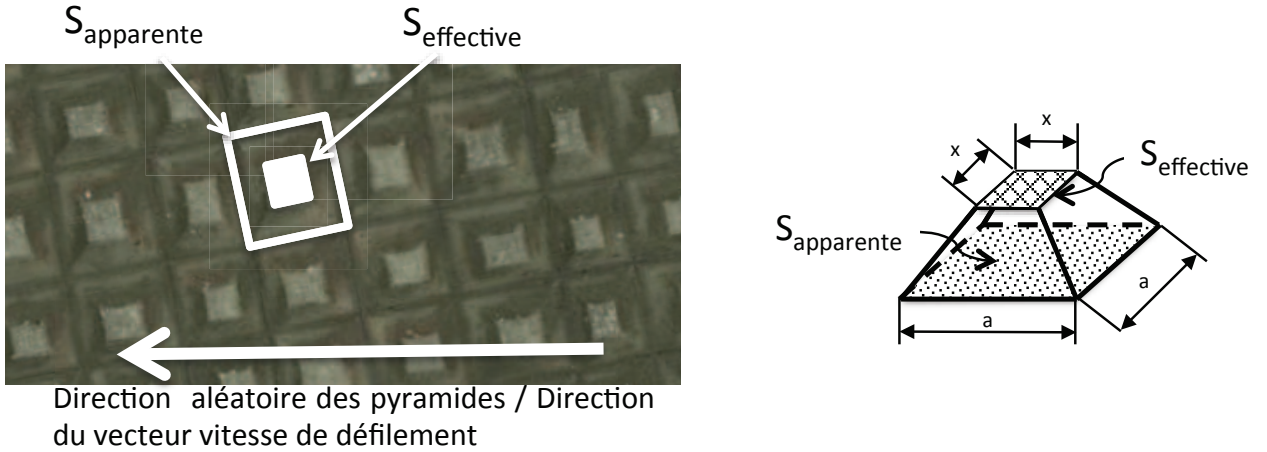


Figure 62 : Surface apparente - Surface effective

Le débit matière obtenu avec les pyramides en contact avec la matière (au nombre de N), noté ($d_{effectif}$), est :

$$(Eq. 15) \quad d_{effectif} = N \cdot S_{effective} \cdot C_p \cdot p \cdot V \quad .$$

Le débit matière au niveau de la surface apparente, noté ($d_{apparent}$) est défini par :

$$(Eq. 16) \quad d_{apparent} = N \cdot S_{apparente} \cdot \frac{dz}{dt} \quad .$$

où $\frac{dz}{dt}$ est la vitesse d'enfoncement de la bande abrasive dans la matière.

Grâce au défilement des pyramides abrasives sur la surface polie, nous avons un enlèvement matière uniforme. La quantité de matière enlevée par l'extrémité des pyramides par unité de temps ($d_{effectif}$) correspond au débit de la matière prélevée sur la pièce ($d_{apparent}$). Cette observation donne :

$$(Eq. 17) \quad d_{apparent} = d_{effectif} \quad .$$

Avec les éléments fournis ci-dessus, nous pouvons former la relation :

$$(Eq. 18) \quad N \cdot S_{apparente} \cdot \frac{dz}{dt} = N \cdot S_{effective} \cdot C_p \cdot p \cdot V \quad .$$

Elle nous donne le modèle de Preston adapté aux bandes abrasives structurées :

$$(Eq. 19) \quad \frac{dz}{dt} = \frac{S_{effective}}{S_{apparente}} \cdot C_p \cdot p \cdot V \quad .$$

Compte tenu de la géométrie des pyramides en cours d'utilisation (Figure 62), le rapport de surface est fourni par l'équation (Eq. 20).

$$(Eq. 20) \quad \frac{S_{effective}}{S_{apparente}} = \left(\frac{x}{a}\right)^2 = \left(\frac{(1-k) \cdot a}{a}\right)^2 = (1-k)^2 \quad ,$$

où k représente le taux d'usure des pyramides. Les pyramides sont neuves pour $k=1$, et totalement usées pour $k=0$. L'équation (Eq. 19) devient alors :

$$(Eq. 21) \quad \frac{dz}{dt} = (1-k)^2 \cdot C_p \cdot p \cdot V \quad .$$

Or la pression (p) provient de l'effort presseur (F_z) appliqué sur un patin de section constante pressant les grains abrasifs sur la matière à polir. Ici aussi, il faut prendre en compte le rapport entre l'aire apparente du patin et l'aire des sommets des pyramides en contact sur la pièce à polir (Eq. 22).

$$(Eq. 22) \quad p = \frac{F_z}{S_{effective}} = \frac{F_z}{S_{apparente} \cdot (1-k)^2} \quad .$$

La vitesse d'enfoncement de la bande abrasive dans la matière s'écrit alors :

$$(Eq. 23) \quad \frac{dz}{dt} = C_p \cdot \frac{F_z \cdot V}{S_{apparente}} \quad .$$

L'équation (Eq. 22) peut se mettre aussi sous la forme :

$$(Eq. 24) \quad \frac{F_z}{S_{apparente}} = (1-k)^2 \cdot p \quad .$$

Elle met en évidence le couplage entre la pression (p) et le taux d'usure (k). Ces deux paramètres se compensent pour un processus donné (F_z et surface patin presseur constants). Quand la bande s'use, k diminue, le facteur $(1-k)^2$ augmente et la pression (p) diminue.

Enfin, le débit matière peut s'exprimer ainsi :

$$(Eq. 25) \quad \frac{dv}{dt} = C_p \cdot F_z \cdot V \quad .$$

Il ressort de cette modélisation que la consommation matière est indépendante du taux d'usure de l'outil abrasif structuré à base pyramidale. Pour un outil abrasif structuré donné, seuls l'effort presseur (F_z) et la vitesse de défilement ont un impact sur la vitesse d'enfoncement de l'outil dans la matière.

6 Banc expérimental

6.1 Expression du besoin

Pour atteindre nos objectifs, nous avons choisi d'emprunter la voie expérimentale. Nous avons conçu à cet effet un banc d'essais pour identifier des lois de comportement pour les différentes sorties présentées ci-dessus. Si un cas d'espèce a été retenu (INOX 316L – TRIZACT 307EA) pour présenter notre démarche, la caractérisation d'un large éventail de couples matériaux outils abrasifs devra être menée pour couvrir les besoins des bureaux des méthodes. Le banc a été conçu dans cette perspective.

Pour chaque séquence d'essai, l'effort presseur (F_z) et la vitesse de défilement des grains (V) sont choisis dans une plage couvrant l'ensemble des situations de polissage à traiter. Quant au taux d'usure de l'abrasif, il découle d'une préparation de la bande menée pour atteindre le niveau souhaité. Ces paramètres étant fixés, pour un couple matériau-abrasif donné, la finalité du banc est :

- de produire des échantillons de manière à caractériser la texture de la surface polie ;
- d'enlever de la matière en quantité suffisante pour étudier la consommation matière et l'usure de l'outil abrasif ;
- de mesurer les différents paramètres du process : efforts, vitesse de défilement et vitesse d'enfoncement.

Ici, le polissage est prévu à sec car c'est la préconisation du fabricant pour l'abrasif retenu. Par contre, une aspiration performante des poussières a été mise en place.

Bien que le polissage soit un procédé couramment utilisé pour traiter des surfaces étendues, nous avons fait le choix de ne pas déplacer la ponceuse dans le plan de la surface polie. L'intérêt est de favoriser la qualité de la mesure des efforts, mieux connaître la consommation matière de l'échantillon et de simplifier la conception du banc en limitant les mobilités de la ponceuse. Nous avons conscience que

certaines choix réalisés à l'occasion de cette première étude pourront être rediscutés à la lumière de l'expérience acquise au cours des essais.

6.2 Composition du banc expérimental de polissage

La Figure 63 présente l'organisation du banc de polissage mis en place. Ses fonctions principales sont :

- générer le mouvement de l'outil,
- appliquer l'effort presseur,
- acquérir les données du process.

Pour entrainer la bande abrasive, nous avons porté notre choix sur une machine industrielle à savoir la ponceuse DINABRADE 14200 (vitesse à vide = 30 m/s - largeur bande = 25,4 mm - longueur bande = 457 mm). Cette ponceuse professionnelle (Figure 64) est dotée de 3 galets : un pour l'entraînement au moyen d'un moteur pneumatique, un comme support de la bande et un troisième associé à un mécanisme mettant la bande en tension.

Pour assurer le contact plan de la ponceuse sur l'échantillon (dimensions maximales : 40 x 70 x 2 mm), celle-ci est guidée en translation par quatre douilles à billes montées sur deux colonnes rigides. L'effort presseur (F_z) est obtenu par un câble reliant le coulisseau porte ponceuse et un poids suspendu dans le vide. Un roulement à billes joue le rôle de poulie de manière à réorienter la direction des efforts en place. L'échantillon est fixé sur un support muni d'une butée annulant tout mouvement de sa part dans le sens de défilement de la bande. Sa fixation est assurée par deux sauterelles placées de chaque coté de la bande. Le patin presseur a sa surface de contact tangente aux deux galets de la ponceuse. Les efforts de la ponceuse sur l'échantillon sont mesurés à l'aide d'un capteur dynamométrique à six composantes.

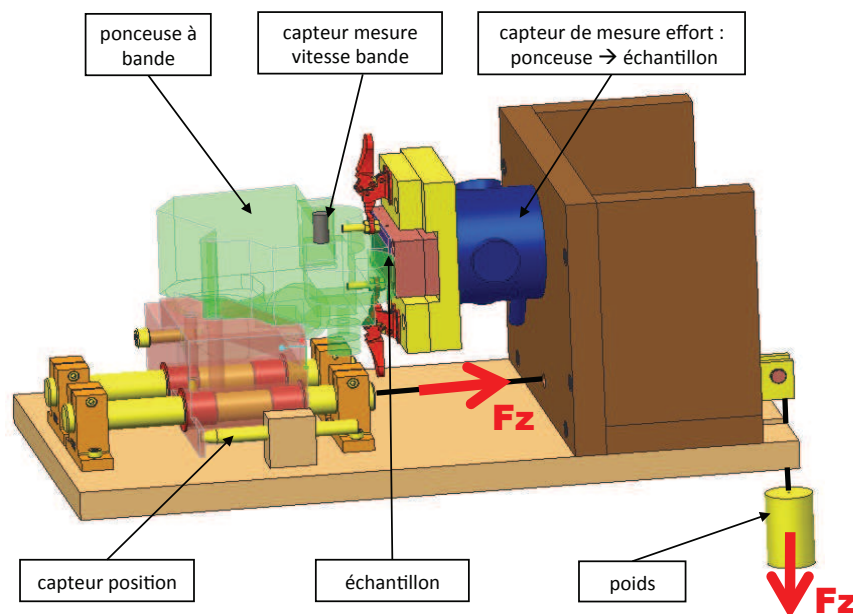


Figure 63 : Composition du banc de polissage

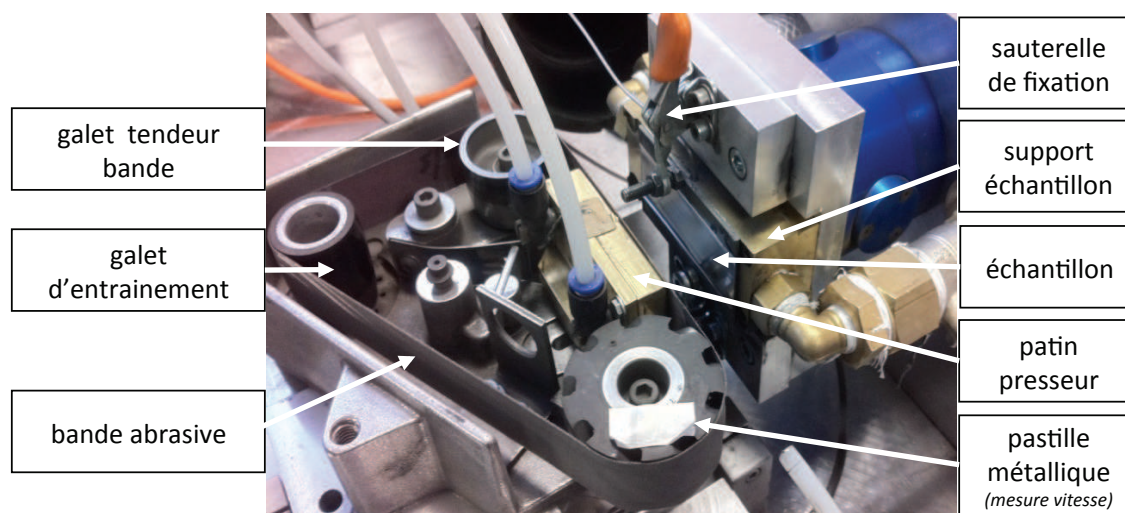
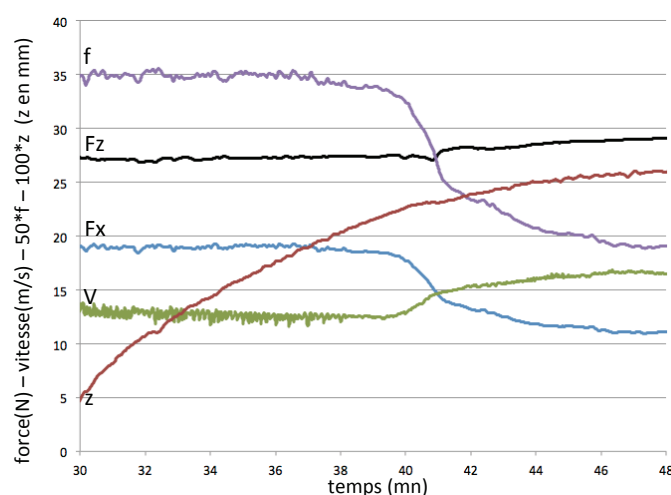


Figure 64 : Dispositif de polissage

La vitesse de défilement de la bande (V) est gérée par un régulateur de débit à vis pointeau. Elle est mesurée au moyen d'un détecteur inductif associé à une pastille métallique placée sur le galet avant de la ponceuse. Enfin, la position de la ponceuse par rapport à l'échantillon est mesurée au moyen d'un capteur LVDT. L'acquisition et le traitement des signaux de mesure sont assurés par une baie d'acquisition SIRIUS 8 voies de chez DEWETRON. La Figure 65 présente un relevé des principaux paramètres mesurés avec cet équipement. Une fréquence d'échantillonnage de 5 Hz est retenue pour réaliser l'enregistrement des signaux.



f : coefficient tangentiel de coupe
 F_z : effort presseur
 F_x : effort de polissage résultant
 V : vitesse de défilement des grains abrasifs
 z : position du patin presseur

Figure 65 : Relevé des principaux paramètres réalisé avec la baie DEWETRON

6.3 Echangeurs thermiques

Comme indiqué ci-dessus, la ponceuse reste immobile sur l'échantillon. Le polissage donnant lieu à un frottement intense entre les grains abrasifs et la matière, un échauffement important se produit dans la zone du contact. De plus, la faible conductivité thermique de l'acier inox ($16,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) fait que l'évacuation de la chaleur produite se fait difficilement. Un refroidissement de la zone de polissage a été

mis en place pour faire travailler les bandes abrasives dans une plage de températures satisfaisante et proche de la réalité industrielle. Il a aussi pour mission d'empêcher le transfert de la chaleur vers le dynamomètre à 6 composantes sensible aux variations de température. A cet effet, nous avons installé aussi bien pour le support de l'échantillon que pour le patin presseur, un système de refroidissement à eau. La Figure 66 présente l'échangeur en laiton sur lequel est placé l'échantillon. A l'aide d'une unité réfrigérante, l'eau est maintenue dans une plage comprise entre 15 et 30°C. Pour favoriser l'évacuation des calories par cet échangeur, une fine couche de pâte thermique (KERATHERM KP92 – 10 W/mK) est placée à l'interface de cet échangeur et de l'échantillon en inox. La température de chaque échangeur est relevée à l'aide d'un thermocouple collé sur une face de chacun d'eux.



Figure 66 : Echangeur thermique intégré au porte-échantillon

6.4 Caractéristiques géométriques du patin presseur

Pour disposer d'une palette de pressions de polissage suffisamment large, nous avons élaboré des patins presseurs de deux largeurs différentes. Le patin principal (Figure 67) a une largeur effective de 24 mm et le sabot (Figure 68) se plaçant sur ce dernier nous donne une largeur opérationnelle de 9 mm.

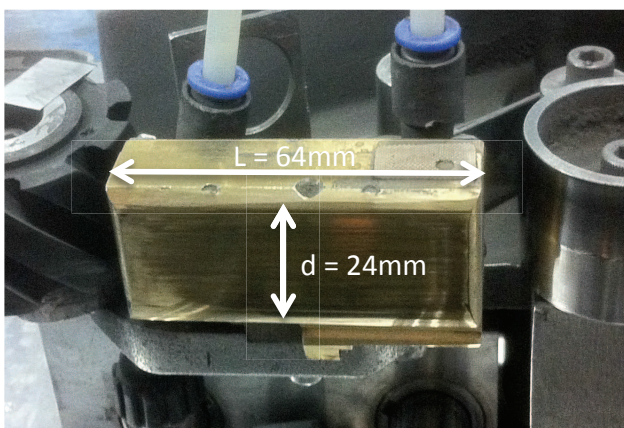


Figure 67 : Patin presseur principal

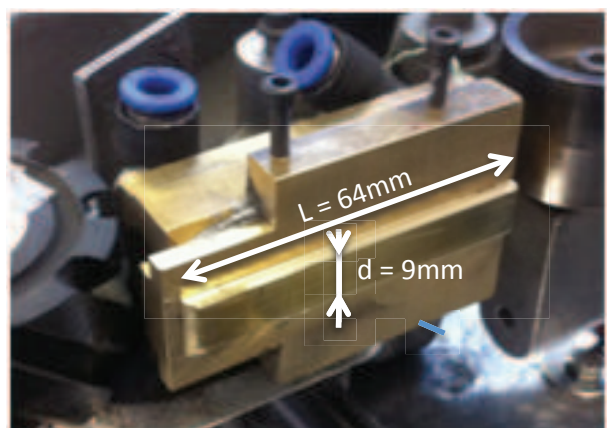


Figure 68 : Patin rapporté (sabot)

L'autre dimension de la surface polie est donnée par la longueur de l'échantillon avec un maximum de 64 mm. Cette valeur découle de la place disponible entre les deux galets. Nous avons repris la longueur du

patin fourni initialement avec la ponceuse. La fixation de l'échantillon impose une longueur minimale de 5 mm.

Pour terminer, la surface de contact avec la bande abrasive a été rectifiée afin d'avoir une bonne planéité pour cette surface. Son parallélisme avec la surface supérieure de l'échantillon est obtenu par réglage au moment du montage de l'ensemble.

6.5 Courbes caractéristiques de la ponceuse

Pour bénéficier du savoir-faire acquis au fil des années dans la conception de machines de polissage, nous avons fait appel à une ponceuse industrielle dotée d'un moteur pneumatique à palettes. Cette technologie est appréciée par la profession car elle offre un rapport puissance/poids 5 à 6 fois supérieur à celui des moteurs électriques. De plus, un calage du moteur n'a aucune incidence sur sa durée de vie. La pression d'alimentation est de l'ordre de 6/7 bars.

Pour mener nos expérimentations, nous avons besoin de connaître la courbe caractéristique de la machine retenue. Nous l'avons établie pour trois références de bandes abrasives (A100 – A30 – A6), deux longueurs d'échantillons (20 et 40 mm) et deux largeurs de bandes (9 et 24 mm). Nous avons constaté une convergence des couplages ($F_z - V$) pour les différentes situations étudiées. Nous présentons Figure 69 les courbes caractéristiques pour les trois tailles de grains retenues.

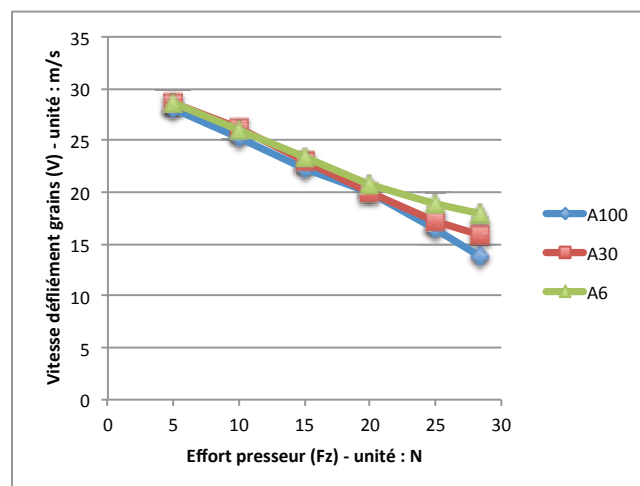


Figure 69 : Courbes caractéristiques de la ponceuse

Ces relevés nous définissent le domaine d'emploi de la ponceuse DINADRADE. Un régulateur de débit (ouvert à 100% pour les essais de caractérisation) nous permet de fonctionner avec un couple ($F_z - V$) placé en dessous de chaque courbe. A ce stade de nos travaux, nous avons fait l'hypothèse que le niveau d'usure des pyramides abrasives n'avait pas d'incidence sur les performances de la ponceuse. Cette hypothèse devra être validée à partir des résultats obtenus. En conclusion, ces informations sont suffisantes pour mener à bien les essais envisagés.

7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter le cadre des essais nécessaires à la mise en œuvre de la démarche développée dans ce mémoire. Pour démontrer sa faisabilité, nous avons sélectionné un cas d'espèce à savoir le polissage de tôles en inox 316L avec des bandes abrasives structurées. Les paramètres de rugosité et de mouillabilité ont été identifiés pour aider à caractériser le résultat obtenu sur la surface polie. Pour caractériser le contact entre l'outil abrasif et la matière, il y a tout lieu de connaître ses caractéristiques géométriques durant tout le temps de son utilisation. Ces informations ont été obtenues en réalisant un relevé topographique des bandes abrasives. En partant de la loi de Preston, nous avons proposé un nouveau modèle de consommation matière qui prend en compte la disposition pyramidale des grains. Pour valider le modèle proposé et caractériser d'autres phénomènes en suivant la voie des plans d'expériences, nous avons élaboré un banc d'essais. Sa description nous a permis de justifier les choix opérés et les éléments nécessaires à la bonne marche des séquences de polissage ont été précisés.

Chapitre 4 : Essais, résultats et analyse

Ce chapitre présente les essais réalisés pour valider les modèles proposés et de préciser aussi bien que possible les phénomènes physiques qui en sont dépourvus jusqu'ici. Il débute par la présentation de l'organisation des essais réalisés dans le cadre de ce mémoire et la logique suivie pour fixer les différents paramètres opératoires de chacun d'eux.

Les premières campagnes expérimentales menées avec le banc décrit à la section 3§6 ont mis en évidence le phénomène de beurrage. Nous proposons dans ce chapitre de présenter les conditions de son apparition et les conséquences sur le processus de polissage et la surface traitée. Nous donnons une explication à ce phénomène et nous introduisons la nécessité de polir les pièces en inox 316L avec des bandes abrasives structurées en appliquant une pression supérieure à une pression minimale d'abrasion. L'étude visant à déterminer cette pression seuil pour le couple matériau-abrasif choisi est présentée pour différentes tailles de grains, différents degrés d'usure des pyramides et différentes vitesses de polissage.

Une fois cette borne inférieure du domaine de l'étude fixée, différents essais ont été conduits pour délimiter les autres bornes du domaine de travail. Pour chaque type de grades d'abrasifs, une campagne d'essais a été conduite pour, d'une part, tester le modèle de consommation matière proposé au chapitre précédent, et pour, d'autre part, caractériser les efforts induits par le processus de polissage et produire des échantillons de manière à connaître la rugosité des surfaces polies et leur degré de mouillabilité.

Pour ces différents essais, les paramètres opératoires mis en place sur l'équipement sont précisés. En retour, les valeurs de la vitesse d'enfoncement de la ponceuse suivant la normale à la surface polie, le coefficient tangentiel de coupe, les paramètres caractérisant la rugosité et la mouillabilité des surfaces sont fournies. Une analyse des résultats mettra en avant les enseignements qui découlent des expériences menées. Dans cet esprit, les paramètres influents seront identifiés pour chaque phénomène étudié.

1 Plans d'expériences

Pour mener à bien la caractérisation d'un phénomène physique, deux voies peuvent être poursuivies en fonction des connaissances initiales. Soit une loi a été identifiée et des essais couvrant le domaine de l'étude permettent de la valider et de déterminer ses paramètres numériques. C'est la voie suivie ici pour l'étude de la consommation de matière avec un modèle dédié à notre cas d'espèce issu de la loi de

PRESTON. Soit lorsqu'aucun élément ne permet d'établir une quelconque théorie, il est nécessaire de réaliser des essais pour mettre en avant les paramètres influents et une première tendance pour le phénomène étudié. Ce type d'étude est parfois le point de départ au développement d'un modèle pertinent. Différentes techniques mathématiques comme les plans d'expériences ou les réseaux neuronaux ont été élaborés pour répondre à ce besoin. Ici, pour étudier la pression minimale d'abrasion, le coefficient tangentiel de coupe, la rugosité ou encore la mouillabilité, nous avons appliqué cette démarche en s'appuyant sur les plans d'expériences factoriels complets. Ces derniers ont pour principe : chaque paramètre d'entrée fait évoluer linéairement la caractéristique du phénomène étudié. L'équation (Eq. 26) donne le principe de la loi modélisant la sortie (s) pour différents paramètres (e_i).

$$(Eq. 26) \quad s = \prod_{i=1}^n (m_i + p_i \cdot e_i) \quad ,$$

où : s est le paramètre de sortie

m_i et p_i sont des constantes

e_i sont les paramètres d'entrée

Pour réaliser les essais, les paramètres d'entrée sont choisis aux limites du domaine. Dans le cadre d'un plan d'expériences complet avec (n) entrées, le nombre d'essais est au minimum égal à 2^n . A titre d'exemple, l'équation (Eq. 26) devient, quand deux paramètres d'entrée sont considérés, l'équation (Eq. 27).

$$(Eq. 27) \quad s = a_0 + a_1 \cdot e_1 + a_2 \cdot e_2 + a_{12} \cdot e_1 \cdot e_2 \quad ,$$

où : a_0 est la moyenne des résultats obtenus au cours des essais,

a_1 et a_2 sont les coefficients d'effet pour chaque entrée,

a_{12} est le coefficient d'interaction entre e_1 et e_2 .

Si la loi (s) considère n entrées (e_i), le nombre de constantes qui la caractérise est égal à 2^n .

Avec 2^n essais, autant d'équations sont mises en place. La résolution du système d'équations permet d'établir les valeurs pour la moyenne et les coefficients de la loi (s).

Pour que chaque paramètre d'entrée ait le même poids dans la détermination des données, ses valeurs sont normalisées dans la plage [-1, +1]. Bien entendu, la loi (s) finale avec les paramètres d'entrée réels doit prendre en compte ce changement d'échelle.

Un nombre d'essais supérieur à 2^n permet d'obtenir grâce à une régression des moindres carrés une meilleure précision dans le calcul des coefficients de la loi (s).

2 Mise en œuvre des essais

Différents essais ont été conduits pour mener à bien la validation du modèle de consommation matière, la détermination des valeurs associées et la caractérisation du coefficient tangentiel de coupe, de la rugosité et de la mouillabilité. Nous présentons ici la logique suivie pour fixer les conditions opératoires de leur mise en œuvre.

2.1 Vitesse de défilement des grains abrasifs (V)

La courbe caractéristique de la ponceuse DINABRADE présentée à la section 6.5 du chapitre 3 a mis en évidence que plus l'effort presseur était important et plus la vitesse de la bande était faible. Un autre élément peut réduire cette vitesse, c'est la limitation du débit d'air comprimé par le biais de la vis pointeau placée à l'entrée de la ponceuse. Pour chaque essai de polissage, une vitesse de défilement des grains (V) doit être mise en place à un niveau donné. Cela a pour conséquence de préciser la plage opérationnelle de l'effort presseur (Fz). L'équation (Eq. 28) issue de la caractérisation de la ponceuse DINABRADE permet de préciser pour une valeur visée (V) l'effort maxi (Fz) quand le régulateur de débit est grand ouvert. Les valeurs des coefficients (a) et (b) ont été toutefois minorées de 10% pour prendre en compte les incertitudes liées à cette caractérisation.

$$(Eq. 28) \quad F_{max} = a \cdot V + b$$

avec $a = -2$ et $b = 57$ avec Fz est exprimé en N et V en m/s

Si, pour des considérations abordées plus loin, l'effort (Fz) retenu est inférieur à la valeur fournie par cette relation, la vitesse effective de la bande est réduite en faisant appel au limiteur de débit. La vitesse réelle de la bande est mesurée via la baie DEWETRON et prise en compte dans nos modélisations. Enfin, les différents essais préliminaires nous indiquent que la plage optimale de fonctionnement de la ponceuse se situe pour une vitesse de défilement comprise dans l'intervalle 10 - 25 m/s.

2.2 Taux d'usure (k)

La Figure 70 présente les bornes retenues pour le coefficient d'usure (k).

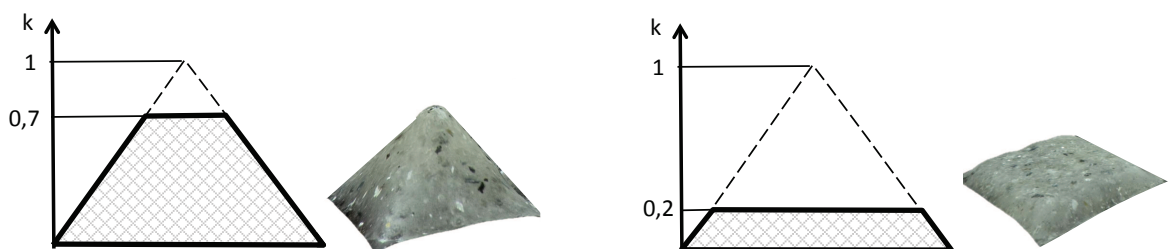


Figure 70 : Bornes du coefficient d'usure (k)

Pour des raisons de fabrication, le sommet des pyramides neuves n'est jamais complètement formé. Une bande neuve a une valeur de (k) voisine de 0.8/0.85. Aussi, la présence d'un cratère au sommet de la plupart des pyramides favorise une usure prononcée au cours des premières minutes de polissage. C'est pourquoi nous avons pratiqué systématiquement un rodage des bandes pour obtenir une valeur de départ de 0.7 pour (k). Nous avons retenu 0.2 comme valeur basse car en dessous il devient difficile d'identifier le profil des pyramides surtout pour des tailles de grains élevées (voir chapitre 3§3). Aussi, plus les pyramides sont usées, plus l'évacuation des déchets (métal et liant) est difficile. Cet encrassement favorise le phénomène de beurrage (voir chapitre 4§3). Un soufflage régulier de la bande permet d'atténuer ce risque.

2.3 Pression exercée par les grains abrasifs (p)

La pression exercée par les grains abrasifs (p) est l'un des paramètres des essais à conduire. Elle a été précisée au chapitre 3 par l'équation (Eq. 22). Cette dernière est complétée dans l'équation (Eq. 29) en introduisant les dimensions de la surface rectangulaire polie. On note (L) la dimension dans le sens de défilement des grains, (d) dans la direction transversale à ce mouvement (Figure 67, Figure 68).

$$(Eq. 29) \quad p = \frac{F_z}{(1-k)^2 \cdot L \cdot d} \quad .$$

Pour une pression (p) visée, un couple ($F_z - L$) doit être identifié avec comme contraintes :

- $F_z \in [5, F_{maxi}]$ unité : N
- $L \in [5, 64]$ unité : mm

La valeur minimale de F_z est fixée expérimentalement à 5N pour assurer un comportement satisfaisant du processus de polissage. A savoir disposer d'un effort presseur suffisamment élevé pour limiter les vibrations occasionnées par la coupe du métal par les grains abrasifs à une vitesse voisine de 20 m/s.

La valeur F_{max} a été précisée plus haut à la section 2.1 de ce chapitre.

Les bornes de (L) découlent des dimensions du patin presseur en place sur notre équipement (voir section 1§6.4). La valeur mini de (L) est liée aux contraintes de bridage de l'échantillon. La valeur maxi correspond à la longueur du patin presseur. A savoir 64 mm.

Aussi, la largeur (d) correspond à la largeur du patin : 9 ou 24 mm.

Le choix du couple ($F_z - L$) doit se faire en privilégiant une valeur de (L) comprise entre 10 et 30 mm de manière à limiter l'impact du défaut d'orientation du patin presseur par rapport à la face supérieure de l'échantillon. Aussi, plus l'effort presseur (F_z) est important, meilleure est la stabilité du processus de polissage.

Les valeurs du couple ($F_z - L$) étant fixées, l'échantillon est découpé à la demande à l'aide d'une guillotine pour métaux en feuille. Si la précision de la coupe est seulement de 1mm, sa mesure nous permet de prendre en compte cette longueur au $1/10^{\text{ème}}$ de mm et d'ajuster la valeur de la pression (p) visée dans les modélisations élaborées.

2.4 Mesure de la consommation matière

Un modèle sur la consommation de matière a été proposé à la section 5 du chapitre 3. Il doit nous permettre de prédire la quantité de matière enlevée au cours d'un processus de polissage. Pour déterminer la vitesse d'enfoncement de la ponceuse dans la matière (dz/dt), nous n'avons pas utilisé le capteur LVDT renseignant la position de la ponceuse par rapport au bâti car les vibrations provoquées par le processus de polissage altèrent trop fortement les relevés réalisés. Nous avons préféré mesurer la masse de matière (M) enlevée au cours d'une séquence de polissage d'une durée (T). La quantité (M) est connue en mesurant la masse de l'échantillon avec une balance de précision METTLER TOLEDO EL204 avant et après chaque séquence de polissage. La durée (T) est fournie par le relevé de l'effort (F_z) réalisé avec la baie DEWETRON. Elle correspond à la durée où (F_z) est supérieur à 5N.

La détermination de (T) présente un dilemme, d'un côté, la recherche de la précision de cette mesure conduit à maximiser la durée de l'essai, et de l'autre côté, une durée trop importante conduit à une variation de la hauteur des pyramides au cours de l'essai. Nous avons choisi des durées qui conduisent à une réduction maximale de (k) de 2% pour un essai et d'avoir une énergie identique dépensée d'un essai à l'autre. Cette énergie a été fixée expérimentalement à 30 kJ pour tous les essais.

Pour terminer, la détermination de la vitesse (dz/dt) nécessite de connaître la section balayée par la bande abrasive. C'est un rectangle dont les dimensions caractéristiques sont (L) et (d) (cf. section 2.3).

De là, la constante (C_p) peut être déterminée à l'aide des deux relations suivantes :

$$(Eq. 30) \quad C_p = \frac{dz/dt}{p \cdot V \cdot (1-k)^2} = \frac{dz/dt \cdot L \cdot d}{F_z \cdot V} .$$

3 Pression minimale d'abrasion

Le polissage de l'inox 316L avec des bandes abrasives structurées doit être réalisé avec une pression exercée par les grains abrasifs sur la matière suffisante pour éviter l'apparition du phénomène de beurrage. Après avoir caractérisé ce phénomène, un protocole d'identification de la pression minimale d'abrasion est développé et les résultats obtenus sont présentés. Ils permettent de dégager une valeur minimale pour la pression (p) à prendre en compte dans les autres études expérimentales.

3.1 Mise en évidence de ce phénomène

La Figure 71 correspond au relevé d'un essai réalisé avec le banc expérimental mis en place pour cette étude. Les données de l'essai sont fournies dans le Tableau 7. Il fait apparaître l'évolution de l'effort presseur (F_z), l'effort tangentiel de coupe (F_x), le coefficient tangentiel de coupe (f) et la vitesse de défilement des grains abrasifs (V).

Grade bande	A30
Effort presseur (F_z)	28 N
Vitesse de défilement des abrasifs (V)	13 m/s
Largeur bande	25 mm
Longueur surface polie	64 mm

Tableau 7 : Paramètres du relevé de la Figure 71

Le relevé proposé correspond à la période où $t \in [30, 48\text{mn}]$. La date ($t=0$) correspond au début du processus de polissage avec une bande neuve.

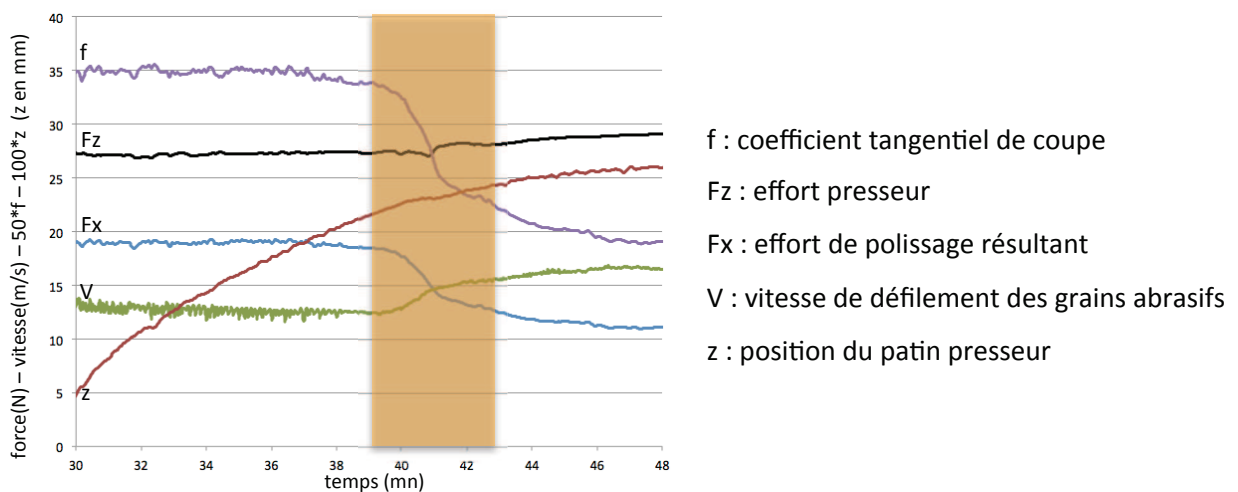


Figure 71 : Evolution des paramètres lors de l'apparition du phénomène de beurrage

Dans cet essai, le phénomène de beurrage se manifeste à partir de $t=39\text{mn}$. Nous observons alors une baisse marquée et régulière de l'effort tangentiel de coupe (F_x) sur une période d'une dizaine de minutes. Cela a pour conséquence de faire chuter le coefficient tangentiel de coupe (f). L'effort (F_x) étant moins important, les paramètres de fonctionnement de la ponceuse restant par ailleurs inchangés, la vitesse de défilement des abrasifs augmente légèrement. Aussi, la vitesse d'enfoncement dz/dt tend vers zéro. Enfin, des traces noirâtres apparaissent sur la surface polie et sur la bande abrasive. La Figure 72a donne une idée de la physionomie de la surface dégradée et la Figure 72b est une vue rapprochée de ces traces.

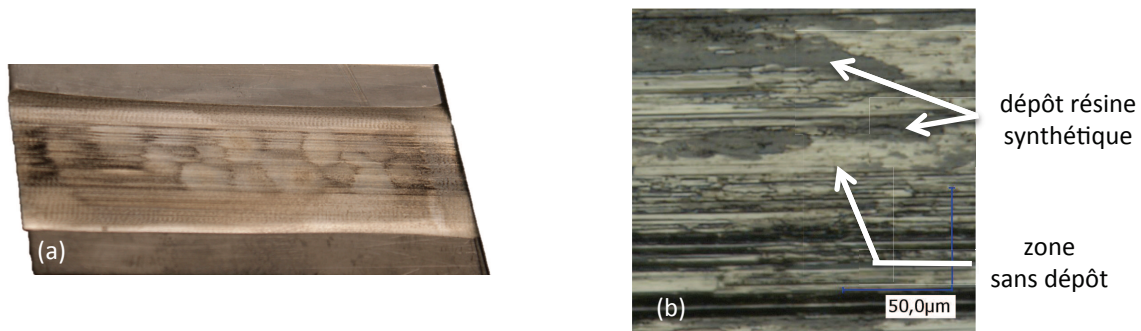


Figure 72 : Dépôts observés sur la surface polie

Une étude au MEB de ces tâches fait apparaître que la matière déposée est de nature organique (Figure 73). Elle correspond prioritairement à un dépôt des résines synthétiques liant les grains abrasifs entre eux.

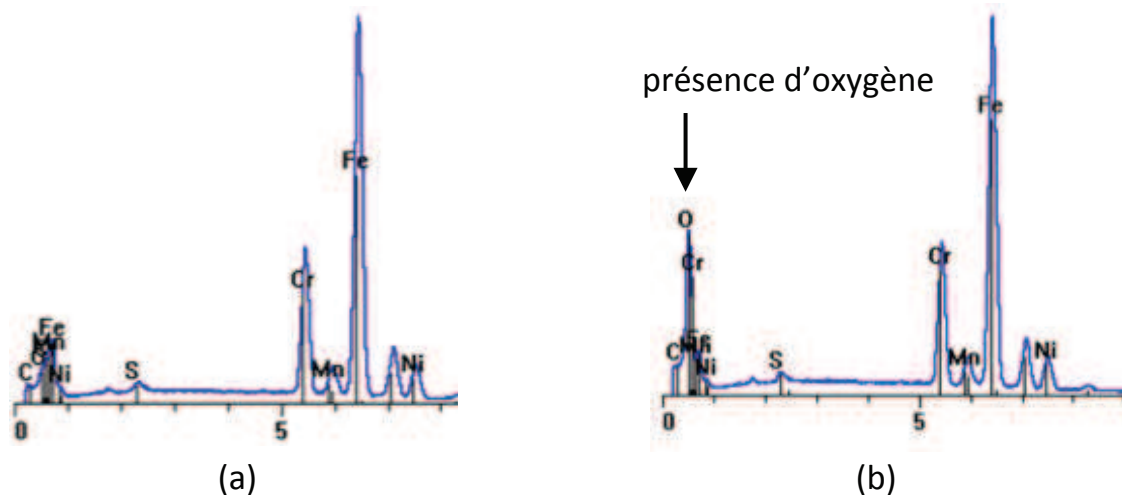


Figure 73 : Relevé des constituants présents sur la surface polie (a) avant beurrage - (b) après beurrage

Pour expliquer la présence de ces dépôts sur la surface polie, trois phénomènes sont à prendre en compte. Le premier est l'incrustation dans les stries de la surface des résidus de résine synthétique. Quand la coupe du métal est régulière, ils sont rapidement délogés par l'extraction de la matière hôte. Leur évacuation est concomitante à celle de la matière. Pour des conditions de coupe satisfaisantes, leur présence est imperceptible une fois le polissage terminé. Le deuxième est la réduction de la pression exercée par les grains abrasifs sur la surface au fur et à mesure que la hauteur des pyramides s'amenuise. Le troisième est la fragmentation des grains abrasifs nécessaire pour régénérer les arêtes de coupe. Quand la pression exercée par les grains abrasifs est trop faible pour fragmenter ces derniers, leurs arêtes s'émoussent et la coupe du métal a du mal à se produire. L'enlèvement des incrustations du liant n'ayant plus lieu à un niveau suffisant, le phénomène de beurrage apparaît et se développe d'autant plus facilement que les résidus de liant, de part leur nature, favorisent le glissement des grains abrasifs sur le métal poli. C'est pour cette raison que nous observons le décrochement du coefficient tangentiel de coupe

(f) sur la Figure 71. De même, la vitesse d'enfoncement de la ponceuse (dz/dt) s'estompe et devient insignifiante. L'enlèvement de matière attendu ne pourra donc pas être atteint et la surface polie se retrouve couverte de tâches noirâtres lui donnant des caractéristiques très éloignées des préconisations recherchées. Le beurrage est un phénomène irréversible à iso-conditions. Seule une augmentation sensible et durable de la pression d'abrasion permet de revenir à des conditions de polissage satisfaisantes.

Pour mener à bien une opération de polissage avec les bandes étudiées, il est nécessaire d'avoir une pression de contact toujours supérieure à la pression dite minimale d'abrasion. Les travaux présentés ci-dessous visent à préciser cette pression ainsi que l'influence sur ce paramètre de la vitesse de défilement des grains et du taux d'usure des pyramides abrasives.

3.2 Protocole expérimental pour déterminer la pression minimale d'abrasion

L'apparition du phénomène de beurrage se traduit par une chute de la consommation de matière. Pour analyser les conditions à réunir pour le voir s'installer, nous avons besoin d'un modèle qui précise la vitesse d'enfoncement de la ponceuse. Bien que sa validation soit présentée plus loin (section 4 de ce chapitre), le modèle issu de la loi de Preston (proposé à la section 5 du chapitre 3) est utilisé ici pour caractériser la pression minimale d'abrasion. Cet ordonnancement est imposé par la nécessité de connaître les bornes de la pression (p) pour mener à bien la validation du modèle proposé. A partir de ce modèle, l'équation (Eq. 31) est mise en place pour préciser la constante (C_p) qui caractérise les performances du processus de polissage en terme de pouvoir abrasif.

$$(Eq. 31) \quad C_p = \frac{dz/dt}{p \cdot V \cdot (1-k)^2} \quad .$$

Si, pour un contexte de polissage donné (k et V constants), la consommation matière (dz/dt) se modifie brusquement alors que la pression (p) évolue régulièrement, la constante (C_p), elle aussi, se modifie dans les mêmes proportions. La pression pour laquelle cette rupture intervient dans l'évolution de (C_p), correspond à la pression minimale d'abrasion (p_{ma}). En utilisant le protocole défini à la section 2 de ce chapitre, les différentes valeurs obtenues pour (C_p) sont consignées sur la Figure 74 à titre d'exemple, le processus étant dans ce cas réalisé avec une bande abrasive A30 et le couple ($V-k$) égal à (10-0,2). On y distingue une évolution quasi-constante de (C_p). L'enlèvement de matière est régulier et suffisant pour supprimer les incrustations de résine synthétique dans le métal. Le résultat est conforme aux attentes en termes de consommation matière et d'aspect de surface. Par contre pour les faibles valeurs de pression d'abrasion, l'enlèvement de matière est insuffisant pour chasser efficacement les dépôts de résine synthétique. Le phénomène de beurrage se met en place progressivement. Le tracé de la courbe met clairement en évidence la rupture dans l'évolution de (C_p). La pression pour laquelle intervient ce décrochement nous permet d'identifier la pression minimale d'abrasion. La valeur de (p) à l'origine de la

plage correspondant à un polissage satisfaisant est retenue pour préciser cette pression. La constante (C_p) identifiée ici pour de faibles pressions d'abrasion donne une image du pouvoir abrasif dégradé du process au cours des premières minutes de beurrage. Une nouvelle mesure après cette première phase de démarrage du mécanisme de beurrage donnerait une valeur nettement inférieure à la première relevée puisqu'aucun enlèvement de matière n'est observé une fois le phénomène de beurrage installé.

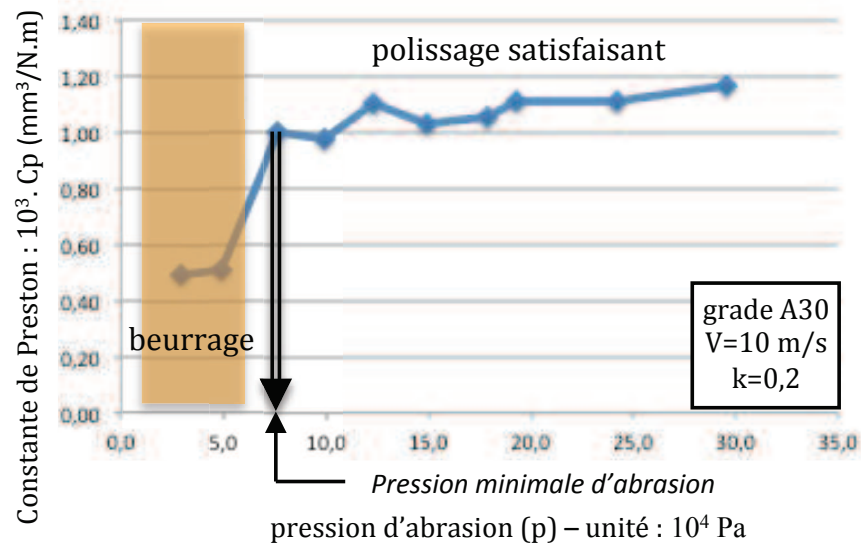


Figure 74 : Evolution de (C_p) en fonction de la pression d'abrasion

Pour aller plus loin, c'est-à-dire connaître l'évolution de la pression minimale en fonction de la vitesse (V) et du taux d'usure (k), nous proposons de mettre en place un plan d'expériences ayant pour entrées ces deux paramètres (Figure 75). Par contre, chaque référence de bande est traitée séparément car en plus de la taille des grains, il faudrait intégrer la nature du liant et la proportion des grains abrasifs par rapport au liant sur lesquelles nous n'avons pas d'information.

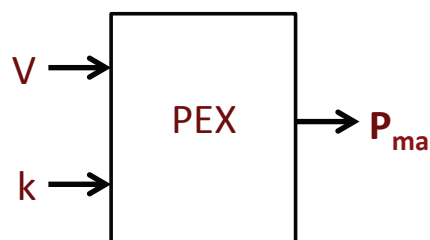


Figure 75 : Paramètres du plan d'expériences

Le Tableau 8 fournit les bornes des différents paramètres d'entrée du plan d'expériences visant à déterminer la pression minimale d'abrasion ainsi que la plage de la pression considérée pour l'étude du comportement du polissage.

Paramètres	Symb.	Unité	Borne mini	Borne maxi
Vitesse	V	m/s	10	25
Taux d'usure	k		0,2	0,7
Pression d'abrasion	p	10^4 Pa	3	30

Tableau 8 : Paramètres de l'étude visant à déterminer la pression minimale d'abrasion

3.3 Résultats expérimentaux

L'évolution de la constante de Preston (Cp) pour les couples (V-k) : (25-0.7 / 25-0.2 / 10-0.2) est présentée sur les Figure 76, 77 et 78 pour les trois références de bandes étudiées. Les courbes ont une physionomie conforme à la courbe présentée Figure 74.

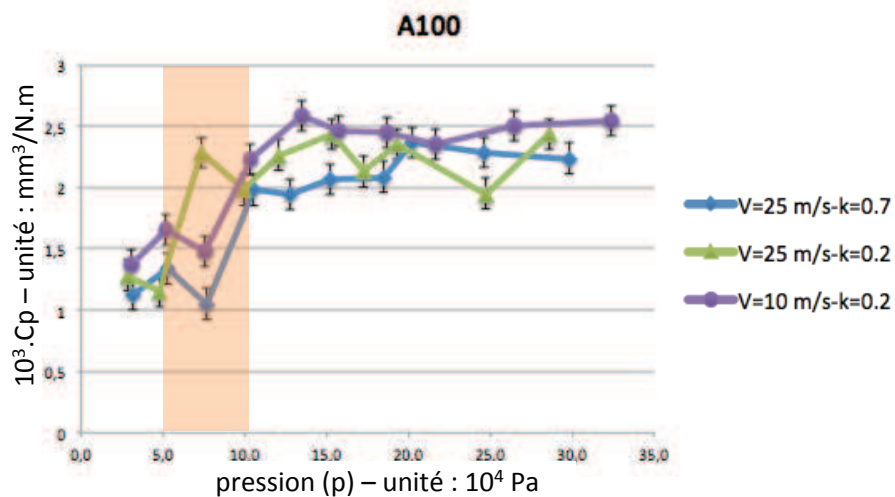


Figure 76 : Evolution de la constante de Preston - bande A100

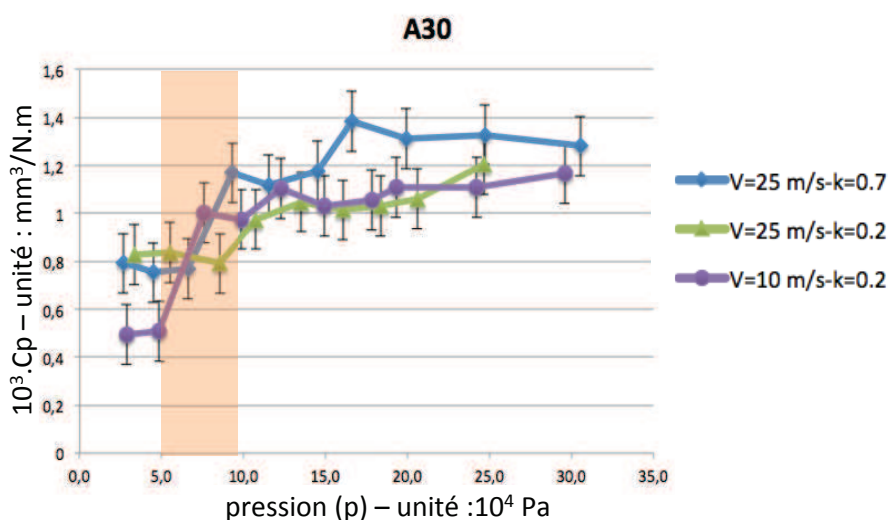


Figure 77 : Evolution de la constante de Preston - bande A30

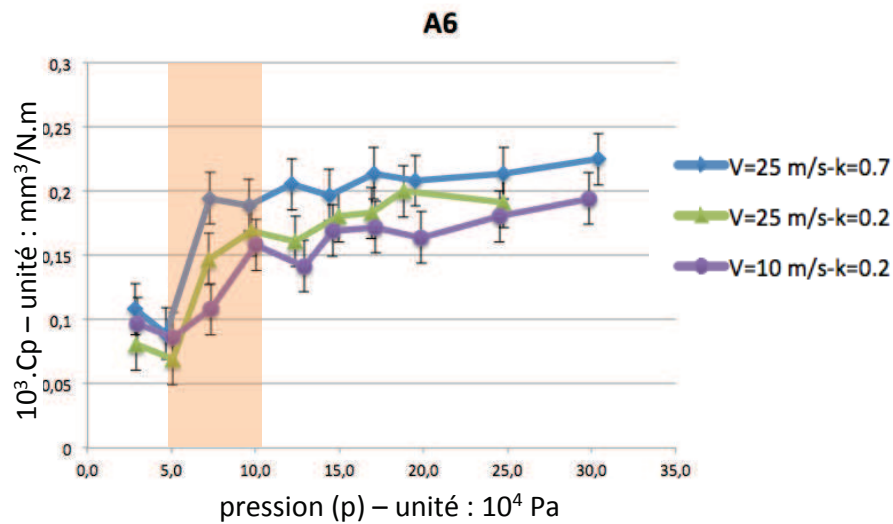
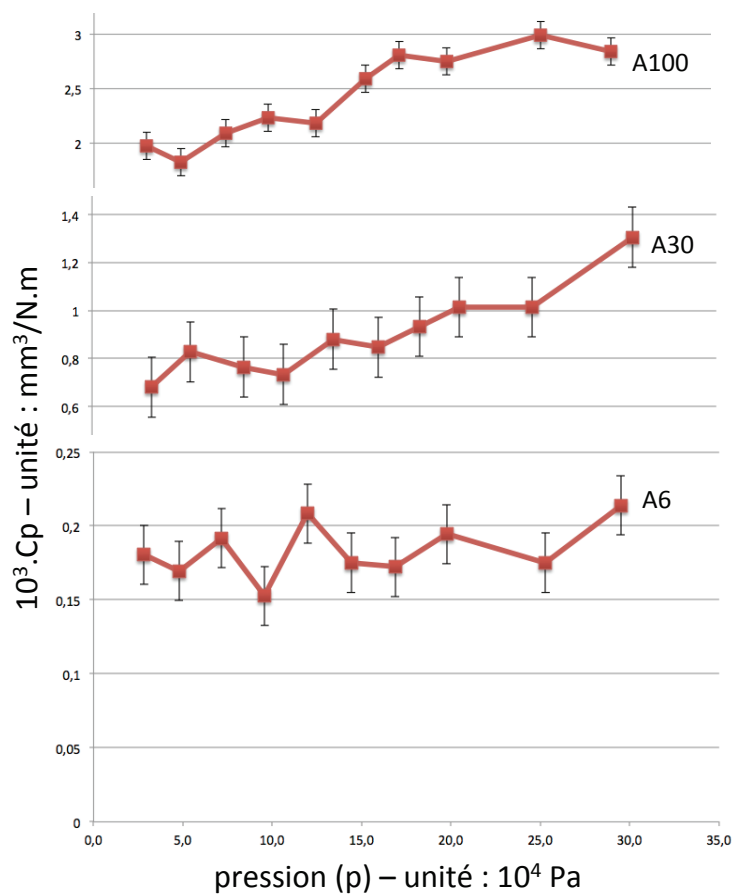


Figure 78 : Evolution de la constante de Preston - bande A6

Dans la zone de beurrage, nous avons observé de manière plus ou moins prononcée, la présence de tâches noirâtres sur les échantillons polis.

L'évolution de la constante de PRESTON pour le couple $(V-k) = (10-0.7)$ est présentée conjointement pour les trois grades d'abrasifs Figure 79.

Figure 79 : Evolution de la constante de Preston pour le couple $(V-k) = (10-0,7)$

Le décrochage caractéristique du phénomène de beurrage n'y apparaît pas. Une explication probable est que la pression minimale d'abrasion est inférieure à la pression minimale atteignable par notre dispositif expérimental et que nous n'avons donc pas travaillé dans des conditions permettant d'atteindre les conditions de beurrage. La pression minimale de beurrage a donc été identifiée comme inférieure à $2 \cdot 10^4$ Pa dans ce cas là.

Le tableau 5 fournit les différentes pressions minimales d'abrasion identifiées pour les différentes conditions de polissage proposées.

V (m/s) - k	25 - 0,7	10 - 0,7	25 - 0,2	10 - 0,2
A100	10	<2	7	10
A30	9	<2	10	8
A6	7	<2	7	10

Tableau 9 : Pression minimale d'abrasion (unité : 10^4 Pa)

La Figure 80 présente la valeur moyenne de la pression minimale d'abrasion pour les trois grades des bandes étudiées. Ici, la taille des grains n'est pas un paramètre influent.

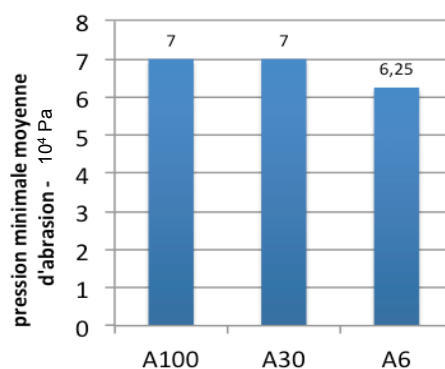


Figure 80 : Valeurs moyennes de la pression minimale d'abrasion

Les coefficients du plan d'expériences complet effectué ayant pour entrées V et k, sont présentés Figure 81.

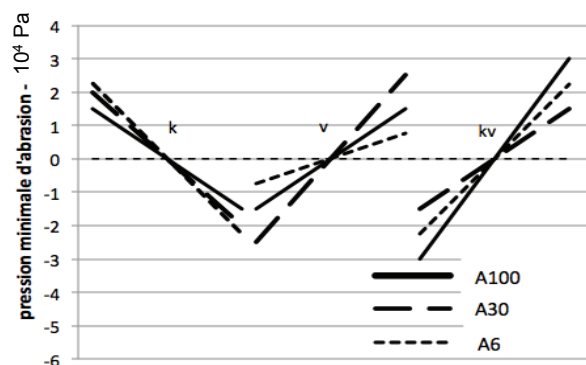


Figure 81 : Valeurs moyennes des coefficients du plan d'expériences caractérisant la pression minimale

Il en ressort qu'une forte vitesse a pour effet d'augmenter la pression minimale d'abrasion. Réduire la vitesse de défilement des grains abrasifs peut être une solution pour abaisser cette pression. Notons que ce choix va à l'encontre de la productivité. Aussi, le risque de voir apparaître le phénomène de beurrage est d'autant plus grand que les pyramides sont basses. Les espaces entre les pyramides étant plus réduits, l'évacuation des poussières de métal, d'abrasifs et de liant est alors moins performante.

Pour la suite de notre étude, il est intéressant de noter que la pression minimale d'abrasion est toujours inférieure à 10^5 Pa.

3.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le phénomène de beurrage qui peut se manifester quand des bandes abrasives structurées sont utilisées pour polir des tôles inox 316L. Ce comportement particulier du processus de polissage dégrade fortement l'aspect de la surface et bloque l'enlèvement de matière. Nous avons précisé comment il se manifestait et mis en évidence que la pression exercée par les grains abrasifs devait être d'un niveau suffisant pour ne pas le voir apparaître. Puis nous avons présenté la démarche suivie pour déterminer la pression minimale d'abrasion pour un large panel de conditions de polissage en réalisant un plan d'expériences. Nous avons présenté les résultats qui en découlent ainsi que des données utiles pour réaliser des opérations de polissage sans beurrage.

4 Consommation matière

L'objectif des travaux développés maintenant est de tester et de valider le modèle de consommation proposé au chapitre 3 que nous rappelons ci-dessous.

$$(Eq. 32) \quad \frac{dz}{dt} = (1 - k)^2 \cdot C_p \cdot p \cdot V \quad .$$

avec	$\frac{dz}{dt}$	vitesse d'enfoncement (ponceuse / matière)
	k	taux d'usure des pyramides
	C_p	constante de Preston
	p	pression exercée par les abrasifs
	V	vitesse de défilement des grains abrasifs

4.1 Essais

Pour constituer notre liste d'essais en vue de tester le modèle proposé, nous avons suivi une démarche basée sur les plans d'expériences complets. L'intérêt de cette démarche est double. D'une part, elle permet d'utiliser les mêmes essais pour caractériser les autres paramètres de notre étude à savoir le coefficient tangentiel de coupe, la rugosité et la mouillabilité. D'autre part, dans l'hypothèse où notre

modèle se révélerait peu conforme à la réalité, nous pourrions néanmoins dégager des enseignements sur la consommation en déterminant les coefficients découlant du plan d'expériences.

La Figure 82 présente les paramètres de cette étude. Nous avons, en entrée, la pression exercée par les abrasifs (p), la vitesse de défilement des grains (V) et le taux d'usure des pyramides abrasives (k). En sortie, nous nous intéressons à la vitesse d'avance de la ponceuse dans la matière polie (dz/dt).

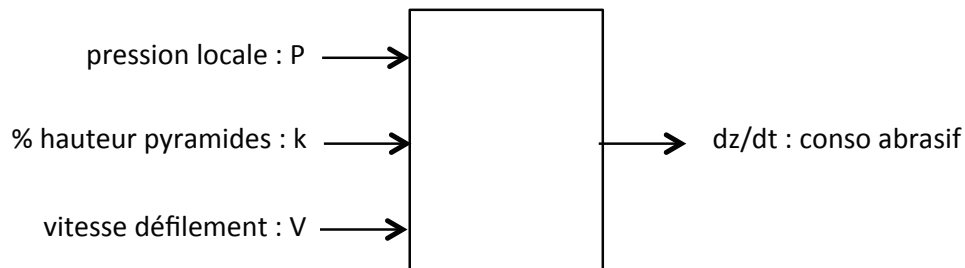


Figure 82 : Paramètres de l'étude

La Figure 83 précise le domaine de l'étude pour les trois paramètres d'entrée. La borne inférieure de la pression découle directement du sous-chapitre sur la pression minimale d'abrasion. Nous prenons la valeur haute à savoir 10^5 Pa pour éviter toute interférence entre l'étude de notre modèle et le phénomène de beurrage. La borne supérieure a été fixée suite à des essais préliminaires. Au delà de cette valeur, nous observons un processus de polissage particulièrement agressif qui perturbe la mesure des efforts et provoque une usure rapide des pyramides abrasives. Les bornes des paramètres de vitesse et du taux d'usure ont été présentées respectivement aux sections 2.1 et 2.2 de ce chapitre. Les essais sont réalisés aux limites du domaine. Ils sont au nombre de 8. Les numéros placés à chaque angle du domaine correspondent aux numéros des tests précisés ci-dessous.

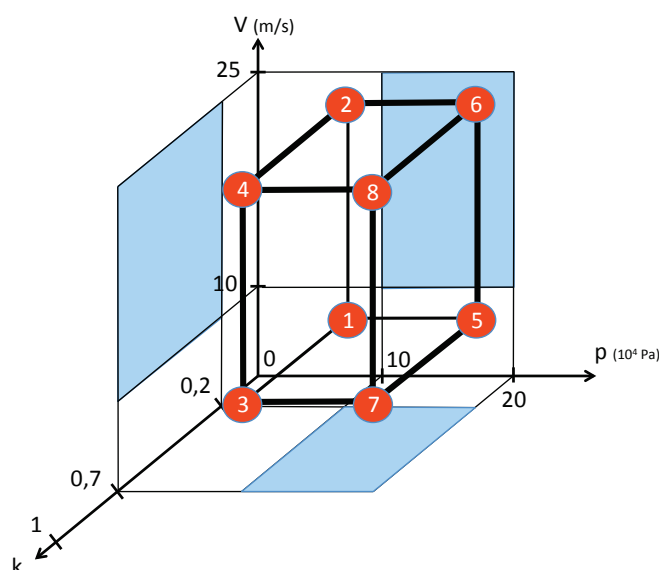


Figure 83 : Domaine de l'étude et position des test réalisés

4.2 Résultats et analyse

Le Tableau 10 fournit pour chaque point extrême du domaine de l'étude la vitesse d'enfoncement de la ponceuse (dz/dt) équipée d'une bande A100 et la constante (C_p).

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,4	9,9	9,9	10,5	21,6	19,3	20,0	20,2
k		0,26	0,26	0,7	0,68	0,27	0,27	0,71	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	26,1	10,2	24,5	9,7	25,1
dz/dt	mm/h	4,59	9,50	0,72	2,05	9,85	21,18	1,58	3,92
C_p	$10^3 \cdot \text{mm}^3/\text{N.m}$	2,22	1,99	2,22	2,03	2,33	2,33	2,69	2,39

Tableau 10 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A100

Résultats pour la bande A30

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	9,9	10,1	10,7	9,3	19,3	19,4	20,6	19,9
k		0,21	0,21	0,7	0,65	0,23	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	24,5	10,2	24,5	9,7	23,8
dz/dt	mm/h	2,16	5,43	0,26	1,15	4,65	10,95	0,58	2,04
C_p	$10^3 \cdot \text{mm}^3/\text{N.m}$	0,96	0,98	0,74	1,14	1,11	1,05	1,03	1,33

Tableau 11 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A30

Résultats pour la bande A6

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,0	9,7	9,6	9,5	19,9	18,8	19,7	19,5
k		0,23	0,21	0,7	0,68	0,24	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,2	24,3	10,2	25,4	10,0	24,7	10,0	25,3
dz/dt	mm/h	0,35	0,90	0,05	0,20	0,69	2,02	0,11	0,23
C_p	$10^3 \cdot \text{mm}^3/\text{N.m}$	0,16	0,17	0,16	0,22	0,17	0,20	0,20	0,14

Tableau 12 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A6

Des écarts existent entre les bornes nominales des entrées et les valeurs réelles des essais. La vitesse de défilement (V) correspond à sa valeur moyenne pendant la durée de chaque essai. Avant chaque essai, différentes séquences de polissage sont menées pour réduire la hauteur des pyramides et se rapprocher du taux d'usure escompté. Cependant, le processus d'usure des bandes abrasives présente de fortes fluctuations. Aussi, les temps opératoires pour user les bandes abrasives et caractériser leur géométrie étant longs, nous avons limité notre étude à des valeurs de (k) comprises dans une plage de $\pm 10\%$ par rapport à la valeur visée. Enfin, pour les bandes A100 qui renferment des grains de forte taille, nous avons relevé la borne mini de (k) car il était difficile de distinguer la géométrie des pyramides pour des valeurs inférieures.

Pour chaque essai, il est possible de déterminer la constante C_p en utilisant l'équation (Eq. 31). Les valeurs obtenues pour les différents grades sont proposées dans les tableaux 11, 12 et 13. En appliquant une régression des moindres carrés, nous déterminons la constante C_p pour chaque type de bande testée. La Figure 84 fournit ces valeurs.

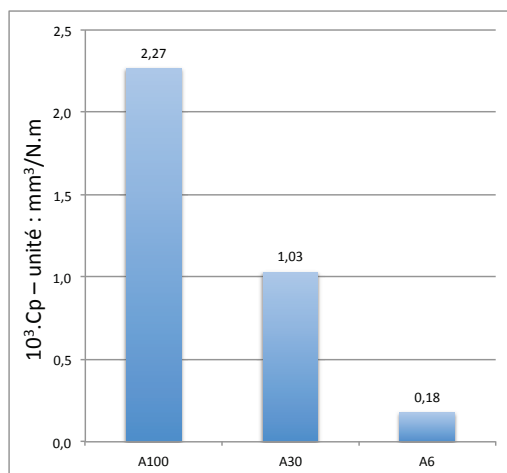


Figure 84 : Constantes C_p obtenues expérimentalement

Pour chaque essai, la valeur théorique de la vitesse d'enfoncement est rapprochée de la valeur expérimentale. La Figure 85 présente une vue synthétique de ces écarts pour l'ensemble des essais réalisés, grade par grade d'abrasif. Une échelle Ln-Ln est utilisée pour donner une meilleure répartition des points sur le graphique. Elle met en évidence une bonne corrélation du modèle avec les valeurs expérimentales.

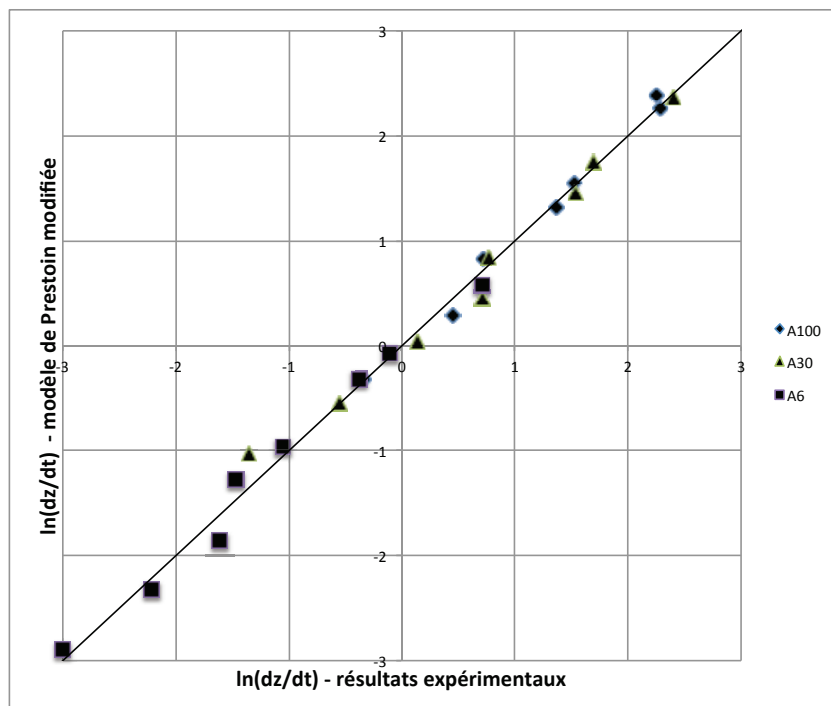


Figure 85 : Ecart entre résultats expérimentaux et modèle de PRESTON modifié

L'étude de l'écart entre valeurs expérimentales et valeurs issues du modèle nous donne un écart type de 13% pour l'ensemble des essais réalisés dans cette étude.

Ces résultats mettent en avant l'importance de la taille des grains abrasifs. Le taux de productivité va de 1 à 10 entre les différents grades proposés dans cette technologie d'abrasifs.

La première lecture du modèle permet de dire que la consommation matière dépend à la fois du taux d'usure des bandes, de la pression exercée par les grains abrasifs sur la matière et de leur vitesse de défilement. Cependant, compte tenu du couplage entre la pression (p), l'effort presseur (F_z), le taux d'usure (k) et la surface du patin presseur ($S_{projetée}$), nous avons une présentation plus porteuse de sens pour l'opérateur ou le bureau des méthodes. On rappelle ci-dessous l'équation (Eq. 23) présentée au chapitre 3 :

$$\frac{dz}{dt} = C_p \cdot \frac{F_z \cdot V}{S_{projetée}} \quad .$$

Elle met en avant que pour des conditions données (grade, matière, F_z , V), la vitesse d'enfoncement de la ponceuse ne dépend pas du taux d'usure des pyramides abrasives. La performance est constante du début jusqu'à la fin de vie de la bande abrasive. Cette perspective simplifie grandement les préconisations sur le déroulement des opérations de polissage, autant pour le bureau des méthodes qui doit les imaginer que pour les opérateurs qui doivent les appliquer.

4.3 Conclusion

Les essais réalisés ont permis d'identifier des consommations matière pour différentes situations de polissage en termes de pression, de vitesse de défilement des grains et de taux d'usure des pyramides abrasives. Nous avons pu ainsi confronter ces résultats expérimentaux au modèle proposé au chapitre 3 section 5. Les écarts obtenus sont inférieurs à 15% validant ainsi le modèle issu de la loi de Preston. Il met en évidence les paramètres qui régissent la progression de l'outil abrasif dans la matière et nous avons établi que la taille des grains avait une forte incidence sur la productivité d'un processus de polissage.

5 Coefficient tangentiel de coupe

Nous avons vu qu'un effort presseur exercé suivant la normale à la surface polie est nécessaire pour assurer la coupe du métal par les grains abrasifs. Il en résulte l'apparition d'efforts propres au processus de polissage. Il peut être nécessaire de connaître ces efforts induits pour concevoir l'outillage porte-pièce ou le bras support de l'outil abrasif. Ayant équipé notre banc d'essai d'un dynamomètre à 6 composantes, nous avons pu identifier les différents efforts supportés par la pièce au cours d'une opération de polissage. La Figure 86 présente le paramétrage de la mesure du torseur d'action des abrasifs sur l'échantillon par le

capteur dynamométrique à 6 composantes au point A. Le point A est placé au centre de l'échantillon et à l'interface de la bande abrasive et de ce dernier.

Ici, le mouvement des abrasifs est linéaire. La direction est portée par le vecteur directeur $\vec{X}$. Nous avons constaté que l'effort résultant a invariablement pour support le vecteur vitesse des grains par rapport à la ponceuse. Aussi, les composantes de moment exprimées en A sont toujours voisines de zéro. L'équation (Eq. 33) fournit la forme générale du torseur d'action des abrasifs sur l'échantillon. L'étude des efforts induits revient donc à évaluer l'évolution de l'intensité de cet effort résultant. Concrètement, nous proposons d'étudier le rapport entre l'effort résultant (F_x) et l'effort presseur appliqué par la ponceuse suivant la normale au patin presseur (F_z). Nous l'appelons coefficient tangentiel de coupe et nous le notons f (Eq. 34).

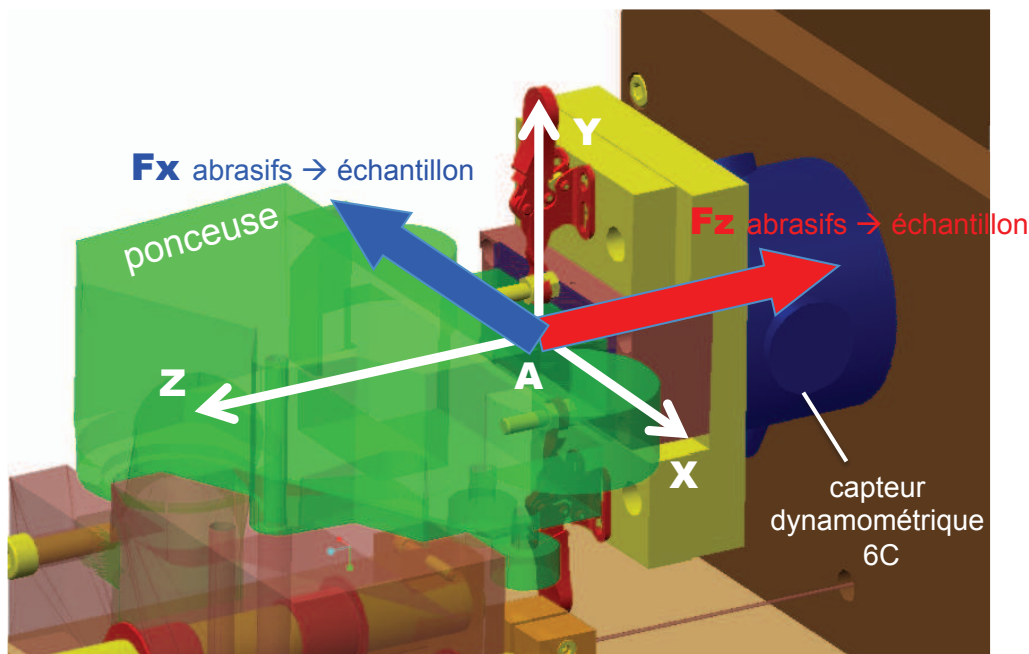


Figure 86 : Paramétrage de la mesure du torseur d'action des abrasifs sur l'échantillon

$$(Eq. 33) \quad [A_{abrasifs \rightarrow \text{échantillon}}] = \begin{bmatrix} F_x & 0 \\ 0 & 0 \\ F_z & 0 \end{bmatrix}_{(A, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})},$$

$$(Eq. 34) \quad f = \frac{F_x}{F_z}.$$

Aucun modèle n'ayant été proposé sur le sujet, nous avons élaboré un plan d'expériences factoriel complet pour connaître une valeur moyenne de ce coefficient, identifier les paramètres influents sur sa variation et déterminer des coefficients permettant d'extrapoler linéairement la valeur moyenne vers d'autres cas d'usage placés dans un domaine de travail donné.

Les paramètres de notre plan d'expériences sont à nouveau le taux d'usure des pyramides abrasives (k), la pression exercée par les grains abrasifs sur la surface polie (p) et la vitesse de défilement des grains (V).

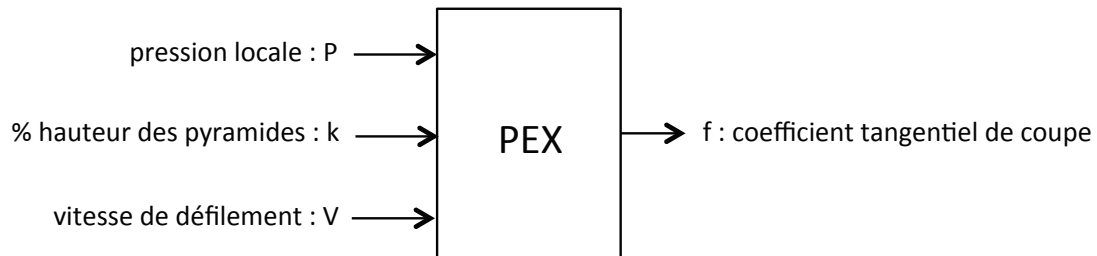


Figure 87 : Paramètres du plan d'expériences pour l'étude du coefficient tangentiel de coupe (f)

Le domaine de l'étude est identique à celui sur la consommation de matière. Il est précisé Figure 83 ainsi que la position des différents tests réalisés dans ce domaine.

Le Tableau 13 fournit pour chaque point extrême du domaine de l'étude le coefficient tangentiel de coupe (f) de la ponceuse équipée d'une bande A100.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,4	9,9	9,9	10,5	21,6	19,3	20,0	20,2
k		0,26	0,26	0,7	0,68	0,27	0,27	0,71	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	26,1	10,2	24,5	9,7	25,1
f		0,67	0,61	0,62	0,59	0,74	0,59	0,70	0,59

Tableau 13 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A100

Données pour la bande A30 avec le Tableau 14.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	9,9	10,1	10,7	9,3	19,3	19,4	20,6	19,9
k		0,21	0,21	0,7	0,65	0,23	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	24,5	10,2	24,5	9,7	23,8
f		0,42	0,55	0,73	0,47	0,52	0,52	0,63	0,63

Tableau 14 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A30

Données pour la bande A6 avec le Tableau 15.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,0	9,7	9,6	9,5	19,9	18,8	19,7	19,5
k		0,23	0,21	0,7	0,68	0,24	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,2	24,3	10,2	25,4	10,0	24,7	10,0	25,3
f		0,38	0,39	0,30	0,30	0,41	0,39	0,33	0,39

Tableau 15 : Valeurs obtenues expérimentalement pour la bande A6

La Figure 88 présente les valeurs moyennes du coefficient tangentiel de coupe (f) dans le domaine considéré pour notre étude.

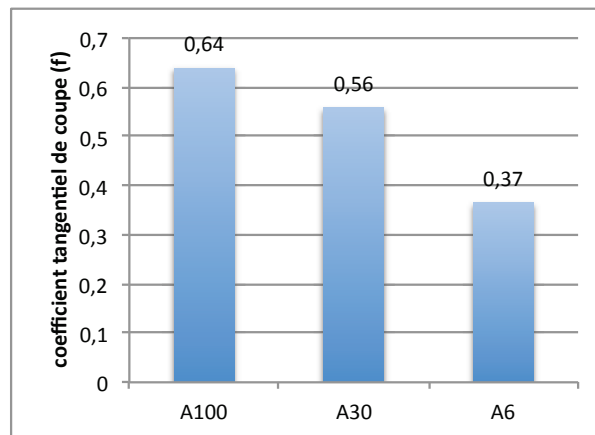


Figure 88 : Valeurs moyennes du coefficient tangentiel de coupe (f)

Le Tableau 16 fournit les coefficients d'effet et d'interaction pour chaque grade de bande abrasive. Ces données correspondent à des entrées centrées réduites comprises entre -1 et +1.

f	p	k	v	pk	p_v	k_v	pk_v
A100	0,01	-0,01	-0,04	0,01	-0,02	0,01	0,00
A30	0,02	0,06	-0,02	0,00	0,02	-0,05	0,05
A6	0,02	-0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01

Tableau 16 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le coefficient tangentiel de coupe (f)

La quasi-totalité de ces coefficients est inférieure au $1/10^{\text{ème}}$ de leur moyenne respective. Le coefficient tangentiel de coupe n'est donc sensible ni à la pression (p), ni à la vitesse de défilement des grains (V) et ni au taux d'usure des pyramides abrasives (k).

Pour notre cas, l'effort (F_x) a le même support que le vecteur vitesse des grains par rapport à la ponceuse et son intensité est proportionnelle à l'effort presseur appliqué suivant la normale à la surface polie. Le rapport entre ces efforts dépend essentiellement de la taille des grains abrasifs.

6 Rugosité

6.1 Objectifs et démarche de travail

Le recours au polissage se justifie souvent par la nécessité de donner une certaine micro-géométrie aux surfaces d'une pièce métallique. Nous avons précisé à la section 3 du chapitre 3 les différents paramètres proposés par la norme ISO pour caractériser une surface. Ils se divisent en deux catégories, ceux qui caractérisent le profil relevé et ceux qui sont issus de la courbe de taux de longueur portante,

appelée courbe d'Abbott. Pour avoir une vision globale de l'impact du polissage sur l'état de surface, l'ensemble des critères normalisés est analysé.

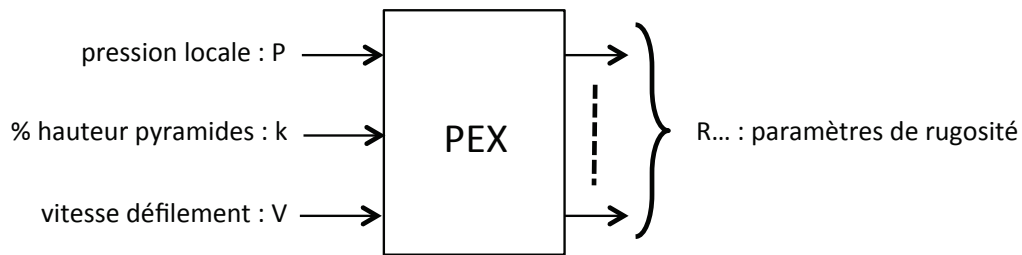


Figure 89 : Paramètres du plan d'expériences pour l'étude de la rugosité

Là non plus, ne disposant pas de modèle permettant d'estimer l'un ou l'autre de ces paramètres, nous avons établi un plan d'expériences pour chacun d'eux sur les mêmes bases que pour les études déjà présentées.

Le domaine de l'étude est identique à celui sur la consommation de matière. Il est précisé Figure 83 ainsi que la position des différents tests réalisés dans ce domaine.

Chaque échantillon a fait l'objet de trois mesures pour établir une valeur moyenne de chaque paramètre.

6.2 Résultats et analyse des paramètres caractérisant la hauteur des stries du profil

Le Tableau 17 fournit pour chaque point extrême du domaine de l'étude les paramètres caractérisant chaque profil relevé sur un échantillon poli avec une bande A100.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,4	9,9	9,9	10,5	21,6	19,3	20,0	20,2
k		0,26	0,26	0,7	0,68	0,27	0,27	0,71	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	26,1	10,2	24,5	9,7	25,1
Ra	μm	0,43	0,58	0,66	0,61	0,55	0,66	0,60	0,56
Rz	μm	0,20	0,29	0,42	0,29	0,22	0,36	0,32	0,39
Rt	μm	1,06	1,57	2,32	1,44	1,12	1,92	1,95	1,84
Rsk		-0,01	0,19	-0,11	-0,19	0,42	0,38	1,17	-0,67
Rku		8,98	8,41	10,01	11,45	8,52	12,53	17,31	11,39

Tableau 17 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A100

Données pour la bande A30 avec le Tableau 18.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10 ⁴ Pa	9,9	10,1	10,7	9,3	19,3	19,4	20,6	19,9
k		0,21	0,21	0,7	0,65	0,23	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	24,5	10,2	24,5	9,7	23,8
Ra	μm	0,082	0,117	0,088	0,095	0,083	0,134	0,107	0,126
Rz	μm	0,15	0,23	0,15	0,20	0,16	0,22	0,21	0,25
Rt	μm	0,55	0,87	0,66	0,65	0,51	0,67	0,75	0,87
Rsk		0,26	-0,07	0,04	-0,08	0,12	-0,25	0,10	-0,16
Rku		7,06	7,00	8,74	0,20	5,22	5,49	8,03	6,68

Tableau 18 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A30

Données pour la bande A6 avec le Tableau 19.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10 ⁴ Pa	10,0	9,7	9,6	9,5	19,9	18,8	19,7	19,5
k		0,23	0,21	0,7	0,68	0,24	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,2	24,3	10,2	25,4	10,0	24,7	10,0	25,3
Ra	μm	0,037	0,030	0,044	0,043	0,041	0,028	0,042	0,032
Rz	μm	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10
Rt	μm	0,29	0,37	0,28	0,34	0,24	0,29	0,31	0,27
Rsk		-0,238	0,564	0,056	-0,037	0,051	0,124	-0,074	-0,008
Rku		4,63	11,78	4,16	6,01	4,49	7,56	4,25	4,06

Tableau 19 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A6

La Figure 90 présente les valeurs moyennes des paramètres caractérisant la hauteur des stries de la surface pour chaque type de bande.

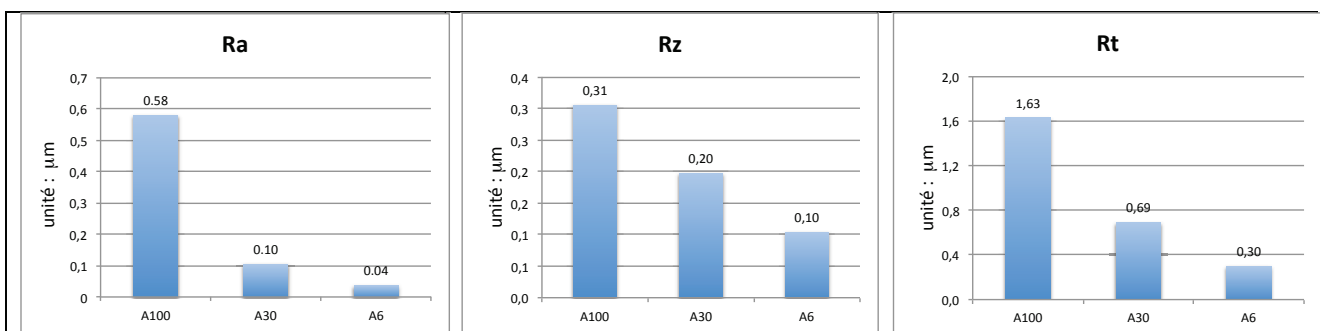


Figure 90 : Moyennes des paramètres caractérisant la hauteur des stries d'une surface polie

Les prochains tableaux fournissent les coefficients d'effet et d'interaction pour chaque grade de bande abrasive. Ces données correspondent à des entrées centrées réduites comprises entre -1 et +1. Les valeurs grisées sont inférieures au 1/10^{ème} de leur moyenne respective.

Ra	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	0,58	0,01	0,03	0,04	-0,04	0,00	-0,05	0,00
A30	0,10	0,0086	-0,0004	0,0156	0,0042	0,0043	-0,0076	-0,0006
A6	0,037	-0,0014	0,0033	-0,0040	-0,0020	-0,0019	0,0010	-0,0006

Tableau 20 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre de rugosité (Ra)

Rz	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	0,31	0,012	0,049	0,027	-0,014	0,028	-0,042	0,018
A30	0,20	0,014	0,0057	0,030	0,016	-0,0033	-0,0063	0,0026
A6	0,10	-0,0017	0,0054	-0,0057	0,0040	0,0013	-0,0001	-0,0010

Tableau 21 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre de rugosité (Rz)

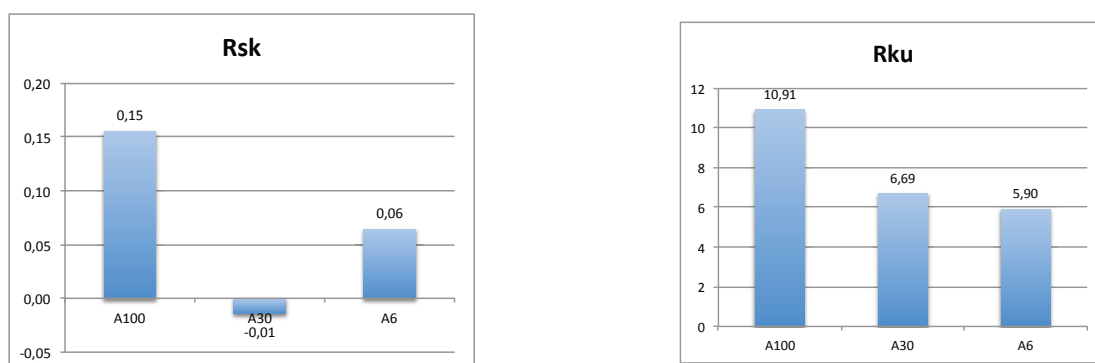
Rt	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	1,63	0,055	0,26	0,10	-0,061	0,13	-0,34	0,058
A30	0,69	0,0064	0,043	0,081	0,075	-0,0029	-0,045	0,043
A6	0,30	-0,020	-0,0003	0,017	0,011	-0,019	-0,020	-0,015

Tableau 22 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre de rugosité (Rt)

Les paramètres (Ra), (Rz) et (Rt) caractérisent la hauteur des stries de la micro-géométrie d'une surface. L'étude de ces trois paramètres donne des résultats équivalents. Les essais mettent en évidence qu'ils sont sensibles principalement à la taille des grains. La hauteur des rayures réalisées est d'autant plus faible que les grains sont petits. Avec le grade A6, nous sommes proches de la qualité miroir. Nous avons pu le vérifier visuellement. Aussi, les paramètres du process pris en compte dans notre étude n'influent que très peu sur le résultat. La quasi-totalité des coefficients d'effet et d'interactions sont inférieurs au $1/10^{\text{ème}}$ de leur moyenne respective. Ceci est un résultat qui simplifie grandement le travail des bureaux des méthodes puisque la qualité obtenue ne varie que très peu même si les conditions du polissage évoluent dans le temps quelles qu'en soient les raisons.

6.3 Résultats et analyse des paramètres caractérisant les stries d'une surface polie

La Figure 91 présente les valeurs moyennes des paramètres caractérisant la morphologie des stries de la surface caractérisée par les paramètres (Rsk) et (Rku) pour chaque type de bande.

**Figure 91 : Moyennes des paramètres caractérisant la morphologie des stries d'une surface polie**

Les coefficients d'effet et d'interaction du paramètre (R_{sk}) sont présentés Figure 92.

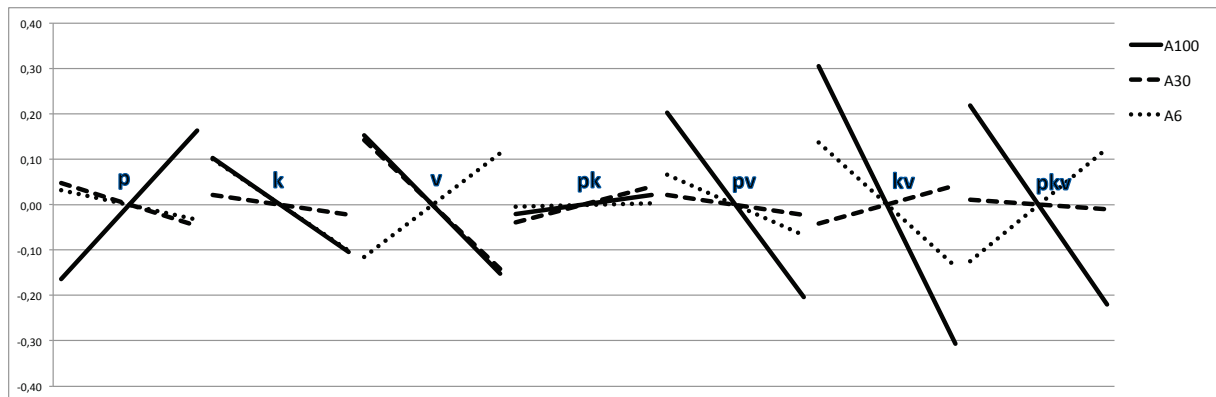


Figure 92 : Coefficients d'effet et d'interaction du plan d'expériences portant sur le facteur d'asymétrie (R_{sk})

Une interprétation des valeurs du facteur d'asymétrie (Skewness) est proposée dans la norme ISO 4287 [45] et reproduite Figure 93.

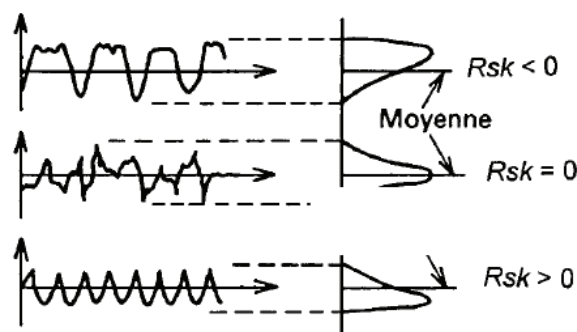


Figure 93 : Interprétation du facteur d'asymétrie (R_{sk})

L'observation des moyennes de ce paramètre met en évidence des disparités dans l'interprétation possible. Autant les grades A100 et A6 donnent des sommets de stries bien prononcées, autant le grade A30 favoriserait l'émergence de légers plateaux aux sommets des rayures. Aussi, l'impact des coefficients d'effet et d'interaction est loin d'être négligeable quel que soit le paramètre d'entrée considéré. D'un grade à l'autre, la tendance n'est pas forcément homogène.

Pour conclure, les résultats proposés ici ne constituent pas une base solide pour dégager des enseignements forts sur le profil des stries qui composent une surface polie avec les bandes étudiées.

Pour compléter la présentation des valeurs moyennes du paramètre (R_{ku}), le Tableau 23 fournit les valeurs des coefficients d'effet et d'interaction pour les trois grades de bande. Ces données correspondent à des entrées centrées réduites comprises entre -1 et +1. Les valeurs grisées sont inférieures au $1/10^{\text{ème}}$ de leur moyenne respective.

Rku	moyenne	p	k	v	pk	p _v	k _v	pk _v
A100	10,91	1,29	1,59	0,14	0,42	-0,01	-1,17	-1,74
A30	6,69	-0,50	0,62	-0,47	0,45	0,25	-0,60	0,14
A6	5,90	-0,83	-1,62	1,51	0,22	-0,86	-1,41	0,18

Tableau 23 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (Rku)

Une interprétation des valeurs du facteur d'aplatissement (Kurtosis) est proposée dans la norme ISO 4287 [45] et reproduite Figure 94.

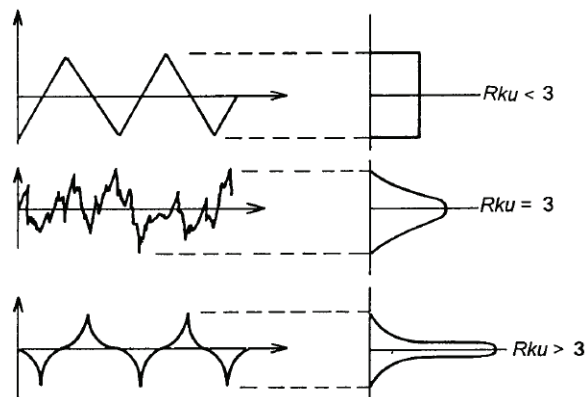


Figure 94 : Interprétation du facteur d'aplatissement (Rku)

La valeur charnière de ce paramètre est fixée par cette norme à 3. En dessous, le profil présente des creux et des pics ayant une base assez large. Par contre, une valeur supérieure à 3 traduit la présence sur le profil de pics fins et de creux étroits.

Les moyennes obtenues sont nettement supérieures à 3. Le profil des stries ou des creux est donc très affiné. L'impact des coefficients d'effet et d'interaction bien que non identiques d'un grade à l'autre ne modifie pas fondamentalement la valeur du facteur d'aplatissement. Nous en déduisons qu'il subsiste sur la surface polie des stries étroites. L'existence de ces dernières devrait être rapprochée de la nature même du matériau travaillé. En effet, l'inox 316L est réputé pour être assez malléable et dans le contexte qui nous intéresse, la matière a plutôt tendance à se déplacer en surface sous l'action des grains abrasifs plutôt que se rompre facilement et ainsi se détacher aisément de la pièce.

6.4 Résultats et analyse des paramètres issus de la courbe d'Abbott

La norme ISO 13565 [49] établit le protocole d'évaluation permettant de déterminer les paramètres issus de la représentation linéaire de la courbe de taux de longueur portante, appelée aussi courbe d'Abbott, qui décrit l'augmentation du taux de longueur portante de la surface en fonction de l'augmentation de la profondeur du profil de rugosité. Ces paramètres sont destinés à faciliter l'évaluation du comportement fonctionnel des surfaces soumises à de fortes contraintes mécaniques. La Figure 95 synthétise les paramètres présentés dans le Tableau 3.

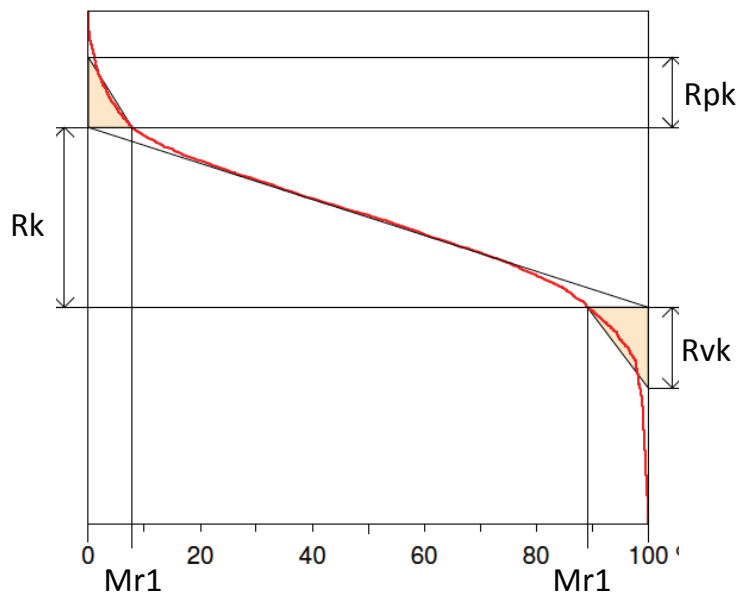


Figure 95 : Courbe de taux de longueur portante et ses paramètres associés

Le Tableau 24 fournit ces paramètres pour chaque point extrême du domaine de l'étude sur un échantillon poli avec une bande A100.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,4	9,9	9,9	10,5	21,6	19,3	20,0	20,2
k		0,26	0,26	0,7	0,68	0,27	0,27	0,71	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	26,1	10,2	24,5	9,7	25,1
Rpk	μm	0,86	0,57	0,62	0,70	0,67	0,52	0,56	0,37
Rk	μm	1,40	1,74	2,15	1,90	1,43	1,88	1,84	1,80
Rvk	μm	0,45	1,05	0,99	0,52	0,97	1,47	-0,67	1,10
MR1	%	11,42	7,86	7,32	9,75	11,26	7,84	11,39	8,49
MR2	%	91,54	85,95	88,72	92,86	85,86	86,19	84,3	85,89

Tableau 24 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A100

Données pour la bande A30 avec le Tableau 25.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	9,9	10,1	10,7	9,3	19,3	19,4	20,6	19,9
k		0,21	0,21	0,7	0,65	0,23	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,1	24,5	10,1	24,5	10,2	24,5	9,7	23,8
Rpk	μm	0,092	0,157	0,094	0,137	0,080	0,159	0,120	0,151
Rk	μm	0,257	0,385	0,286	0,283	0,272	0,436	0,341	0,383
Rvk	μm	0,147	0,203	0,138	0,154	0,175	0,160	0,252	0,207
MR1	%	7,8	10,6	9,2	11,7	8,6	9,6	8,5	8,7
MR2	%	87,1	89,4	89,9	89,4	88,2	90,7	85,8	87,1

Tableau 25 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A30

Données pour la bande A6 avec le Tableau 26.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10 ⁴ Pa	10,0	9,7	9,6	9,5	19,9	18,8	19,7	19,5
k		0,23	0,21	0,7	0,68	0,24	0,22	0,72	0,7
V	m/s	10,2	24,3	10,2	25,4	10,0	24,7	10,0	25,3
Rpk	µm	0,047	0,040	0,053	0,047	0,041	0,043	0,050	0,039
Rk	µm	0,115	0,106	0,137	0,122	0,126	0,099	0,132	0,113
Rvk	µm	0,064	0,086	0,078	0,074	0,088	0,084	0,062	0,062
MR1	%	9,8	9,8	10,0	9,0	8,5	10,3	10,1	8,7
MR2	%	87,7	88,0	88,6	87,7	86,8	87,5	89,1	88,7

Tableau 26 : Valeurs obtenues expérimentalement pour une bande A6

Le Tableau 27 présente les valeurs moyennes obtenues pour ces paramètres et les trois types de bande.

Rt	Rpk	Rk	Rvk	MR1	MR2
A100	0,62	1,75	0,77	9,42	79,2
A30	0,12	0,33	0,18	9,36	88,6
A6	0,045	0,12	0,074	9,50	88,1

Tableau 27 : Valeurs moyennes des paramètres relevés sur la courbe d'Abbott

La Figure 96 met en évidence pour chaque paramètre les écarts en fonction de la taille des grains abrasifs. Ici aussi, la dimension des grains impacte les valeurs relevées.

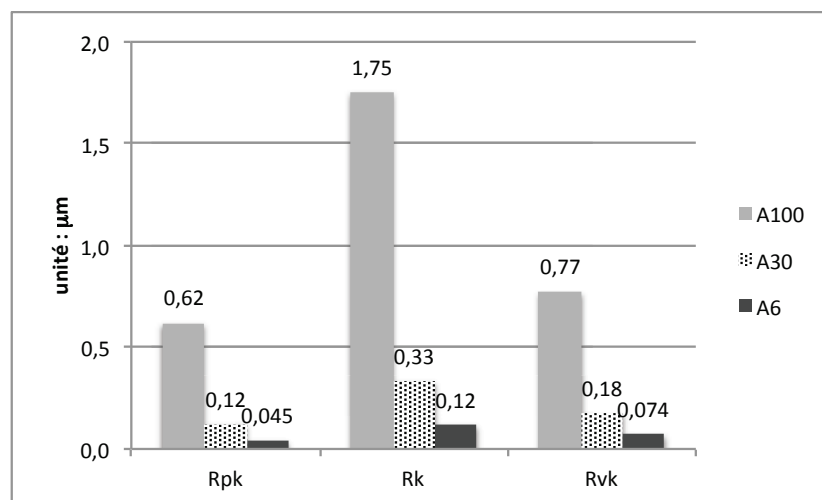


Figure 96 : Valeurs moyennes des paramètres Rpk, Rk et Rvk

Pour savoir si cela se fait dans les mêmes proportions, nous proposons d'établir le rapport entre chacun de ces paramètres et l'écart moyen arithmétique respectif de la hauteur des stries de polissage (R_a). La Figure 97 fournit ces données.

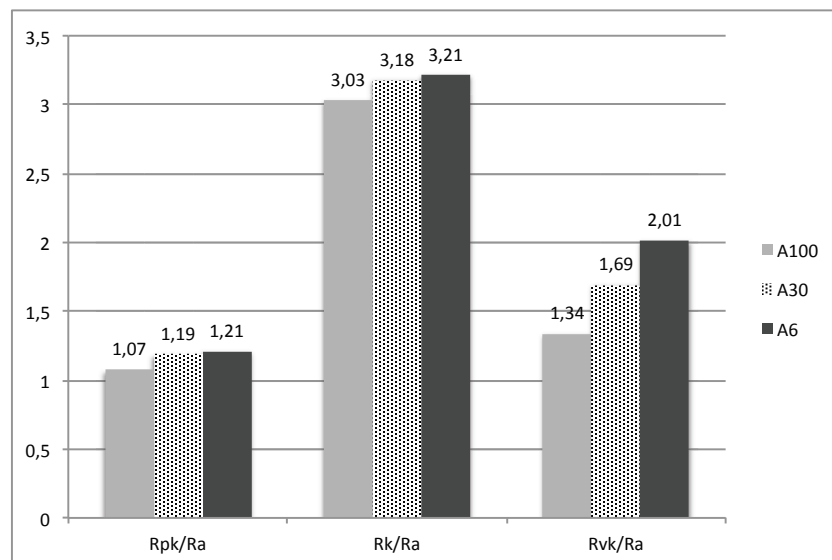


Figure 97 : Evolution des rapports de Rpk, Rk et Rvk avec Ra

Pour les deux premiers rapports, les valeurs obtenues sont assez voisines. Le processus abrasif fournit des micro-géométries de surface globalement semblables tout en ayant un rapport d'échelle de 10. Pour ce qui est des creux, leur proportion va en augmentant quand la taille des grains diminue. A ce stade de nos travaux, nous n'avons pas de piste pour expliquer ce comportement.

La Figure 98 fournit les valeurs moyennes des paramètres (MR1) et (MR2). Ici, la taille des grains n'a pas d'impact significatif sur ces valeurs.

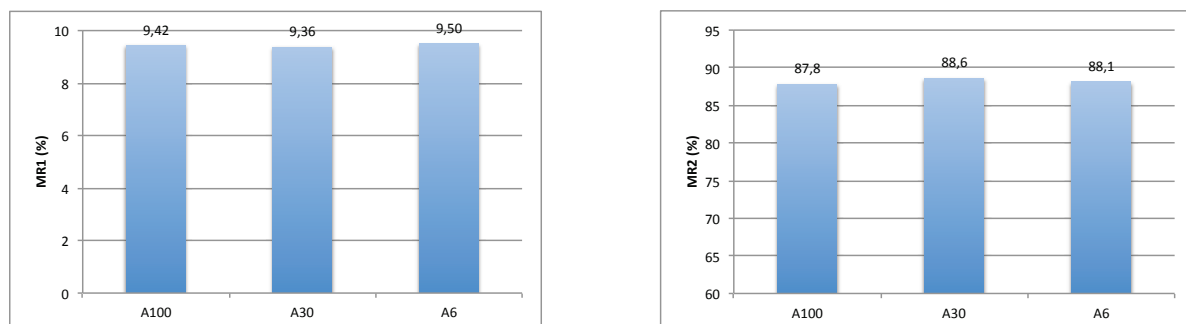


Figure 98 : Valeurs moyennes des paramètres MR1 et MR2

Les prochains tableaux (Tableau 28 à Tableau 32) fournissent pour les paramètres issus de la courbe d'Abbott les coefficients d'effet et d'interaction pour chaque grade de bande abrasive. Ces données sont fournies pour des entrées centrées réduites comprises entre -1 et +1. Les valeurs grisées sont inférieures au $1/10^{\text{ème}}$ de leur moyenne respective.

L'essentiel de ces coefficients sont inférieurs à 10% de la valeur moyenne et une bonne partie des autres coefficients sont inférieurs à 20% à cette même valeur. Seul le paramètre (Rvk) pour la bande A100 a des coefficients significatifs mais ce cas étant isolé, il ne peut pas en être tiré d'enseignement global. Il ressort de cette étude que les paramètres de pression (p), de vitesse (V) et d'usure (k) n'ont pas d'incidence

marquée sur les paramètres de rugosité considérés dans cette section. Seule la taille des grains a un réel impact sur le niveau de ces derniers.

Rpk	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	0,6207	-0,0723	-0,0516	-0,0814	-0,0273	-0,0125	0,0589	-0,0569
A30	0,1238	0,0035	0,0014	0,0298	0,0071	0,0014	-0,0092	-0,0035
A6	0,0446	-0,0018	0,0020	-0,0029	-0,0013	0,0003	-0,0019	-0,0020

Tableau 28 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (Rpk)

Rk	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	0,6207	1,7511	-0,0220	0,1761	0,0938	-0,0870	0,0395	-0,1557
A30	0,3309	0,0288	-0,0097	0,0458	0,0120	0,0126	-0,0332	0,0012
A6	0,1185	-0,0012	0,0078	-0,0092	-0,0023	-0,0026	0,0001	0,0017

Tableau 29 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (Rk)

Rvk	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	0,6207	0,7728	0,0303	-0,2871	0,3074	-0,2761	0,2283	-0,0096
A30	0,1763	0,0174	0,0060	0,0034	0,0237	-0,0172	-0,0069	0,0022
A6	0,0742	-0,0016	-0,0075	0,0015	-0,0074	-0,0030	-0,0031	0,0042

Tableau 30 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (Rvk)

MR1	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	9,4181	0,2746	-0,1725	-1,0817	0,4157	-0,5484	0,9886	-0,7566
A30	9,3636	-0,4973	0,1806	0,8008	-0,4576	-0,5439	-0,1696	-0,0488
A6	9,5036	-0,1185	-0,0943	-0,1209	0,0878	0,1280	-0,6321	-0,3172

Tableau 31 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (MR1)

MR2	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	87,811	-1,899	0,267	-0,258	-0,974	0,460	1,819	-1,203
A30	88,579	-0,400	-0,402	0,651	-1,109	0,284	-0,643	0,196
A6	88,079	0,077	0,617	-0,020	0,434	0,109	-0,331	0,042

Tableau 32 : Coefficients d'effet et d'interaction pour le paramètre (MR2)

6.5 Prolongements

Des travaux précédents, il ressort nettement que la taille des grains est le paramètre le plus influent sur la plupart des paramètres de rugosité proposés par la norme ISO. Pour mieux cerner le rôle de ce paramètre, de nouveaux essais ont été réalisés avec une palette élargie du point de vue de la taille des grains abrasifs tout en conservant la même technologie d'abrasifs. Les nouvelles bandes considérées ont pour référence A45 et A16. Le Tableau 33 donne la taille des grains de l'ensemble des bandes considérées ci-dessous.

référence	référence FEPA	diamètre moyen (μm)
A100	P180	82
A45	P400	35
A30	P800	21,8
A16	P1200	15,3
A6	P2500	8,4

Tableau 33 : Taille des grains abrasifs pour le polissage des échantillons

Compte tenu de la faible incidence des paramètres d'entrée (p , k , V), les surfaces ont été polies pour un jeu unique de paramètres situé au milieu du domaine de l'étude à $\pm 10\%$. Ce dernier est précisé Tableau 34.

Paramètres	Symbole	Niveau
Pression	p	$15 \cdot 10^4 \text{ Pa}$
Vitesse de défilement des grains	V	18 m/s
Taux usure des bandes	k	0,45

Tableau 34 : Niveau des paramètres opératoires pour le polissage des échantillons

Un échantillon a été poli avec chaque grade de bande abrasive. Chaque surface a fait l'objet de trois relevés de profil à partir desquels les paramètres de rugosité ont été établis.

Le Tableau 35 donne la moyenne des paramètres de rugosité pour chaque grade de bande abrasive.

Paramètre	unité	Références bandes abrasives				
		A100	A45	A30	A16	A6
Ra	μm	0,58	0,27	0,10	0,08	0,04
Rt	μm	1,63	1,09	0,69	0,49	0,30
Rsk	μm	0,15	-0,05	-0,01	-0,02	0,06
Rku	μm	10,91	5,55	6,69	4,10	5,90
Rz	μm	0,31	0,27	0,20	0,11	0,10
Rpk	μm	0,62	0,40	0,12	0,10	0,04
Rk	μm	1,75	0,93	0,33	0,21	0,12
Rvk	μm	0,77	0,43	0,18	0,12	0,07
MR1	%	9,42	8,15	9,36	10,06	9,50
MR2	%	88,2	87,62	88,58	87,43	88,08

Tableau 35 : Niveaux des paramètres de rugosité

La Figure 99 fournit une traduction graphique des paramètres caractérisant la hauteur des stries des surfaces polies. La tendance linéaire de chaque relevé est superposée sur leur représentation respective.

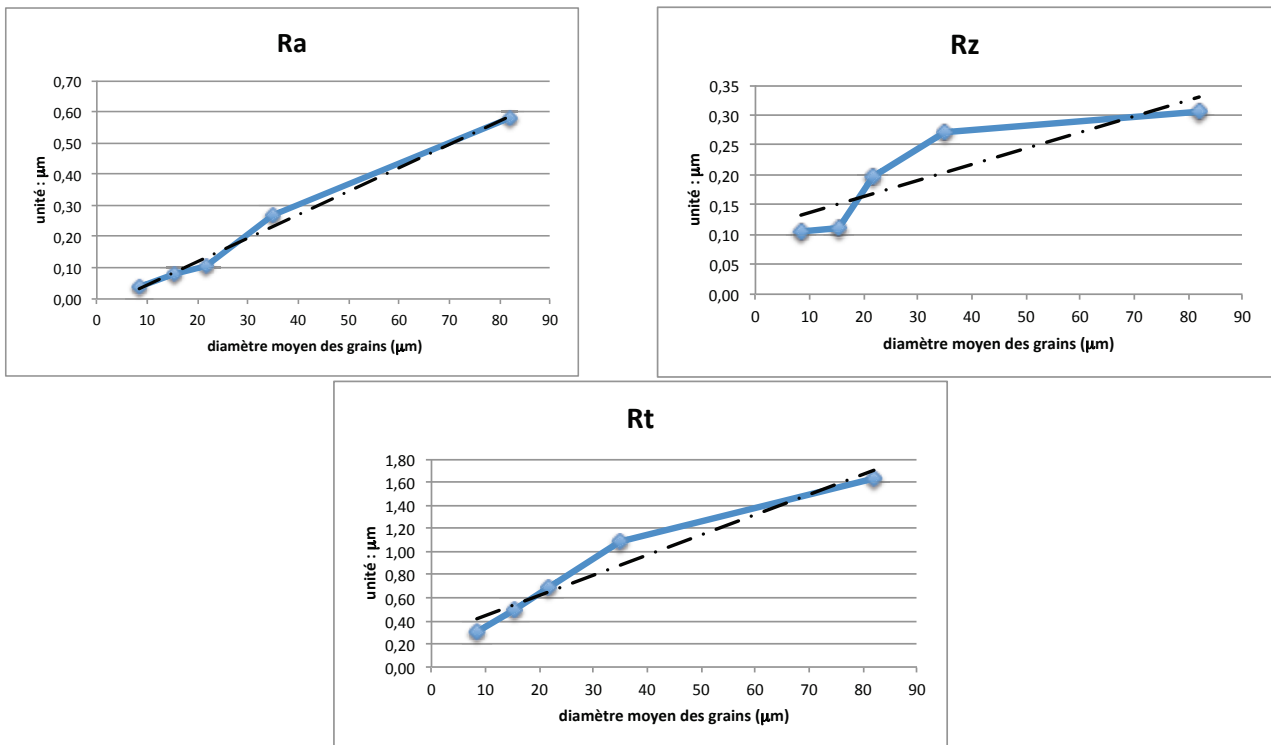


Figure 99 : Evolution des paramètres caractérisant la hauteur des stries des surfaces polies

La proportionnalité de la hauteur des stries des surfaces polies avec le diamètre moyen des grains abrasifs se confirme. L'écart moyen arithmétique semble présenter un meilleur degré de corrélation des trois paramètres considérés. Nous avons un résultat similaire à celui proposé par E. Felder [3] pour le polissage trois corps (Equation 7 au chapitre 2). Le rapport de proportionnalité entre le paramètre (Ra) et le diamètre moyen des grains est voisin de 0,007.

La Figure 100 présente l'évolution des paramètres (Rsk) et (Rku). Pour ce qui est de (Rsk), il se confirme que ce paramètre ne donne pas un éclairage pertinent sur la rugosité des surfaces polies. Par contre, le paramètre (Rku) est supérieur ou égal à 6, ce qui est nettement supérieur à 3. La tendance des surfaces polies des pièces en inox 316L est bien de présenter des pics fins et des creux étroits.

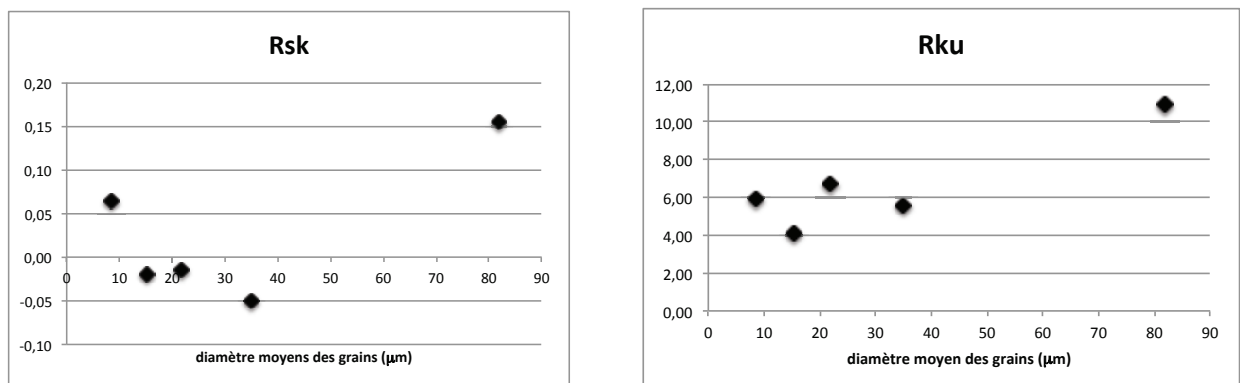


Figure 100 : Evolution des paramètres (Rsk) et (Rku)

La Figure 101 présente l'évolution des paramètres issus de la courbe d'Abbott. Là aussi, la proportionnalité de ces paramètres avec le diamètre moyen des grains est mise en évidence. La Figure 102 met en évidence le rapport des ces paramètres avec l'écart arithmétique moyen (R_a). Pour chaque rapport, il se dégage une tendance quasi-constante.

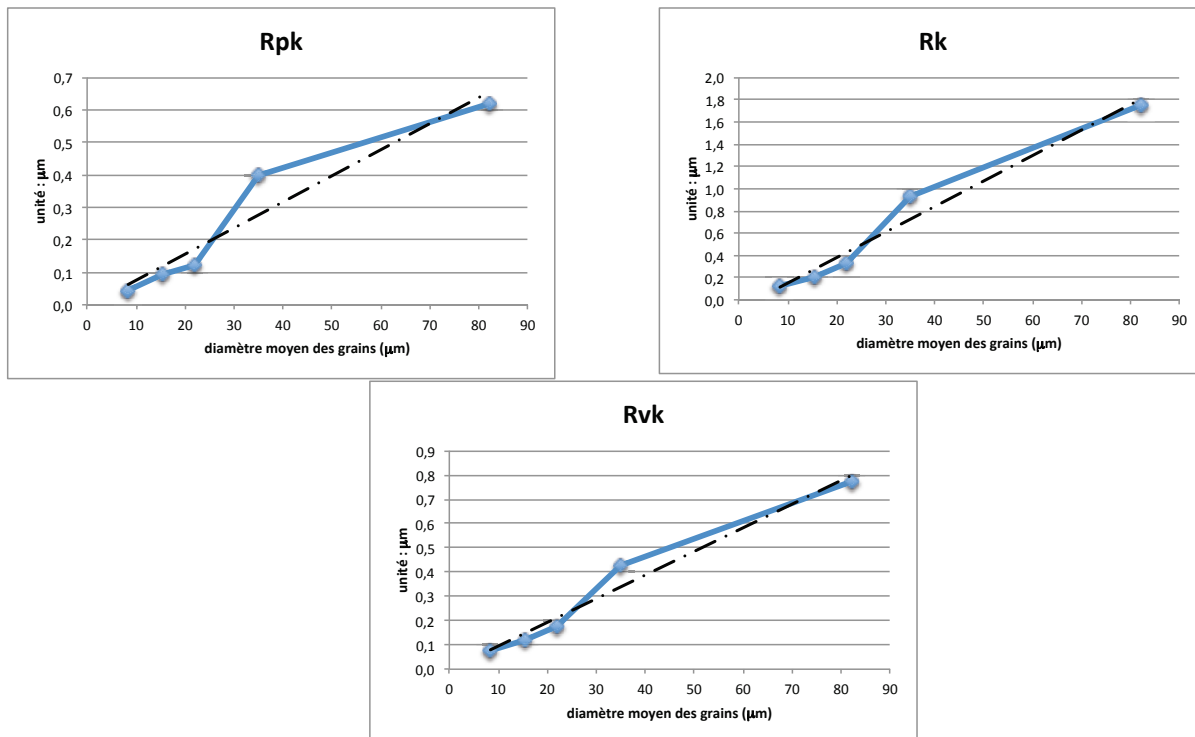


Figure 101 : Evolution et tendance des paramètres issus de la courbe d'Abbott

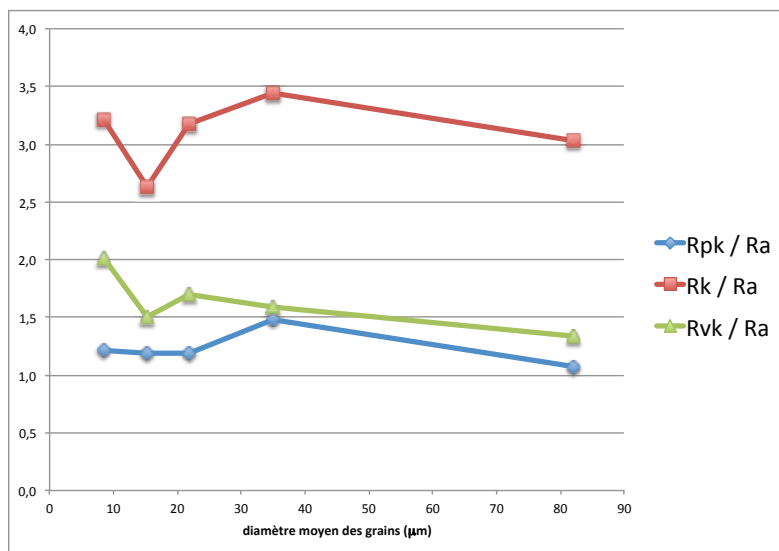


Figure 102 : Evolution des rapports entre les paramètres issus de la courbe d'Abbott et (R_a)

Pour terminer, la Figure 103 présente l'évolution des paramètres (MR_1) et (MR_2) issus de la courbe d'Abbott en fonction du diamètre moyen des grains. Il en ressort que ces paramètres sont aussi quasi-constants.

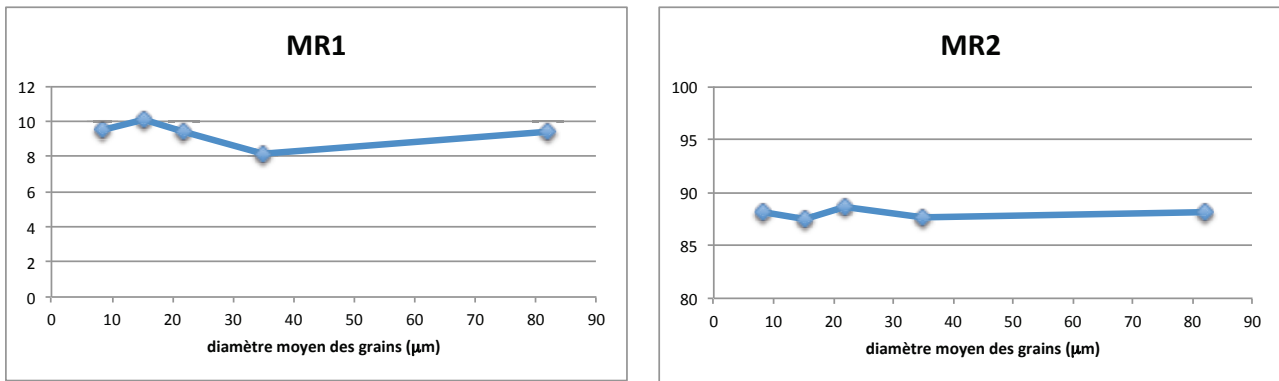


Figure 103 : Evolution des paramètres (MR1) et (MR2) de la courbe d'Abbott

En conclusion, le polissage de l'inox 316L avec les bandes abrasives structurées retenues pour notre étude génère donc une micro-géométrie de surface identique au facteur d'échelle près. La taille des grains est le principal paramètre qui définit la rugosité d'une surface polie pour le cas d'espèce étudié.

6.6 Conclusion

Les surfaces polies dans le cadre du plan d'expériences ayant pour paramètres d'entrée : la pression (p), la vitesse de défilement des grains (V) et le taux d'usure des bandes abrasives (k) ont été analysées à l'aide d'un rugosimètre 3D muni d'une sonde confocale à lumière blanche. L'ensemble des paramètres proposés par la norme ISO a été considéré. Il en ressort que ces paramètres du process de polissage n'ont qu'une faible influence sur l'ensemble des critères liés à la rugosité. Cet enseignement est particulièrement appréciable pour les techniciens des bureaux des méthodes et les compagnons en charge des opérations de polissage puisque le résultat obtenu en terme de rugosité n'est que très faiblement impacté par les conditions opératoires notamment l'usure des bandes abrasives. Par contre, la taille des grains est le paramètre qui influe le plus sur la hauteur des stries qui composent les surfaces polies. Avec nos essais, nous avons mis en évidence que l'écart moyen arithmétique des profils (R_a) est le paramètre qui offre une proportionnalité la plus régulière avec le diamètre moyen des grains abrasifs. Le facteur d'asymétrie de profil (R_{sk}) donne des résultats disparates. Il ne semble pas être porteur de spécifications particulières pour les surfaces polies en inox 316L. Quant au facteur d'aplatissement de profil (R_{ku}), il est systématiquement supérieur à 3, seuil à partir duquel les pics comme les creux sont très resserrés. L'étude des paramètres issus de la courbe de taux de longueur portante, courbe d'Abbott, est intéressante car elle met en évidence le facteur d'échelle qui existe entre les différentes surfaces polies avec des tailles de grains différentes. Par contre, nos résultats ont mis en évidence une insensibilité des taux de longueur portante aussi bien pour les pics ($Mr1$) que pour les creux ($Mr2$) vis à vis de la taille des grains abrasifs.

7 Mouillabilité

Le polissage abrasif est un procédé couramment utilisé pour préparer les surfaces en vue de l'application d'un revêtement comme une peinture, une colle ou un dépôt électrolytique. La capacité d'adhésion de ces revêtements sur les surfaces polies est essentielle pour assurer un travail de qualité. L'essai de mouillabilité est une des solutions pour caractériser les surfaces avant l'application du revêtement. Nous avons défini à la section 2.3 du chapitre 3 les conditions de réalisation de ces essais. Pour mieux connaître l'évolution de l'angle de contact (θ), nous avons élaboré un plan d'expériences sur les mêmes bases que pour l'étude du coefficient tangentiel de coupe et de la rugosité. Le domaine de l'étude est précisé Figure 83 ainsi que la position des différents tests réalisés dans ce domaine.

Le Tableau 36 fournit, pour chaque point extrême du domaine de l'étude, l'angle de contact (θ) observé sur des échantillons polis avec une bande A100. Chaque angle transcrit dans ce tableau correspond à la moyenne de trois mesures réalisées sur un même échantillon.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,4	9,9	9,9	10,5	21,6	19,3	20,0	20,2
k		0,26	0,26	0,7	0,68	0,27	0,27	0,71	0,7
v	m/s	10,1	24,5	10,1	26,1	10,2	24,5	9,7	25,1
θ	degré	86,0	97,1	95,8	98,3	88,5	101,1	90,7	89,5

Tableau 36 : Paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences sur l'essai de mouillabilité – bande A100

Le Tableau 37 fournit des valeurs similaires quand les échantillons sont polis avec une bande A30.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	9,9	10,1	10,7	9,3	19,3	19,4	20,6	19,9
k		0,21	0,21	0,7	0,65	0,23	0,22	0,72	0,7
v	m/s	10,1	24,5	10,1	24,5	10,2	24,5	9,7	23,8
θ	degré	76,3	87,6	96,8	98,4	84,2	95,6	91,0	85,0

Tableau 37 : Paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences sur l'essai de mouillabilité - bande A30

Le Tableau 38 fournit des valeurs similaires quand les échantillons sont polis avec une bande A6.

Paramètres	Unité	test n°1	test n°2	test n°3	test n°4	test n°5	test n°6	test n°7	test n°8
p	10^4 Pa	10,0	9,7	9,6	9,5	19,9	18,8	19,7	19,5
k		0,23	0,21	0,7	0,68	0,24	0,22	0,72	0,7
v	m/s	10,2	24,3	10,2	25,4	10,0	24,7	10,0	25,3
θ	degré	84,6	72,5	85,5	72,9	73,9	70,4	90,1	84,6

Tableau 38 : Paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences sur l'essai de mouillabilité - bande A6

La Figure 104 présente les valeurs moyennes pour chaque type de polissage.

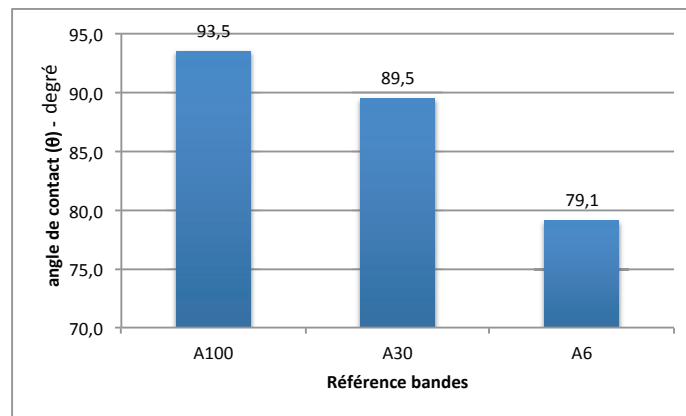


Figure 104 : Valeurs moyennes de l'angle de contact (θ)

Ce graphique met en évidence que l'angle de contact moyen (θ) dépend de la taille des grains. Cet angle de contact moyen est d'autant plus faible que la taille des grains est petite.

La Figure 105 présente l'évolution des coefficients d'effets et d'interaction établis dans le cadre de ce plan d'expériences. Ces données sont fournies pour des entrées centrées réduites comprises entre -1 et +1 (Tableau 39). D'une taille de grain à une autre, il y a des tendances qui sont homogènes comme la pression (p) et le taux d'usure (k). Par contre, d'autres sont contradictoires comme le couplage entre (p) et (k). Aussi, d'un grade à un autre, l'écart sur l'angle de contact (θ) moyen n'est pas très important alors que le poids de la plupart des coefficients est loin d'être négligeable. Les valeurs résultantes d'angle de contact obtenues avec différents grades d'abrasifs présentent une dispersion dont il est difficile d'extraire une tendance marquée à propos de la mouillabilité.

	moyenne	p	k	v	pk	pv	kv	pkv
A100	93,5	-0,56	0,15	3,89	-2,92	-0,05	-3,41	-0,89
A30	89,5	-0,38	3,33	2,44	-4,80	-0,89	-3,73	-1,17
A6	79,1	0,08	4,50	-4,01	3,72	2,21	-0,03	-0,27

Tableau 39 : Coefficients d'effet et d'interaction du plan d'expériences portant sur l'essai de mouillabilité

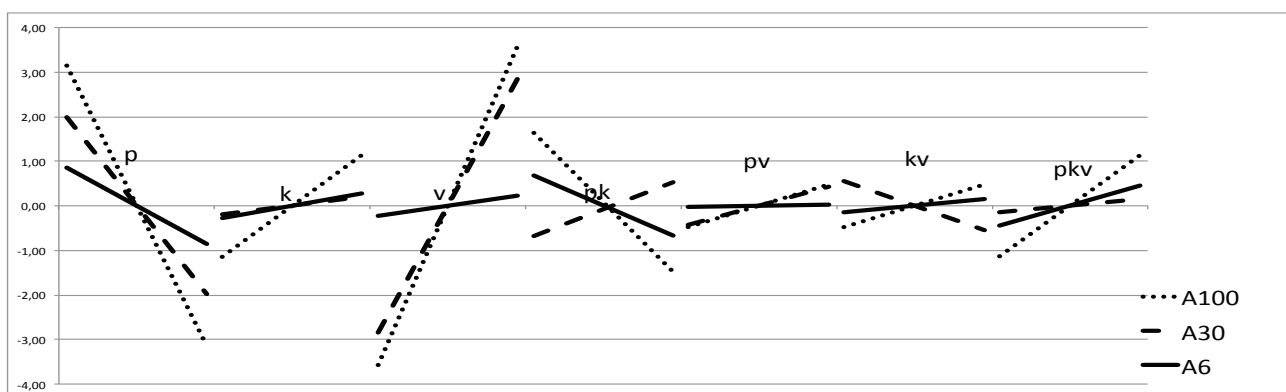


Figure 105 : Coefficients d'effet et d'interaction pour l'angle de contact (θ)

8 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de valider le modèle sur la consommation matière et de caractériser les efforts induits par le processus de polissage ainsi que la rugosité et la mouillabilité des surfaces polies. Mais avant cela, la découverte du phénomène de beurrage au cours des premiers essais nous a amenés à comprendre son origine, à proposer un protocole pour déterminer la pression minimale d'abrasion pour polir des tôles inox 316L avec des bandes abrasives structurées. Les autres bornes du domaine de l'étude sont issues des possibilités offertes par la ponceuse industrielle montée sur notre banc d'essais, la possibilité d'identifier correctement la géométrie des abrasifs et le comportement général du processus de polissage.

Les essais ont été organisés suivant une logique propre aux plans d'expériences factoriels complets. Ils ont permis de valider une loi de consommation matière spécifique issue du modèle de Preston. Les efforts induits par le processus de polissage ont été caractérisés en termes de direction, de sens et d'intensité. Il a été mis en avant que l'effort de coupe appartenant au plan de la surface polie était proportionnel à l'effort presseur pour une bande abrasive donnée. Le coefficient tangentiel de coupe ainsi identifié dépend principalement de la taille des grains abrasifs.

La rugosité des différents échantillons polis a été relevée à l'aide d'un rugosimètre 3D équipé d'une sonde confocale à lumière blanche. L'ensemble des paramètres introduits par la norme ISO a été considéré. Il en ressort que la taille des grains est le paramètre influent sur la rugosité. Par contre, les paramètres opératoires que sont la pression (p), la vitesse de défilement (V) et le taux d'usure des bandes abrasives (k), n'ont qu'une faible incidence sur le résultat obtenu quel que soit le paramètre étudié. Aussi, nous avons mis en évidence que l'écart moyen arithmétique des profils (R_a) est proportionnel au diamètre moyen des grains abrasifs. De même, le facteur de Kurtosis qui caractérise le sommet des stries, est systématiquement supérieur à 3 quelles que soient les conditions opératoires. Enfin, les paramètres issus de la courbe d'Abbott évoluent de manière similaire d'une taille de grains à l'autre. Un facteur d'échelle s'applique sur les paramètres qui caractérisent la hauteur des pics et des creux qui constituent les surfaces polies. Quant à la proportion des creux et des pics, elle s'avère constante quel que soit le paramètre considéré y compris le diamètre moyen des grains.

Nous avons cherché à mettre en avant les paramètres qui caractérisent la mouillabilité des surfaces polies au travers de l'angle de contact formé par une goutte d'eau distillée avec la surface étudiée. Les résultats obtenus ne permettent pas de distinguer d'enseignements sur l'influence des paramètres considérés vis à vis de la surface polie dans notre étude.

Conclusion et perspectives

1 Synthèse du mémoire

Bien que l'usinage par abrasion soit un procédé couramment utilisé dans l'industrie, sa mise en œuvre reste essentiellement une opération manuelle empirique. Cela a pour conséquence d'augmenter le prix de revient des pièces, d'introduire des disparités de qualité et d'être la cause de possibles troubles musculo-squelettiques (TMS). Le principal argument pour le maintien d'une main d'œuvre hautement qualifiée tient à la capacité du compagnon à ajuster en temps réel son action de manière à atteindre le niveau de qualité souhaité. Aussi, au fil du temps, les fabricants d'outils abrasifs ont préféré apporter un accompagnement dans l'usage de leurs produits plutôt que de fournir une documentation suffisante à la mise en place de séquences d'usinage par abrasion. Aujourd'hui, la démarche la plus suivie est de reproduire ce qui marche bien, de glisser par empirisme vers d'autres solutions et de compter sur les compétences du compagnon pour respecter le cahier des charges et limiter le temps consacré au polissage. Pour aller de l'avant, l'automatisation des opérations d'usinage par abrasion est certainement la voie à suivre. Elle suppose une meilleure connaissance du procédé et une capacité à définir les conditions opératoires optimales et à prédire le résultat sur les pièces usinées ainsi que le comportement des outils utilisés.

Le mémoire proposé est une contribution ayant pour objectif d'identifier la voie à suivre pour fournir les éléments nécessaires à la définition des paramètres optimaux d'une opération de polissage et à la caractérisation de la surface obtenue. Nous nous sommes attachés, ici, à un cas d'espèce industriel pour mieux cerner les tâches à réaliser et les difficultés à résoudre dans ce type d'étude.

L'usinage par abrasion s'est diversifié au fil des décennies. Aujourd'hui, il existe une multitude d'outils abrasifs permettant de réaliser des opérations très variées. Le chapitre 1 présente un panorama de ces outils. Il précise les conditions à réunir pour enlever de la matière à l'aide de grains abrasifs et les principaux paramètres à considérer comme la dureté, la taille des grains, l'effort presseur et le déplacement des grains. La suite de l'exposé est organisée autour des différents modes d'association des grains abrasifs. De la technologie retenue découle une certaine souplesse du contact de l'outil avec la pièce. Pour chaque solution développée industriellement, il est mis en avant le principe d'élaboration, les principales utilisations et les machines utilisées pour les mettre en œuvre. Pour conclure cette présentation, les différentes données considérées au cours du processus d'élaboration d'une gamme d'usinage par abrasion sont identifiées. Il s'agit du cahier des charges de la pièce (matériau, état de surface,

etc.), des outils abrasifs envisagés pour l'opération (technologie, taille des grains, etc.). De là, les données opératoires du processus d'usinage par abrasion (effort presseur, vitesse des grains, trajectoire, recouvrement, etc.) doivent être établies. Or, la documentation et les outils numériques associés proposés par les fabricants ne permettent pas de définir avec suffisamment de précision les paramètres opératoires. Cette situation explique le recours à des opérateurs qualifiés pour ajuster en temps réel le processus de polissage. C'est pour palier à ce manque que nous avons entrepris des travaux visant à évaluer sur un cas d'espèce le chemin à parcourir pour apporter les éléments nécessaires à une détermination satisfaisante des paramètres d'une opération de polissage.

Le chapitre 2 présente un état des lieux bibliographique. La piste imaginée en premier est d'étudier la rayure réalisée par un grain abrasif dans la matière. Ce travail permet d'identifier les paramètres influents comme l'angle d'attaque ou la dureté. Mais la coupe du métal n'est pas franche, elle est souvent le résultat du labourage répété du métal. La modélisation de ce type de comportement oblige à utiliser des modèles numériques tels que les éléments finis ou les éléments discrets très gourmands en ressources informatiques. D'autres aspects ont été étudiés comme la consommation de matière par des approches empiriques ou analytiques. C'est dans le cadre du polissage chimico-mécanique (CMP) que les travaux ont été les plus nombreux mais ils ne permettent pas de dégager une loi globale à l'ensemble des processus d'abrasion. La loi qui fait référence dans le domaine de la modélisation des procédés abrasifs est la loi de Preston proposée initialement dans le cadre du polissage du verre. Même si d'autres lois empiriques ont été proposées postérieurement, il est courant d'utiliser cette loi pour la modélisation de la consommation matière.

D'autres questions ont été traitées par la communauté scientifique comme la rugosité et la trajectoire que doit suivre l'outil abrasif pour obtenir un état de surface régulier. Il a été mis en avant que la rugosité était étroitement liée à la taille des grains abrasifs. Des travaux ont mis en avant une méthodologie pour décrire la trajectoire à suivre. Elle s'inspire beaucoup du mouvement appliqué manuellement par un opérateur.

Pour concrétiser notre réflexion, nous avons choisi un couple abrasif-matériau : les bandes abrasives structurées TRIZACT 307EA de chez 3M et l'inox 316L. Le chapitre 3 renferme les données utiles à la caractérisation de ce couple abrasif-matériau. Nous avons identifié les paramètres permettant de caractériser le résultat des opérations de polissage. Il s'agit des paramètres de rugosité définis par la norme ISO et de l'indice de mouillabilité. Pour modéliser le contact entre les grains abrasifs et la matière, nous avons besoin de connaître la géométrie de l'abrasif structuré utilisé. Les paramètres géométriques ont été introduits et un protocole a été mis en place pour les quantifier. Les résultats de cette caractérisation sont fournis pour l'ensemble des bandes utilisées dans notre étude. Les paramètres du process étant précisés, nous avons proposé une loi relative à la consommation de matière pour notre couple abrasif-matériau.

Pour tester cette loi et caractériser les performances du process en termes d'efforts, de rugosité et de mouillabilité, nous avons élaboré un banc d'essais instrumenté. Ce dernier permet de réaliser des opérations de polissage tout en relevant les paramètres de l'étude comme l'effort exercé par les grains abrasifs sur la matière ou la vitesse de défilement des grains. Les échantillons polis sont utilisés ensuite pour mesurer la rugosité et la mouillabilité des surfaces obtenues.

Le chapitre 4 livre les résultats obtenus et l'analyse qui en a été faite. Tout d'abord, les premiers essais de polissage ont mis en évidence le phénomène de beurrage. Il s'agit de l'incrustation dans les stries des résidus de liant de la bande abrasive qui ne sont pas retirés faute d'un effort presseur suffisant. Ces dépôts dégradent l'aspect des surfaces polies et empêchent la poursuite de l'enlèvement de matière. Nous avons donc identifié, grâce à un plan d'expériences, la pression minimale pour réaliser une surface ne présentant pas ce défaut.

Ensuite, nous avons organisé une série d'essais suivant une logique de plan d'expériences factoriel complet pour tester le modèle et caractériser la rugosité et la mouillabilité des surfaces polies. Les résultats obtenus permettent de valider le modèle proposé avec un degré de précision intéressant. Cette étude met en avant que la vitesse d'enfoncement de la ponceuse dépend avant tout de l'effort presseur, de la vitesse de défilement des grains et de la taille des grains. Par contre, la hauteur des pyramides abrasives n'a pas d'incidence sur la productivité de ce processus d'usinage. Ce résultat simplifie grandement la gestion des bandes abrasives utilisées au cours des opérations de polissage.

Les essais menés ont permis de caractériser les efforts induits au cours d'un polissage. Ces efforts ont pour direction la trajectoire suivie par les grains abrasifs en situation de coupe et leur intensité est proportionnelle à l'effort presseur pour une bande abrasive donnée. Seule la taille des grains influe significativement sur le rapport de proportionnalité. Quand les conditions opératoires permettent de fournir un travail éloigné du phénomène de beurrage, la pression exercée par les grains abrasifs et leur vitesse de défilement ne jouent qu'un rôle mineur sur le rapport de l'effort tangentiel avec l'effort presseur.

Les échantillons polis ont été mesurés avec un rugosimètre 3D équipé d'une sonde confocale à lumière blanche. Les profils ont été relevés, comme le stipule la norme ISO, transversalement aux rayures. Comme indiqué dans l'étude bibliographique, la rugosité est principalement fixée par la taille des grains et le prolongement d'une séquence de polissage n'améliore en rien le résultat. Il a été mis en avant que l'écart moyen arithmétique du profil (R_a) est proportionnel au diamètre moyen des grains abrasifs utilisés. L'étude des paramètres issus de la courbe d'Abbott permet de faire apparaître un facteur d'échelle avec la taille des grains. Quant aux taux de longueur portante (Mr_1 , Mr_2), ils sont quasi-identiques quelle que soit la taille des grains. Il ressort que le facteur d'aplatissement du profil (R_{ku}) est systématiquement supérieur à

3. Ce qui traduit un profil comportant avant tout des pics fins et des creux étroits. Les stries obtenues sur les échantillons en inox 316L présentent donc des pics et des creux qui sont très resserrés. Par contre, aucun enseignement ne se dégage de l'étude du facteur d'asymétrie (R_{sk}). Enfin, là aussi, la pression exercée par les grains abrasifs et leur vitesse de défilement ne sont pas des facteurs influents sur la rugosité.

L'étude de la mouillabilité des surfaces polies a été menée à l'aide d'un banc de mouillage. Si une légère tendance se dégage vers une diminution de l'angle de contact (θ) quand la taille des grains utilisés diminue, il est difficile d'extraire des enseignements plus précis sur le sujet.

Les travaux présentés dans ce mémoire permettent en grande partie de fixer les conditions opératoires pour le polissage d'un inox 316L avec des bandes abrasives structurées. Des essais ont permis d'identifier des plages d'utilisation. Il n'est pas impossible toutefois que celles-ci puissent être plus larges. Néanmoins pour une plage d'utilisation précisée dans ce manuscrit, il est possible de connaître le comportement du processus de polissage et de prédire le niveau des efforts en jeu et des paramètres de rugosité.

2 Perspectives

Si les travaux menés permettent de dégager les paramètres influents sur la consommation matière et sur la rugosité obtenue, il n'a pas été possible de déterminer le temps nécessaire pour passer une surface d'un état de surface à un autre caractérisé par une rugosité plus faible. Quelques essais ont permis de valider l'idée, bien connue des polisseurs, qu'une opération est terminée quand toutes les rayures obtenues par le polissage ont été « gommées » par un polissage de direction transversale. Le pivotement de 90° de l'échantillon génère des dispersions trop fortes sur l'orientation de la ponceuse par rapport à la surface polie. Le patin presseur n'est alors pas en mesure d'exercer un contact uniforme sur toute la surface considérée. La conception du banc d'essai devra être reprise sur ce point.

La consommation des abrasifs est une question d'un réel intérêt pour les bureaux des méthodes car sa modélisation permettrait de déterminer la durée de vie des outils abrasifs. Bien que de nombreuses bandes ont du être utilisées pour obtenir une valeur de (k) voisine de 0,2, de forts écarts sur la répétabilité des mesures de la consommation des abrasifs ont été constatés. Un autre frein à une étude aboutie est le temps nécessaire pour connaître le taux d'usure (k) d'une bande usagée. En effet, la production d'une valeur de ce paramètre est de l'ordre de trente minutes. Enfin, les caractéristiques mécaniques et chimiques du liant étant susceptibles d'évoluer d'une série de bandes à l'autre, une caractérisation devrait porter sur un grand nombre de bandes issues d'un nombre conséquent de lots. Des travaux spécifiques sur

l'usure des outils abrasifs devront être envisagés pour mieux cerner les paramètres qui régissent la destruction et l'arrachement des particules abrasives.

La démarche suivie pour le cas étudié peut être reproduite pour d'autres couples abrasif-matériau afin d'étoffer les bases de données propres au polissage et de faire apparaître de nouveaux paramètres d'étude comme la dureté du matériau. L'équipement expérimental mis en place est immédiatement opérationnel pour travailler avec d'autres matériaux. D'autres bandes abrasives structurées pourront être étudiées avec le même équipement. Cela est aussi envisageable pour des bandes abrasives appliquées ou non tissées. Néanmoins, le modèle de consommation matière devra alors être repris pour prendre en compte la réalité du contact entre les grains abrasifs et la matière.

Les outils abrasifs devant être animés d'un mouvement de rotation ou oscillant ne peuvent s'appuyer que très partiellement sur les idées directrices développées dans ce mémoire. En partant du modèle de Preston, nous savons que la consommation matière est liée à la vitesse de défilement des grains. Si la ponceuse est fixe dans le plan de l'échantillon, la consommation matière sera maximale sur la périphérie du disque rotatif et nulle en son centre. L'effort presseur évoluera en fonction du temps et en fonction de l'excentration du point de contact. Pour évaluer la consommation matière de ce type d'outil, la ponceuse devra se déplacer dans le plan de la surface travaillée comme proposé par A. Guiot [53]. Aussi, les surfaces polies auront des stries croisées. La mesure de la rugosité devra se faire en appliquant la norme ISO dédiée aux surfaces.

Bibliographie

- [1] F. Klocke, « Manufacturing Processes 2 : Grinding, Honing, Lapping », RWTH edition. Springer, 2008. ISBN : 978-3-540-92258-2
- [2] S. Torbaty, « Rectification très grande vitesse », Techniques de l'Ingénieur. 2004. (BM 7220).
- [3] E. Felder, « Usinage par abrasion - analyse expérimentale et théorique », Techniques de l'Ingénieur. 2009. (BM 7053).
- [4] M. Barge, J. Rech, H. Hamdi, J.-M. Bergheau, « Experimental study of abrasive process », Wear, vol. 264, no 5-6, p. 382-388, 2008.
- [5] K. Hokkirigawa, K. Kato, « An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear », Tribology International, vol. 21, no 1, p. 51-57, 1988.
- [6] K.H. Zum Gahr, « Modelling of two-body abrasive wear », Wear, vol. 124, no 1, p. 87-103, 1988.
- [7] J. Goddard, H. Wilman, « A theory of friction and wear during the abrasion of metals », Wear, vol. 5, no 2, p. 114-135, 1962.
- [8] K. Hokkirigawa, K. Kato, « The effect of hardness on the transition of the abrasive wear mechanism of steels », Wear, vol. 123, no 2, p. 241-251, 1988.
- [9] H. Petryk, « Slip line field solutions for sliding contact », Int. Conf. Tribology : frictions, lubrication and wear, p. 987-994, 1987.
- [10] F. Wredenberg, P.-L. Larsson, « On the numerics and correlation of scratch testing », Journal of Mechanics of Materials and Structures, vol. 2, no 3, p. 573-594, 2007.
- [11] J.L. Bucaille, E. Felder, G. Hochstetter, « Mechanical analysis of the scratch test on elastic and perfectly plastic materials with the three-dimensional finite element modeling », Wear, vol. 249, p. 422-432.
- [12] J. Li, W. Beres, « Three-dimensional finite element modelling of the scratch test for a TiN coated titanium alloy substrate », Wear, vol. 260, no 11-12, 2006.
- [13] D. Tabor, « The hardness of solids », Oxford Clarendon Press. 1951.
- [14] J.L. Bucaille, « Simulation numérique de l'indentation et de la rayure des verres organiques », Thèse de doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, Ecole des Mines de Paris, 2001.
- [15] S. Giljean, D. Najjar, M. Bigerelle, A. Iost, « Analyse multi-échelle de l'abrasion », Mécanique & Industries, vol. 7, no 1, p. 13-20, 2006.

- [16] D. A. Axinte, J. Kwong, M.C. Kong, « Workpiece surface integrity of Ti-6-4 heat-resistant alloy when employing different polishing methods », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no 4, p. 1843-1852, 2009.
- [17] C.C. Wang, S.C. Lin, H. Hochen, « A material removal model for polishing glass–ceramic and aluminum magnesium storage disks », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no 8, p. 979-984, 2002.
- [18] F.G. Shi, B. Zhao, « Modeling of chemical-mechanical polishing with soft pads - Springer », *Applied Physics A*, vol. 67, no 2, p. 249-252, 1998.
- [19] C. Liu, B.T. Dai, W.T. Tseng, C.F. Yeh, « Modeling of the Wear Mechanism during Chemical-Mechanical Polishing », *Journal of Electrochemical Society*, vol. 143, no 2, p. 716-721, 1996.
- [20] W.T. Tseng, Y.L. Wang, « Re-examination of Pressure and Speed Dependences of Removal Rate during Chemical-Mechanical Polishing Processes », *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 144, no 2, p. 15-17, 1997.
- [21] L.M. Cook, « Chemical processes in glass polishing », *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 120, no 1-3, p. 152-171, 1990.
- [22] J. Warnock, « A Two-Dimensional Process Model for Chemimechanical Polish Planarization », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 138, no 8, p. 2398-2402, 1991.
- [23] Y. Wang, Y. Zhao, J. Jiang, X. Li, J. bai, « Modeling effect of chemical–mechanical synergy on material removal at molecular scale in chemical mechanical polishing », *Wear*, vol. 265, no 5-6, p. 721-728, 2008.
- [24] A. Guiot, C. Tournier, Y. Quinsat, « Modélisation de l'usure des abrasifs pour garantir la qualité des surfaces polies », *Colloque National AIP PRIMECA*, 2012.
- [25] Y.R. Jeng, P.Y. Huang, « A Material Removal Rate Model Considering Interfacial Micro-Contact Wear Behavior for Chemical Mechanical Polishing », *Journal of Tribology*, vol. 127, no 1, p. 190-197, 2005.
- [26] J. Luo, D.A. Dornfeld, « Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling », *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 14, no 2, p. 112-133, 2001.
- [27] F. Klocke, O. Dambon, R. Zunke, « Modeling of contact behavior between polishing pad and workpiece surface », *Prod. Eng. Res. Devel.*, vol. 2, no 1, p. 9-14, 2008.
- [28] Y.Y. Lin et S.P. Lo, « A study of a finite element model for the chemical mechanical polishing process », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 23, no 9-10, p. 644-650, 2004.
- [29] S.P. Lo, Y.Y. Lin, « The prediction of wafer surface non-uniformity using FEM and ANFIS in the chemical mechanical polishing process », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 168, no 2, p. 250-257, 2005.
- [30] K.S. Chen, H.M. Yeh, J.L. Yan, Y.T. Chen, « Finite-element analysis on wafer-level CMP contact stress: reinvestigated issues and the effects of selected process parameters », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 42, no 11-12, p. 1118-1130, 2008.
- [31] D. André, « Modélisation par éléments discrets des phases d'ébauchage et de doucissage de la silice », *Thèse de doctorat en Mécanique et Ingénierie, Université Bordeaux 1*, 2012.

-
- [32] X. Pessoles, Tournier, « Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no 7, p. 3665-3673, 2009.
- [33] J. Chaves-Jacob, J.M. Linares, J.-M. Sprauel, « Improving tool wear and surface covering in polishing via toolpath optimization », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no 10, p. 1661-1668, 2013.
- [34] H. Tam, O. Chi-hang Lui, A.C.K. Mok, « Robotic polishing of free-form surfaces using scanning paths », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 95, no 1-3, p. 191-200, 1999.
- [35] M.J. Tsai, J.F. Huang, « Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 30, no 9-10, p. 817-827, 2006.
- [36] F. Nagata, T. Hase, Z. Haga, M. Omoto, K. Watanabe, « CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot », *Mechatronics*, vol. 17, no 4-5, p. 207-216, 2007.
- [37] V. Lacharnay, C. Tournier, G. Poulachon, et E. Dufour, « Optimisation d'une gamme de polissage sur mocrn 5 axes », *Intercut 2010 - 6ème Assises MUGV*, 2010.
- [38] L. Grandguillaume, Y. Quinsat, S. Lavernhe, C. Tournier, « Optimisation de la fabrication de moule : une approche globale des procédés de fraisage et de polissage », *14ème colloque National AIP-PRIMECA*, 2015.
- [39] V. Lacharnay, C. Tournier, G. Poulachon, « Design of experiments to optimise automatic polishing on five-axis machine tool », *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 12, no 1, p. 76-87, 2012.
- [40] J.P. Huissoon, F. Ismail, A. Jafari, S. Bedi, « Automated Polishing of Die Steel Surfaces », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. volume 19, no Issue 4, p. pp 285-290, 2002.
- [41] I. Hilerio, T. Mathia, C. Alepee, « 3D measurements of the knee prosthesis surfaces applied in optimizing of manufacturing process », *Wear*, vol. 257, no 12, p. 1230-1234, 2004.
- [42] A.Y. Suh, A.A. Polycarpou, T.F. Conry, « Detailed surface roughness characterization of engineering surfaces undergoing tribological testing leading to scuffing », *Wear*, vol. 255, no 1-6, p. 556-568, 2003.
- [43] Y. Quinsat, C. Tournier, « In situ non-contact measurements of surface roughness », *Precision Engineering*, vol. 36, no 1, p. 97-103, 2012.
- [44] F. Klocke, O. Dambon, B. Behrens, « Analysis of defect mechanisms in polishing of tool steels », *Prod. Eng. Res. Devel.*, vol. 5, no 5, p. 475-483, 2011.
- [45] « NF EN ISO 4287 - Spécification géométrique des produits (GPS) - Etat de surface : méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface. » AFNOR, 1998.
- [46] « NF EN ISO 4288 - Spécification géométrique des produits (GPS) - Etat de surface : méthode du profil », AFNOR, 1998.
- [47] « NF EN ISO 11562 - Spécification géométrique des produits (GPS) - Etat de surface : méthode du profil » - Caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte », AFNOR, 1996.

- [48] « NF EN ISO 13565-1 - Spécification géométrique des produits (GPS) - Etat de surface : méthode du profil; surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux - Partie 1 : Filtrage et conditions générales de mesurage », AFNOR, 1998.
- [49] « NF EN ISO 13565-2 - Spécification géométrique des produits (GPS) - Etat de surface : méthode du profil; surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux - Partie 2 : Caractérisation des hauteurs par la courbe de taux de longueur portante », AFNOR, 1998.
- [50] B. Raphet, « États de surface: Caractérisation », Techniques de l'Ingénieur. 2005. (R1230)
- [51] P. Beckmann, A. Spizzichino, « The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces ». Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987, 511p. ISBN : 0-890006-238-2. 1987.
- [52] T. Young, « An Essay on the Cohesion of Fluids », Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 95, p. 65-87, 1805.
- [53] A. GUIOT, « Modélisation et simulation du procédé de prépolissage automatique sur centre d'usinage 5 axes », Thèse de doctorat en Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil. École Normale Supérieure de Cachan, 2012.

Annexe A : PROTOCOLE DE CARACTÉRISATION DE LA GEOMETRIE DES PYRAMIDES ABRASIVES

1 Objectif

Déterminer les paramètres géométriques d'une bande abrasive neuve ou usée en partie.

2 Démarche

1 – Réaliser la topographie d'une portion de bande composée d'un alignement de 10 pyramides

2 – Créer le profil des pyramides correspondant à l'intersection de la surface digitalisée avec le plan passant par leurs sommets

3 – Extraire le profil de chaque pyramide

4 – Déterminer les paramètres géométriques de chaque pyramide : largeur base (a), largeur du plateau (x), angle au sommet (β), hauteur du plateau, taux d'usure (k)

3 Topographie d'une portion de bande

Moyen : rugosimètre 3D ALTISURF 500 équipé d'une pointe conique à 60° (Figure 56).

Fixation : La bande est maintenue en place sur une pièce parallélépipédique en acier grâce à du scotch double-face.

Repérage : Pour analyser l'évolution de la hauteur des pyramides et compte tenu de leurs dispersions dimensionnelles, les différents relevés de pyramides sont réalisés sur la même portion de bande. Elle est repérée par une marque qui consiste à retirer manuellement une ou deux pyramides (Figure 106).

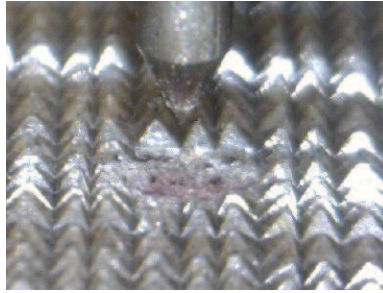


Figure 106 : Repère réalisé sur le réseau de pyramides et la pointe de palpé

Paramètres de mesure :

L'axe X correspond à l'alignement des pyramides. L'axe Y est l'axe transversal à X.

Un dégauchissage de la bande est réalisé avant le relevé afin d'amener l'alignement de pyramides parallèle à l'axe X.

pas de mesure suivant X : 0.005 mm

pas de mesure suivant Y : 0.05 mm

déplacement linéaire suivant X à une vitesse de 0.5 mm/s

longueur du déplacement suivant X : longueur moyenne de 10 pyramides + 10%

largeur de la surface balayée suivant Y : largeur moyenne mesurée à la base d'une pyramide

temps nécessaire au relevé : 10 mn

4 Extraction du profil des pyramides

L'objectif est de constituer un fichier renfermant les coordonnées du profil qui correspond à l'intersection de la surface digitalisée avec le rugosimètre 3D et le plan passant par le sommet des pyramides et perpendiculaire à la surface sur laquelle sont posées les pyramides (Figure 107).



Figure 107 : Surfaces considérées pour créer le profil caractéristique des pyramides

Logiciel utilisé : MaperMap 4.0, soft associé au logiciel du rugosimètre ALTISURF 500.

Opérations à réaliser :

1 – Extraction du profil

Cette fonction permet de créer un profil en réalisant l'intersection de la surface digitalisée avec un plan normal au plan XY. La position de ce plan est réglée par l'utilisateur.

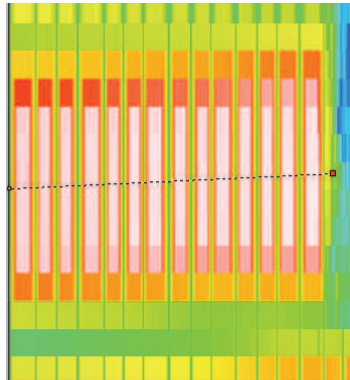


Figure 108 : Représentation de la surface digitalisée

2 – Zoom

L'objectif ici est d'éliminer les zones inutiles du profil en vue de la l'identification des pyramides (Figure 109).

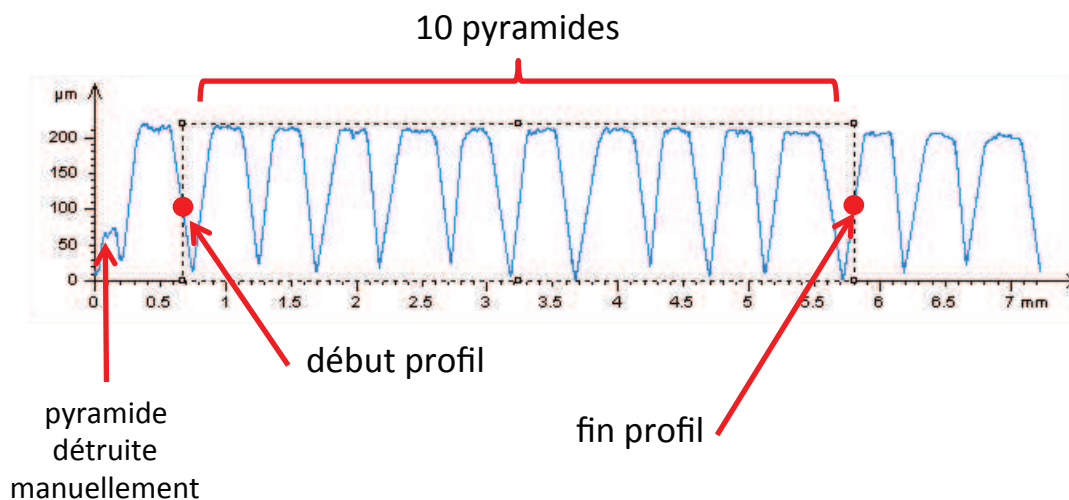


Figure 109 : Caractéristiques du profil utilisé pour l'analyse

3 – Enregistrement des coordonnées du profil dans un fichier au format CSV.

Le fichier est une liste à deux colonnes. La 1^{ère} correspond à l'incrément suivant l'abscisse. Il est noté « i ». Compte tenu du pas d'incrément retenu (voir plus haut), l'espace entre deux points est de 0.005mm. La deuxième colonne correspond à l'altitude des points. Elle est noté « z(i) ».

5 Extraction du profil de chaque pyramide

L'objectif ici est d'isoler le profil de chaque pyramide pour en déterminer ses caractéristiques géométriques à l'étape suivante. Ce travail est réalisé à l'aide du logiciel MATLAB.

Etapes de l'algorithme allant de $i=1$ jusqu'à $i_{\max}$:

1 – recherche du point de départ de la 1^{ère} pyramide

ignorer points tant que $z(i+1) < z(i)$

2 – identification de la pente ascendante

mémoriser points tant que $z(i+1) > z(i)$

3 – identification du plateau et début pente descendante

$$hp = \frac{(z_{\min} + z_{\max})}{2}$$

mémoriser points tant que $z(i) > hp$

4 – Identification de la fin de la pente descendante

mémoriser les points tant que $z(i+1) < z(i)$

5 – si nombre de pyramides analysées < 10 recommencer au point 2 sinon arrêter

6 Calcul des paramètres géométriques de chaque pyramide

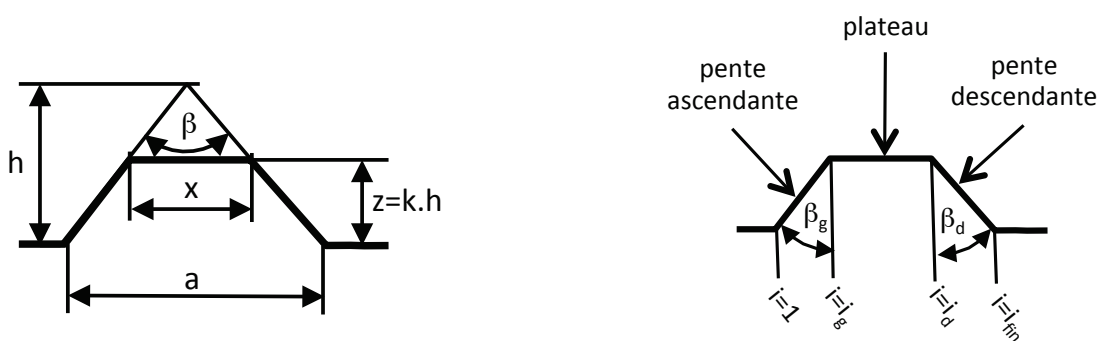


Figure 110 : Paramètres de l'algorithme

Base (a) :

rechercher le 1^{er} $z(i) \neq 0$ en scrutant la liste à l'envers $\rightarrow i_{fin}$

$$a = (i_{fin} - 1) * 0,005$$

Angle au sommet (β) :

rechercher i_g tel que trois segments consécutifs ont une pente inférieure à 0,5

rechercher i_d tel que trois segments consécutifs ont une pente inférieure à 0,5 (en absolu) en scrutant la liste à l'envers

$$\beta = \arctang\left(\frac{i_g - 1}{z(i_g)}\right) + \arctang\left(\frac{i_{fin} - i_d}{z(i_d) - z(i_{fin})}\right)$$

Largeur plateau (x) :

$$x = (i_d - i_g) * 0,005$$

Hauteur plateau (z) :

$$z = \frac{z(i_g) + z(i_d)}{2}$$

Taux d'usure (k) :

$$k = \frac{z}{a} \cdot \tan(\beta/2)$$

Les valeurs produites pour chaque portion de bande correspondent à la moyenne des valeurs obtenues pour les 10 pyramides retenues pour une caractérisation.