

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Génie Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Thèse de Doctorat en Science

Présentée par

Mourad MOUMEN

Magister en Génie Mécanique de l'EMP

SPECIALITE : GENIE MECANIQUE

THÈME

Impact des opérations d'émerisage avec des meules tiges sur machines 5-axes sur la qualité de surface de formes complexes

Soutenue le 22 janvier 2018 devant le Jury d'examen :

Président	: M. Belkacem KEBLI	Professeur, ENP, Alger - Algérie
Examineurs	: M. Said RECHAK	Professeur, ENP, Alger - Algérie
	: M. Krimo AZOUAOU	Professeur, USTHB, Alger - Algérie
	: M. Aouici Hamdi	MC-A, ENST, Alger - Algérie
	: M. Abderrahmane BELAIDI	MC-A, UMBBoumerdès
Directeurs	: Mohamed BOUAZIZ	Professeur, ENP, Alger - Algérie
	: M. Jean-Marc LINARES	Professeur, Université d'Aix-Marseille - France
Invité	: M. Julien CHAVES JACOB	MC-B, Univ. Aix-Marseille, France

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Génie Mécanique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Thèse de Doctorat en Science

Présentée par

Mourad MOUMEN

Magister en Génie Mécanique de l'EMP

SPECIALITE : GENIE MECANIQUE

THÈME

Impact des opérations d'émerisage avec des meules tiges sur machines 5-axes sur la qualité de surface de formes complexes

Soutenue le 22 janvier 2018 devant le Jury d'examen :

Président	: M. Belkacem KEBLI	Professeur, ENP, Alger - Algérie
Examineurs	: M. Said RECHAK	Professeur, ENP, Alger - Algérie
	: M. Krimo AZOUAOU	Professeur, USTHB, Alger - Algérie
	: M. Aouici Hamdi	MC-A, ENST, Alger - Algérie
	: M. Abderrahmane BELAIDI	MC-A, UMBBoumerdès
Directeurs	: Mohamed BOUAZIZ	Professeur, ENP, Alger - Algérie
	: M. Jean-Marc LINARES	Professeur, Université d'Aix-Marseille - France
Invité	: M. Julien CHAVES JACOB	MC-B, Univ. Aix-Marseille, France

DEDICACES

A mes Parents,

A ma femme Karima

et

*Mes enfants : Takoua, Yara,
Mohamed et Nouha.*

A mes frères et ma sœur.

Remerciements

Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire de thèse ont été réalisés entre deux établissements. Le Laboratoire Génie Mécanique et Développement (LGMD) à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger sous la direction de M. le professeur Mohamed BOUAZIZ et le laboratoire ISM UMR 7287 à l'Université Aix-Marseille, Marseille - France sous la direction de M. le professeur Jean-Marc LINARES. Je tiens à leurs exprimer mes remerciements et mes reconnaissances les plus profondes pour leurs conseils, leurs encouragements et le partage de leurs connaissances scientifiques.

Je tiens à remercier M. Julien Chaves-Jacob Maître de Conférences d'Aix Marseille Université pour son encadrement au sein du laboratoire ISM UMR 7287. Il m'a témoigné sa passion de recherche et m'a encouragé à avance durant toute ma thèse.

Je n'oublie pas les personnes qui m'ont aidé de près et de loin dans mes travaux, spécialement Monsieur Mesrati, Ferhat, Baroud, Mezir et Lazhar pour les discussions scientifiques que nous avons eues. Je voudrais également remercier tout le personnel du LGMD de l'ENP-Alger et de laboratoire ISM UMR 7287 à l'Université Aix-Marseille.

Mes grandes pensées sont à toute la famille, ma femme Karima pour son précieux soutien moral et pour sa patience durant ses années de thèse et pour ses encouragements, mes enfants Takoua, Yara, Mohamed et Nouha, mes frères et ma sœur. C'est grâce à leurs encouragements que j'ai pu franchir les obstacles les plus difficiles. Ils me donnent toujours un appui sûr par leur soutien et leur encouragement.

Je dédie ce travail pour mes parents Belkacem et Fatima pour leur amour et soutien durant toutes ces années de thèse et pour ses encouragements.

ملخص :

الآلات المكنية الحديثة المتعددة المحاور توفر إمكانية تصنيع الأسطح المعقدة الشكل وتسمح بالحصول على سطوح ذات جودة عالية. مساهمتنا تسجل في إطار هذا الهدف و ذلك بدراسة عملية الصقل على ماكينة قطع آلية ذات 5-محاور. ويتم ذلك عن طريق دراسة نوعية السطوح المحصل عليها باستخدام أداة قطع (مكونة من غطاء على شكل ورق الكشط زجاجي النوعية على داعم مطاطي) مرنة أسطوانية الشكل تعمل تحت ضغط منخفض واتصال مستمر على قطعة معدنية اسطوانية الشكل من الفولاذ المقاوم للصدأ 100Cr6.

عوامل كثيرة (الشكل الهندسي للأداة، سرعة الدوران، عمق القطع، التشحيم ومسار الأداة... وما إلى ذلك) تؤثر على جودة عملية تلميع السطوح. ولذلك فمن الضروري توفير مسبقا التصحيحات وتحديد العوامل المؤثرة. يتم إجراء تصحيح لاتجاه محور دوران الأداة للحفاظ على اتصال دائم من القطعة وأداة القطع. صلابة حامل غطاء الصقل وانحناء ساق الأداة درست لضمان ضغط منخفض لاتصال دائم بين القطعة والأداة. يتم تحديد العوامل الأكثر تأثيرا وفقا لمنهجية تصميم التجارب عن طريق الفحص المخطط باستخدام طريقة هادمارد. وأجري التحليل عن طريق قياس حالة السطح واحتساب تكلفة عملية التلميع.

وبناء على العوامل المؤثرة (عمق القطع، نوع وشكل نمط مسار التجليخ)، تم طرح التصميم الثاني من التجارب لأسطح الاستجابة لتنفيذ النماذج التجريبية للتعبير عن خشونة التي تم الحصول عليها وحساب تكلفة تلميع الأسطح. وسيتم استخدام هذه النماذج في وقت لاحق لتحسين عملية التلميع. وأخيرا، فإن هذه الدراسة تسمح بربط خشونة السطح المحددة بتكلفة الصقل الأمثل.

كلمات مفتاحية : تلميع السطوح، أداة قطع مرنة، منهجية التصميم التجريبي، استجابة السطوح، خشونة.

Abstract :

The modern's multi-axis machine tools provide the ability to machine complex form surfaces and consider obtaining of a good quality surface finish. Our contribution is in this purpose by studying the polishing process on CNC machine-tools 5-axis. It is carried out by considering the surface quality obtained with the aid of a flexible cylindrical grinding tool on a rod, consisting of a sandpaper abrasive cap mounted on a rubber support. The polishing operations are carried out on a cylindrical piece made of stainless steel 100Cr6.

The numbers factors (tool geometry, spindle speed, depth of pass, lubrication, tool path, etc.) affect the quality of the polishing operation. It is therefore necessary to make corrections first and to identify the influential factors. Correction is made to the orientation of the spindle axis to maintain constant tool-piece contact. The stiffness of the cap holder and the flexion of the rod are studied to ensure a low contact pressure. The identification of the most influent factors is obtained by experimental design by screening using the Hadamard method. The analysis is carried out by measuring the surface condition and calculating the cost of the polishing operation.

Based on the influent factors (depth of pass, type and shape of polishing pattern), a second plan of experiments for response surfaces is defined to describe experimental models expressing the roughness obtained and the cost of polishing.

Finally, this study allows to associate a specified roughness with an optimal cost.

Key words : CNC 5-axis, Polishing, Grinding wheel, Experimental design, Response surface, Roughness, Optimization.

Résumé :

Les machines-outils modernes multi-axes offrent la possibilité d'usiner des surfaces de forme complexe et d'envisager l'obtention d'états de surface de bonne qualité. Notre contribution s'inscrit dans ce but en étudiant le processus de polissage sur MOCN 5-axes. Elle est menée en considérant la qualité de surface obtenue à l'aide d'un outil-meule cylindrique flexible sur tige, constitué d'un capuchon abrasif en papier de verre monté sur support en caoutchouc. Les opérations de polissage sont réalisées sur une pièce cylindrique en acier inoxydable 100Cr6.

De nombreux facteurs (forme géométrique de l'outil, vitesse de rotation de la broche, profondeur de passe, lubrification, trajectoire de l'outil, ...) agissent sur la qualité de l'opération de polissage. Il est nécessaire d'apporter au préalable des corrections et d'identifier les facteurs influents. La correction est apportée à l'orientation de l'axe de la broche pour maintenir le contact outil-pièce constant. La rigidité du support-capuchon et la flexion de la tige sont étudiées pour assurer une pression de contact faible. L'identification des facteurs les plus influents est obtenue par plan d'expériences par criblage en utilisant la méthode d'Hadamard. L'analyse est effectuée en mesurant l'état de surface et en calculant le coût de l'opération de polissage.

Basé sur les facteurs influents (profondeur de passe, type et forme du motif de la trajectoire de l'outil), un deuxième plan d'expériences pour surface de réponse est défini pour décrire des modèles expérimentaux exprimant la rugosité obtenue et le coût de polissage.

Enfin, cette étude permet d'associer une rugosité spécifiée à un coût optimal.

Mots-clés : MOCN 5-axes, Polissage, Meule sur tige, Plan d'expériences, Surface de réponse, Rugosité, Optimisation.

Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Nomenclature	
Introduction générale	15
Chapitre 1 : Etat de l'art sur les procédés d'usinage par abrasion	
1.1. Introduction	19
1.2. Processus d'obtention du brut	19
1.3. Processus d'usinage	20
1.3.1. Etat d'ébauche des surfaces	21
1.3.2. Demi-finition des surfaces	21
1.3.3. Finition des surfaces	21
1.4. Usinage par abrasion	22
1.4.1. Mécanismes d'enlèvement de matière par abrasion	23
1.4.2. Procédés d'usinage par abrasion	25
1.4.2.1. Les procédés d'abrasion 2 corps	25
1.4.2.2. Les procédés d'abrasion 3 corps	26
1.4.2.3. Les procédés par érosion	27
1.5. Polissage des surfaces	27
1.5.1. Outil de polissage	29
1.5.2. La pièce	29
1.5.3. Le fluide	29
1.5.4. Les particules abrasives	30
1.6. Modèles d'abrasion	31
1.6.1. Approches par modèles analytiques	32
1.6.2. Approches par modèles empiriques	35
1.6.2.1. Modèle de Preston	36
1.6.2.2. Amélioration du modèle de Preston	36
1.7. Méthodes de polissage : Applications industrielles et solutions technologiques	38
1.7.1. Polissage manuelle	39
1.7.2. Polissage sur polisseuse conventionnelle	40
1.7.3. Polissage avec méthodes non-conventionnelle (non-mécanique)	40
1.7.4. Polissage automatique	41

1.7.4.1. Polissage automatique avec asservissement en effort	42
1.7.4.2. Polissage automatique avec asservissement en position	42
1.8. Détermination d'état de surface	43
1.8.1. Définitions et importance de l'état de surface	46
1.8.2. Paramètres d'état de surface (différents types de profils ISO 3274)	49
1.8.3. Techniques de caractérisation d'état de surface	52
1.8.3.1. Structure d'une surface	53
1.8.3.2. Principe général d'une méthode de caractérisation	53
1.8.3.3. Microscopie optique confocale	54
1.8.3.4. Technologie STIL	55
1.8.4. Qualité du fini de surface en fonction de la fonctionnalité des pièces	56
1.9. Conclusion	57

Chapitre 2 : Définition des paramètres de pré-polissage automatique sur MOCN 5-axes

2.1. Introduction	59
2.2. Polissage sur machines outils à CN 5-axes	59
2.2.1. Méthode de pré-polissage	59
2.2.2. Trajectoire de pré-polissage	60
2.2.3. Effort de pré-polissage	63
2.3. Paramètres liés aux opérations de pré-polissage sur MOCN 5-axes	64
2.3.1. Paramètres liés au processus	64
2.3.2. Paramètres liés à l'outil	66
2.3.3. Paramètres liés à la trajectoire	68
2.4. Gamme de pré-polissage	70
2.5. Conclusion	72

Chapitre 3 : Formulation des paramètres d'optimisation

3.1. Introduction	75
3.2. Performance d'un système de production	75
3.3. Méthodes d'optimisation	76
3.3.1. Méthodes d'optimisation déterministes	78
3.3.2. Méthodes d'optimisation probabilistes	79
3.3.3. Méthodes d'optimisation stochastiques /non déterministes	80
3.4. Formulation mathématique du problème d'optimisation	81
3.4.1. Formalisme mathématique	82
3.5. Architecture d'une méthode d'estimation des coûts	83
3.6. Méthodes de calcul des coûts de fabrication	85
3.6.1. La méthode intuitive ou empirique	86
3.6.2. La méthode analytique	86
3.6.3. La méthode paramétrique	87
3.6.4. La méthode analogique	87

3.7. Modélisation des données	87
3.7.1. Les paramètres de production	88
3.7.2. Critères d'optimisation	89
3.8. Optimisation de la fonction objective	90
3.8.1. Optimisation du processus d'usinage en polissage	90
3.9. Conclusion	93

Chapitre 4 : Méthodologie d'optimisation par plans d'expériences

4.1. Introduction	95
4.2. Historiques	95
4.3. Modèles empiriques et analytiques utilisés dans l'optimisation	98
4.4. Contexte des plans d'expériences	101
4.5. Méthodologies des plans d'expérience	102
4.5.1. Plan de criblage par plan d'expériences	103
4.5.1.1. Plans factoriels complets	104
4.5.1.2. Plans de factoriels fractionnaires	105
4.5.1.3. Notion d'alias et de contraste	106
4.5.1.4. Plans de Hadamard	107
4.5.1.5. Critère de construction " Matrice d'Hadamard "	108
4.5.2. Obtention de la matrice d'expérience	109
4.5.3. Choix des facteurs et du domaine expérimental	110
4.5.4. Codage des variables	110
4.5.5. Codage de la matrice d'expériences	112
4.5.6. Construction de la matrice du modèle	113
4.5.7. Formulation mathématique : Choix du modèle	114
4.5.7.1. Modèle additif sans couplage (ou des facteurs principaux)	114
4.5.7.2. Calcul des coefficients du modèle additif	115
4.5.7.3. Estimation des coefficients par moindres carré	117
4.6. Méthodologie des surfaces de réponse	119
4.6.1. Construction de la méthodologie de surface de réponse	119
4.6.2. Analyse statistique des données	120
4.6.3. Validation du modèle	122
4.7. Conclusion	122

Chapitre 5 : Approche expérimentale et interprétation des résultats

5.1. Introduction	124
5.2. Moyens matériels	125
5.2.1. Machine-outil	125
5.2.2. Mesure des efforts de coupe	126
5.2.3. Mesure d'état de surface	126
5.2.4. Outil de polissage automatique	127
5.3. Polissage sur MOCN 5-axes	128
5.3.1. Environnement de travail	128
5.3.2. Paramètres liés aux opérations de pré-polissage sur MOCN 5-axes	128
5.3.3. Paramètres liée à la trajectoire et l'outil	129
5.4. Détermination des facteurs influents en utilisant un plan de criblage par plan d'expérience	130
5.4.1. Criblage par plan d'expérience pour définir les paramètres influents	130
5.4.2. Contrôle de la force radiale	132
5.4.3. Réalisation des premiers essais de pré-polissage automatique sur M.O. 5-axes	133
5.4.3.1. Mesure de la forme de l'outil	134
5.4.3.1. Validation de la compensation de la forme de l'outil	135
5.4.3.1. Mesure de l'effort de pré-polissage	136
5.4.4. Réalisation du plan de criblage par plan d'expérience	137
5.4.4.1. Construction de la matrice modèle et matrice d'expériences	138
5.4.4.2. Modèle de criblage	140
5.4.5. Réponses du Criblage : Définition des fonctions objectives	141
5.4.5.1. Résultats du criblage et interprétations	142
5.4.5.2. Coûts de pré-polissage par volume	143
5.4.5.3. Rugosité de surface	145
5.5. Optimisation des facteurs : Surface de la réponse par plan d'expérience	146
5.5.1. Mode expérimentale	146
5.5.2. Résultats et interprétation	147
5.5.3. Coût du pré-polissage par volume en surface de réponse	148
5.5.4. Rugosité de surface	149
5.5.5. Optimisation sous contrainte	149
5.6. Conclusion	153
Conclusion générale et perspectives	155
Annexes	
Annexe N° 01 : Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme	158
Annexe N° 02 : Résultats de mesure de l'état de surface	172
Références bibliographiques	179

Nomenclature

Liste des symboles

V_C	: Vitesse de coupe.
V_f	: Vitesse d'avance.
V_Z	: Vitesse d'avance par dent.
a_e	: Profondeur de passe.
N	: Vitesse de rotation de la broche.
β	: Angle d'attaque d'un grain.
δh	: Pénétration pour un grain.
R_a	: Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.
R_p	: Hauteur maximale des pics.
R_t	: Hauteur maximale du profil.
R_t	: Ecart moyen quadratique.
P	: Effort normale sur un grain.
HV	: Dureté Vickers.
a	: Avance de motif.
R	: Rayon de motif.
F_x	: Effort mesuré par le dynamomètre Kistler selon l'axe x .
F_y	: Effort mesuré par le dynamomètre Kistler selon l'axe y .
F_z	: Effort mesuré par le dynamomètre Kistler selon l'axe z .
F_{nor}	: Effort normal.
F_{tang}	: Effort tangentiel.
F_{transv}	: Effort transversal.

Abréviations

MOCN	: Machines-Outils à Commande Numérique.
TI	: Technique de l'Ingénieur.
TEM	: Taux d'Enlèvement de Matière.
UGV	: Usinage Grande Vitesse.
CN	: Commande Numérique.
CFAO	: Conception et Fabrication Assisté par Ordinateur.
CAO	: Conception Assisté par Ordinateur.
PME	: Méthodologie des Plans d'expériences.

Liste des tableaux

4.1 : Domaine de variation des facteurs ou domaine d'étude	104
4.2 : Codage des facteurs pour criblage	105
4.3 : Matrice des expériences pour criblage des facteurs	106
4.4 : Organisation des essais pour plan d'expérience	106
4.4 : Matrice du modèle	107
5.1 : Matrice d'expérience	126
5.2 : Domaine de variation des facteurs pour la conception de plan de criblage	132
5.3 : Matrice d'expérience relative à notre étude	134
5.4 : Expériences effectuées par criblage des paramètres avec plan l'expérience	135
5.5 : Résultats expérimentale	138
5.6 : Modèle numérique du coût par volume enlevé	140
5.7 : Modèle numérique de la rugosité de surface	140
5.8 : Valeurs des facteurs testés dans la surface de réponse par plan d'expérience	142
5.9 : Réponse expériences et les résultats de surface	142
5.10 : Coefficients des surfaces de réponse	143
5.11 : Paramètres de polissage optimal pour réduire le coût assurer une rugosité spécifiée	147

Liste des figures

1.1	: Cycle de fabrication de produit	8
1.2	: Environnement du processus de coupe par abrasion [Barge-2005]	11
1.3	: Mode d'action du grain dans l'essai de rayure	12
1.4	: Grain abrasif en action [Barge -2005]	12
1.6	: Procédés d'usinage par abrasion et cinématique des grains abrasifs [TI- BM 7052]	13
1.7	: Photos de procédés d'usinage par abrasion [Anthony-2012]	15
1.8	: Étapes de fabrication d'une partie fémorale de prothèse de genou	16
1.9	: Processus de finition d'une partie fémorale de prothèse de genou	16
1.10	: Outils de polissage automatique	17
1.11	: Influence de l'effort presseur sur la distribution des particules abrasives [Jeng et al. 2005]	20
1.12	: Paramètres de l'étude de F. Klocke s'appuyant sur la loi de Hertz	21
1.13	: Qualité de surface en pré-polissage [Savio et al. 2009]	21
1.14	: Simulation de la topographie avant et après polissage [Xi et Zhou 2005]	21
1.15	: Illustration de la distribution des grains abrasifs sur la meule [Zhen et Komanduri 2003]	22
1.16	: Paramètres macroscopiques impliquées dans l'abrasion	24
1.17	: Evolution de la profondeur de polissage en fonction du temps [Guiot et la. 2012]	26
1.18	: Polissage manuel	27
1.19	: Trajectoires de polissage manuel [Pessoles et Tournier-2009]	27
1.20	: Méthode de polissage manuel	27
1.21	: Polisseuse conventionnelle	28
1.22	: Influence de l'effort et la vitesse de polissage sur R_a avec papier # 600 [Lacharnay 2010]	32
1.23	: Evolution de la rugosité en fonction du temps [Lacharnay 2010]	32
1.24	: Caractéristiques de la texture d'une surface [Mikell-2007]	34
1.25	: Caractéristiques de la texture d'une surface [Mikell-2007]	35
1.26	: Décomposition de l'erreur totale d'un profil	35
1.27	: Illustration de description de différents ordres de défauts surfaciques	36
1.28	: Principe de la mesure des états de surfaces	37
1.29	: Vue 3D de la topographie de surfaces extérieures	37
1.30	: Principe général des méthodes de caractérisation de surface	41
1.31	: Principe de la microscopie confocale	43
1.32	: Dispositifs métrologiques du laboratoire	44
1.33	: Procédés d'usinage et états de surface	45

2.1	: Processus de polissage effectué sur une machine CNC	49
2.2	: Trajectoires exploités en polissage automatique [Lasemi et al. 2010]	51
2.3	: Trajectoire d'outil en polissage [Ryuh et al. 2006]	51
2.4	: Courbes fractales utilisées en polissage [Tam et Cheng-2010]	52
2.5	: Modèle de trajectoire de polissage	52
2.6	: Outillage de polissage utilisé dans l'expérimentation	54
2.7	: Illustration du procédé de polissage	55
2.8	: Paramètres liées au procédé de polissage	55
2.9	: Outils de polissage automatique	56
2.10	: Données constructeurs relatifs aux outils de polissage	57
2.11	: Outil de polissage et ces paramètres	57
2.12	: Paramètres de la trajectoire de polissage [Chaves-Jacob et al. 2013]	58
2.13	: Morphologies possibles du modèle trochoïde élémentaire	59
2.14	: Paramètres de la forme de motif	59
2.15	: Paramètres de calcul de la trajectoire de l'outil de polissage	60
2.16	: Paramètres des motifs	60
2.17	: Modèles des motifs expérimentés	60
2.18	: Paramètres à prendre lors de la mise en place d'un processus de polissage	61
3.1	: Méthode d'optimisation	69
3.2	: Méthodologie d'optimisation par plan d'expérience	76
3.3	: Structure d'estimation des coûts	77
3.4	: Procédures d'optimisation par plan d'expérience	81
3.4	: Optimisation de la fonction objective	82
4.1	: Evolution des techniques de criblage [Louvét- 06]	89
4.2	: Contexte d'utilisation des plans d'expérience	95
4.3	: Modèle du plan d'expérimentation [Sandrine -2004]	98
4.5	: Méthodologie d'optimisation par surface de réponse	113
5.1	: Diagramme expérimental	119
5.2	: Centre d'usinage UGV 5-Axes Ultrasonic 20 Linear	120
5.3	: Dispositif expérimentale pour mesure des efforts	121
5.4	: Dispositif expérimentale pour mesure de l'état de surface	122
5.5	: Outils de polissage automatique	122
5.6	: Processus de polissage effectué sur une machine CNC	123
5.7	: Illustration de l'environnement expérimentale (Outil de polissage et ces paramètres)	124

5.8 : Modèle de trajectoire de polissage	124
5.9 : Paramètres de motif	125
5.10 : Modèle des motifs utilisés	125
5.11 : Forme du motif testé par le plan d'expérience	125
5.12 : Paramètres utilisées dans les plans d'expérience	126
5.13 : Histogramme des paramètres influents	127
5.14 : Test de l'effort presseur pour définir la rigidité équivalente du porte-capuchon	128
5.15 : Résultats du 1 ^{er} essai de polissage	128
5.16 : Mode de mesure de la forme de l'outil sur la machine 5-axes	139
5.17 : Résultats des mesures de la forme de l'outil	130
5.18 : Résultats des mesures de la forme de l'outil avant et après l'opération de polissage	131
5.19 : Evolution de la force de polissage en fonction de l'engagement de l'outil	132
5.20 : Coefficients relative aux coûts de pré-polissage par volume	139
5.21 : Coefficients relative à la rugosité de surface	141
5.22 : Surface de réponse pour le coût du pré-polissage par volume enlevé	143
5.23 : Surface de réponse de la rugosité	143
5.24 : Modèle de solution la fonction de Lagrange pour une rugosité de 1,4 μm	146
5.25 : Paramètres de polissage optimales pour réduire le coût assuré une rugosité spécifiée	147



Introduction Générale

Introduction générale

L'industrie de fabrication des pièces mécaniques ne cesse de rechercher des moyens afin d'accroître la productivité, de réduire les temps de cycles et d'améliorer la qualité de pièces usinées.

L'usinage des métaux est aujourd'hui la méthode de mise en forme la plus utilisée dans le domaine de la fabrication des pièces. Cette méthode permet l'obtention de géométries complexes et offre une excellente précision dimensionnelle du produit fini.

Les techniques d'usinage se développent rapidement en parallèle avec l'avancement de l'informatique et des systèmes de contrôle numérique. Par contre, la précision et la rapidité d'usinage des machines peuvent être affectées par la trajectoire de l'outil tel qu'il est imposé par le programmeur et les contrôleurs numériques, par les paramètres de coupes, par la géométrie des outils, par le type de matériau usiné et par la rigidité structurale du centre d'usinage.

Les exigences en termes de qualité dimensionnelle, géométrique et état de surface sont de plus en plus sévères sur les pièces nécessitant une plus grande maîtrise dans les phases de conception et d'industrialisation (par exemple, choix des procédés et des processus) et de fabrication (réalisation, contrôle, montage) d'une façon cohérente. Actuellement, le processus de fabrication de pièces composées de formes complexes comporte de nombreuses opérations manuelles nécessitant l'emploi de main d'œuvre qualifiée qui deviennent de plus en plus rares sur le marché du travail. Ces opérations ont un degré de pénibilité important et une incidence néfaste sur la santé de l'opérateur qui les réalise.

Les avancées et innovations dans le domaine de l'usinage, comme l'usinage à grande vitesse et la maquette numérique ont permis d'accroître considérablement la productivité tout en maîtrisant la qualité. Pour de nombreux procédés (fonderie, usinage, assemblage, ...), l'automatisation garantit une bonne répétabilité du procédé et des cadences importantes. C'est notamment le cas du polissage et du pré-polissage de formes complexes, pour lesquels l'automatisation n'est pas courante car il est difficile de maîtriser l'ensemble des paramètres du procédé.

Fréquemment, le pré-polissage et le polissage sont les étapes finales (superfinitions) réalisées après une opération d'usinage. L'automatisation de ce procédé pour réaliser les surfaces de formes complexes sur machine multiaxes présente potentiellement de nombreux avantages. Premièrement, il est possible d'améliorer la qualité des surfaces polies grâce à la répétabilité des axes des robots ou machines-outils utilisés. De plus, les machines-outils offrent la possibilité d'effectuer les opérations de fraisage et de polissage sur le même moyen d'usinage. Ensuite, l'automatisation du procédé de polissage apporte un gain à terme de productivité. Enfin, les délais de transfert chez le sous traitant sont ainsi supprimés.

Même si le polissage automatique offre de nombreux avantages par rapport au polissage manuel, il est moins utilisable car il est mal maîtrisé et qu'il soulève de nouveaux verrous scientifiques et technologiques qui doivent être débloqués. Dans le cas du polissage manuel, l'observation de l'opérateur lui permet d'adapter les différents paramètres de polissage au cours de son travail. Dans le cas du pré-polissage automatique, il est difficile de remplacer l'œil de l'opérateur, il faut donc définir à l'avance l'ordonnancement des opérations et les paramètres opératoires permettant ainsi d'obtenir la qualité de surface souhaitée.

Notre contribution consiste à étudier le procédé de polissage (y compris la phase de pré-polissage) afin de faciliter l'automatisation de sa gamme d'usinage sur MOCN 5-axes équipée d'un outil-flexible cylindrique travaillant à une pression de contact faible et constante pour garantir une bonne qualité de surface. L'analyse est effectuée en utilisant la méthodologie des plans d'expérience, cette méthode aide à l'amélioration de la qualité des produits et des procédés tout en réduisant le temps et le coût de fabrication.

La présente thèse est structurée comme suit :

- ⇒ Le chapitre 1, a pour objectif de présenter un état de l'art des travaux scientifiques réalisés dans le domaine du polissage et de comprendre l'origine des verrous scientifiques associés à cette problématique. 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. Il 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. On donne aussi des synthèses 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. Enfin, nous terminons notre état de l'art par les principales méthodes de caractérisation de l'état de surface, en présentons les différents dispositifs d'acquisition de la topographie des surfaces en spécifiant les champs d'application de chacun.
- ⇒ Le chapitre 2, a pour objectif de préciser le contexte industriel de la fabrication des pièces mécanique et de mieux comprendre les difficultés liées à l'automatisation du polissage. Un état de l'art décrit les problématiques liées aux stratégies d'usinage, le choix des mouvements de l'outil nécessaires à la réalisation de la forme effectué par les MOCN. Pour obtenir une abrasion homogène sur toute la surface, il est donc nécessaire de contrôler ou de maîtriser le contact, l'usure des grains abrasifs et la trajectoire.

- ⇒ Le chapitre 3, a pour objectif de traiter l'influence des paramètres de coupe sur le temps de cycle lors de l'usinage en finition sur MOCN. Nous présentons aussi un état de l'art sur les méthodes de modélisation et d'optimisation existantes et la méthode d'optimisation proposée dans notre travail. Un modèle mathématique est proposé permettant la minimisation du coût total incluant le coût d'utilisation des machines, coût de l'outil, coût de changement d'outils et le temps total de réalisation d'une unité du produit.
- ⇒ Le chapitre 4, a pour objectif de présenter la théorie des plans d'expériences. Dans ce chapitre, après de montrer l'intérêt des plans d'expérience par rapport à la méthode classique des essais, nous décrivons les outils et les étapes nécessaires à la formulation d'un problème. Puis, nous présentons les deux types de stratégies expérimentales que nous avons choisies d'utiliser, à savoir, les plans de criblage et les plans à surfaces de réponses. Il présente l'étude et l'analyse des conditions de coupe et la modélisation mathématique des équations de prédiction du fini de surface.
- ⇒ Le chapitre 5, expose l'ensemble des résultats expérimentaux relatifs au polissage automatique des pièces de formes gauches sur centre d'usinage 5-axes. Une analyse de l'ensemble des résultats expérimentaux relevés dans ce travail est effectuée. Tout d'abord, nous avons retenu un process industriel à savoir le polissage d'une pièce cylindrique en acier inoxydable 100Cr6 avec un outil-abrasif cylindrique flexible constitué d'un capuchon en papier de verre monté sur un support en caoutchouc. En première étape, 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 l'outil est présenté puis analysé.

En deuxième étape, les Plans d'Expériences seront employés pour identifier les facteurs les plus influents de ce processus. Basée sur ces facteurs influents, une surface de réponse est utilisée pour obtenir des modèles expérimentaux et estimer le coût de polissage en considérant le débit de matière enlevée et la rugosité obtenue. Ces modèles seront exploités pour optimiser les facteurs de polissage et de réduire le coût du processus pour une rugosité souhaitée, une synthèse des résultats obtenus est présentée.

- ⇒ Enfin, nous terminons cette thèse par une conclusion générale qui synthétise les points essentiels de cette recherche et cite les perspectives associées pour les travaux futures.



Chapitre 01

**Etat de l'art sur les procédées
d'usinage par abrasions**

1.1. Introduction

Le processus d'élaboration d'un produit industriel est défini par un ensemble d'étapes qui permettent, à partir d'un besoin ou d'une idée, la réalisation d'un produit. A chacune de ces étapes, des informations de types très divers contribuent à la définition du produit. De l'idée du produit à son industrialisation puis à son utilisation, le produit passe par plusieurs phases essentielles de développement : la conception, la fabrication, la vente et les services associés.

La fabrication de produits de qualité doit s'effectuer en toute sécurité et dans le respect de l'environnement, elle met en œuvre un ensemble de procédés et de processus.

1.2. Processus d'obtention du brut

Avant usinage, toute pièce est obtenue par un procédé d'élaboration de pièce brute. Une pièce brute est un produit initial, réalisé lors d'une production primaire, qui a une forme géométrique ainsi que des propriétés physico-mécaniques et dont la modification de ses surfaces par usinage génère une pièce finie.

Ces procédés sont nombreux et dépendent étroitement du matériau et de la forme de la pièce. Selon la qualité obtenue avec le procédé choisi, il peut ne pas s'avérer nécessaire de procéder à l'usinage de tout ou partie de la pièce.

Selon la nature des changements de forme géométrique et des propriétés physico-mécaniques des surfaces, on peut classer les procédés d'obtention des pièces mécaniques brutes comme suit :

- Formage à chaud ou à froid avec une déformation plastique (laminage, forgeage, estampage, extrusion) ;
- Formation de la pièce brute par remplissage de métal fondu d'un évidement appelé empreinte, dans un moule non permanent ou permanent (moulage) ;
- Création de la pièce mécano-soudée (estampage-soudage) ;
- Métallurgie des poudres.

La connaissance des procédés permet donc, de :

- Choisir un procédé pour une pièce à réaliser,
- Reconnaître, à partir d'une pièce existante, le ou les procédés qu'elle a subit,
- Justifier la nécessité d'usinage.

La qualité des pièces fabriquées dépend d'un certain nombre de facteurs qui affectent leurs caractéristiques mécaniques et géométriques en cours de fabrication. A partir de l'analyse fonctionnelle du produit, le bureau d'étude définit chaque pièce constitutive et leur matériau.

Les paramètres de fabrication et la caractérisation du matériau vont être déterminants dans le choix des procédés d'élaboration des pièces brutes et des pièces finies. La pièce à réaliser étant défini par son dessin de définition et le procédé d'usinage par enlèvement de matière étant choisi, il s'agit de déterminer le type de machines-outils adapté à la fabrication.

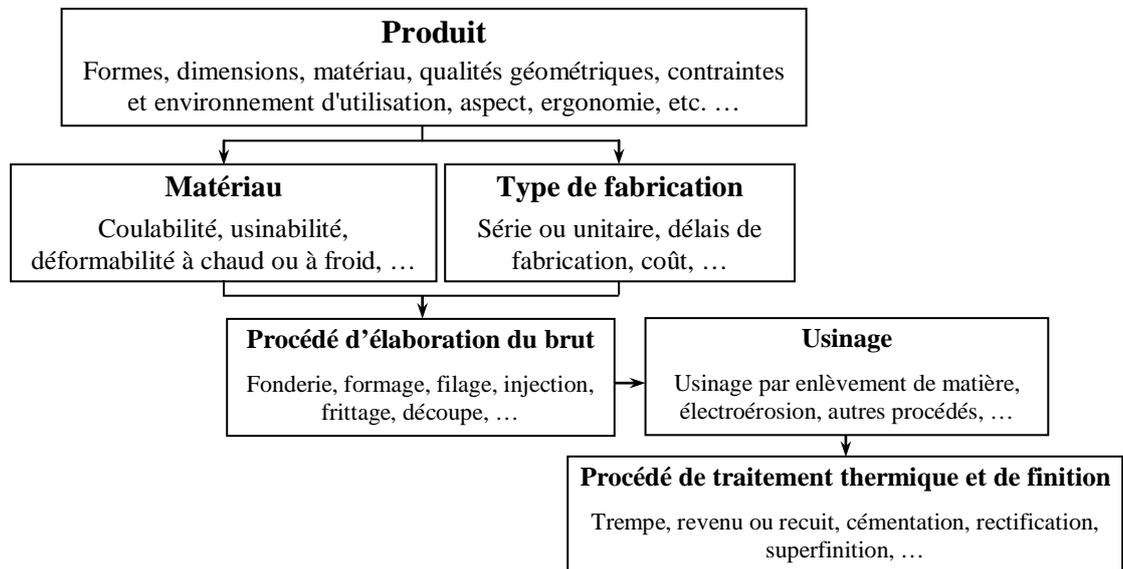


Figure 1.1 : Cycle de fabrication du produit

Si le choix de la MOCN est souvent lié à la disponibilité du parc existant, il existe cependant des contraintes de trajectoire, de positionnement des usinages, de performance, qui impose un type de machine : Tour, Centre d'usinage horizontal, centre d'usinage vertical, centre d'usinage 4 ou 5 axes, centre d'usinage palettisé ou non...

L'usinage d'une pièce consiste à passer de son état brut (pièce brute) à son état fini (pièce usinée ou finie). Ce passage est assuré par une succession d'actions appelée processus d'usinage, l'opération d'usinage consiste à imposer à l'outil une loi de déplacement précise par rapport à la pièce à usiner. Le processus d'usinage d'une pièce est généralement composé de trois phases : ébauche, demi-finition et finition ; chacune de ces phases est caractérisée par différents types d'opérations.

L'ébauche permet d'enlever un maximum de matière en un minimum de temps. Pour le réaliser, on emploie d'importants efforts de coupe et des outils pouvant y résister et ayant, par conséquent, des diamètres élevés.

La finition est l'usinage final d'une surface, et on cherche le plus souvent une bonne qualité de surface : dimensions, forme et rugosité dans les tolérances données. Les efforts sont alors plus faibles que pour une ébauche, les outils utilisés sont donc plus minces.

La phase de demi-finition englobe les opérations intermédiaires entre l'ébauche et la finition. De façon générale, toute opération d'usinage peut être décrite par les paramètres suivants : l'outil de coupe, sa trajectoire et les conditions de coupe.

1.3. Processus d'usinage

La transformation de la pièce brute par enlèvement de matière génère de nouvelles surfaces qui ont une fonctionnalité précise qui garantit la précision d'un assemblage, respecter une esthétique ou un design. Le processus d'usinage d'une entité se décompose en différents états qui doivent être identifiés et ordonnancés. En général, durant le processus l'entité passe d'un état initial (état brut) à un état final (état de finition) en passant par un (ou deux) état(s) intermédiaire (s) (état d'ébauche et/ou 1/2 finition).

Un état est caractérisé par une forme géométrique et une qualité de réalisation associée à cette forme. Pour chaque état du processus d'usinage de l'entité, la forme géométrique se rapproche de la forme finale et la qualité s'améliore jusqu'à atteindre la qualité visée. Le choix des opérations d'usinage, l'outil de coupe et la machine-outil nécessaires aux entités d'usinage proposées demande des connaissances du savoir-faire importantes au cours de la génération du processus d'usinage. Les critères de choix des états d'usinage sont relatifs à :

- L'état initial de l'entité : matériau, nature de brut, surépaisseurs ;
- L'état final de l'entité : forme, spécifications dimensionnelles et géométrique ;
- Les ressources : possibilité de la machine, possibilités techniques, outils de coupe.

1.3.1. Etat d'ébauche des surfaces

Les usinages d'ébauche utilisent de gros outils pour enlever rapidement la matière de la pièce. Les caractéristiques du système de fabrication en ébauche sont les suivantes :

Machine : machine puissante et robuste ;

Porte pièce : appareillage rigide avec serrage conséquent, porte-à-faux réduit ;

Outil : plaquette robuste, géométrie et forme spécifiques, grosse denture, brise-copeau, angle de coupe

Paramètres de coupe : V_C : minorée en ébauche ;

V_f ou V_Z : majorée ;

a_e : max possible.

Objectif :

- Eliminer la croûte superficielle liée au procédé d'obtention du brut ;
- Eliminer les fortes surépaisseurs d'usinage (excédent important de matière) pour garantir une surépaisseur d'usinage la plus constante possible ;
- Garantir une surépaisseur d'usinage la plus faible possible et obtenir une tolérance géométrique et dimensionnelle acceptable.

1.3.2. Demi-finition des surfaces

C'est l'opération d'usinage qui donne, entre l'ébauche et la finition, une seconde forme intermédiaire en une seule passe, préparer une finition précise en corrigeant les défauts géométriques résultants d'une ébauche. Elle permet d'avoir une bonne approche de la surface finale et assurer une précision géométrique de l'état de surface.

1.3.3. Finition des surfaces

La finalité d'un usinage des pièces mécaniques nécessite des moyens de grande précision dans les procédés de finition, plusieurs techniques modernes sont apparues (la rectification, le pierrage, le toilage, électroérosion et le polissage, ...) pour la finition de ces pièces de plus en plus précise à cause des exigences technologiques croissantes.

Pour le travail de finition, les objectifs recherchés sont principalement :

- La qualité de la surface produite ;
- Le temps de réalisation.

- Machine : machine à qualité géométriques précises ;
- Porte pièce : appuis précis et serrage plus modéré (faible efforts de coupe) ;
- Outil : Géométrie et forme spécifique, forme de bec adapté, angle de pointe aigu ;
- Paramètres de coupe :
- V_C : majorée en ébauche ;
 - V_f ou V_Z : minorée ;
 - a_e : mini que possible.

Une stratégie d'usinage de finition est une méthodologie utilisée pour générer une opération dans le but de réaliser une entité géométrique dans sa forme finale. Le choix de cette stratégie est un problème sous contraintes associés au défaut de forme et à l'état de surface.

Elle permet de caractériser l'outil, les conditions de coupe et les paramètres de réglage du générateur de trajectoires. Pour réussir ces objectifs, le travail de finition va s'appuyer sur une stratégie d'usinage qui comprend plusieurs aspects :

- Un mode d'usinage ;
- Une trajectoire d'outil ;
- Une gestion de l'orientation de l'axe outil ;
- Une gestion des entrées et sorties d'outil, pour éviter les collisions et interférences.

1.4. Usinage par abrasion

Le polissage est un procédé d'usinage par abrasion qui vise à obtenir des pièces de très haute qualité est une micro-géométrie précise sur les surfaces de solides, c'est la dernière opération de finition des surfaces des pièces mécaniques. Cette super finition permet de réduire ou d'éliminer les défauts d'intégrité de surface (texture de la surface ; rugosité et défauts de surface, contraintes résiduelles, couches blanches, ...) engendrés par les procédés d'usinage antérieure.

D'après une définition du CIRP [CIRP (2004)] [Anthony 2012] :

« L'abrasion est un mécanisme d'usure d'origine mécanique généré par le déplacement relatif des solides en contact ».

Ce type d'enlèvement de matière s'effectue en appliquant à la pièce un chargement mécanique (forces, couples), mais, alors que dans les autres procédés mécaniques de coupe, un ou quelques outils tranchants de forme bien précise (foret, fraise, broche ou des plaquettes d'usinage) enlèvent la matière sous forme de copeaux de taille millimétrique, l'enlèvement de matière par abrasion est assuré à l'échelle micrométrique ou sub-micrométrique par des grains abrasifs de taille, de forme et d'orientation variables.

Dans le cadre spécifique du polissage, l'analyse du processus d'abrasion peut se décomposer en différentes approches, issues des trois sous-systèmes pouvant être isolés dans l'environnement du procédé : l'outil meule, la pièce et les grains comme illustrée sur la Figure 1.2.

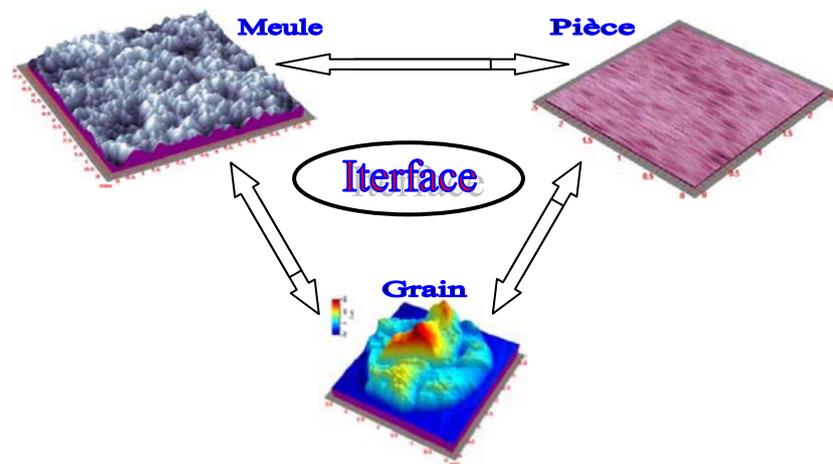


Figure 1.2 : Environnement du processus de coupe par abrasion [Barge 2005]

Ces trois sous-systèmes définissent l'échelle à laquelle se positionne l'analyse. Ainsi, une analyse globale s'intéressera d'avantage à l'action de la meule sur la pièce antagoniste. L'enlèvement de matière généré par une particule abrasive peut être le résultat de différents mécanismes. L'analyse microscopique du processus de coupe par abrasion consiste à étudier l'action d'une particule abrasive élémentaire sur une surface antagoniste.

La connaissance des différentes transitions d'écoulement autour d'une particule abrasive, dans des conditions bien établies, permet alors de mieux maîtriser les processus d'usinages abrasifs et d'usure abrasive.

1.4.1. Mécanismes d'enlèvement de matière par abrasion

Comme il a été expliqué précédemment, l'enlèvement de matière en polissage est dû à l'action abrasive des grains sur la pièce. Afin d'expliquer au lecteur ce point, il apparaît donc important de présenter ce phénomène d'abrasion et la physique **qui lui entouré**.

Aussi, pour comprendre plus facilement les effets générés par l'abrasion, il est courant de se soumettre à l'étude d'un seul grain : c'est le domaine de la sclérométrie qui a été étudié par de nombreux auteurs [Xi et Zhou 2005], [Barge 2005]. Les grains, en polissage, ou les aspérités, en usure abrasive, ont des géométries et des orientations particulières et peuvent posséder plusieurs arêtes tranchantes et faces de coupe, ceci génère un écoulement complexe autour de la particule abrasive pouvant mener à un micro-usinage (cas de polissage) et à un phénomène de déformation plastique (ou usure abrasive).

L'approche expérimentale des phénomènes élémentaires gouvernant la réaction du matériau au grain abrasif à l'échelle microscopique est basée sur les essais de rayure (figure 1.3). Cette approche est à la base de la compréhension des phénomènes locaux de déformations plastiques et de rupture, mis en jeu au cours du processus d'abrasion.

L'essai de rayure est généralement pratiqué sur un échantillon du matériau étudié de surface plane (figure 1.3). Il consiste à appliquer à la surface du matériau un pénétrateur, qui simule un grain abrasif, avec une force normale P tout en le déplaçant avec une vitesse de translation v tangente à la surface de l'échantillon.

Les deux caractéristiques géométriques fondamentales de l'essai sont :

- La pénétration δh : c'est-à-dire la distance entre la pointe de l'indenteur **O** et la surface initiale de l'échantillon ;
- L'angle d'attaque β : à savoir l'angle entre la normale à la surface de l'indenteur et à la surface initiale de l'échantillon au premier point de contact **A**.

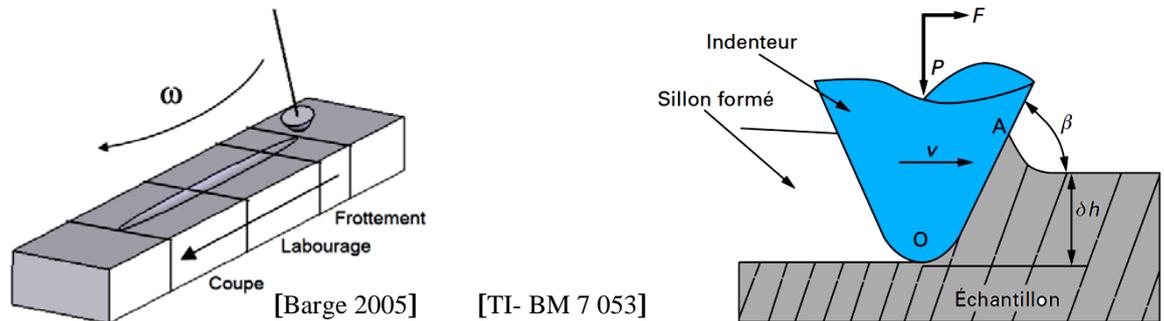


Figure 1.3 : Mode d'action du grain dans l'essai de rayure

Le mécanisme dépend visiblement de la profondeur à laquelle se trouve la particule abrasive [Brinksmeier et al. 2010], [Klocke et al. 2011]. Le grain abrasif, a des géométries, des orientations et des positions aléatoires et peut posséder plusieurs arêtes et faces de coupe, ceci engendre un écoulement complexe autour de la particule abrasive (figure 1.4). Le contact des abrasifs avec la pièce engendre une déformation élastique du matériau, puis une déformation plastique du matériau lorsque la profondeur de pénétration des particules augmente.

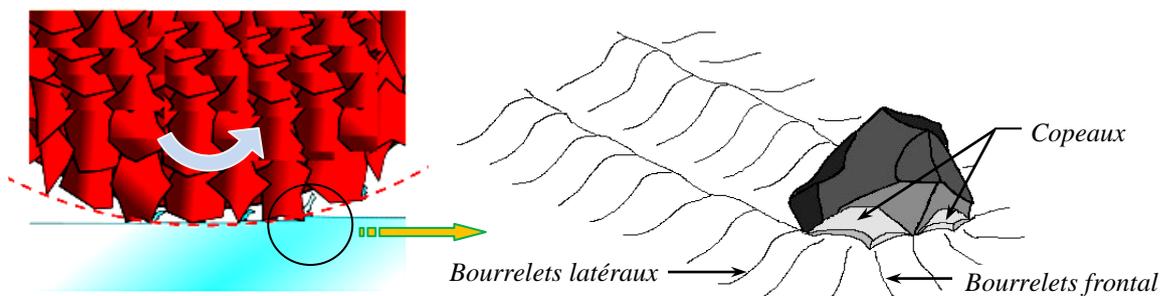


Figure 1.4 : Grain abrasif en action [Barge 2005]

Pour clarifier le contact grain-pièce, la figure 1.5 présente les différents scénarios ou possibles lors de l'approche du grain sur la pièce. Ces déformations plastiques font apparaître des « micro-labours » ou « micro-rayures » (figure 1.5.a). Avec ce mécanisme, il n'y a pas réellement d'enlèvement de matière, cette dernière se déforme de chaque côté du sillon. Si plusieurs particules agissent dans la même zone, la matière est régulièrement déformée et finit par céder, ce mécanisme est appelé « micro-fatigue » (figure 1.5.b).

Le mécanisme de « micro-coupe » intervient lorsque la profondeur de pénétration est suffisante pour qu'il y ait formation d'un copeau, laissant place à un sillon (figure 1.5.c). La « micro-fissuration » est le fruit de contraintes internes importantes souvent liées aux particules abrasives (figure 1.5.d). Ce mécanisme existe uniquement avec les matériaux fragiles comme la céramique, tandis que le micro-rayage et la micro-coupe apparaissent principalement avec les matériaux ductiles.

Pour comprendre l'action de labourage faisant suite au frottement et à la déformation élastique du massif, les relations de vitesses de pénétration de l'arête de coupe ont été étudiées par [Lortz 1979]. La forme géométrique aléatoire des particules abrasives rend difficile la compréhension de leurs interactions dans la matière ainsi de leurs transitions d'écoulement.

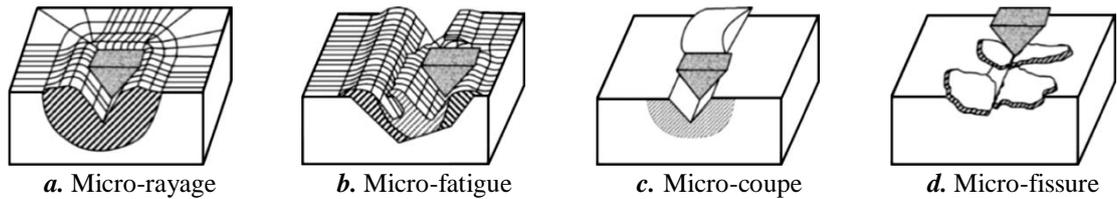


Figure 1.5 : Mécanismes d'enlèvement de matière [Klocke et al. 2011]

Pendant, l'enlèvement de matière idéal n'est jamais atteint en abrasion à cause des imperfections des grains. En effet, la nature, la forme et l'orientation des grains va modifier la géométrie du contact grain-pièce et en particulier l'angle d'attaque du grain.

1.4.2. Procédés d'usinage par abrasion

Les procédés d'abrasion peuvent être classés en trois catégories, les procédés d'abrasion 2 corps, 3 corps et par érosion [Komanduri et al. 1997], [Felder 2009b] :

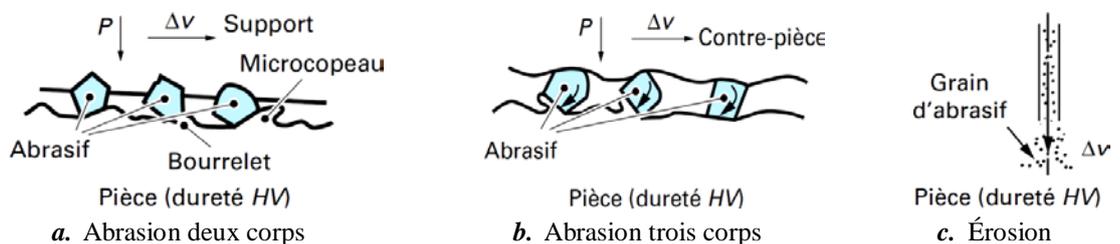


Figure 1.6 : Procédés d'usinage par abrasion et cinématique des grains abrasifs [TI- BM 7052]

Le choix d'un type d'abrasif pour le polissage repose sur des règles empiriques. Les travaux de [Douzet 90] présentent les principales caractéristiques d'un abrasif pour le procédé d'usinage par abrasion. Les arêtes de coupe d'une fraise par exemple s'usent et doivent être changées ou affûtées, car le niveau de qualité attendu se dégrade. Les outils de polissage nécessitent des abrasifs qui se régénèrent naturellement.

1.4.2.1. Les procédés d'abrasion 2 corps : (*Two-body abrasion*)

Les grains d'abrasif sont solidaires d'un support, leur mouvement est identique à celui des points de la surface du support : meule, bande, fil,

L'abrasion résulte du glissement entre les particules abrasives et la pièce pour un effort normal P exercée par le support, leur glissement produit l'enlèvement de matière (figure 1.6).

a. Meulage

Le meulage utilise des meules de différentes géométries (cylindre, disque, sphère, ...) et permet d'obtenir une rugosité R_a entre $12,5 \mu m$ et $1,6 \mu m$ [Fanchon 2001].

b. Rectification

La rectification plane consiste en un meulage horizontal de la pièce de façon à éliminer à plusieurs reprises des couches de matériau allant de 20 à $40 \mu m$. La pièce effectue un mouvement de va-et-vient longitudinal.

Pour la rectification cylindrique, la pièce tourne sur elle-même en effectuant sa course parallèlement à l'axe de la meule. Ce procédé permet d'atteindre des tolérances dimensionnelles de l'ordre du micromètre et une rugosité R_a comprise entre 3,2 μm et 0,1 μm .

c. Rodage

Le rodage est principalement utilisé pour roder les surfaces cylindriques comme les chemises de moteurs. Le procédé utilise des pierres-bâtons, les pierres et la pièce sont animées de deux mouvements simultanés qui sont habituellement une rotation pour la pièce et une translation alternée pour l'outil de rodage. Ce procédé permet d'obtenir une rugosité R_a entre 0,8 μm et 0,25 μm .

d. Tribo-finition

La tribo-finition est un procédé qui consiste à ébavurer et à affiner la surface de pièces métalliques. Les pièces sont insérées avec des corps d'ébavurage (souvent en céramique) ou de polissage, de l'eau et une solution nettoyante dans des tambours hermétiquement clos.

Par rotation ou vibration de tambours, une abrasion se produit à la surface et sur les arêtes des pièces. Les surfaces obtenues sont très lisses, et l'aspect peut varier selon la durée, mais la qualité dimensionnelle est de l'ordre du 1/2 mm.

e. Toilage

Le toilage est une opération de finition des surfaces cylindriques par défilement de bandes abrasives. La bande défile lentement (3 à 5 cm/minute) sur le galet de contact. L'usinage est assuré par le mouvement de rotation de la pièce et l'oscillation transversale de la bande abrasive [Khellouki et al. 2010].

f. Ponçage

Le ponçage permet de décaper ou modifier l'état de surface des pièces avant les opérations de peintures ou de collage pour obtenir une meilleure accroche. Les ponceuses peuvent être excentriques, vibrantes ou à bande, et l'évacuation des poussières est souvent effectuée par aspiration [Poirée et al. 2012].

1.4.2.1. Les procédés d'abrasion 3 corps : (*Three-body abrasion*)

Les grains d'abrasif ne sont pas solidaires d'un support, ils ont un mouvement complexe. L'abrasion résulte en partie du glissement et en partie du roulement entre les particules et la pièce (figure 1.6.b).

a. Superfinition

Les processus de superfinition permettent d'obtenir une rugosité R_a inférieure à 0,1 μm pour des surfaces cylindriques, coniques, sphériques ou planes.

C'est comme le processus de rodage, la pièce est en rotation et les abrasifs oscillent sur la surface avec une pression constante.

b. Polissage mécanique

Le polissage mécanique permet d'obtenir une rugosité R_a entre $0,4 \mu\text{m}$ et 20 nm pour des formes simples et complexes.

1.4.2.1. Les procédés par érosion

Les grains d'abrasif sont projetés à grande vitesse. L'abrasion est due à l'énergie cinétique (figure 1.6.e).

a. Polissage par flux abrasif

Ce procédé permet de traiter tout type de surfaces même anguleuses. On peut parler de sablage lorsque les particules sont des petites billes de sables.

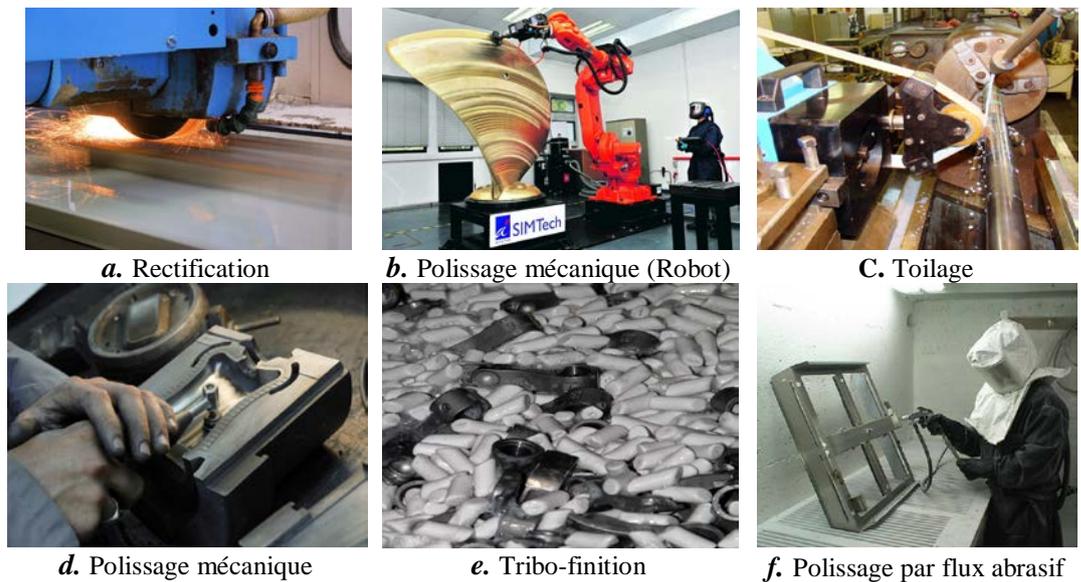


Figure 1.7 : Photos de procédés d'usinage par abrasion [Anthony 2012]

D'autres procédés, comme, les traitements de brossage, de sablage et de grenailage leur objectif n'est pas d'ôter de la matière, mais plutôt, de :

- Contrôler la composition chimique superficielle : élimination des couches superficielles, dépôt d'éléments des abrasifs, ... ;
- Imposer une rugosité permettant l'accrochage d'un dépôt ;
- Améliorer la résistance à la fatigue mécanique ou à la corrosion de la pièce en durcissant par écrouissage la superficie de la pièce, en éliminant les fissures superficielles et/ou en introduisant des contraintes résiduelles de compression.

1.5. Polissage des surfaces

Actuellement, les exigences de l'industrie des pièces de précision de haute qualité avec des géométries complexes sont devenues de plus en plus nécessaires et doit permettre de garantir la fidélité entre la pièce et les spécifications fonctionnelles du produit fini.

La finition de surface finale de certaines pièces métalliques telles que l'outillage (moules pour injection plastique) et l'industrie biomédicale (implants et prothèse totale de genou) est généralement mises en œuvre par des opérations de pré-polissage et de polissage, afin de réduire la rugosité de surface de la pièce usinée.

La fabrication d'une telle pièce attire l'intérêt des différentes équipes de recherche dans le monde, par exemple, [Hilerio et al. 2004] présentent le produit Life Management de prothèses du genou et une étude des différentes étapes de pré-polissage et de polissage. Le procédé de fabrication de cette pièce biomécanique est présenté à la figure 1.8.

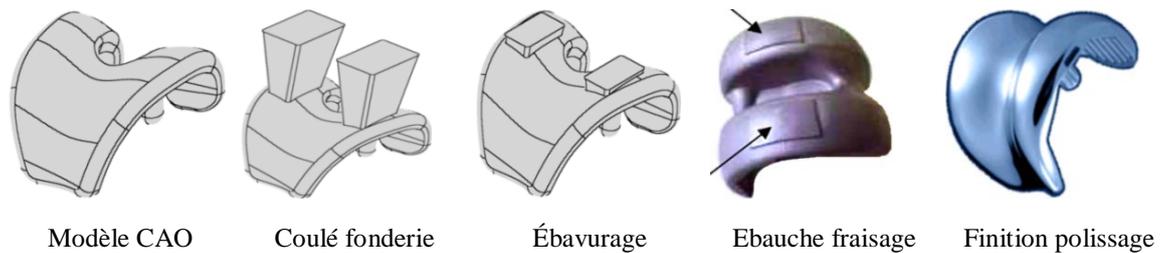


Figure 8 : Étapes de fabrication d'une partie fémorale de prothèse de genou

Le principe de base est de réaliser une telle pièce en partant d'un modèle de fonderie réaliser en cire perdue (lost-wax casting) et en procédant à des opérations successives de finition d'usinages jusqu'à l'étape finale de pré-polissage ensuite de polissage, le procédé de fabrication est présenté à la figure 1.9.

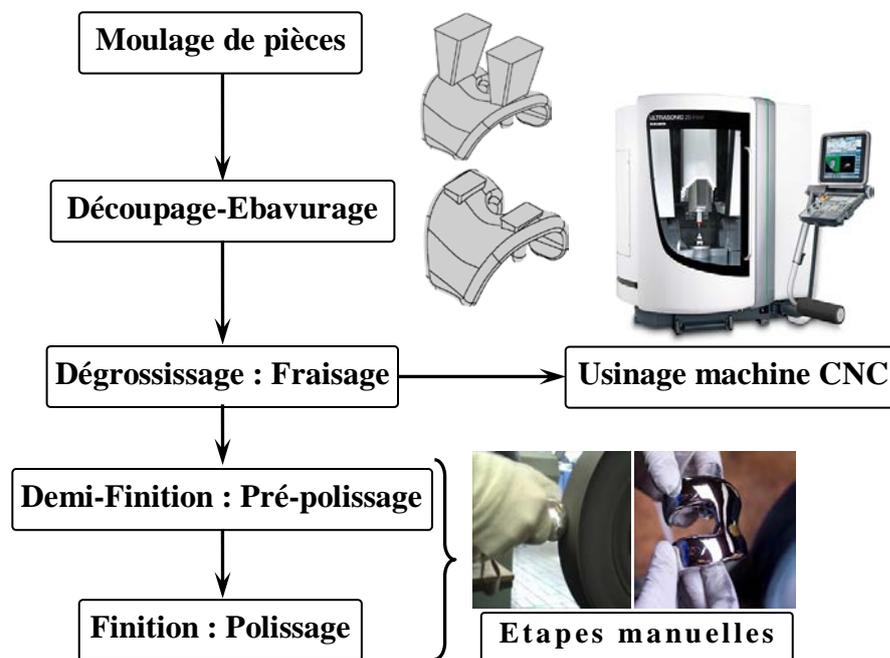


Figure 1.9 : Processus de finition d'une partie fémorale de prothèse de genou

Actuellement, le processus de finition de pièces composées de formes complexes comporte de nombreuses opérations manuelles qui nécessitent l'emploi de main d'œuvre qualifiée. Ces dernières deviennent, de plus en plus rares, sur le marché du travail. Ces étapes sont le travail intense et dangereux pour la santé de l'opérateur.

En effet, les petites particules dues à l'éjection de la poussière métallique et le bruit qui sont produits par ce processus ont un degré de pénibilité importante et une incidence néfaste sur la santé de l'opérateur qui les réalise. [Lison et al. 1996] présentent une étude pour comprendre la pathogénèse de la maladie pulmonaire produite par les particules en suspension de cobalt (alliage standard utilisé pour les prothèses).

Le polissage utilise des abrasifs : Particules dures, d'une géométrie souvent anguleuse et de granulométrie contrôlée. Ils sont très variés : silex, rubis (grenat), émeri, corindon, carbure de silicium, diamant, nitrure de bore, oxyde de chrome, ... , et peuvent se présenter sous différentes formes : meules abrasives, abrasifs appliqués (sur des bande, disques ou feuilles), abrasifs intégrés (sous forme de bandes, de disques compressés, de roues à lamelles ou de roues enroulées), pâtes et liquides à polir utilisés sur des roues ou des brosses de nature variée (en sisal, coton, flanelle, feutre, laine ou drap, tissés selon différents modes).

En générale, le mécanisme d'usinage par abrasion fait intervenir quatre composants qui sont la pièce, le fluide, les particules abrasives et l'outil.

1.5.1. Outil de polissage

L'objectif premier de l'outil est de commander les mouvements relatifs entre le capuchon et la pièce et d'imposer un effort ou une pression de contact.

Les outils de polissage automatique sont les mêmes que ceux utilisés en polissage manuel à savoir principalement les disques abrasifs collés sur des portes-disques de formes toriques et des outils de formes sphériques [Tam et al. 1999], [Liu et al. 2005], [Tsai et Huang 2006], [Pessoles et Tournier 2009]. Ces outils de polissage sont composés de deux parties distinctes (figure 1.10). Un axe métallique permet de fixer l'outil sur les micromoteurs utilisés par les polisseurs manuels ou dans la broche des machines-outils dans le cas du polissage automatique. La seconde partie est souvent en élastomère, elle peut donc subir d'importantes déformations pour épouser la surface à polir.



Outil flexible porte capuchon [Moumen et al. 2015]

Outil porte-disque [Deyang et Bia-2014]

Figure 1.10 : Outils de polissage automatique

1.5.2. La pièce

Le polissage est un procédé de finition des pièces en tous matériaux (métalliques, plastiques, bois, ...) visant à améliorer l'état de surface. Cette opération, qui supprime les fissures et les aspérités s'effectue par frottement des abrasifs sur un métal dont sa dureté et la finesse sont fonction de la dureté des abrasifs et de la qualité finale recherchée. On général, la taille, l'orientation des grains, les changements de phase dans la structure sont généralement des caractéristiques du matériau de la pièce qu'on doit prendre en compte, car ils vont directement influencer le processus de polissage.

1.5.3. Le fluide

Le mode et la nature de lubrifiant influent directement sur la durée de vie de l'outil de polissage et sur la qualité de la surface usinée.

Les propriétés de viscosité, de densité et de conductivité thermique qualifient la capacité du fluide à transporter les particules et ainsi à évacuer les micro-copeaux, ce qui se traduit par une baisse de surchauffe lors de l'abrasion et une amélioration de la rugosité, donc, il joue un rôle non négligeable dans le processus de polissage.

Dans certains domaines de l'industrie, comme les circuits intégrés, le fluide possède des agents chimiques actifs qui permettent de fragiliser les liaisons interatomiques et intergranulaires pour soutenir le polissage [Bai et al. 2007]. Cet agent peut avoir un effet négatif sur les propriétés mécaniques de l'abrasif, ces catégories de fluides actifs ne peuvent être utilisées dans le cas des matériaux tels que l'acier ou l'inox.

1.5.4. Les particules abrasifs

Les grains abrasifs sont des particules (corps) durs qui, par action mécanique sur des corps moins durs, permettent l'enlèvement de matière par abrasion à l'échelle micrométrique.

L'industrie des abrasifs est essentiellement basée sur les abrasifs conventionnels et sur les super-abrasifs. Le choix des uns par rapport aux autres dépend fortement de l'application, des propriétés de l'abrasif et de son coût économique. Il est caractérisé par ses propriétés mécaniques, sa stabilité physico-chimique, sa forme et ses dimensions. La granulométrie est une caractéristique particulièrement importante car elle est directement liée au taux d'indentation et conditionnera par la suite le mécanisme de coupe par abrasion.

Les abrasifs industriels les plus utilisés sont généralement les abrasifs de type Corindon (Alumine Al_2O_3), le carbure de silicium (SiC), le nitrure de bore cubique (CBN) et le diamant. Les différentes caractéristiques des abrasifs sont définies par les normes [ISO 6344-1, ISO 6344-2, ISO 6344-3], et sont utilisés par agglomération sous forme de meules ou appliqués sur des supports.

Les caractéristiques principales d'un abrasif sont :

- Sa dimension : représentée par un chiffre allant de taille 8 (gros grains) à 600 (fin), elle conditionne entre autre la résistance du grain aux efforts de coupe et la largeur du sillon dans la pièce à polir ;
- Sa forme et rugosité : elles conditionnent le pouvoir accrochant de l'abrasif au liant et également l'angle d'attaque du grain sur la pièce ;
- Sa dureté : caractéristique principale d'un grain qui dépend de sa composition ;
- Sa friabilité et micro fragmentation : c'est l'inverse de la ténacité. Ces grandeurs vont caractériser l'aptitude du grain à se régénérer pour créer des arêtes de coupe neuves ;
- Sa conductivité et stabilité thermique : nécessaire pour limiter des pertes de caractéristiques telles que la dureté due à l'échauffement du grain ;
- Sa stabilité chimique : elle caractérise l'affinité du grain avec d'autres éléments chimiques.

Une fois le choix de type d'abrasifs déterminé, il est important de choisir le meilleur moyen de les assembler pour former une meule : c'est le rôle du liant.

Le liant a deux fonctions essentielles dans la conception des outils d'usinage par abrasifs (meule). La première est d'équilibrer les forces exercées par la pièce ou le copeau sur le grain actif. La seconde est de donner une certaine rigidité globale à la meule de manière à résister aux forces centrifuges mais aussi à transmettre la puissance délivrée par la broche. Il existe plusieurs types de liants :

- Liants en céramique ou vitrifié : les liants céramiques peuvent être réalisés avec un volume de pore contrôlable et en variétés de duretés. Sa vitesse opérationnelle survient jusqu'à 35 m/s et leur rupture lors de la coupe s'effectue dans de bonnes conditions de manière à garantir l'évacuation des grains usés et un auto-affûtage.
- Liant résinoïde ou bakélite : il est utilisé surtout avec le diamant et le CBN. Le grain est enrobé dans la résine. La porosité de la meule est nettement plus faible que pour les meules à liant céramique et la structure obtenue est plus dense.
- Liant métallique : la force de rétention élevée de ce type d'agglomérant empêche pour toutes opérations d'auto-affûtage, ce qui limite leur utilisation en abrasifs les plus durs (Diamant et CBN). Les liants habituellement employés sont frittés (en bronze) mais d'autres matériaux comme l'acier et le carbure de tungstène peuvent être utilisés.

La taille du grain est déterminée par un chiffre compris entre taille 8 et 600. Le chiffre est d'autant plus élevé que le diamètre moyen du grain est petit. Il indique le nombre de mailles par pouce linéaire (25,4 mm) du tamis qui laisse passer les grains de la meule.

La taille des grains est obtenue par tamisage jusqu'à $M = 240$ et par sédimentation pour les grains plus petits. Les grains les plus gros (de 8 à 24) sont principalement utilisés dans les opérations d'ébarbage et d'ébavurage, les grains de diamètre allant de 30 à 60 sont réservés à la semi-finition des aciers, à l'affûtage et les plus fins servent aux travaux de finition et au polissage pour les tailles 500 à 600. Le grade est désigné par une lettre de l'alphabet de A à Z par dureté croissante. Il correspond à la force avec laquelle le grain est retenu par le liant. Il peut être déterminé par la porosité globale de la meule.

Il n'y a pas d'échelle unique de correspondance entre le grade de la meule et sa porosité et pour le même grade, la porosité pourra varier d'un fabricant à l'autre. Le numéro de structure indique la concentration en volume du grain dans la meule.

1.6. Modèles d'abrasion

Bien que la recherche sur le procédé de polissage ne soit apparue que tardivement, différents travaux menés par la communauté scientifique pour comprendre les phénomènes physiques propres à l'usinage par abrasion, dans le but d'identifier les paramètres nécessaires à la description du comportement de la matière, des outils et proposer des lois qui permettent de prédire les performances du procédé ainsi définir des stratégies et techniques pour permettre l'obtention d'un niveau de qualité de surface conforme aux cahiers des charges tout en maîtrisant les coûts de production.

Cependant, avant de les présenter, il faut tout de même définir ce qu'on entend par modèle. Tönshoff [Tönshoff et al. 1992] a fait un aperçu sur les modèles utilisés en meulage et donne une bonne définition : un modèle est une représentation globale d'un processus qui décrit la corrélation et relie les causes et les effets. Ainsi, on comprend aisément qu'un modèle est consacré à traduire une relation entre les grandeurs d'entrée et les grandeurs de sortie d'un procédé dans la vision de pouvoir prédire à l'avance la dynamique ainsi que les performances statiques.

Il y a tout d'abord les modèles analytiques qui sont basés sur la modélisation mathématique de l'interaction outil/pièce au niveau du grain puis les modèles empiriques, le plus souvent issus de l'expérimentation et de l'observation de plusieurs essais. Les travaux ci-dessous présentent des méthodes permettant de prédire le comportement du procédé d'usinage par abrasion sur la qualité de la pièce après une opération d'usinage.

1.6.1. Approches par modèles analytiques

Les modèles analytiques sont basés sur une formulation mathématique de la physique de l'abrasion pour exprimer l'effet des efforts et de la température. Cette modélisation prend ainsi en compte les connaissances de la physique du matériau que sont les propriétés thermiques et mécaniques. Pour aller plus loin, [Jeng et al. 2005], [Luo et al. 2001] et [Wang et al. 2005] ont exploité les lois de l'élasticité, intégré des approches statistiques pour prendre en compte une proportion plus ou moins grande de particules abrasives en contact avec le matériau à polir en fonction de la force exercée par le patin presseur sur les particules abrasives (figure 1.11) et observer l'évolution de la rugosité de la surface polie. Les paramètres à prendre en considération sont : 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 et la profondeur de la pénétration des grains dans la matière et dans le patin presseur.

[Luo et al. 2001] 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.

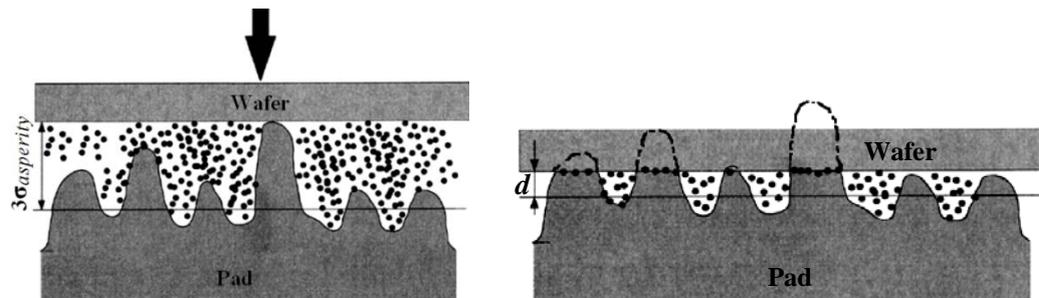


Figure 1.11 : Influence de l'effort presseur sur la distribution des particules abrasives [Jeng et al. 2005]

Quant à F. Klocke [Klocke et al. 2008], il s'est appuyé sur la théorie de Hertz (figure 1.12) pour fournir un éclairage poussé sur les mécanismes de polissage trois corps. Le modèle décrit la géométrie de contact et la modélisation du processus de polissage se fait de manière prévue par [Wuttke 1986].

[Savio et al. 2009] calculer le volume de matière enlevé par unité de surface en se basant sur le modèle d'abrasion de Preston et sur le modèle de contact de Hertz.

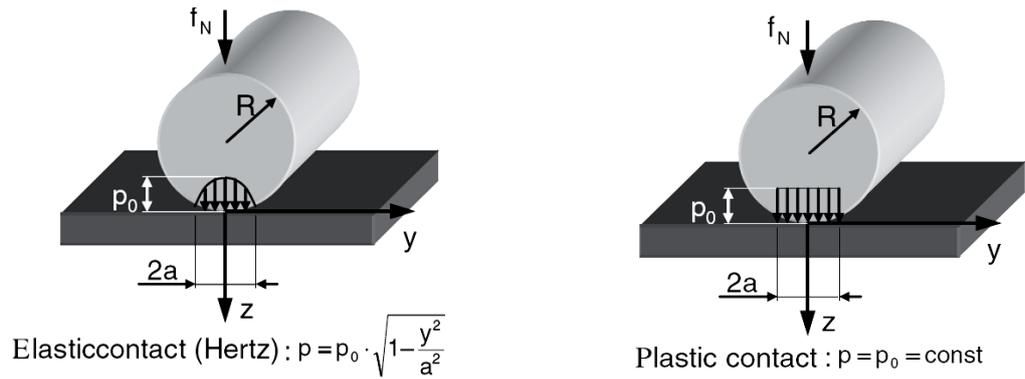
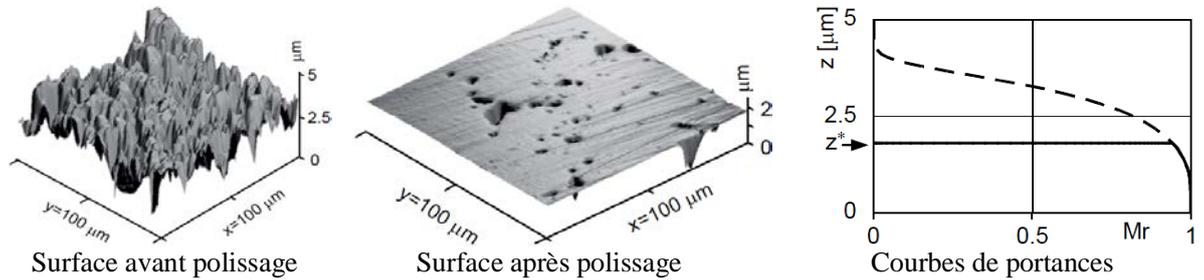


Figure 1.12 : Paramètres de l'étude de F. Klocke s'appuyant sur la loi de Hertz

Connaissant la topologie de la surface avant l'opération (figure 1.13), cette surface est tronquée à une altitude Z^* tel que le volume contenu dans les pics corresponde au volume de matière théoriquement coupé. Les paramètres de rugosité sont ensuite calculés à partir de la surface tronquée.



[Xi et Zhou 2005] utilise une méthode similaire où l'état de surface est obtenu à partir d'une surface de fraisage obtenue par simulation.

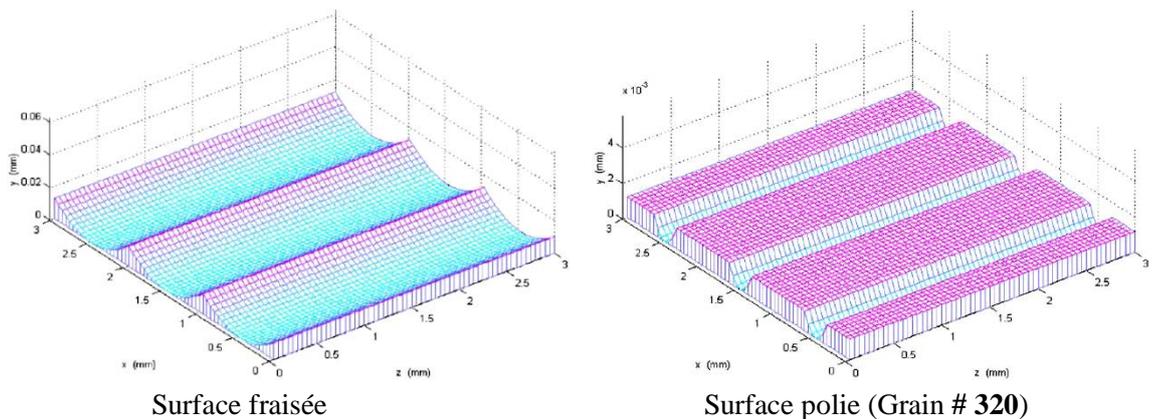


Figure 1.14 : Simulation de la topographie avant et après polissage [Xi et Zhou 2005]

D'autres travaux faits appellent aux techniques des éléments finis pour modéliser le polissage. Là encore, c'est dans le polissage chimico-mécanique que se concentrent les travaux de [Lin et Lo 2004], [Lo et Lin 2005] et [Chen et al. 2008], c'est le modèle de Preston qui est retenu pour modéliser le taux d'enlèvement de matière (TEM). Ces travaux apportent des réponses originales sur la distribution des contraintes, sur la surface polie mais pas des informations supplémentaire sur le TEM.

Une autre technique numérique a été exploitée par [André 2008] dans le cadre du polissage du verre. Ce travail vise à développer un modèle numérique du comportement complexe de la silice par la méthode des éléments discrets. 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, des simulations d'indentation microscopique avec un indenteur de type Vickers ont été réalisées.

Confrontés à des résultats expérimentaux, les résultats numériques obtenus permettent ainsi de simuler efficacement l'enlèvement des particules de silice.

Pour mieux maîtriser le processus d'usinage par abrasion et donc le taux d'enlèvement de matières, des modèles comme ceux de Bai [Bai et al. 2007], de Jiang [Jiang et al. 2008], de Oh [Oh et Seok 2009] et de Zhen [Zhen et Komanduri 2003] font le lien entre l'ensemble des paramètres du processus et le taux d'enlèvement de matière.

La finalité de ces travaux de recherche est de vérifier la possibilité de l'utilisation d'une fonction statistique pour la représentation de la distribution réelle des hauteurs des grains dans une meule rigide. Le nombre de grains intéressés par l'action de coupe a été ici déterminé à partir du calcul des efforts appliqués sur chaque grain et des caractéristiques de l'outil abrasif. Pour ces modèles, la méthode reste formellement la même avec les quatre étapes suivantes :

1. Il s'agit tout d'abord de modéliser le microcontact au niveau des grains, et donc de connaître les différents efforts et déformations locales exercés sur les grains abrasifs, l'outil (effort globale) et la pièce ;
2. Ensuite le nombre des grains actifs est estimé en fonction des surfaces en contact, de la concentration et de la quantité de particules ainsi que du fluide ;
3. Le modèle d'enlèvement de matière d'une particule dépend du mécanisme utilisé :

❖ Zhen [Zhen et Komanduri 2003] ont estimé, dans le cas du meulage des surfaces plane, le pourcentage de grains qui entrent en contact avec la pièce et, en particulier, ceux qui participent activement à l'enlèvement de matière (figure 1.15).

Les principales hypothèses utilisées sont les suivantes :

- La distribution de la taille des grains sur la surface de la meule est conforme à une distribution statistique de type loi normale (courbe de Gauss) ;
- Les déformations élastiques dépendent des conditions du contact grain/pièce ;

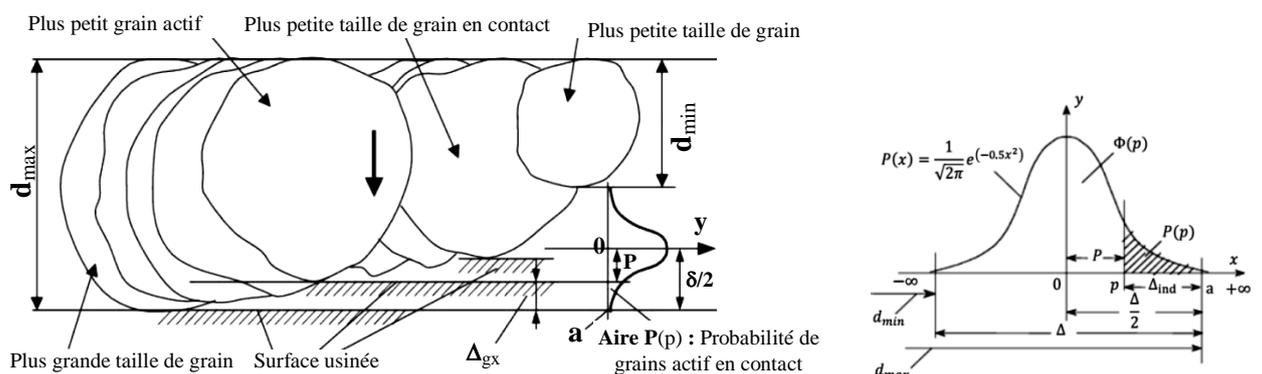


Figure 1.15 : Illustration de la distribution des grains abrasifs sur la meule [Zhen et Komanduri 2003]

L'étude effectuée par [Zhen et Komanduri 2003] a permis d'évaluer quantitativement le nombre des grains générés par le processus. Elle montre aussi que d'autres phénomènes physiques, tels que le labourage et le frottement, caractérisent l'action de la majorité des grains en contact avec la surface à usiner.

Un modèle similaire a été proposé par [Chang et al. 2000] pour l'analyse des meules rigides. L'approche est, comme dans les travaux de [Zhen et al. 2003], de type statistique. La finalité de cette recherche est de vérifier la possibilité de l'utilisation d'une fonction statistique pour la représentation de la distribution réelle des hauteurs des grains d'une meule abrasive. Le nombre de grains intéressés par l'action de coupe permet de déterminer les calculs des efforts appliqués sur chaque grain et les caractéristiques de l'outil abrasif.

4. Enfin, connaissant le N^{bre} de grains actifs, l'enlèvement de matière généré par une particule et les mouvements de la pièce, le taux d'enlèvement de matière global peut être calculé.

La formation de copeau et l'enlèvement de matière dépendent de la structure de la meule, des géométries de coupe (paramètres géométriques de la meule et de la pièce) et des conditions opératoires (Vitesses de rotation et d'avance). Les équations obtenues à partir de la modélisation du contact outil pièce à l'échelle de particules abrasives donnent une estimation du taux d'enlèvement de matière à partir de l'ensemble des caractéristiques des matériaux (module d'Young, dureté, coefficient de Poisson), de la forme des surfaces (type, taille, distribution des aspérités et particules) et des conditions de l'opération (pression, vitesse relative, effet d'un agent chimique ou d'un fluide).

La modélisation de la prédiction de rugosité de la surface réalisée par meulage est pour la majorité des travaux reliée au modèle de la topographie de la meule. Les modèles de rugosité sont perçus comme une reproduction de la topographie de la meule sur la pièce. Ces modèles ne sont valables que pour de faibles profondeurs de passe et une topographie constante (usure négligeable de la meule). Il existe peu de travaux sur la prédétermination de l'ondulation et de défauts de forme de la pièce meulée.

En réalité, il n'existe pas un modèle analytique figé et commun pour modéliser le processus d'usinage des pièces mécaniques par abrasion. Pour le polissage de matériaux, les modèles utilisés sont des modèles en général empiriques.

1.6.2. Approches par modèles empiriques

Les modèles empiriques sont établis à partir d'essais et ont pour but de trouver un lien simple et direct entre les conditions d'usinage et les propriétés de la surface réalisée.

En fonction du paramètre à modéliser, un ensemble d'essais sous forme de plans d'expériences est mis en place. L'enregistrement des paramètres d'entrée et de sortie vont alors permettre de déterminer ce lien.

Cette méthode relativement simple présente des inconvénients comme la difficulté d'extrapolation des résultats expérimentaux pour des méthodes et conditions de pré-polissage et de polissage différentes.

1.6.2.1. Modèle de Preston

Le polissage est un procédé d'enlèvement de matière, la connaissance du débit de matière est nécessaire pour estimer la durée des opérations. Ce type d'enlèvement de matière, obéit schématiquement à la loi de Preston-Archard [Preston 1927], qui propose son modèle dans le cadre du polissage du verre. Ce modèle est probablement celui qui reste encore aujourd'hui le plus utilisé.

Le taux d'enlèvement de matière (**TEM**) [Éric F. TI BM 7052], soit la dérivée de la hauteur (**h**) de la pièce par rapport au temps, est proportionnel au produit de la pression (**P**) et de la vitesse relative entre l'outil et la pièce (**V_r**).

$$TEM = \frac{dh}{dt} = C_p \cdot P \cdot V_r$$

C_p : Coefficient de Preston à déterminer de manière expérimentale pour un couple outil matière et pour un choix de paramètres du processus.

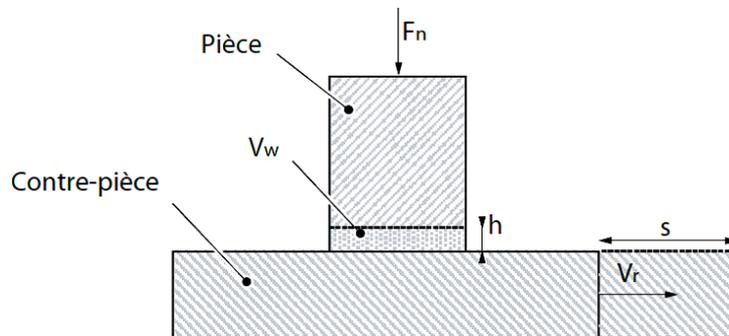


Figure 1.16 : Paramètres macroscopiques impliqués dans l'abrasion

D'un point de vue tribologique, le volume de matière enlevé (**V_w**) proposé par [Archard 1953] est inversement proportionnel à la dureté (**H**) de la surface abrasée et directement proportionnel au produit entre l'effort normal (**F_n**) et la longueur de glissement (**S**) entre la pièce et la contre-pièce.

$$V_w = K \cdot \frac{F_n \cdot s}{H}$$

Les travaux du [Brown et al. 1981] montrent que les équations d'Archard et de Preston sont équivalentes avec : **C_p** = $\frac{K}{H}$.

1.6.2.2. Amélioration du modèle de Preston

De nombreux travaux ont cherché à exprimer et évaluer les résultats expérimentaux des principaux paramètres du processus. Elles mettent en évidence leur rôle prépondérant dans la consommation de la matière. Différentes expressions ont été proposées pour définir le TEM dans des productions basées sur le polissage chimico-mécanique.

Les équations sont issues des travaux de recherche respectivement de [Wang et al. 2002], [Shi et al. 1998], [Liu et al. 1996] et de [Tseng et al. 1997] :

$$- TEM = K \cdot P^{n/2} \cdot V^{1-n/2}$$

$$- TEM = K \cdot P^{\frac{2}{3}} \cdot V$$

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

$$- TEM = K \cdot P^{\frac{5}{6}} \cdot V^{\frac{1}{2}}$$

[Cook 1990] à mis en évidence que le TEM est fonction de la taille des grains et du PH du fluide porteur des particules abrasives. [Warnock 1991] poursuit le même objectif en privilégiant la taille de grains et leur concentration. [Wang et al. 2008], quant à lui, se concentre sur le niveau des contraintes sur l'effort presseur. [Liu et al. 1996] utilise une approche statistique et les lois de l'élasticité pour caractériser le processus d'enlèvement de matière.

- ❖ Dans les travaux [Luo et al. 1998], Luo étudie l'influence du fluide sur les opérations de polissage du cuivre, dans le domaine de l'industrie des circuits intégrés. Il a utilisé des polisseuses conventionnelles pour réaliser des surfaces planes.

Suite à une campagne d'essais, en faisant varier les fluides ainsi que le type des grains abrasifs, il en déduit une influence du fluide et de ses propriétés chimiques sur l'abrasion. En plus des effets mécaniques, il met en avant le fait qu'il existe des mécanismes chimiques qui participent à l'abrasion. Les résultats de ces travaux montrent que le modèle de Preston n'est pas convenable pour ce type d'opérations, une nouvelle loi légèrement améliorée est présentée :

$$TEM = (K \cdot P + B) \cdot V + R_C$$

K , B et R_C : paramètres à déterminer expérimentalement.

R_C : Taux d'enlèvement de matière du au mécanisme chimique.

- ❖ [Wang et al. 2002], leurs travaux concentrés sur le polissage des surfaces planes, pour la réalisation des composants du disque dur (disque), en aluminium/magnésium et en vitrocéramique, utilise ce procédé pour obtenir une planéité et des défauts de surfaces convenables. Les résultats des essais montrent que le modèle de Preston n'est pas approprié pour ces travaux. Wang [Wang et al. 2002] propose donc un nouveau modèle.

$$TEM = K \cdot P^{n/2} \cdot V^{1-n/2}$$

Les deux variables K et n sont deux constantes à déterminer expérimentalement. La corrélation entre ce modèle et les essais réalisés donne des bons résultats pour chacun des deux matériaux utilisés.

- ❖ [Klocke et al. 2010], propose un modèle d'abrasion encore plus générique, faisant intervenir les paramètres (k , α , β) qu'il doit déterminer expérimentalement.

$$TEM = K \cdot P^\alpha \cdot V^\beta$$

Suite à des essais de polissage sur le nitrure de silicium avec des outils abrasifs en oxyde de cérium pour des pressions et des vitesses d'abrasion différentes montrent que le modèle de Preston n'est pas convenable, il montre que la pression est beaucoup plus importante que la vitesse sur le TEM.

Ces différents travaux proposés sont indépendants du temps. Alors que les travaux de [Guiot et al. 2012], mettent 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 1.17). Afin d'améliorer et de mieux contrôler la qualité des surfaces polies, il étudie l'influence de divers paramètres sur l'abrasion et l'usure de l'outil par la méthode des plans d'expérience.

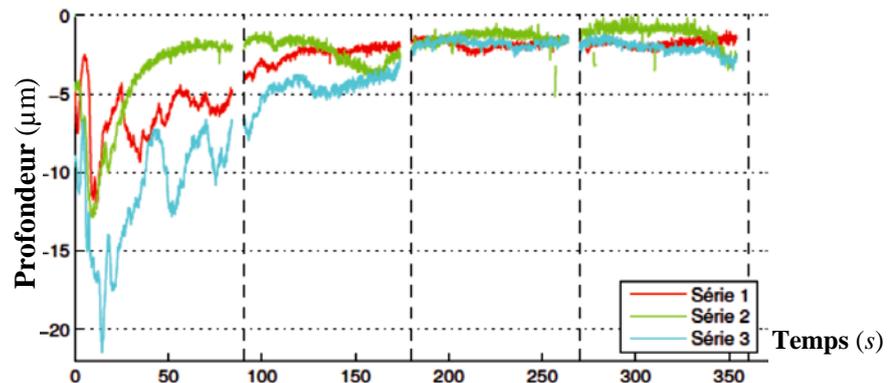


Figure 1.17 : Evolution de la profondeur de polissage en fonction du temps [Guiot et la. 2012]

Enfin, compte tenu de la complexité du processus d'enlèvement de matière, il est difficile de proposer un modèle qui permet de mieux caractériser la micro-géométrie des surfaces polies. Différents travaux ont été menés pour observer le comportement d'ensemble d'un processus de polissage et identifier les conditions pour satisfaire les besoins exprimés par les cahiers des charges des surfaces polies.

1.7. Méthodes de polissage : Applications industrielles et solutions technologiques

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 conditionne les moyens à mettre en œuvre. Aussi, il est rare de disposer d'un outil capable de recouvrir la totalité de la surface à polir. 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 5-axes. Ils ont pour avantages d'offrir une structure robuste et de réaliser l'opération de polissage avec la même machine utilisée pour l'usinage de la pièce initiale. Autre solution très usitée aussi est le robot poly articulé, il a pour avantage de présenter un coût d'acquisition inférieur à un centre d'usinage 5-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.

Le polissage peut être réalisé de 2 façons : manuellement ou mécaniquement, avec de nombreuses techniques différentes.

1.7.1. Polissage manuel

Actuellement, le processus de fabrication de pièces de formes complexes comporte de nombreuses opérations manuelles qui nécessitent un savoir-faire et des mains d'œuvre qualifiées. Cependant, encore de nos jours, le polissage est une tâche essentiellement manuelle assurée par des opérateurs qualifiés. Une dépense considérable de temps et d'argent est donc investie à cette étape de fabrication.

Malgré l'automatisation de la plupart des procédés, cette opération reste encore aujourd'hui manuelle, notamment pour le polissage des surfaces complexes, car il n'existe pas de mise au point efficace du processus.

En polissage manuel, le polisseur utilise des supports ou des outils rotatifs (figure 1.18) sur lesquels il peut fixer différents types d'abrasifs, 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 réalisées.

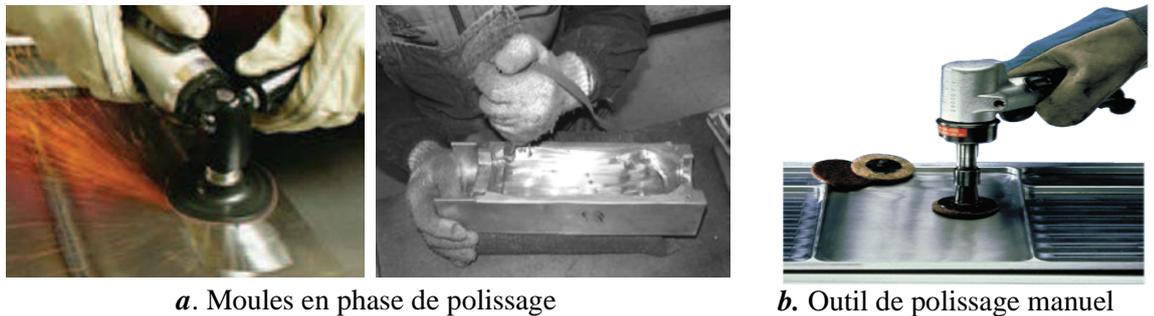


Figure 1.18 : Polissage manuel

Les trajectoires de polissage généralement multidirectionnelles avec des mouvements de translation selon trois directions ou des trajectoires de type trochoïdale afin de ne pas laisser de motifs particuliers sur la surface (figure 1.19).

Finalement, la qualité de la surface est validée visuellement ou par réalisation d'une pièce dans le cas d'un outillage. L'état de surface obtenu se caractérise par une rugosité faible, une brillance qui fait l'objet d'un contrôle visuel et/ou microscopique.

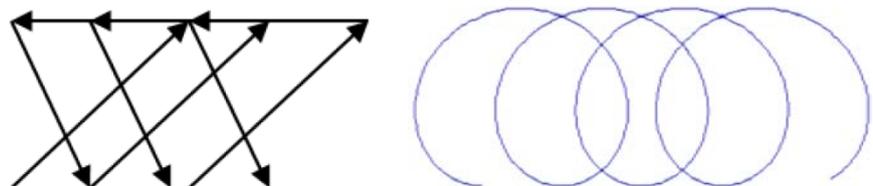


Figure 1.19 : Trajectoires de polissage manuel [Pessoles et Tournier-2009]

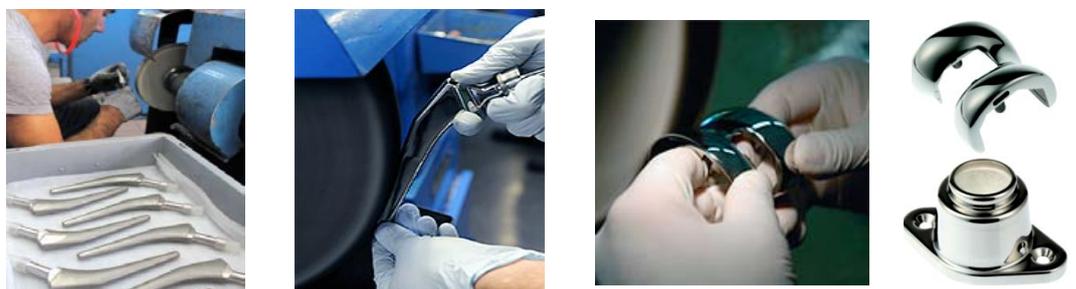


Figure 1.20 : Méthode de Polissage manuel

1.7.2. Polissage sur polisseuse conventionnelle

Les polisseuses conventionnelles (figure 1.21) permettent de polir aisément des surfaces planes. Les industries de l'électronique et de l'informatique sont toujours en demande de plus en plus élevées de précision pour divers appareils à cause de la densité de stockage des données élevées. La précision ultime obtenue par la finition est lorsque la taille des copeaux enlevés proche de la taille atomique ($\approx 0,3 \text{ nm}$) [Taniguchi 1983]. Pour finir les surfaces dans la gamme du nanomètre, il est nécessaire d'enlever de la matière sous la forme d'atomes ou de molécules, individuellement ou en groupes (Superfinition avec des copeaux très fins).

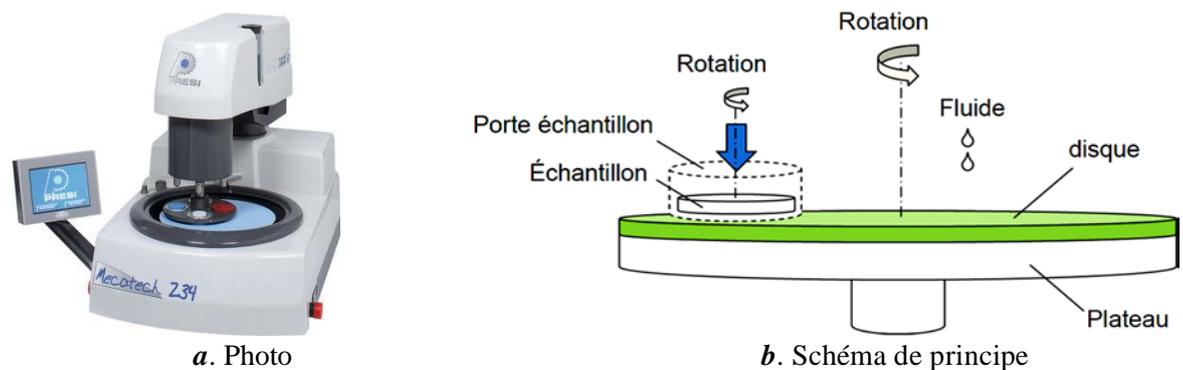


Figure 1.21 : Polisseuse conventionnelle

Le polissage mécano chimique est très utilisé dans ces industries car c'est un excellent procédé pour niveler et ajuster des surfaces à très petite échelle, les défauts observés sont de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Elles sont très utilisées dans le domaine des circuits intégrés pour réaliser des couches minces et planes de semi-conducteur ou pour réaliser des éprouvettes micrographiques.

1.7.3. Polissage avec méthodes non-conventionnelles (*non-mécanique*)

Au cours des dernières années, il y a eu beaucoup d'efforts pour élaborer des processus de polissage polyvalents. Le polissage, comme un post-traitement, est souvent indispensable pour obtenir une surface poli-miroir de haute qualité et une précision de forme à faible rugosité de surface.

Il existe plusieurs méthodes de polissages. Citons par exemple, le polissage abrasif fixe avec outil rigide, le polissage à abrasifs libres avec un patin souple, le polissage assisté par champs tel que le polissage abrasif magnétique [Kim et al. 1997], [Mori et al. 2003], [Yin et Shimura 2004] le polissage avec fluide magnétique [Shimada et al. 2003] et [Umehara et al. 1995], le polissage avec fluide magnéto-rhéologique [Jain et Jah 2004].

D'autres travaux utilisent un faisceau d'électrons [Uno et al. 2007] et le faisceau laser [Ukar et al. 2010] pour l'irradiation de surface à polir. Il existe également le polissage avec fluide assisté électro-rhéologique (Erf) [Kuriyagawa et al. 2002], [Zhang et al. 2008 et 2010], et le polissage à jet abrasif [Yan et al. 2008], [Zhu et al. 2009].

Des études ont montré que les vibrations ont des effets positifs sur le polissage en raison des trajectoires elliptiques ultrasonores des outils de polissage.

Cette technique de polissage est utilisée pour la finition de surface de bord des plaquettes de silicium [Hocheng et Kuo 2002] et pour le polissage des micro-surfaces en verre avec de petits outils mis en vibration à une fréquence ultrasonique [Suzuki et al. 2006]. Elle est aussi employée pour le polissage ultra-précision à l'aide d'outil sphérique pour améliorer la rugosité de surface en acier inoxydable durci [Shiou et Ciou 2008].

Toutes ses méthodes sont basées sur la concentration des particules abrasives dans la zone de polissage par les effets du champ magnétique, fluide ou de celle du champ électrique. La performance de polissage assistée par champ se situe entre ceux de polissage abrasif fixe et polissage abrasif libre. D'autres études utilisent la technique de polissage mécano-chimique [Bernard 2006] des pièces en cuivre pour comprendre et modéliser le phénomène d'enlèvement de matière.

Le polissage automatique au laser et le polissage assisté par champs sont efficaces dans la finition des surfaces plates, mais n'ont pas encore été appliqués sur des surfaces à forme libre en raison de difficultés techniques relatives à la maîtrise des différents paramètres de finition et d'ajustages. Pour améliorer la qualité de polissage et de faire face à l'insuffisance des travailleurs qualifiés, le processus de polissage nécessite de compétences exceptionnelles qui ne peuvent être dispensées par un ouvrier qualifié. Une solution alternative est d'utiliser le polissage automatique en exploitant les systèmes multi-axes (robots anthropomorphes) ou des machines outils 5-axes.

1.7.3. Polissage automatique

Le processus d'élaboration d'un produit industriel est défini par un ensemble d'étapes qui permettent, à partir d'un besoin ou d'une idée, la réalisation d'un produit. À l'heure actuelle, la plupart des pièces mécaniques sont couramment réalisées par usinage 5-axes dans la masse. Une opération de finition sur centre d'usinage grande vitesse 5-axes permet de réaliser des formes complexes avec une productivité importante. Cependant les surfaces nécessitant un état de surface supérieur doivent subir d'autres opérations de super-finition comme le polissage. Ces opérations coûteuses sont encore bien souvent réalisées manuellement.

L'automatisation de polissage a permis d'obtenir une qualité géométrique et micro-géométrique très fine jusqu'à l'obtention d'une surface dite polie miroir et de réduire les défauts d'aspect.

Très souvent, l'automatisation du polissage fait appel à une plate-forme de mouvement à commande numérique multi-axes, comme les robots anthropomorphes [Dieste et al. 2013] ou exploiter les machines-outils 5-axes pour réaliser les opérations de polissage [Chen et al. 2002], [Pessoles et Tournier 2009] ainsi que des centres de rectification [Denkena et al. 2010].

Le grand nombre d'axes de ces derniers permet d'atteindre facilement une position de l'espace avec une orientation imposée. Il est possible d'utiliser un asservissement en position à partir d'un capteur d'effort [Nagata et al. 2007] pour obtenir un effort de contact le plus constant possible ou plus rarement d'un capteur d'émission acoustique [Ahn et al. 2002].

Dans les deux méthodes, les trajectoires utilisées sont issues du savoir-faire des polisseurs, soit des courbes trochoïdales qui imitent les mouvements répétitifs des polisseurs. Les courbes porteuses des trochoïdes sont principalement de type balayage ou fractale [Tam et al. 1999] et [Chaves-Jacob et al. 2013].

1.7.3.1. Polissage automatique avec asservissement en effort

Les robots industriels sont bien implantés dans les procédés de fabrication modernes pour leur bonne répétabilité de l'opération d'usinage (tel que défini dans l'ISO 92983), les robots commencent à être utilisés pour des applications complexes telles que le forage, le rivetage, le placement de fibres, etc. ... Dans le cadre du polissage, l'asservissement de la position par retour d'effort permet de maintenir le contact et évite d'enlever trop de matière si l'effort devenait trop important [Mizugaki et al. 1990], [Ryuh et al. 2006]. Mais les modèles d'abrasion trouvés dans les littératures montrent que l'enlèvement de matière est fonction de la pression au niveau du contact.

Pour un effort donné, le contact entre l'outil et la pièce peut varier en fonction de la géométrie de la pièce et de la trajectoire de l'outil [Guiot 2012]. Donc, même si l'effort est maintenu constant par l'asservissement, la pression de contact et par conséquent l'enlèvement de la matière ne seront pas constants. Ainsi, le maintien d'un effort constant ne permet pas de garantir une abrasion constante sur toute la surface.

1.7.3.2. Polissage automatique avec asservissement en position

Aujourd'hui, la plupart des industries utilisent les machines-outils CNC pour réaliser, pratiquement, tous les processus d'enlèvement de matière. Les machines-outils 5-axes sont utilisées pour la finition des surfaces de formes complexes, le vidage de poche 5-axes ou l'usinage sur le flanc de l'outil des turbines [Chaves-Jacob 2009].

Le polissage sur ces machines est assez récent, l'avantage principal de ce moyen étant de pouvoir réaliser les opérations de fraisage et de polissage sur la même machine [Pessoles et Tournier 2009] et [Chaves-Jacob 2013]. Le contrôle en effort des machines outils n'est pas facile à mettre en œuvre, mais il est possible d'utiliser un asservissement passif au niveau du porte-outil. La vitesse des déplacements des axes et la position des éléments mobiles sont contrôlées par un asservissement en boucle fermée. De manière générale, les machines-outils 5-axes ont une rigidité importante, ce qui leur confère une bonne précision (proche du μm) et une bonne répétabilité de production.

Que ce soit en polissage automatique avec asservissement en effort ou sans, pour maîtriser réellement le polissage automatique, il est nécessaire de maîtriser le contact par la position ou par l'effort. Le choix d'une solution technologique dans le cadre de l'usinage est un compromis entre, capacité spatiale, capacité cinématique et capacité machine vis-à-vis d'un coût d'investissement donné.

1.8. Détermination d'état de surface

Quel que soit le produit, les surfaces industrielles comportent des irrégularités. Celles-ci constituent des écarts locaux ou globaux par rapport à une surface idéale appelée surface nominale. Pour caractériser une surface et son comportement, il est nécessaire de mesurer la surface afin d'acquérir des informations quantifiées sur sa géométrie.

L'étude de l'état de surface est importante pour des pièces telles que les moules utilisés pour le moulage par injection ou des matrices pour les pièces forgées de précision. La qualité de ces derniers affecte directement la qualité des pièces produites.

Le polissage est le procédé qui vise à donner des caractéristiques micro-géométriques à toute l'étendue d'une surface métallique. Aujourd'hui on ne saurait imaginer le fonctionnement correct des organes des machines sans assister à une certaine qualité des surfaces, selon lesquelles elles s'assemblent. Pour cette raison la connaissance approfondies des relations empiriques entre l'influence des facteurs de base d'usinage par l'outil coupant (propriétés du matériau travaillé, vitesse de coupe V_c , Avance V_f , profondeur de passe a_e , géométries et caractéristique de la partie active de l'outil, fluide réfrigérant et lubrification, et ...) et la qualité de la surface est recherchée.

L'un des facteurs importants qui influent sur la finition de surface c'est la taille des grains abrasifs. Ainsi, des grains plus fins permettent d'obtenir une surface plus lisse et réduisent le taux d'enlèvement de matière. En raison de la répartition aléatoire des grains dans les outils abrasifs, les travaux de recherche dans ce domaine sont principalement expérimentaux. Récemment, en appliquant la théorie stochastique, des méthodes ont été développées pour modéliser la rugosité de surface en meulage [Wang et al. 2002] et [Tam et al. 1999].

Néanmoins, [Felder 2009] précise que la hauteur des rayures à la surface 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 suivante fournit un modèle approximatif du critère (R_a) pour le polissage trois corps d'une surface métallique.

$$R_a = \frac{1}{10} \cdot \frac{\alpha_a}{1 + \left(\frac{H}{H_b}\right)}$$

Où :

α_a est le rapport entre la taille moyenne du grain abrasif et la pénétration totale ;
 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 d'usure des grains.

Ces résultats sont confirmés par les travaux de [Lacharnay 2010]. Il a étudié l'évolution de l'état de surface au cours d'une opération de polissage pour différents types d'abrasifs (figure 1.22).

Bien sûr, il est très important de préciser que les temps de polissage pour atteindre des valeurs asymptotiques identiques sont cohérents avec les durées de vie des abrasifs, puisque le taux d'enlèvement de matière est proportionnel à la pression exercée par les grains abrasifs sur la surface. Il est aussi possible que les valeurs atteintes sont dues aux caractéristiques de l'outil abrasif et à leur usure.

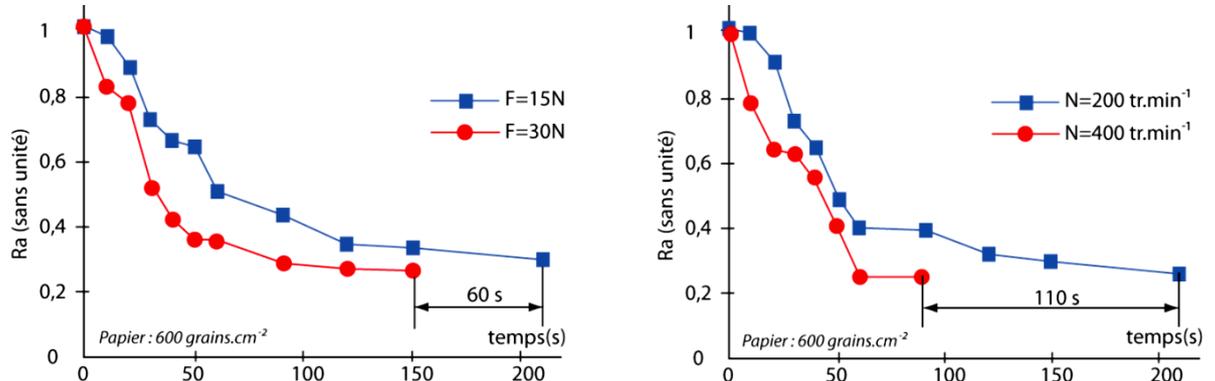


Figure 1.22 : Influence de l'effort et la vitesse de polissage sur R_a avec # 600 [Lacharnay 2010]

L'état de surface s'améliore en réduisant la taille des particules abrasives entre deux opérations successives. Différentes études menées par [Grandguillaume et al. 2015], [Lacharnay et al. 2010] et [Tsai et al. 2006] 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. [Lacharnay et al. 2010] met clairement en évidence l'intérêt de réduire progressivement la taille des grains pour atteindre la rugosité recherchée (figure 1.23).

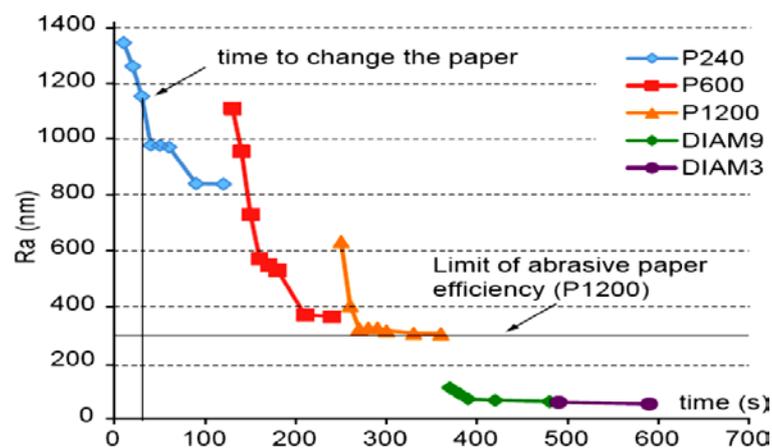


Figure 1.23 : Evolution de la rugosité en fonction du temps [Lacharnay 2010]

En effet, on observe que le taux d'abrasion augmente quand l'effort de polissage augmente, ce qui permet de supprimer les marques et les crêtes laissées par les opérations de fraisage ou de polissage précédentes.

Par contre, [Huissoon et al. 2002] a mis en évidence à l'issue de ses travaux expérimentaux une réelle influence de l'effort presseur sur la rugosité résultante, il cherche par un plan d'expérience à optimiser la rugosité en jouant sur les paramètres (Force, inclinaison de l'outil, la vitesse d'avance et de rotation).

D'autres travaux mettent en avant d'autres paramètres proposés par la norme ISO25178-2.

[Hilerio et al. 2004] et [Suh et al. 2003] 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.

A signaler, que l'étude menée par [Quinsat et al. 2012] a permis de préciser les différentes conditions pour relever la topographie d'une surface polie à l'aide d'une sonde confocale à lumière blanche sur un centre d'usinage 5-axes. En effet, pour les pièces polies et de grandes tailles comme les matrices d'emboutissage, un Rugosimètre 3D peut être utilisé. De plus, le fait de ne pas démonter la pièce, on peut réduire les erreurs de mesure sur l'état de surface.

[Klocke et al. 2011] 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.

[Xi et Zhou 2002 et 2005] a développé une méthode pour la modélisation et la prédiction de la rugosité de surface avec meule rigide pour différents paramètres tels que la pression de contact, la dureté de la pièce et la granulométrie. Par suite, les estimations de rugosité, à l'aide d'un outil souple sont, généralement, réalisées expérimentalement tel que présenté par [Huissoon et al. 2002].

L'approche cinématique de simulation employée par [Nguyen et Butler 2005] et [Liu et al. 1998] pour déterminer les différentes trajectoires, ensuite, ces trajectoires sont combinées ensemble et équilibrées de la façon appropriée pour créer une surface. Selon les méthodes soustractives, employées par exemple par [Chakrabarti et Paul-2008] aussi que [Darafon et al. 2012], les modèles des grains sont soustraits d'un modèle d'objet d'une façon par étapes pendant que les tranchants se déplacent le long de leur trajectoire.

Savio et al. 2009, ont étudié les caractéristiques de la rugosité de surface, qui à été exprimée à la fois par la Courbe Abbott-Firestone et les paramètres de rugosité S_a , S_q , S_v et S_z extraites de la surface de la pièce usinée, filtrée par un polynôme du second degré selon la norme ISO/CD 25178-2. La distribution de pression dans la zone de contact est estimée d'après la théorie de Hertz.

Wu et al. 2007, utilisent une meule souple à tête sphérique pour polir des surfaces de forme libre. Un grand nombre d'expériences à été réalisé avec différentes conditions de polissage pour optimiser le processus. Le paramètre S_p à été près comme paramètre d'évaluation pour vérifier l'efficacité et la qualité du polissage.

Ando et al. 2005, ont utilisé un outil flexible stratifié avec une couche élastique pour polir une surface sphérique. La méthode Taguchi a été utilisée pour déterminer les paramètres optimaux de polissage [Lin et al. 2000 et 2003]. Mais aucune de ces études fournissent une procédure de polissage efficace de leurs méthodes.

En effet, certains autres paramètres comme l'usure de l'outil et la lubrification doivent également être pris en compte. Les quelques procédés présentés précédemment dans la littérature ne sont que les procédés les plus courants de finition de surface. On trouve entre autre, le polissage avec abrasifs magnétiques [Mori et al. 2003], le polissage par écoulement d'abrasifs et par écoulement ultrasonique d'abrasifs [Jones et al. 1998] et d'autres techniques permettant la finition de surfaces des pièces mécaniques.

Le choix des conditions de coupe s'avère un facteur très important dans l'usinage. Actuellement, les méthodes les plus utilisées pour faire ce choix sont des méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des utilisateurs des outils coupants (abaques, diagrammes par constat expérimental, etc.). Ces expériences, souvent très coûteuses, donnent une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins. Ainsi, l'objectif est de fournir à ces derniers un nouvel outil permettant de choisir les conditions de coupe de façon intelligente à partir d'un minimum d'expériences tout en prenant en compte des intérêts parfois opposés.

1.8.1. Définitions et importance de l'état de surface

L'état géométrique de surface d'une pièce, produit par les conditions de réalisation (usinage, formage), correspond à des irrégularités de surface, elle présente toujours des défauts par suite des erreurs systématiques d'imperfections, admissibles dans la fabrication.

Il est caractérisé par l'ensemble des défauts microscopiques (aspérités) dont le pas de distribution est relativement petit (figure 1.24). La mesure de rugosité permet de quantifier l'état géométrique de surface généralement par l'intermédiaire des paramètres de rugosité.

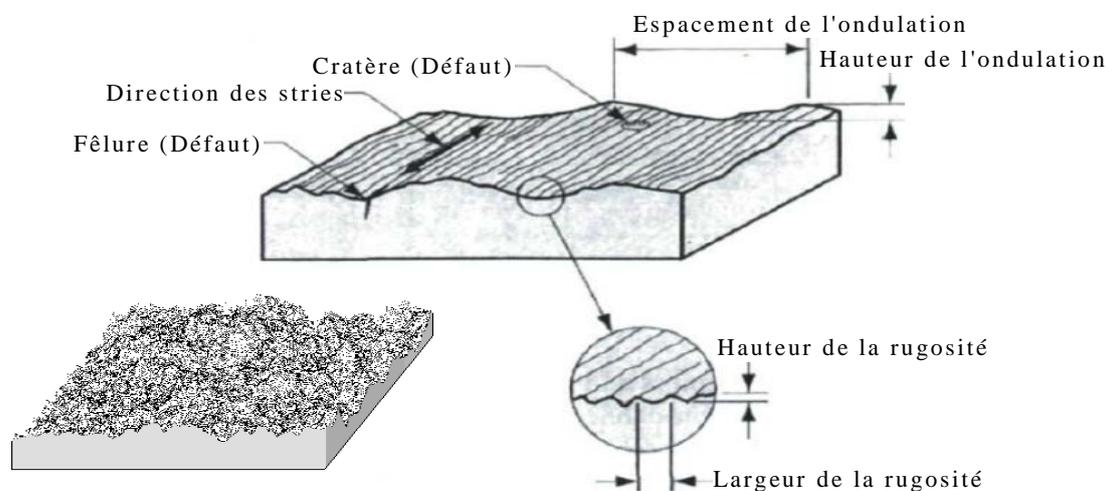


Figure 1.24 : Caractéristiques de la texture d'une surface [Mikell-2007]

Lors de la coupe des métaux, l'outil laisse à la surface usinée des traces sous forme de sillons orientés non seulement dans le sens de la coupe, mais également dans celui de l'avance. Une valeur de rugosité peut être prise comme critère indirect l'usure des outils de coupe.

Une surface, c'est la topographie réelle de la surface obtenue après élaboration (avec ou sans enlèvement de matière), elle comprend la forme nominale, l'écart de forme, l'ondulation, la rugosité, et les imperfections de surface comme illustrée sur la figure 1.25.

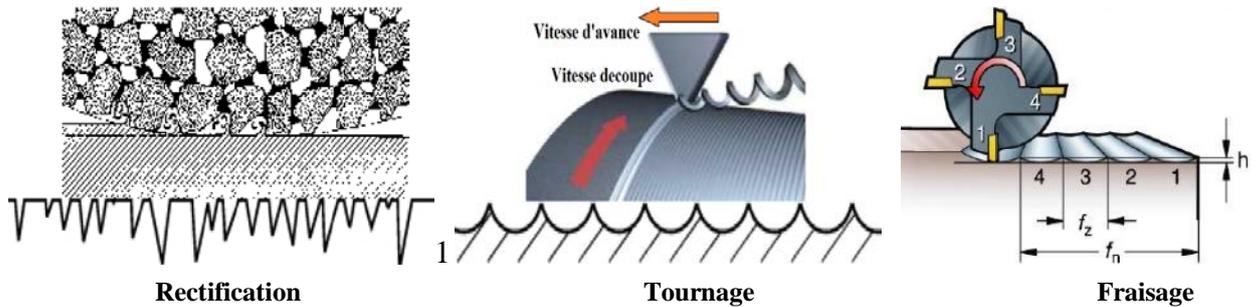


Figure 1.25 : Caractéristiques de la texture d'une surface [Mikell-2007]

La norme française NF E05-015-1972 classe les défauts géométriques selon quatre ordres :

- **Ordre 1 : Défauts de forme**, représente l'écart entre la forme théorique et la forme réelle de la surface obtenue après fabrication ou usinage de la surface [ISO-4287 97].
- **Ordre 2 : Défauts d'ondulation**, résultant d'une vibration à basse fréquence de la pièce, de l'outil, ou des deux, ces défauts, est constitué des composantes périodiques de la surface, de longueurs d'ondes inférieures à celles qui constituent le défaut de forme.

L'écart de forme toléré est matérialisé par une zone de tolérance (figure 1.26), à l'intérieur de laquelle doit se situer la surface réelle, résultant d'un positionnement (mise en place et serrage) de la pièce ou de l'outil, d'une déformation élastique ou thermique du système technologique en cours de travail. On peut utiliser un filtre de coupure pour séparer les composantes de forme de celles qui sont de l'ondulation [ISO-12085 96], mais il est difficile de définir avec précision la longueur d'onde de coupure entre forme et ondulation, et ondulation et rugosité.

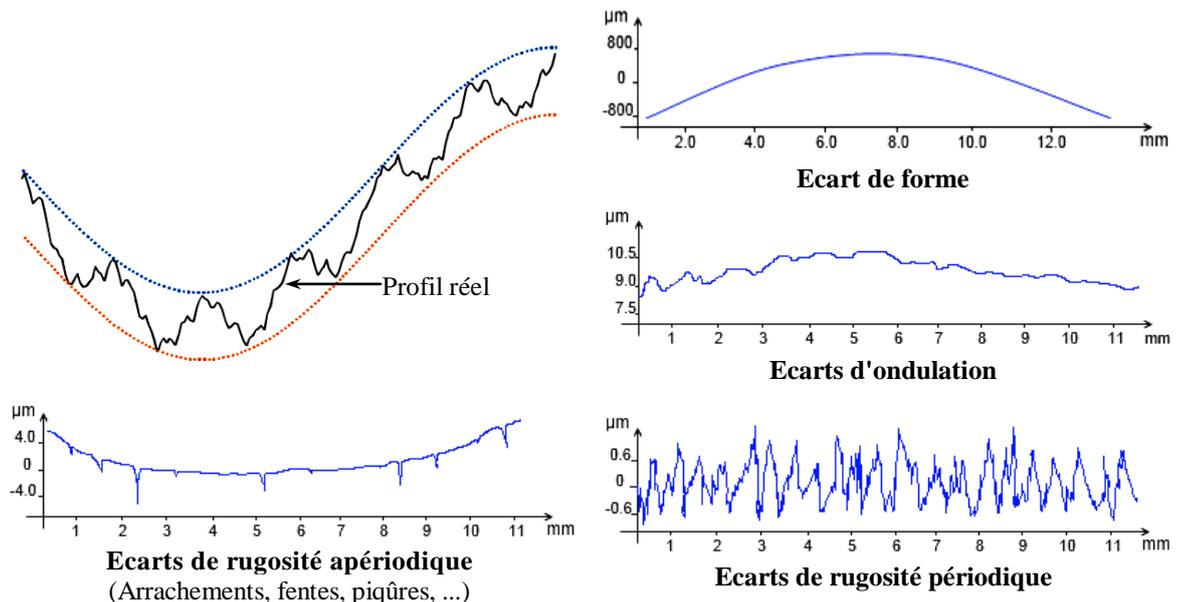


Figure 1.26 : Décomposition de l'erreur totale d'un profil

- **Ordre 3 : Défauts de rugosité**, sont constitués des composantes périodiques de la surface, de longueurs d'ondes inférieures à celles qui constituent le défaut d'ondulation.

L'origine de ce défaut peut être par exemple liée au passage de l'outil lors de l'usinage (traces géométriques de grains de la meule), et peut se matérialiser sur la surface par des stries ou des sillons sur la surface, pseudo-périodiques [ISO-25178-3 08].

- **Ordre 4 : Micro-rugosités** sont constituées des composantes aperiodiques de la surface, l'origine des composantes constituant le défaut de micro-rugosité peut être liée à un arrachement de la matière lors du l'usinage, ou à toute autre dégradation de la surface lors de sa fabrication, de sa manipulation, ou de son usage.

On retrouve ainsi dans ce type de défauts l'ensemble des défauts de surface telles que définies par la norme ISO 8785 [ISO-8785 98]. L'analyse des états de surface s'intéresse plus particulièrement aux écarts géométriques d'ordre 2, 3 et 4. Par définition, on appelle profil total, le profil mesuré. Par ailleurs, les défauts d'ordre 3 et 4 correspondent respectivement aux stries et aux arrachements matière et définissent la rugosité selon la norme [NF E 05-017].

La distinction entre stries et arrachements étant difficile sur les profils mesurés dans le cadre de cette étude, les écarts géométriques correspondants seront regroupés dans les défauts d'ordre 3. La figure 1.27 présente une synthèse des différents ordres de défauts surfaciques et de leurs caractéristiques.

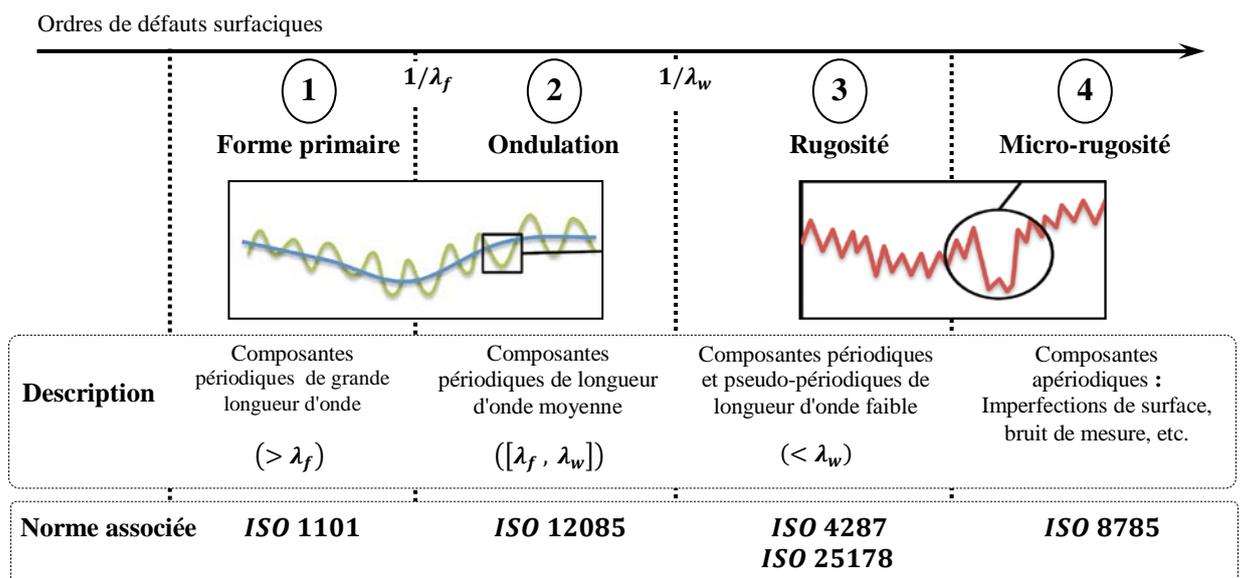


Figure 1.27 : Illustration de description de différents ordres de défauts surfaciques

Cette classification est basée sur la longueur d'onde des défauts observés vis-à-vis des dimensions de la pièce. Il apparaît donc, l'influence de la longueur d'exploration dans le résultat de la mesure : tout défaut de longueur d'onde supérieure à la longueur d'exploration ne pourra pas être pris en compte. La pratique usuelle consiste même à utiliser des paramètres de rugosité standards (R_a , R_t et R_z) mesurés sur des profils bruts redressés mais sans chercher à filtrer les défauts d'ordre 2 et 3.

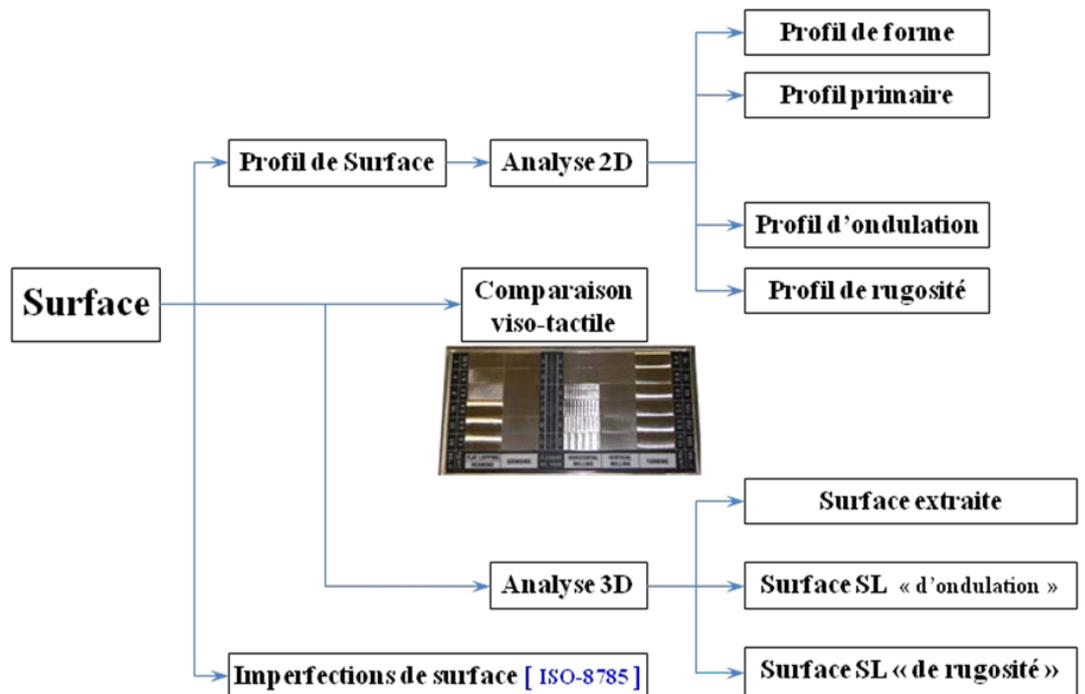


Figure 1.28 : Principe de la mesure des états de surfaces

1.8.2. Paramètres d'état de surface (différents types de profils ISO 3274)

Quand on veut déterminer les caractéristiques physiques d'une surface à partir de l'analyse d'un profil (2D) et/ou d'une image (3D) mesurée, deux questions majeures se posent : quelle définition mathématique peut-on donner à la rugosité, puisque c'est l'information que l'on cherche à déterminer, et comment peut-on la mesurer ?

On utilise en général un repère orthogonal cartésien dont l'axe des **X**, confondu avec la ligne moyenne, qui correspond à la direction de palpement (figure 1.29). L'axe des **Y** appartient au plan de la surface réelle et l'axe des **Z**, perpendiculaire à la surface de mesure et représente l'axe d'enregistrement des écarts (> 0 vers l'extérieur de la matière).

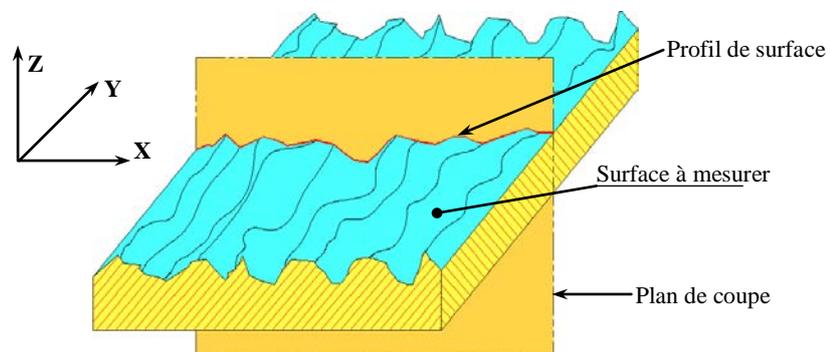


Figure 1.29 : Vue 3D de la topographie de surfaces extérieures

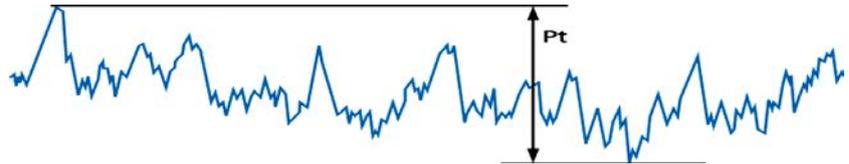
Si l'on coupe normalement une surface par un plan, on obtient une courbe appelée « Profil de surface », qui est le résultat du processus de palpement.

Les paramètres d'état de surface utilisés en profilométrie sont séparés en trois groupes selon le type de profil : les paramètres **P** qui sont calculés sur le profil primaire ; les paramètres **R** qui sont calculés sur le profil de rugosité et les paramètres **W** qui sont calculés sur le profil d'ondulation.

1.8.2.1. Profil primaire P

Le profil primaire non filtré (profil P) est le profil de surface réellement mesuré. Son filtrage selon la norme ISO 11562/ISO 16610-21 permet d'obtenir le profil d'ondulation (profil W) et le profil de rugosité (profil R).

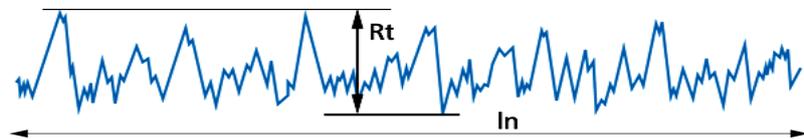
Selon la norme ISO 4287, toutes les définitions de paramètres caractéristiques sont valables à la fois pour le profil de rugosité, le profil primaire et le profil d'ondulation. La hauteur totale du profil P_t , W_t ou R_t est la hauteur maximale entre la saillie la plus élevée et le creux le plus bas du profil de la longueur d'évaluation.



1.8.2.2. Profil de rugosité R

Profil dérivé du profil primaire par suppression de grandes longueurs d'onde (ondulations) en appliquant le filtre de profil λ_c .

Ce profil sert de base à l'évaluation des paramètres de rugosité.



1.8.2.3. Profil d'ondulation W

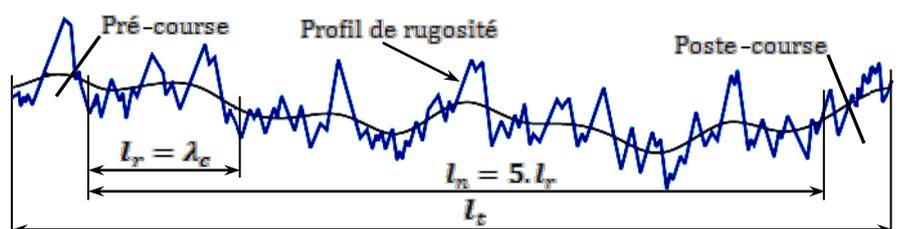
Profil dérivé du profil primaire par suppression de grandes longueurs d'onde en appliquant successivement deux filtres de profil λ_f et λ_c .

Ce profil sert de base à l'évaluation des paramètres d'ondulation.



1.8.2.4. Longueurs d'évaluation et longueur d'onde de coupure du filtre (Cut-off) λ_c

La longueur de mesure l_t est la longueur totale du mouvement du palpeur pendant le processus de palpation, il est choisi en fonction de la surface de la pièce soit selon la distance des creux soit selon les valeurs de rugosité attendues. Elle est plus grande que la longueur d'évaluation l_n afin de pouvoir déterminer le profil de rugosité issu du filtrage. La longueur de base l_r correspond à la longueur d'onde de coupure λ_c .



A l'exception de R_t et de $R_{mr(c)}$, les paramètres caractéristiques de rugosité sont définis à l'intérieur d'une longueur d'évaluation l_r . Ils sont toutefois déterminés comme valeur moyenne de cinq longueurs de base l_r .

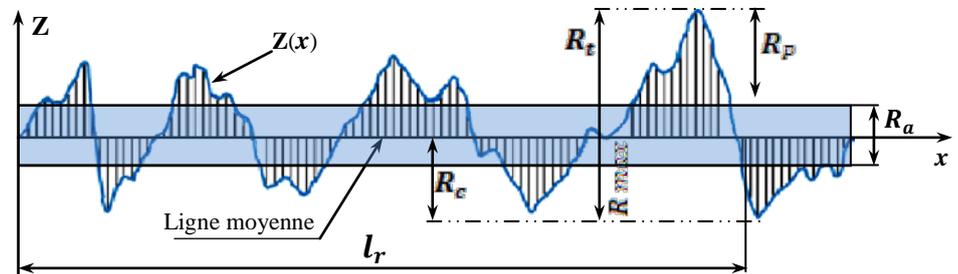
1.8.2.5. Rugosité d'une surface

La rugosité d'une surface donnée peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres, mais la pratique montre qu'un nombre restreint ($R_a, R_t \dots$) d'entre eux est utilisé. On peut citer notamment, parmi les plus utilisés :

- R_a : *Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité*

R_a : C'est la somme des surfaces des pics et des creux situés de part et d'autre de la ligne moyenne divisée par la longueur de base l_r .

Il s'agit de la moyenne arithmétique des valeurs absolues de toutes les ordonnées du profil de rugosité par rapport à une ligne moyenne à l'intérieur d'une longueur d'évaluation. Ce paramètre, ne peut fournir que des informations très limitées et ne prend pas en compte des saillies/creux extrêmes du profil :



$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

D'autres paramètres classiques sont définis comme suit :

- R_p : *Hauteur maximale des pics*

R_p : Il s'agit de la hauteur *maximale* du pic le plus élevé *observé* du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation.

$$R_p = \left| \max_{1 \leq j \leq N} r_j \right|$$

- R_t : *Hauteur maximale du profil R_t*

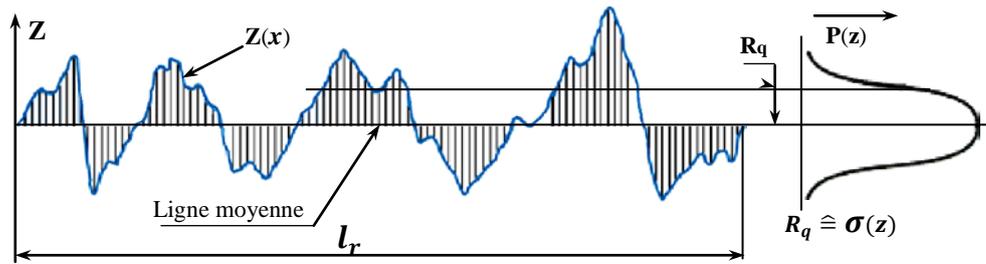
R_t : Rugosité totale. Il s'agit de la hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur la longueur d'évaluation : $R_t = R_c + R_p$

- R_q : *Ecart moyen quadratique*

R_q : **RMS** (Root Mean Square), qui est un paramètre représentant la déviation standard de la distribution des hauteurs des profils :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z(x)^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2}$$

R_q : Correspond à l'écart-type des ordonnées du profil et est donc beaucoup plus représentative sur le plan statistique que R_a .



➤ R_v : Vallée la plus profonde.

R_v : Il s'agit de la profondeur de la vallée la plus profonde du profil de rugosité sur la longueur d'évaluation.

Le tableau suivant, détaille certains des principaux indicateurs normalisés pour caractériser un profil d'un état de surface.

W_t	Hauteur totale du profil W , cet indicateur correspond au défaut d'ondulation du profil.
R_a	Ecarts moyens de rugosité, R_a est obtenu par une moyenne arithmétique des écarts sur la longueur l_r .
R_q	R_q est obtenu par une moyenne quadratique des écarts sur la longueur l_r .
R_p R_v	Hauteurs maximales, respectivement des saillies (<i>pics</i>) et des creux (<i>vallées</i>) sur la longueur de base l_r .
R_{sk} R_{ku}	Facteurs d'asymétrie et d'aplatissement des profils : si R_{sk} est négatif, le profil a pas ou peu de symétries ; et inversement si R_{sk} est positif. Idem pour le facteur d'aplatissement R_{ku} .
R_{pc}	Densité de pics sur le profil, calculée sur la longueur de base l_r .

L'état de surface possède une grande influence sur les propriétés physiques et mécaniques des pièces, tels que frottement de glissement et de roulement, la résistance à l'usure, la résistance à l'écoulement des fluides, l'adhérence des revêtements etc. Tous ces défauts peuvent être contrôlés par des méthodes d'exploration aussi bien électriques qu'optiques.

1.8.3. Techniques de caractérisation d'état de surface

Les surfaces et les interfaces jouent très souvent un rôle important lors de la fabrication ou de l'utilisation des matériaux dans les domaines de l'industrie. La rugosité, la morphologie et la forme précise des structures sont des paramètres clés qui déterminent les propriétés physico-chimiques des surfaces et/ou des interfaces. Il est d'un intérêt primordial de les analyser pour mieux connaître leurs caractéristiques.

L'analyse topographique est l'un des moyens de contrôle des matériaux à l'échelle microscopique et parfois à l'échelle nanométrique. Plusieurs techniques d'analyse de surface [Le palpeur classique, la MEB (Microscopie Electronique à Balayage), l'AFM (Atomic Force Microscopy), la microscopie confocale, la microscopie interférométrique, l'ellipsométrie, ...) sont actuellement utilisées pour contrôler et pour améliorer la qualité de surface aussi bien dans le domaine de la recherche que dans l'industrie.

1.8.3.1. Structure d'une surface

La surface physique d'un matériau peut être définie comme la partie extérieure, qui constitue la limite de l'espace qu'il occupe.

Nous pouvons définir une surface du point de vue de la géométrie analytique comme l'ensemble des points de coordonnées x , y et z vérifiant une équation de la forme : $F(x, y, z) = 0$. Ceci est une fonction permettant de représenter points par points les différences de hauteurs par rapport à une ligne de référence. Elle permet de représenter en tous points la déviation entre la topographie mesurée et le plan moyen.

Pour caractériser une surface, les mathématiciens définissent une surface par une équation, alors que les physiciens et les chimistes doivent l'observer et l'analyser à l'aide d'une technique de caractérisation. Le choix d'une telle technique dépend fortement du type d'échantillon à caractériser et du type d'information que l'on désire obtenir.

1.8.3.2. Principe général d'une méthode de caractérisation

Toute méthode de caractérisation est basée sur un même principe qui consiste d'une part, à envoyer une sonde sur un échantillon afin de créer une interaction sonde-échantillon et d'autre part, une analyse de la réponse que l'on obtient.

Donc la sonde joue le rôle d'une excitation qui peut être un faisceau de particules énergétiques, un rayonnement électromagnétique, un champ électrique ou magnétique, un palpeur mécanique, ... etc. La réponse de l'échantillon à cette excitation peut être externe avec émission d'un rayonnement ou d'une particule ou circulation d'un courant, mais elle peut aussi avoir lieu de manière interne (par exemple : population de pièges dans les semi-conducteurs).

La Figure 1.30 illustre schématiquement et de manière simple, le principe général des différentes méthodes de caractérisation d'une surface.

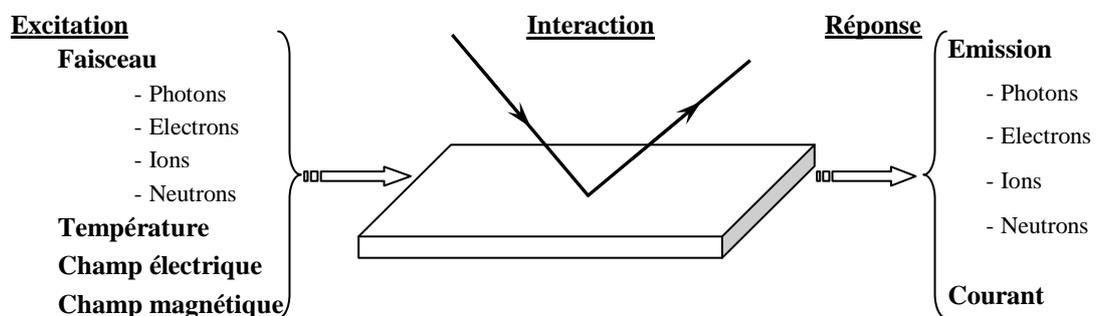


Figure 1.30 : Principe général des méthodes de caractérisation de surface

Plusieurs techniques permettent de reconstituer la géométrie 3D, puis d'en déduire les propriétés de rugosité par calcul.

Dans l'ordre de finesse on dispose des instruments suivants :

- **Palpeur à stylet** : Un palpeur vient en contact avec la surface et évalue les aspérités. Se présente sous la forme d'un petit boîtier électronique portable.

- **Microscopie à variation focale** : Il s'agit d'un microscope optique équipé d'un système d'analyse d'image qui cherche pour chaque point la position focale, et donc la hauteur, la plus probable.
- **Microscopie confocale** : il s'agit d'un microscope optique équipé d'un (ou plusieurs) laser qui sonde en chaque point la profondeur de la surface.
- **AFM (Atomic Force Microscopy)** : une fine pointe montée sur un cantilever vient suivre la surface de l'échantillon et en déduit les aspérités locales par l'intensité de la force subie.

Nous allons nous limiter dans cette brève discussion aux méthodes basées sur la détermination des caractérisations morphologiques permettant d'observer l'aspect extérieur des échantillons. Elles sont généralement associées à l'imagerie et à la métrologie : la microscopie confocale et le stylet mécanique (la profilométrie).

1.8.3.3. Microscopie optique confocale

Les techniques optiques sont aujourd'hui couramment utilisées pour mesurer la rugosité et plus généralement les microreliefs présents à la surface des objets.

Dans la microscopie optique classique, l'image est "plate", donnant des informations dimensionnelles latérales (x et y) mais pas axiales (z). Le contraste de l'image provient en général des variations de la réflectivité de surface. En limitant la profondeur de champ d'un microscope optique avec un système d'éclairage et d'imagerie optimisé, la microscopie confocale permet d'obtenir des informations quantitatives sur l'axe optique (z).

Un système optique de mesures comporte une source de lumière (sonde), un ensemble de composants optiques (réfléchissant, réfractant, diffusant, diffractant, absorbant, polarisant ou dispersif), un ou plusieurs capteurs ainsi que des sous-systèmes mécaniques, électroniques et informatiques.

Ces derniers assurent les liaisons et la compatibilité des différents éléments ainsi que l'acquisition et le traitement des mesures. Le microscope confocal dérive du microscope optique traditionnel, sauf que sa source lumineuse est un Laser qui balaye point par point la surface à analyser. Dans sa configuration « réflexion », il utilise un miroir semi-réfléchissant, qui réfléchit le rayon provenant de la surface vers un détecteur.

Ce dernier peut ainsi mesurer l'intensité lumineuse de chaque point et la stocker dans un ordinateur. Une platine motorisée déplace l'échantillon suivant l'axe z permettant la saisie de différents plans optiques dans l'épaisseur de l'objet.

Le principe du microscope confocal (Figure 31) consiste à focaliser, par l'intermédiaire d'un objectif, un faisceau laser qui va éclairer un point de la surface, puis à récupérer, sur un photomultiplicateur, le signal lumineux émis en ce point. (Péré 94).

Un diaphragme (Pinhole) placé devant le photomultiplicateur arrête tout signal ne provenant pas du plan focal.

Le signal reçu est amplifié dans le photomultiplicateur, traité afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, puis numérisé.

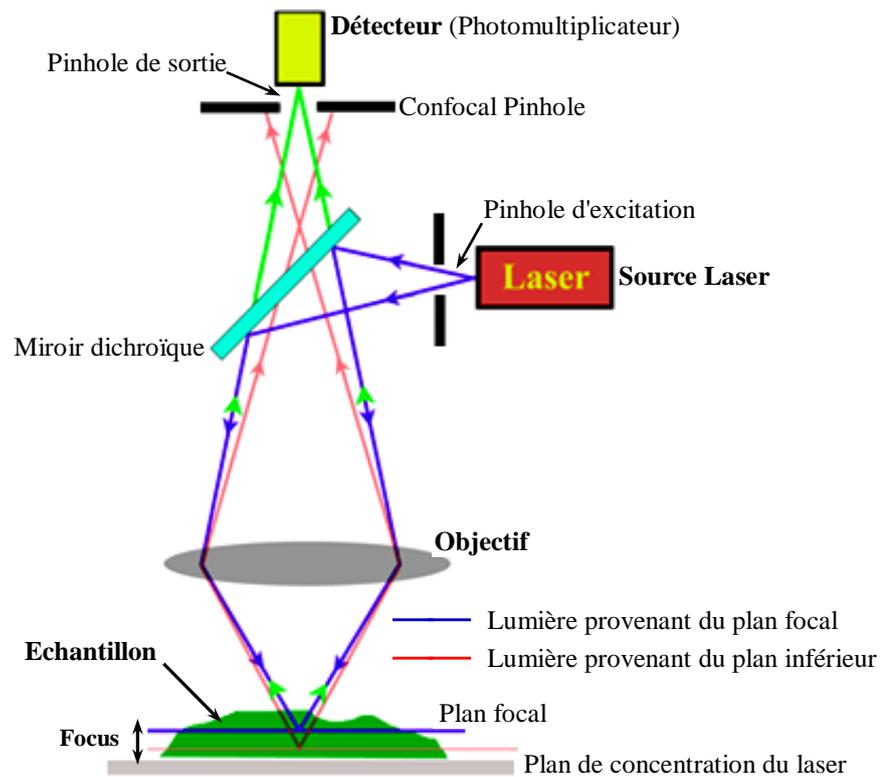


Figure 1.31 : Principe de la microscopie confocale

La microscopie confocale est une technique optique non-destructive permettant d'obtenir des coupes optiques non seulement dans le plan (x, y) mais également suivant un plan (x, z) parallèle à l'axe optique qui peut faire l'objet de reconstructions tridimensionnelles (Roblin 99). Un des inconvénients de la microscopie confocale est sa lenteur de mesure. En effet, la mesure 3D d'une structure nécessite jusqu'à quelques heures. Un capteur CCD donne ainsi une image xz . Un seul balayage est ensuite nécessaire (en y) pour faire la mesure 3D.

1.8.3.4. Technologie STIL

L'imagerie confocale chromatique (Brevet STIL (Sciences et Techniques Industrielles de la Lumière)) a été inventée en 1995 et est reconnue mondialement comme une technique précise et fiable pour la mesure d'épaisseur et de distance. Elle fait partie des rares techniques de métrologie 3D recommandée par la norme internationale ISO 25178.

Les capteurs (Confocale Chromatique) sans contact à haute résolution répondent aux besoins des applications métrologiques les plus exigeantes, qu'il s'agisse de la microtopographie, de l'analyse de formes et textures, de la mesure de rugosité ou du reverse engineering, permet de mesurer sur tout type d'objet (transparent ou opaque, poli ou rugueux) et tout type de matériel (métaux, verre, semi-conducteur, céramique, ...) sans préparation préalable de l'échantillon.

Elle permet de mesurer la rugosité d'un échantillon, de faire une acquisition de profil, de topographie et, si le matériau est transparent, d'en mesurer l'épaisseur avec une précision de quelques microns.

Les principaux avantages de la microscopie confocale sont sa souplesse dans la configuration de la mesure, sa précision et sa rapidité. Ces dispositifs permettent aujourd'hui la mesure d'une gamme étendue de surfaces industrielles et offrent la possibilité de caractériser la rugosité de l'échelle atomique jusqu'à une dizaine de millimètre de hauteur verticale. L'ensemble de ces échelles est regroupé dans le diagramme suivant :

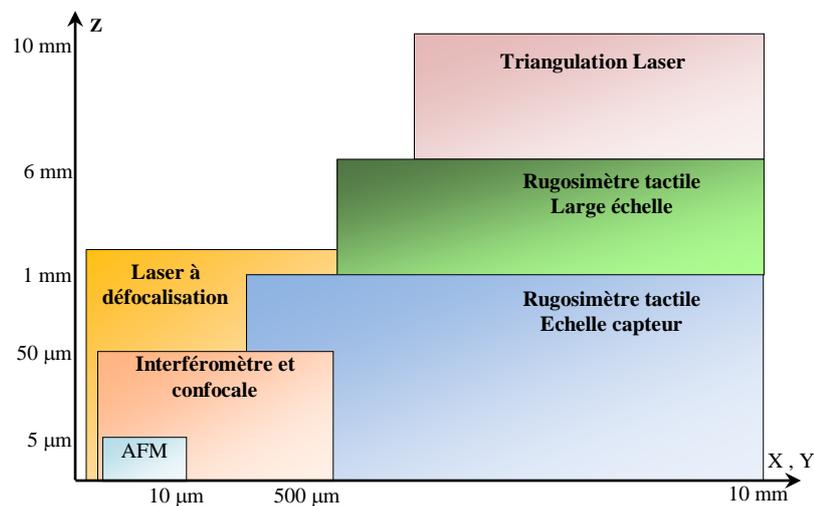


Figure 1.32 : Dispositifs métrologiques du laboratoire

1.8.4. Qualité du fini de surface en fonction de la fonctionnalité des pièces

Les procédés de fabrication, de bruts comme de finition, sont associés à des sollicitations thermomécaniques souvent élevées, qui induisent des propriétés hétérogènes au sein des pièces. Le niveau de précision d'une pièce dépend généralement de son utilisation dans les différents mécanismes.

La qualité des outils de coupe fait partie intégrante de la précision de la pièce. Les exigences géométriques et dimensionnelles de la pièce sont fondées sur des bases de fonctionnalité, qualité, économie et même de sécurité. La figure 1.33 indique les rugosités que l'on peut attendre des principaux procédés de production.

- $Ra > 6,3$: Spécifications peu sévères, correspondant à ce qu'il est possible d'obtenir avec un grand nombre de pièces brutes, sans usinage complémentaire $Ra = 6,3 \rightarrow$ Fini grossier ; $Ra = 25 \rightarrow$ Rugueux ;
- $1,6 \leq Ra \leq 6,3$: Spécifications moyennes, correspondent à ce qu'il est possible d'obtenir usuellement avec les procédés d'usinages classiques ;
- $Ra < 1,6$: Spécifications devenant sévères, l'utilisation de ces valeurs doit être faite avec réflexion et concertation car les temps de production et les prix de revient augmentent très rapidement à partir de ce cas, $Ra = 0,4 \rightarrow$ Fini très fin ; $Ra = 0,0125 \rightarrow$ Extra-fin.

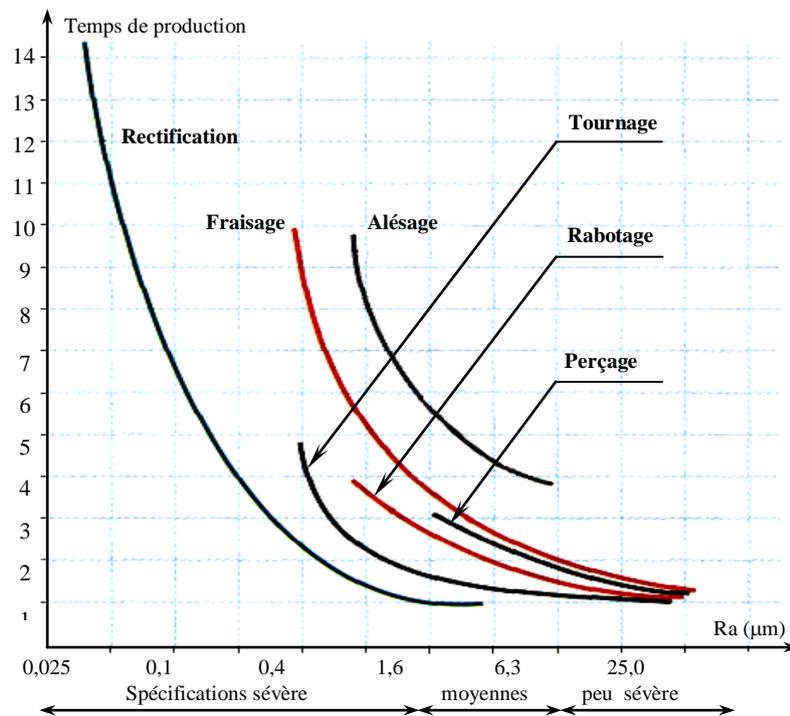


Figure 1.33 : Procédés d'usinage et états de surface

En milieu industriel, les critères utilisés pour déterminer les conditions de coupe incluent généralement le couple outil-matière, la rugosité standard et le diagramme brise copeaux.

D'autres aspects sont étudiés dans la littérature scientifique, notamment les propriétés micro-géométriques, mécaniques et microstructurales. Pour cette raison, la rugosité de surface a fait l'objet d'études expérimentales et théoriques pendant de nombreuses décennies.

1.9. Conclusion

Ce premier chapitre clos la revue de littérature sur les procédés d'usinage par abrasions et 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 employés et les paramètres à prendre en compte pour atteindre les objectifs de qualité imposés par le cahier de charges. 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 qualité d'état de surface et durée des opérations.

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.

Notre contribution consiste à étudier le procédé de polissage (y comprise la phase de pré-polissage) afin de faciliter l'automatisation de sa gamme d'usinage sur MOCN 5-axes équipée d'un outil flexible cylindrique travaillant à une pression de contact faible et constante pour garantir une bonne qualité de surface au moindre coût de polissage.



Chapitre 02

Définition des paramètres de polissage automatique sur MOCN 5-axes

2.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de préciser le contexte industriel de la fabrication des pièces mécaniques et de mieux comprendre les difficultés liées à l'automatisation du polissage de ces surfaces. Ceci concerne la maîtrise de la qualité géométrique des surfaces au cours d'une gamme de polissage automatique.

L'un des aspects novateurs de ces travaux est d'effectuer les recherches nécessaires pour réaliser ces opérations de polissage automatique sur centre de fraisage à 5-axes afin d'optimiser et maîtriser les différents paramètres permettant d'obtenir une qualité de surface souhaitée.

2.2. Pré-Polissage sur machines outils à CN 5-axes

2.2.1. Méthode de pré-polissage

Dans l'industrie de fabrication des moules pour l'injection plastique, la réalisation de surfaces dites « poli-miroir » est indispensable pour obtenir des pièces transparentes de hautes qualité et de supprimer les défauts géométriques. Traditionnellement la réalisation de ce type de pièces se fait manuellement. Nous nous intéressons ici à la réalisation de surfaces dites « poli-miroir » sur des centres UGV 5-axes. De tels états de surface sont nécessaires pour réaliser des pièces transparentes ou parfaitement lisses.

D'un point de vue économique, le polissage est un procédé coûteux pour lequel on a souvent recours à des entreprises sous-traitantes. Le processus proposé utilise un outil flexible monté sur une machine CNC 5-axes. Un des principaux avantages de cette méthode est de permettre la réalisation en même temps les opérations de fraisage et les étapes de finition sans démontage de la pièce.

La figure 2.1 présente le processus proposé.



Figure 2.1 : Processus de pré-polissage effectué sur une machine CNC

En usinage, le besoin principal des industriels est de pouvoir prédire rapidement le temps d'usinage avec des valeurs proches de la réalité pour l'usinage d'une pièce de forme complexe, et de déterminer les paramètres optimaux qui tendent à réduire le temps et par la suite le coût de fabrication tout en maîtrisant la qualité d'état de surface.

Dans le contexte de l'usinage, le déplacement des axes d'une machine à grande vitesse est assuré par des asservissements, assurant la position de l'outil, la valeur de l'accélération et sa dérivée. Le contrôle en effort des machines-outils n'est pas facile à mettre en œuvre, cet effort doit être maîtrisé afin d'éviter de créer des écarts géométriques de forme ou d'ondulation. On a vu l'importance du choix des trajectoires d'usinage et la maîtrise de l'effort en polissage sur la suppression des différentes marques ainsi que les risques de déformer la surface de la pièce [Chaves-Jacob et al. 2013].

Les centres d'usinage ne permettent pas de mesurer simplement les efforts en temps réels. Il n'est donc pas possible d'asservir directement le positionnement de l'outil en fonction de l'effort de contact. Afin de contourner ce problème, une solution, la déformation élastique de l'outil est utilisée pour contrôler la force radiale appliquée au cours de pré-polissage, qui est alors directement relié à l'engagement radial nominal programmé sur la machine à commande numérique [Chaves-Jacob et al. 2015].

2.2.2. Trajectoire de polissage

Pour mettre en évidence la perte d'efficacité de l'abrasion au cours d'une opération de pré-polissage, le taux d'enlèvement de matière doit être maîtrisé.

L'objectif donc est de définir le type de trajectoires de polissage adaptées en fonction de la nature du contact outil/surface, de générer rigoureusement la géométrie des trajectoires et d'assurer que leur exécution sur MOCN 5-axes se fait correctement et sans ambiguïté dans les conditions normales d'usinage. Le développement des moyens de production (centres d'usinage plus performants) et les logiciels de CFAO ont facilité l'usinage de formes gauches. La trajectoire d'usinage permet de définir la position et l'orientation de l'outil par rapport à la surface de la pièce, et de participer au contrôle des vitesses d'avance et de coupe.

De nombreux types de trajectoires de polissage ont été développés pour fournir une couverture uniforme de la surface polie. Des travaux actuels proposent des trajectoires de l'outil qui permettent d'optimiser à la fois l'usure des outils et le taux d'enlèvement de matière.

On trouve, les trajectoires en zigzag et en aller simple s'appuyant sur des plans parallèles qui ont été exploités dès le début de l'automatisation de polissage à cause de leur simplicité de mise en œuvre (Figure 2.3). [Tam et al. 1999] et [Rososhansky et Xi 2001], proposent une étude de polissage des surfaces de forme libre à l'aide d'un robot. L'accent est mis sur les trajectoires d'outils en polissage, leurs efforts, basés sur l'amélioration de l'uniformité de trajectoire de type zigzag et de fournir une couverture uniforme de la surface pendant le polissage.

En CAO, les surfaces complexes sont définies dans la plupart des cas à partir des courbes Bézier ou Nurbs, il est donc facile de s'appuyer sur ces courbes iso-paramétriques pour générer une trajectoire qui couvre la totalité de la surface. Cette méthode est utilisée par plusieurs auteurs pour décrire les trajectoires de polissage automatique pour des robots multiaxes [Márquez et al. 2005] et [Pessoles et Tournier 2009] sur machine 5-axes. Une sélection appropriée peut conduire à des économies consistantes en temps d'usinage, l'amélioration de la qualité de surface de la pièce et à l'augmentation du durée de vie de l'outil, ce qui conduit à une réduction globale des coûts et une plus grande productivité.

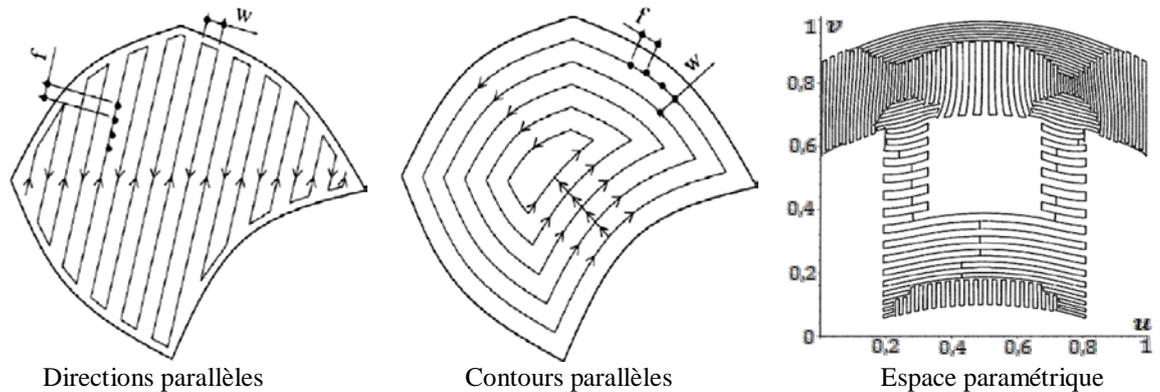


Figure 2.2 : Trajectoires exploitées en polissage automatique [Lasemi et al. 2010]

D'après [Ryuh et al. 2006], les trajectoires de polissage doivent être multidirectionnelles pour couvrir uniformément toute la surface de la pièce et permet de diminuer les erreurs d'ondulation (figure 2.3). De plus, le polissage multidirectionnel est proche de ce qui est fait manuellement. Dans ce type de polissage, les polisseurs permettent d'identifier des motifs qui s'apparentent à des trochoïdes. Ils s'efforcent aussi de modifier constamment l'orientation toujours perpendiculaire à la pièce afin de ne pas faire apparaître des rayures dans un sens privilégié.

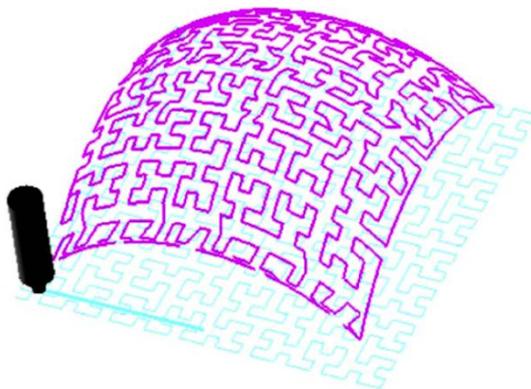


Figure 2.3 : Trajectoire d'outil en polissage [Ryuh et al. 2006]

C'est la raison pour laquelle certains articles utilisent des trajectoires fractales comme les courbes d'Hilbert et de Peano présentées sur la figure 2-4, exploitées également dans le cadre du polissage, car elles évitent d'obtenir une surface avec des motifs répétitifs d'ondulation [Mizugaki et al. 1992, Tam et Cheng 2010].

L'utilisation de ces trajectoires est possible en polissage automatique car les centres d'usinage à grande vitesse ont vu leur dynamique capable aujourd'hui d'effectuer ce type d'usinages, Il suffit de déterminer la géométrie des trajectoires en fonction de la nature du contact outil/surface, en utilisant le modèle CAO [Otkur et Lazoglu 2007, Rauch et al. 2009].

Ces trajectoires s'appuient sur des courbes trochoïdales qui imitent les mouvements effectués en polissage manuel. Ils sont calculés sur des courbes porteuses 5-axes dont sa nature dépend de la géométrie de la surface à polir et de l'opération de polissage considérée.

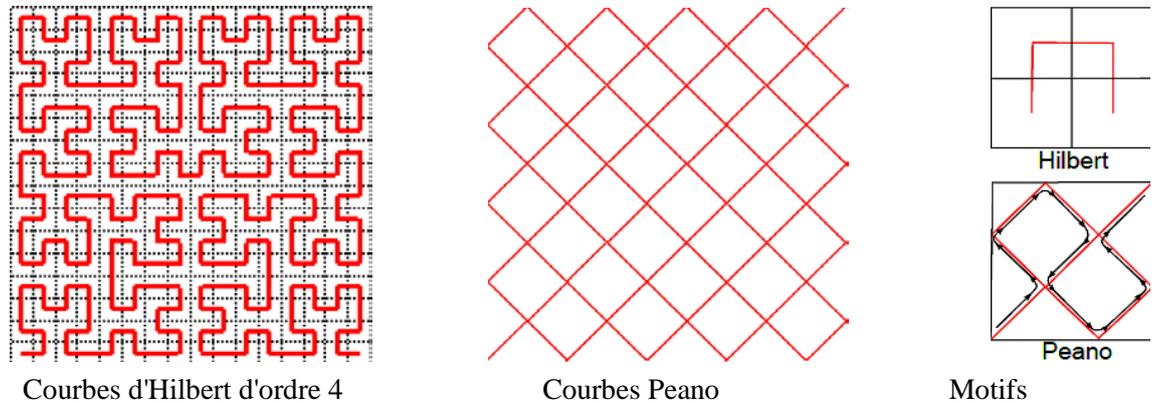


Figure 2.4 : Courbes fractales utilisées en polissage [Tam et Cheng-2010]

Dans notre travail, la trajectoire de l'outil de polissage 5-axes utilisée est une répétition de boucles élémentaires (*Motifs*) avec un petit mouvement d'avance porté sur des *courbes porteuses* [Chaves-Jacob et al. 2013].

Ce mouvement est présenté dans la Figure 2.5.

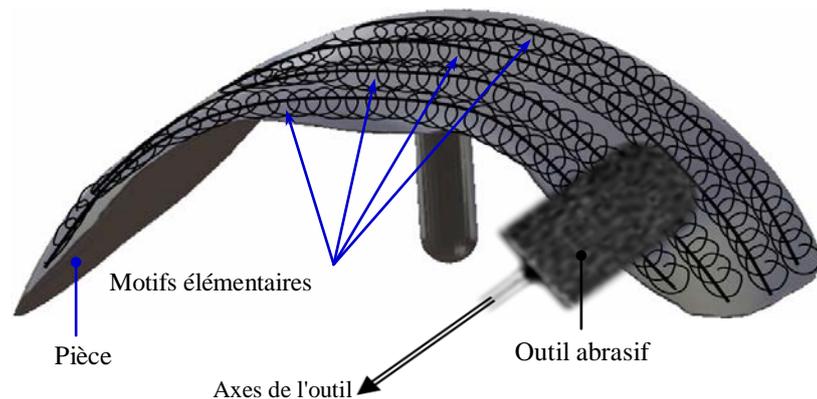


Figure 2.5 : Modèle de trajectoire de polissage

Les activités de génération de trajectoires et de fabrication doivent assurer la réalisation d'un produit fidèle au modèle CAO. La surface usinée est un ensemble de sillons ou de surfaces réglées approchant le modèle CAO. Donc, la trajectoire utilisée en polissage, est composée d'un ensemble de points M_i , calculé en exploitant le modèle CAO de la pièce à polir. Le modèle de la trajectoire de polissage emploie une interpolation polynomiale de cinq degrés, tel que présenté par [Chaves-Jacob et al. 2009].

2.2.3. Effort de polissage

La mise en œuvre d'un processus de polissage performant passe nécessairement par une maîtrise des paramètres opératoires et par conséquent du processus de coupe pour générer, optimiser et surveiller les trajectoires d'outils lors du processus de polissage.

Le problème majeur de polissage automatique est le contrôle de la pression de contact entre l'outil et la pièce à usiner, cette pression est très importante pour maîtriser et contrôler la quantité de matière à enlevé. De nombreux modèles plus ou moins complexes ont été développés pour estimer ces efforts suivant les conditions opératoires et la géométrie de l'outil.

- Le polissage automatique avec asservissement en effort est souvent utilisé pour les robots anthropomorphes. Il est possible d'utiliser un asservissement de position à partir d'un capteur d'effort [Nagata et al. 2007] avec un robot 6-axes, pour permettre de maintenir le contact le plus possible et éviter d'enlever trop de matière ou utiliser un capteur d'émission acoustique [Ahn et al. 2002] pour optimiser les différents paramètres de polissage. Avec [Márquez et al. 2005] un capteur de force piézoélectrique KISTLER 9257A est utilisé pour contrôler la force et maintenir un suivi constant de pression sur la surface de polissage.

Roswell et al. 2006, Liao et al. 2008 utilisent un outil meule rigide et un modèle de contact basé sur la théorie de Hertz, l'asservissement en effort est assuré à travers un système pneumatique et un capteur de pression au niveau de la tête du porte-meule. Tsai et Huang 2006, Yasuhiro et al. 2013 utilisent un outil flexible et le contrôle de la pression appliquée sur l'outil de polissage est suivi par un asservissement en boucle fermée de la force.

- En polissage automatique avec asservissement en position, un outil flexible et une machine-outil CNC 5-axes contrôlé en position, le contrôle est assuré par un contrôle passif au niveau du porte-outil. Pessoles et Tournier 2009, Chaves-Jacob et al. 2013, Deyang et al. 2014, avec ce type d'asservissement, le contact varie entre l'outil et la pièce et également en fonction de la géométrie de la pièce et de la trajectoire de polissage.

Pour rattacher la force de polissage et la pression de contact à la position entraînée, ces méthodes de pré-polissage sur MOCN doivent être caractérisées pour assurer la conformité de l'outil et atteindre les résultats souhaités de l'état de surface au cours du processus de polissage.

Dans le cadre de nos travaux, nous utilisons une méthode expérimentale pour caractériser l'influence de l'engagement de l'outil sur l'effort de polissage [Chaves-Jacob et al. 2015].

Pour ce travail, l'outillage que nous utilisons est celui que l'on retrouve dans les opérations de polissage manuel. Il s'agit d'un outil sphérique en élastomère, fixé sur un axe en acier, sur lequel viennent se monter les capuchons abrasifs.

L'outil d'abrasion est monté sur la broche de la machine à travers un cône porte-pince classique comme illustrée dans la figure 2.6.

Dans cette solution, la déformation élastique de l'outil est utilisée pour contrôler la force radiale appliquée au cours de pré-polissage, qui est alors directement relié à l'engagement radial nominal programmé sur la machine à commande numérique.



Figure 2.6 : Outillage de polissage utilisé dans l'expérimentation

Le taux d'abrasion des outils dépend de la vitesse de l'outil et de l'effort de l'outil sur la pièce. Il est donc nécessaire de déterminer les paramètres d'utilisation des outils par un plan d'expériences. Nous envisageons pour cela de mesurer les efforts radiaux de l'outil sur la pièce.

2.3. Paramètres liés aux opérations de pré-polissage sur MOCN 5-axes

L'enlèvement de matière, lors de la fabrication d'une pièce se décompose souvent en plusieurs étapes : ébauche, semi-finition, finition, puis éventuellement polissage, ... Chaque étape se caractérise par des objectifs spécifiques.

Pour le travail de finition, les objectifs recherchés sont principalement :

- La qualité de la surface produite ;
- Le temps de réalisation.

L'objectif de ces essais est d'étudier l'influence de différents paramètres d'exécution d'une opération de polissage sur l'enlèvement de la matière et la prédiction de l'état de surface.

Les paramètres qui influent sur le processus de pré-polissage sont liés à la géométrie de l'outil, de la pièce, au comportement mécanique des éléments constitutifs de l'outil ou encore au positionnement et à l'orientation de l'outil par rapport à la pièce.

2.3.1. Paramètres liés au processus

Les opérations de finition par polissage ont donné lieu à de nombreux travaux de recherche majoritairement basés sur différentes stratégies d'usinage (zigzag et contour parallèle). L'amélioration des performances des MOCN (cinématique, dynamique, ...) permet aujourd'hui de considérer de nouveaux types de trajectoires restées marginales jusqu'à présent, en particulier pour des questions de productivité.

Le polissage fait partie de ces stratégies d'usinage innovantes dont le domaine d'application initial était souvent intégré à l'usinage des matériaux durs. Afin de réaliser avec réussite l'automatisation complète du processus de polissage, il est nécessaire de prévoir et d'adapter des approches et des dispositifs afin d'assurer une meilleure qualité de production. Pour cela, nous avons utilisé dans notre démarche un centre d'usinage 5-axes ULTRASONIC 20-linéaire, équipé d'une commande numérique Siemens 840D (figure 2.7).

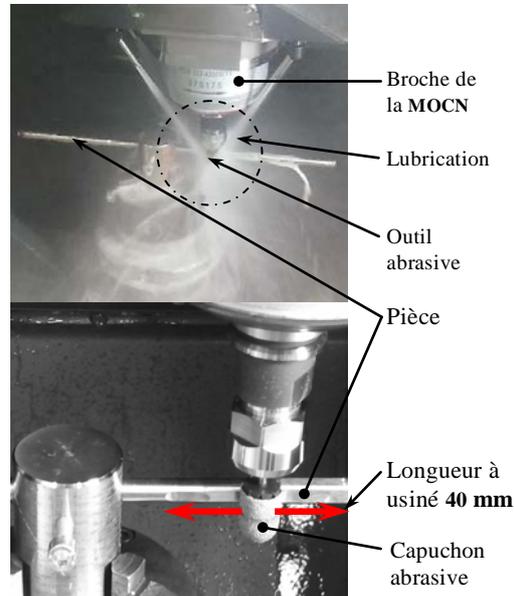


Figure 2.7 : Illustration du procédé de polissage

L'utilisation du flanc de l'outil de polissage pour réaliser une surface de forme libre impose la variation de l'orientation de l'axe d'outil le long sa trajectoire, d'où l'utilisation d'une machine 5-axes. Le procédé de polissage est illustré sur la figure 2.8.

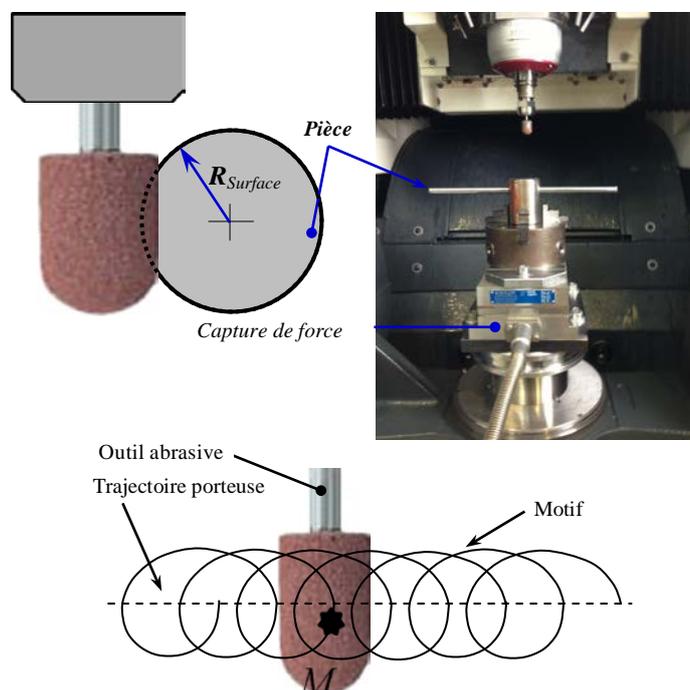


Figure 2.8 : Paramètres liés au procédé de polissage

La trajectoire de l'outil utilisé en polissage comprend des trajectoires porteuses qui couvrent toute la surface polie issue du modèle CFAO et des motifs élémentaires qui sont additionnés sur la trajectoire porteuse pour obtenir les mouvements de polissage. Il est ainsi possible de contrôler l'engagement de l'outil pour une meilleure gestion des efforts de coupe.

Le principal avantage de la description par trajectoire à motifs est de pouvoir générer des trajectoires complexes à partir d'un nombre réduit de paramètres. La courbe porteuse est construite à partir de la géométrie de l'entité de fabrication alors que le motif se base uniquement sur des critères technologiques. Ainsi, les modifications géométriques d'une entité n'affectent que la définition de la courbe guide, le motif étant indépendant. Cette approche permet de simplifier la construction et la modification des trajectoires.

2.3.2. Paramètres liés à l'outil

L'objectif premier de l'outil est d'imposer les mouvements relatifs entre le capuchon et la pièce et d'imposer un effort ou une pression de contact.

L'outil hémisphérique est l'outil le plus utilisé de part la simplicité de sa géométrie qui le rend mathématiquement plus facile à positionner pour réaliser les opérations de polissage, de plus, il génère des sillons réguliers qui conviennent parfaitement pour ce type d'opération.

Les outils de polissage automatique sont les mêmes que ceux utilisés en polissage manuel à savoir particulièrement des disques collés sur des portes-disques de formes toriques et des outils de formes sphériques.



Outil porte-capuchon



Outil porte-disque

Figure 2.9 : Outils de polissage automatique

Cet outil est composé d'un support en caoutchouc sur lequel le capuchon en papier de verre abrasif est monté. Différents capuchons sont disponibles avec différentes granulométries.

Les caractéristiques de l'outil sont présentées dans la figure 2.10

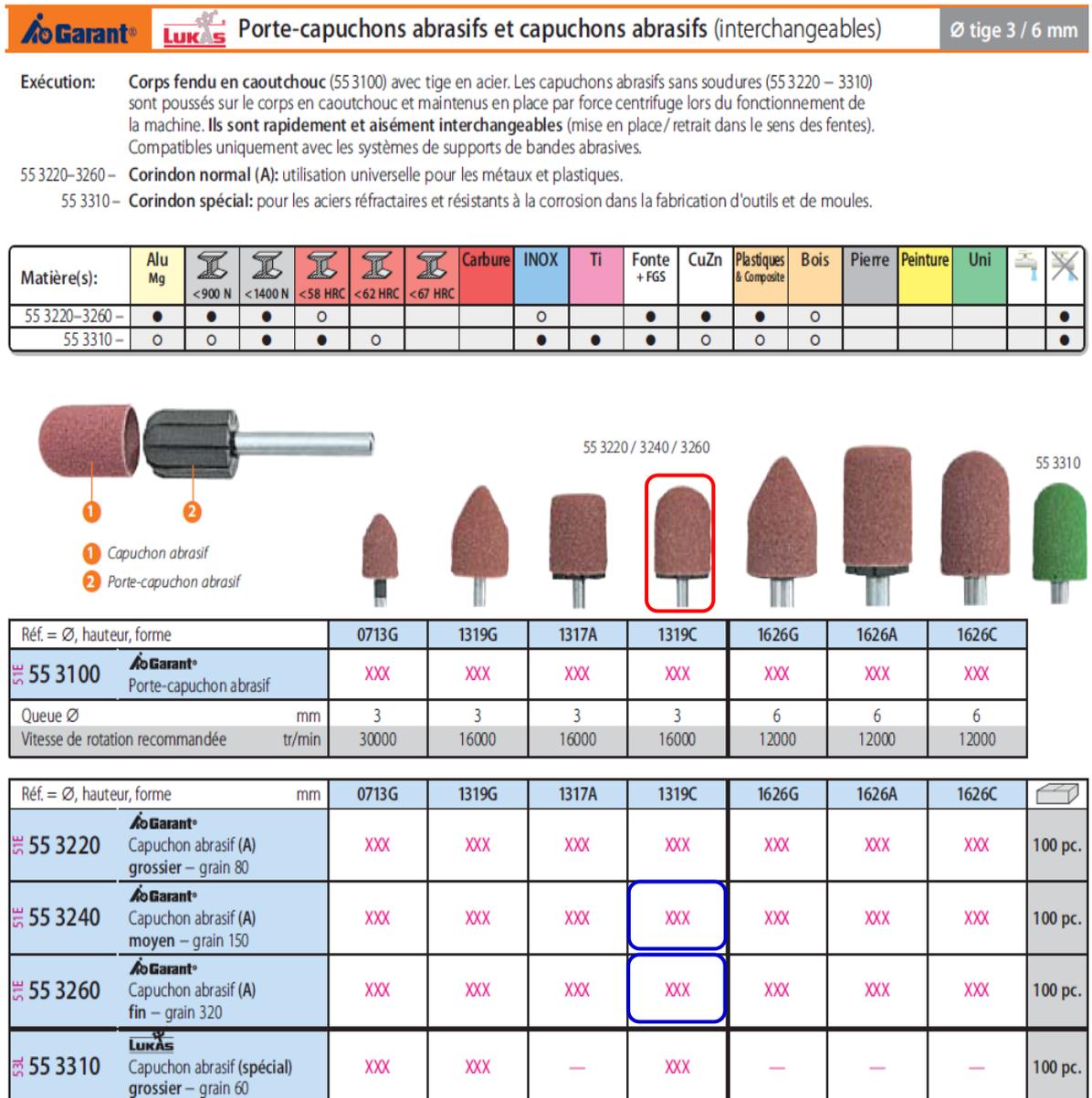


Figure 2.10 : Données constructeurs relatives aux outils de polissage

Le paramétrage géométrique utilisé pour piloter ces outils est le même que celui des outils utilisés en fraisage sur centre d'usinage 5-axes, les paramètres d'utilisation de l'outil sont représentés sur la figure 2.11.

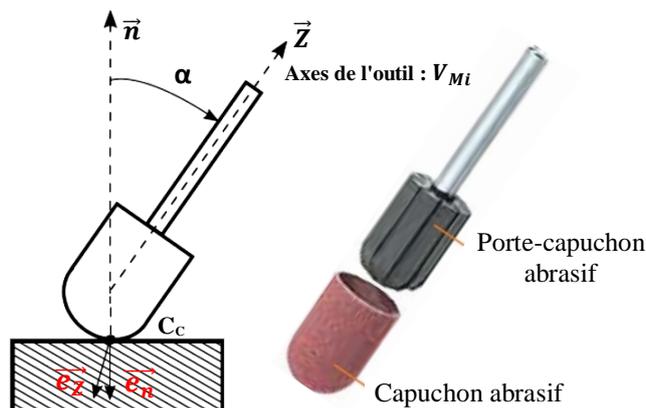


Figure 2.11 : Outil de polissage et ses paramètres

En ce qui concerne l'angle d'inclinaison α entre l'axe de l'outil \vec{z} et l'axe normal à la surface \vec{n} au point de contact c_c correspondant au pivotement de l'outil autour de l'axe (C_c, \vec{n}) il est détaillés dans les travaux de [Chaves-Jacob et al. 2013].

La granulométrie est définie par un nombre ; lorsque ce nombre augmente la taille de grain diminue. Par exemple, les capuchons avec des numéros de grain de # 150 et # 320 ont respectivement une granulométrie moyenne de 100 μm et 46 μm , selon les normes [norme].

2.3.3. Paramètres liés à la trajectoire

La trajectoire de l'outil joue un rôle très important sur l'automatisation du processus de pré-polissage, il s'agit de déterminer la géométrie des trajectoires en fonction de la nature du contact outil/surface, du mode de fonctionnement de l'outil et du taux d'enlèvement de la matière.

L'objectif est de définir la nature de ces trajectoires et de les adapter aux couples outil/entité géométrique retenus, de générer mathématiquement la géométrie des trajectoires et de s'assurer de leur exécution sur la machine-outil 5-axes en termes de non collision et de respect des différentes conditions d'usinage.

Les trajectoires de polissage proposées s'appuient sur des courbes trochoïdales qui reproduisent les mouvements effectués en polissage manuel afin de couvrir toute la surface.

Ces trajectoires trochoïdales sont calculées sur des courbes porteuses dont la nature dépend de la géométrie de la surface à polir et de l'opération de polissage effectué.

Quelle que soit la courbe porteuse, la trajectoire de l'outil est calculée dans l'espace paramétrique (2D) (U_1, U_2) de la surface à polir puis projetée dans l'espace 3D sur la surface.

Les motifs élémentaires dans l'espace 2D sont représentés par u_{motif} et par $u_{polynomial}$ pour l'espace 3D. Le motif élémentaire est basé sur la courbe trochoïdale. La figure 2.12 illustre le modèle trochoïdale et ses principaux paramètres.

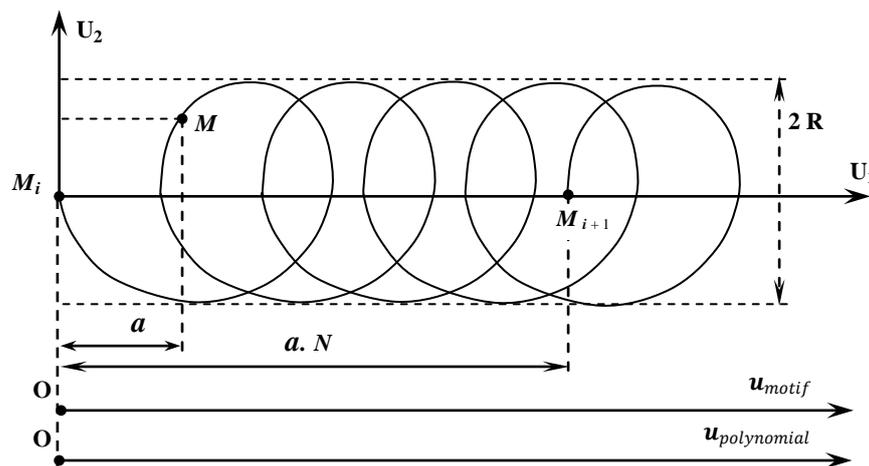


Figure 2.12 : Paramètres de la trajectoire de polissage [Chaves-Jacob et al. 2013]

La forme du motif est définie par deux paramètres R et a , qui caractérisent la géométrie du motif, si :

- $a \ll R$: Le modèle ressemble à un cercle. Ce type de modèle passe plusieurs fois au cours d'un même point de la surface.
- $a = R$: Le modèle passe exactement trois fois sur chaque point de la surface.
- $a \gg R$: Il ressemble à un modèle sinusoïde. Ce type de modèle ne passe qu'une seule fois sur la surface sans aucun mouvement en boucle.

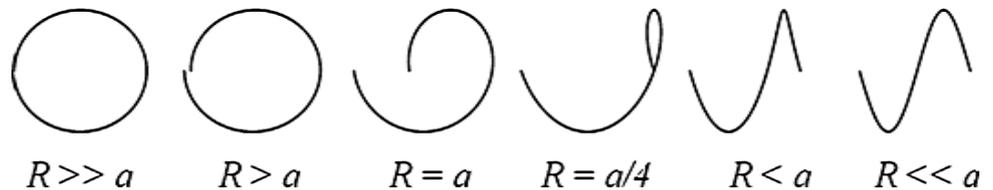


Figure 2.13 : Morphologies possibles du modèle trochoïde élémentaire

Par la suite, ce motif est appliqué dans un espace 3D le long de la trajectoire support outil qui d'imposer par la suite le nombre de motifs par millimètre.

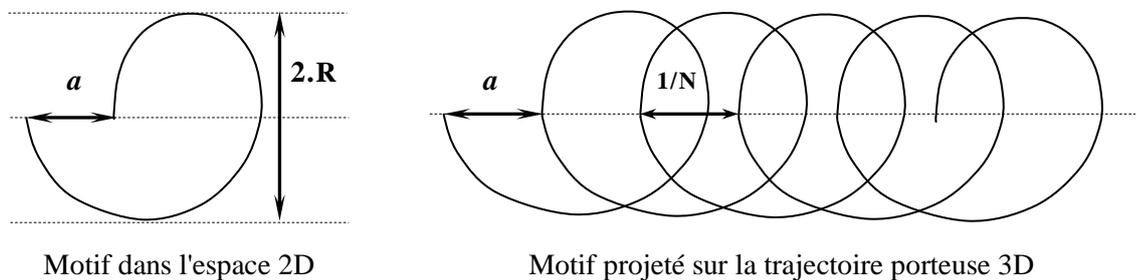


Figure 2.14 : Paramètres de la forme du motif

Ainsi, ces deux paramètres définissent la forme du motif, cette morphologie détermine directement le nombre de fois que l'outil va passer au-dessus d'un point sur la surface. Ce nombre est obtenu grâce à l'équation :

$$\text{Nombre de passages} = [4 * R/a - 1]$$

Parmi les courbes porteuses utilisées dans l'usinage à commande numérique, on peut citer les trajectoires parallèles, en zig-zag, les trajectoires circulaires concentriques, les courbes quelconques et les courbes fractales de Peano.

Quelle que soit la courbe porteuse, la trajectoire de l'outil est calculée dans l'espace paramétrique u, v de la surface à polir puis projetée sur l'espace 3D sur la surface.

L'étape suivante c'est le calcul de l'inclinaison de l'outil tout au long du chemin de l'outil sur la trajectoire porteuse. Une simple interpolation linéaire des composants ($I; J; K$) de l'axe d'outil, le vecteurs de direction (V_i, V_{i+1}), définit le système CAM (Computer Aided Design), pour les points M_i et M_{i+1} . La Figure 2.15 illustre la notation utilisée pour le calcul des axes de l'outil.

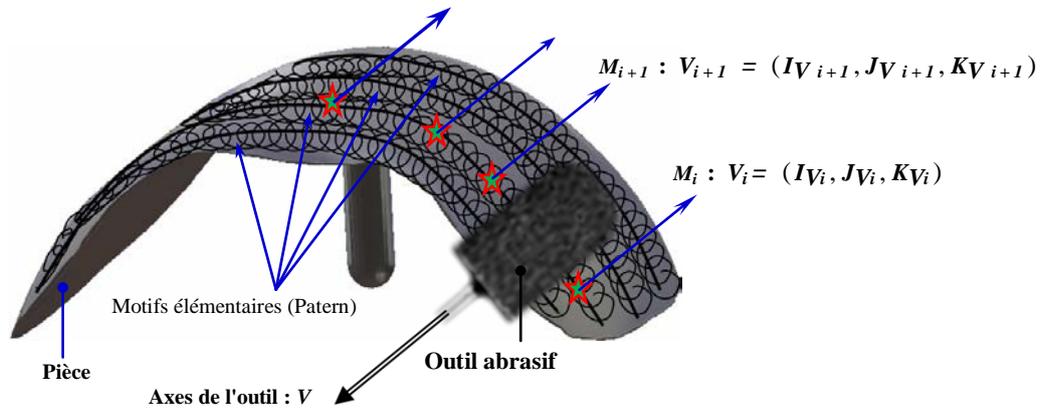


Figure 2.15 : Paramètres de calcul de la trajectoire de l'outil de polissage

La figure 2.16.a illustre le modèle trochoïdal et les principaux paramètres associés a et R (R définit l'amplitude du motif trochoïde et a la progression en boucle). Ces deux paramètres définissent la forme du motif et le nombre de fois que l'outil passe en un point de la surface.

Par la suite, le motif est appliqué dans un espace 3D le long de la trajectoire porteuse de l'outil qui impose le nombre N de motifs par millimètre.

La figure 2.16.b illustre un exemple de trajectoire de polissage et présente le paramètre N .

a) Motif élémentaire 2D

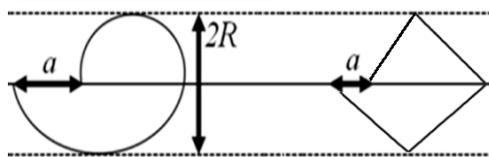
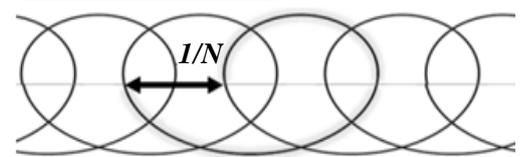


Figure 2.16 : a. Motif élémentaire trochoïdal

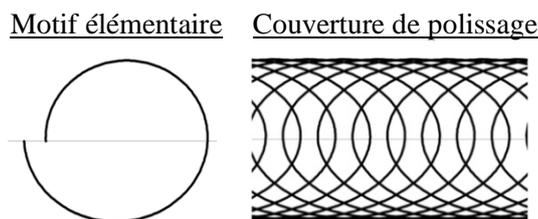
b) Motif élémentaire 3D



b. Motif déformé sur la trajectoire porteuse

Les figure 2.17.a et 2.17.b illustrent la forme des modèles expérimentés.

a) Trajectoire Trochoïdal



b) Trajectoire Triangulaire

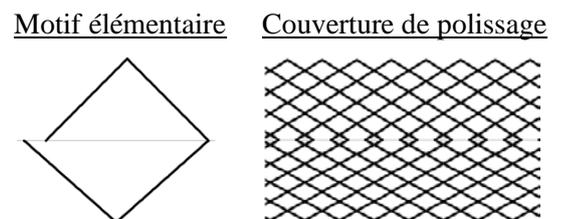


Figure 2.17 : Modèles des motifs expérimentés

2.4. Gamme de polissage

Le choix de la gamme de fabrication est vraiment le cœur du métier de l'usinage, c'est une suite d'opérations à réaliser pour passer de la pièce brute à la pièce finie. 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.

Une surface finie est rarement obtenue en une seule opération. Généralement, on effectue trois, voire quatre passes pour l'obtenir. Par ordre chronologique, ces opérations sont :

- ébauche (appelée aussi dégrossissage) ;
- semi-finition ;
- finition ;
- super-finition.

De plus, pour mener à bien le polissage d'une surface, il est courant de faire appel à plusieurs outils abrasifs, par exemple, différentes tailles de grains sont souvent utiles pour passer d'une rugosité grossière à une rugosité plus fine.

Un processus de polissage est composé de plusieurs séquences élémentaires, chacune faisant appel à un outil abrasif vital et à un mode opératoire spécifique. L'élaboration d'une gamme de polissage se fait alors en deux étapes. Tout d'abord, il est imaginé un enchaînement de séquences élémentaires, chacune étant caractériser par un outil abrasif, une machine associée et une trajectoire adéquate. Cette tâche est avant tout une question de savoir-faire et de l'expérience de l'opérateur. Dans une deuxième étape, 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, le recouvrement, la durée de l'opération.

La Figure 2.18 donne une vision globale 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.

Le choix d'un outil abrasif donne accès au type d'abrasif (agglomération, structure des grains, type de liant,), à la cinématique de la machine, à ses dimensions et à la taille des grains abrasifs.

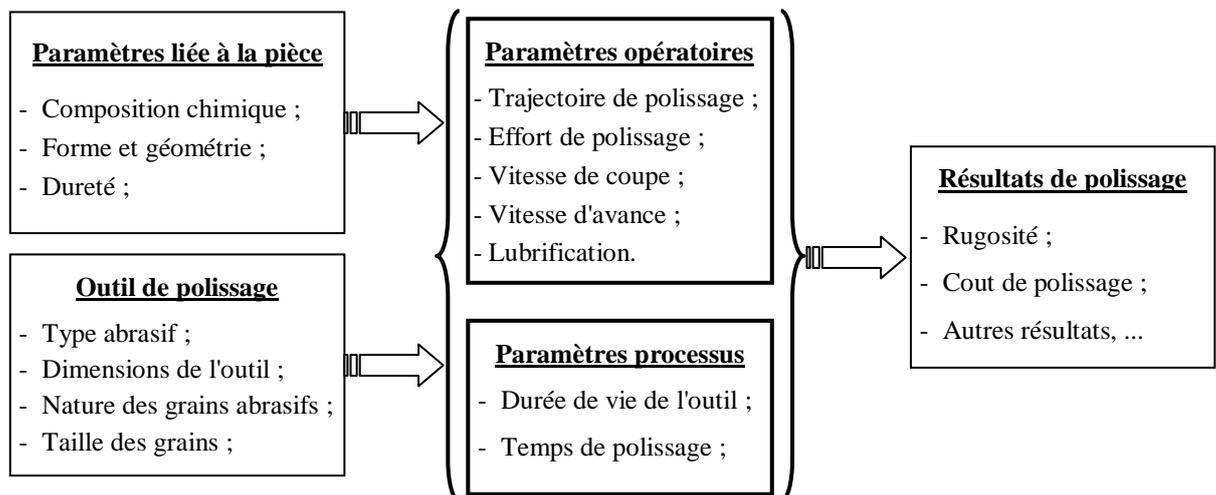


Figure 2.18 : Paramètres à prendre en compte lors de la mise en place d'un processus de polissage

Avec ces informations, les paramètres opératoires comme l'effort presseur, grosseur des grains, profondeur de passe, la trajectoire, le recouvrement (type de motif) et la lubrification sont fixés dans les plages d'utilisation recommandées. De ces choix résultent : la rugosité de la surface, la durée minimale de polissage/la consommation d'abrasif et les efforts induits sur la pièce.

Aujourd'hui, et par manque de documentations 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.

Pour obtenir une abrasion homogène sur toute la surface, il est donc nécessaire de contrôler ou de maîtriser le contact, l'usure des grains abrasifs et la trajectoire. Actuellement, il n'existe pas d'outil permettant lors de la génération de trajectoire de définir les paramètres de polissage respectant les contraintes imposées sur l'état de surface des pièces mécaniques.

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à maîtriser les défauts de surface générés au cours des opérations de polissage. Cette maîtrise passe par la capacité à contrôler l'enlèvement de matière au cours d'une opération de polissage afin de maîtriser la qualité de l'état de surface.

2.5. Conclusion

Le polissage automatique sur MOCN apparaît comme une solution alternative potentiellement intéressante pour maîtriser le processus de finition des pièces et diminuer les coûts de fabrication. De plus, la maîtrise du processus de polissage nous permettra au fur et à mesure d'optimiser les paramètres du procédé : géométrie de l'outil, granulométrie de l'abrasif, trajectoires de polissage. Ainsi, nous nous donnons les moyens d'établir un processus de polissage fiable permettant d'atteindre la qualité géométrique requise par les applications concernées.

Les travaux se focalisent donc sur la faisabilité de surfaces simples pour lesquelles des solutions d'outillage existent, en générant des trajectoires de polissage basées sur l'expérience des polisseurs manuels.

Pour améliorer la qualité géométrique des surfaces polies par la méthode de polissage automatique, il est nécessaire de modéliser les variations du pouvoir abrasif au cours des opérations de pré-polissage. La mise en place d'un essai pour cette étude est complexe. L'idéal serait de définir un essai avec des paramètres opératoires constants :

- Définition de la géométrie des outils de polissage nécessaire à l'obtention de la qualité requise et validation des conditions d'utilisation (efforts de polissage) ;

- Définition des trajectoires de polissage associées sur la base de courbes trochoïdales portées sur des courbes porteuses.
- Exécution de ces trajectoires sur la machine tout en respectant les conditions d'usinage.
- Caractérisation d'un état de surface poli miroir à l'aide des paramètres normalisés.

La méthode proposée utilise un outil flexible constitué d'un capuchon de papier de verre monté sur un support en caoutchouc. L'opération de pré-polissage est réalisée avec une trajectoire d'outil composée d'une trajectoire porteuse optimisée sur laquelle un motif élémentaire est répété.

Une sélection appropriée peut conduire à des économies substantielles en temps d'usinage, l'amélioration de la qualité de surface de la pièce est l'amélioration de la vie de l'outil, ce qui conduit à une réduction globale des coûts et une plus grande productivité.



**Formulation des paramètres
d'optimisation**

3.1. Introduction

L'obtention des formes requises d'une pièce par enlèvement de matière est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Ils sont fréquemment utilisés dans de nombreux secteurs d'activité comme l'aéronautique et l'automobile ou les biens d'équipements, la concurrence conduit à l'élaboration de produits au design toujours plus complexe et de meilleure qualité.

Malgré les progrès réalisés par les procédés de mise en forme des matériaux (formage, fonderie, ...), l'usinage se révèle nécessaire à l'obtention des produits finaux, d'autant plus que les tolérances exigées sur la pièce finale sont faibles, de plus, les performances croissantes des machines-outils, des outils de coupe et des logiciels de FAO ont aidé à maintenir la compétitivité du procédé d'usinage, en l'accompagnant de gains non négligeables en termes de productivité et de qualité. Les industriels ont besoin d'optimiser leurs processus de production afin d'augmenter la productivité, de réduire l'usure des outils de coupe, d'usiner écologiquement en limitant les quantités de lubrifiants et leur nocivité et de maîtriser l'état résiduel de contraintes dans la pièce.

L'amélioration de la qualité fonctionnelle des pièces mécaniques nécessite l'optimisation de leurs procédés de fabrication. L'optimisation des procédés est un enjeu industriel d'une importance capitale qui vise à trouver les caractéristiques des procédés de fabrication en accord avec la meilleure qualité possible des produits

Les problèmes d'optimisation, notamment pour les procédés industriels, sont de plus en plus complexes. La difficulté essentielle tient au coût de chaque simulation et à la formulation des problèmes. Nous aborderons le problème de l'optimisation tout d'abord du point de vue mathématique pour définir le cadre conceptuel (modèle mathématique), mais aussi du point de vue d'un ingénieur opérationnel qui cherche à trouver des solutions simples pour des problèmes de plus en plus complexes causés par les variations des caractéristiques des procédés.

L'optimisation des processus de fabrication prend une place importante au niveau de la recherche scientifique industrielle dans un but de répondre à un double objectif visant l'amélioration de la qualité des produits fabriqués et la réduction des coûts de production.

3.2. Performance d'un système de production

À chaque fois qu'un produit est développé, l'ingénieur tente de trouver la meilleure solution possible pour répondre à ces besoins. Les exigences de qualité et de sûreté de fonctionnement des produits, exprimées par le cahier des charges, ont contraint les industriels à concevoir et à réaliser de nouveaux produits exempts de défaillances dans leurs utilisations nominales.

L'optimisation des produits n'est donc pas une notion nouvelle, dans le domaine de la fabrication qui consiste à produire des pièces conformes en une seule opération d'usinage dans la mesure du possible ce qui nécessite une connaissance et une maîtrise accrues des procédés de fabrication.

L'évolution des méthodes permettant d'améliorer la qualité des pièces, a conduit progressivement les spécialistes ces dernières années à développer des outils d'optimisation des procédés facilitant leurs utilisations.

Pour l'usinage d'une pièce complexe, une gamme de fabrication est définie par le bureau des méthodes. Cette gamme de fabrication est composée d'un ensemble d'opérations d'usinage mais elle peut aussi comporter des opérations d'assemblage. Ainsi, dans le bureau des méthodes, on définit l'ensemble des opérations d'usinages, des techniques et des outils à utiliser en prenant en compte les dimensions, la géométrie, les tolérances d'usinage, le matériau de la pièce à usiner, etc. ... L'optimisation de la gamme d'usinage est primordiale pour minimiser les coûts de fabrication. En effet, l'usinage engendre plusieurs coûts liés au temps de travail, à la nature de la matière à enlever, à l'usure et à la maintenance de la machine outil. À ceci s'ajoutent les coûts des outils d'usinage, de l'énergie, etc. ...

La performance d'un système de production peut être mesurée à l'aide de plusieurs indicateurs :

- Déterminer quel est le taux maximal de production de la machine en minimisant le temps d'usinage ;
- Minimiser le coût d'usinage ce qui nous donnera le taux de production minimum économique de l'opération d'usinage ;
- S'assurer que le taux de la demande est situé entre les taux de production minimum et maximum.
- Déterminer les conditions de coupes optimales pour produire au taux précis de la demande.

3.3. Méthodes d'optimisation

Dans notre vie quotidienne, nous sommes fréquemment confrontés à des problèmes dites « d'optimisation » plus ou moins complexes. Le choix d'une méthode dépend d'une série de caractéristiques du problème à optimiser, et surtout du comportement de la fonction qui le représente, comportement habituellement difficile à déterminer.

Pour faire le choix de la méthode d'optimisation, il est aussi nécessaire d'avoir une bonne connaissance des outils d'optimisation existants. La figure 3.1. présente ces différents outils d'optimisation et le type de problème pour lequel chacun peut être utilisé.

Actuellement, il existe plusieurs méthodes d'optimisation. Chacune d'elles permet d'obtenir de meilleurs résultats selon le type de problème traité lorsque certaines conditions mathématiques sont satisfaites.

Nous distinguons trois grandes familles de méthodes d'optimisation:

- Les méthodes déterministes ;
- Les méthodes probabilistes ;
- Les méthodes non déterministes.

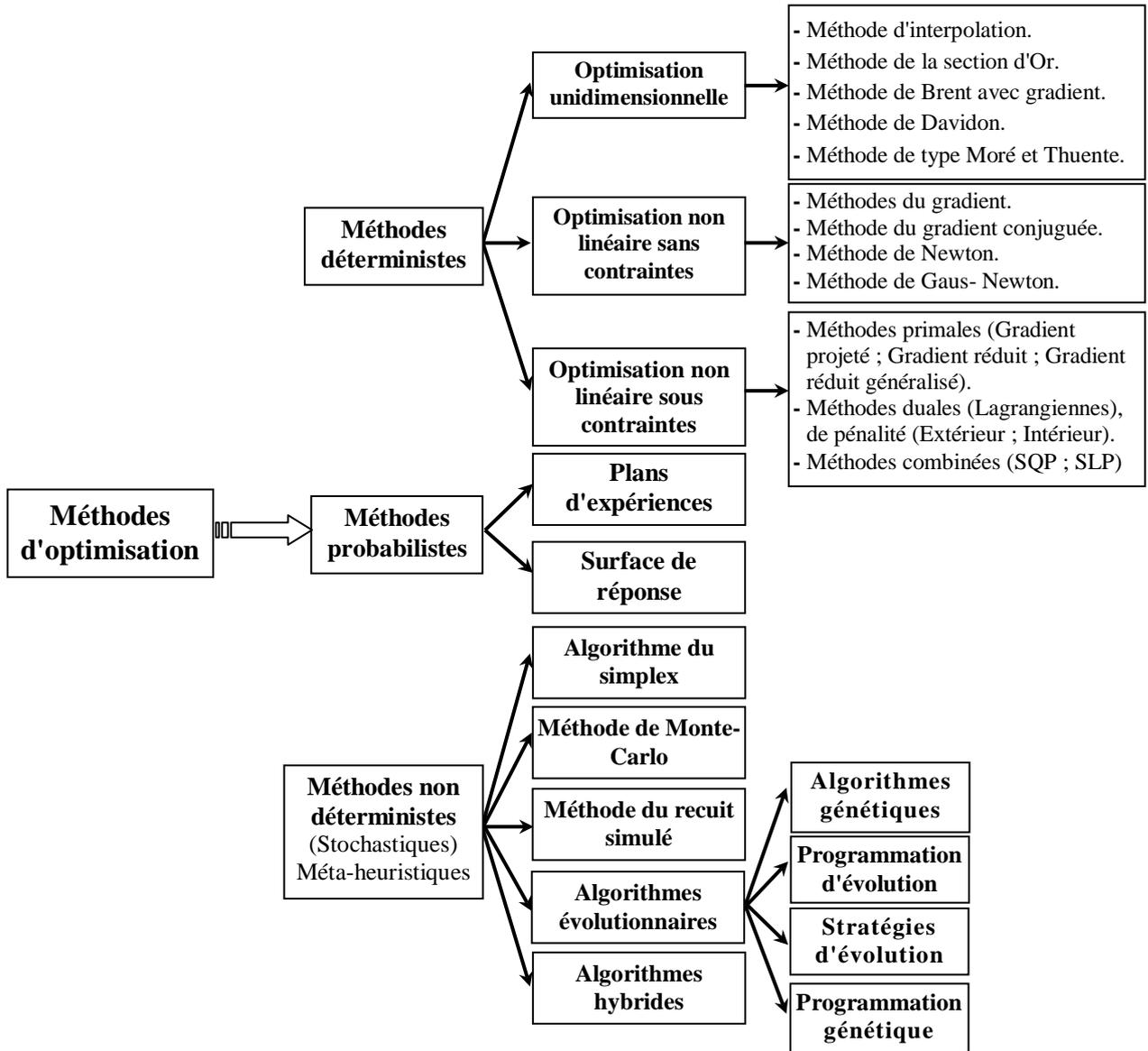


Figure 3.1 : Méthodes d'optimisation [Chibane h. 2013]

La résolution des problèmes d'optimisation est devenue un sujet central dans l'étude de la plupart des processus, le nombre de problèmes d'aide à la décision pouvant être formalisé sous la forme d'un problème d'optimisation étant en forte croissance.

L'efficacité d'une méthode d'optimisation est liée à la sensibilité et à la robustesse par rapport aux paramètres de contrôle et aux conditions initiales.

Afin de mieux comprendre certaines particularités des méthodes d'optimisation utilisées pour améliorer la qualité finale des pièces fabriquées, on présente brièvement les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes sans entrer dans les détails mathématiques.

3.3.1. Méthodes d'optimisation déterministes

Une méthode d'optimisation est dite déterministe lorsque son évolution vers la solution du problème est toujours la même pour un même contexte initial donné, ne laissant aucune place au hasard. Ce sont en général des méthodes efficaces, peu coûteuses, mais qui nécessitent une configuration initiale (point de départ) pour résoudre le problème.

Ce sont souvent des méthodes locales, c'est-à-dire qu'elles convergent rapidement et précisément vers l'optimum le plus proche du point initial, qu'il soit local ou global. Si ces méthodes sont intéressantes en raison de leur grande rapidité de convergence, elles ont plusieurs inconvénients :

1. Les valeurs de la fonction objective et éventuellement de ses dérivées doivent être accessibles.
2. Lorsque le gradient de la fonction n'est pas calculable directement, sa détermination par la méthode des différences finies est toujours délicate à cause de problèmes liés au choix du pas de variation pouvant conduire à des problèmes de convergence [Fletcher 1987].
3. Ces méthodes nécessitent la résolution de systèmes matriciels pouvant être mal conditionnés [Minoux 1983].
4. La convergence est exclusivement locale, l'optimum trouvé dépend du point initial. La sensibilité par rapport aux conditions initiales est importante.

Cette méthode déterministe propose plusieurs solutions dont chacune diffère de l'autre. A titre d'exemple, citons la solution suivant les méthodes Duals comme Lagrangienne qui est une méthode permettant de trouver les points stationnaires (maximum, minimum, ...) d'une fonction dérivable d'une ou plusieurs variables, sous contraintes.

Elle se résume comme suit : la démarche pour optimiser localement une fonction $f(\vec{x})$ de plusieurs variables sous contraintes $h(\vec{x}) = 0$ consiste à :

1. Chercher les points stationnaires du problème sous contraintes ;
2. Etudier la nature de chaque point stationnaire en étudiant le "signe" d'une hessienne bien choisie.

Cette hessienne ne fait plus intervenir seulement la fonction f mais aussi les contraintes h par l'intermédiaire du Lagrangien.

Formellement, on envisage l'optimisation d'une fonction f à n variables sous m contraintes de la forme : $h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_j, j = 1, \dots, m$

On considère le programme de maximisation \mathcal{P} suivant :

$$\mathcal{P} \left\{ \begin{array}{l} \max(x) f(x) \\ S.C. \quad h(x) = C \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.1)$$

On appelle Lagrangien, noté \mathcal{L} , la fonction suivante :

$$\mathcal{L}(x, \lambda) = f(x) + \lambda \cdot (h(x) - C) \dots\dots\dots (3.2)$$

Avec : x représentent la variable de contrôle figurant dans la fonction à maximiser ou de minimiser, $f(x)$ est la fonction à optimiser, λ le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte et $h(x)$ la contrainte du programme d'optimisation.

✓ **Conditions de qualification de la contrainte** : Pour pouvoir utiliser le Lagrangien dans la résolution d'un programme d'optimisation sous une contrainte en équation, il suffit que l'une des conditions suivantes soit vérifiée :

- ⇒ Les dérivées partielles de la fonction contrainte g évaluées à l'optimum x ne sont pas simultanément nulles, c.-à-d. $\frac{\partial h}{\partial x_i}(x) \neq 0$ pour au moins un $x_i, i = 1, \dots, n$.
- ⇒ La fonction contrainte h est linéaire.

✓ **Conditions du premier ordre** : On suppose que la contrainte de qualification est vérifiée. Si le vecteur $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ est une solution du programme de maximisation \mathcal{P} , alors il existe un unique λ^* tel que x^* vérifie les $n + 1$ conditions suivantes:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}(x^*, \lambda^*)}{\partial x_i} = 0 & \Leftrightarrow \frac{\partial f(x^*)}{\partial x_i} - \lambda^* \cdot \frac{\partial h(x^*)}{\partial x_i} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \\ \frac{\partial \mathcal{L}(x^*, \lambda^*)}{\partial \lambda^*} = 0 & \Leftrightarrow h(x^*) = C \end{cases} \dots\dots\dots (3.3)$$

Les points candidats s'obtiennent en résolvant ce système de quatre équations.

3.3.2. Méthodes d'optimisation probabilistes

Les méthodes probabilistes font intervenir la probabilité soit dans l'incertitude de mesure élargie qui est accompagnée d'une probabilité (ou d'un risque), soit dans la méthode ANOVA (Analysis Of Variance) qui utilise le test de Fisher ou de Student, pour déterminer les facteurs significatifs devant entrer dans la modélisation du phénomène étudié. Elles permettent de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, pour obtenir un maximum d'informations à un coût minimal.

L'optimisation consiste à étudier un phénomène Y que nous appellerons par la suite réponse dépendant d'un grand nombre de variables $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, que nous nommerons par la suite facteurs. La modélisation mathématique consiste à modéliser Y par une fonction f telle que :

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \dots\dots\dots (3.4)$$

Suivant la procédure classique, on mesure la réponse Y pour plusieurs valeurs de la variable x_i tout en laissant fixe la valeur des autres variables. Mais le nombre de variables x_i ($i = 1, n$) fait qu'il n'est plus possible d'accepter un tel choix. Il faut donc chercher une autre méthodologie.

L'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences constitue la meilleure stratégie dans le choix des méthodes d'optimisation pour résoudre des problèmes industriels pour lesquels la variation des caractéristiques des pièces fabriquées constitue un vrai problème.

Cette méthodologie offre un outil spécifique pour l'optimisation des procédés par sa capacité d'adaptation aux phénomènes de type boîte noire. Son succès est lié au fait qu'elle propose une optimisation efficace pour un nombre minimal d'expériences, ce qui se traduit par un temps de calcul réduit et par conséquent une réduction considérable du coût de production.

Les plans d'expériences permettent une diminution considérable du nombre d'essais et une interprétation rapide et sans équivoque. Ils fournissent des résultats faciles à présenter et la possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs ainsi que la détection des interactions éventuelles.

Les étapes d'optimisation sont les suivantes : déterminer les paramètres à étudier ; définir leurs spécifications ; effectuer les essais expérimentaux ; construire un domaine opératoire ; définir les modèles de régression ; optimiser les paramètres du procédé pour obtenir la meilleure qualité et productivité ainsi que réduire le coût de fabrication.

La méthodologie des plans d'expérience se base sur la méthode des moindres carrés qui est couramment utilisée. Celle-ci s'adapte très bien pour des phénomènes de type procédés de fabrication pour lesquels on ne connaît que les facteurs d'entrée (paramètres opératoires du procédé) et de sortie (paramètres d'évaluation du produit).

Dans le chapitre quatre (04), on donne le principe la méthodologie des plans d'expérience et ces applications.

3.3.3. Méthodes stochastiques /non déterministes

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation.

Elles permettent d'explorer tout l'espace de recherche et ont une grande capacité à trouver l'optimum global d'un problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni la définition d'un point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objective pour atteindre la solution optimale.

Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations (itérations) avant d'arriver à la solution du problème.

Citons à titre d'exemple, la méthode de Monte-Carlo qui fait appel à un nombre d'itérations important pour converger vers une solution approximative. On estime que le nombre minimum d'itérations est de 10^6 pour obtenir une solution satisfaisante. Il va de soit que cette méthode stochastiques est très lente si l'on cherche une précision accrue de la solution.

Dans notre travail, les méthodes stochastiques ne s'y appliquent pas car ne n'utilisons pas de variables aléatoires et nous ne faisons pas de calculs statistiques (les paramètres étudiés sont mesurés ou calculés).

3.4. Formulation mathématique du problème d'optimisation

Cette phase consiste à traduire le problème de conception, décrit par le cahier des charges, en un problème mathématique équivalent. C'est l'étape la plus délicate du processus de conception car, là aussi, la formulation d'un problème n'est jamais unique, en particulier la définition des fonctions caractérisant la performance du système. Elle consiste à définir de façon précise :

1. La fonction objective ;
2. Les paramètres de conception ou de production ;
3. Les éventuelles contraintes liées à la fabrication ou à l'utilisation du dispositif et donc exprimées dans le cahier des charges ;
4. Les contraintes ajoutées par le concepteur.

La fonction objective est une des réponses de l'objet qui définit l'objectif à atteindre et peut être de deux natures : un coût à minimiser (coût de fabrication, consommation, coût d'exploitation, ...) ou une performance à maximiser (production, rendement, ...). Son choix conditionne la définition du problème d'optimisation et inclus les moyens qui en permettent le calcul, c'est-à-dire la modélisation retenue pour l'objet.

Les paramètres ou variables de conception/production sont des facteurs contrôlés qui permettent d'influencer les performances. Ils peuvent être de natures diverses : dimensions géométriques, propriétés des matériaux, choix structurels, ... etc. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, continus ou discrets.

Le choix et le nombre de paramètres conditionnent aussi la définition du problème d'optimisation. Il peut être intéressant de faire varier un grand nombre de facteurs afin d'augmenter l'espace de recherche mais le processus d'optimisation sera plus long.

Des contraintes peuvent être ajoutées par l'opérateur pour avoir, par exemple, une qualité de produit convenable, s'assurer de la validité de la modélisation retenue et de son bon fonctionnement.

La formulation du problème d'optimisation est fondamentale dans le processus de conception/production parce qu'elle conditionne le succès des étapes qui suivent. Elle n'est pas facile à aborder car le choix des variables de conception/production n'est jamais unique et les moyens de calcul actuels ne peuvent en gérer qu'un nombre limité.

3.4.1. Formalisme mathématique

Optimiser les paramètres d'un procédé de mise en forme ou de fabrication revient à réaliser un produit sans défauts (Rugosité, fissure, etc. ...) et avec le moindre coût. L'objectif est de rechercher le minimum d'une fonction appelée le plus souvent « fonction objective » sans ou avec limitations du domaine de recherche.

Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

D'une manière générale, un problème d'optimisation peut s'écrire sous la forme mathématique suivante :

$$\begin{cases} \text{Min ou Max } f(\mathbf{X}) & \mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ \text{Sous les contraintes } \mathbf{g}_i(\mathbf{X}) \leq \mathbf{0} & i = 1 \dots n \\ \mathbf{h}_j(\mathbf{X}) = \mathbf{0} & j = 1 \dots q \\ & \mathbf{X} \in \mathfrak{R}^n \end{cases} \dots\dots\dots (3.5)$$

Où:

- $f(\mathbf{x})$: Fonction objective à minimisée ou maximisée, appelée aussi fonction coût ;
- \mathbf{X} : Vecteur des variables d'optimisation appelée aussi variables de conception ou encore variables de décision qui représente les paramètres du problème à optimiser ;
- $\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) - \mathbf{h}_j(\mathbf{x})$: Représentent les contraintes d'inégalité respectivement d'égalité ;
- \mathfrak{R}^n est l'espace de recherche borné par les limites du domaine.

Un point X_A est admissible si $X_A \in \mathfrak{R}$ et que toutes les contraintes sont vérifiées à ce point ; c'est-à-dire (Equation (3.2)) :

$$\begin{cases} \mathbf{g}_i(\mathbf{X}_A) \leq \mathbf{0} & i = 1 \dots n \\ \mathbf{h}_j(\mathbf{X}_A) = \mathbf{0} & j = 1 \dots q \end{cases} \dots\dots\dots (3.6)$$

Selon le minimum trouvé, les méthodes peuvent être classées en deux types : méthodes d'optimisation locales et méthodes d'optimisation globales.

En se basant sur ce principe, une méthode d'optimisation locale est un algorithme qui converge vers un minimum local.

On dit que X est un minimum local de f sur \mathfrak{R} si (Equation (3.2)) :

$$\mathbf{X} \in \mathfrak{R} \text{ et } \exists r > 0 / \forall Y \in \mathfrak{R} \cap B(\mathbf{X}, r), f(\mathbf{X}) \leq f(\mathbf{Y}). \dots\dots\dots (3.7)$$

Plusieurs méthodes d'optimisation existent dans la littérature, les plus fameuses sont les méthodes de descente où l'optimum est atteint par une direction de descente déduite des dérivées de la fonction.

Au contraire, les méthodes globales ont une vision plus globale basée sur l'exploration et l'exploitation du domaine de recherche dans le but d'atteindre des optimums globaux.

Dans ce cas, On dit que X est un minimum global de f sur \mathfrak{R} si (Equation (3.2)) :

$$\mathbf{X} \in \mathfrak{R} \text{ et } \forall Y \in \mathfrak{R}, f(\mathbf{X}) \leq f(\mathbf{Y}). \dots\dots\dots (3.8)$$

La différence entre les diverses méthodes d'optimisation en général se fait par le biais du nombre d'évaluations de la fonction objective. Pour l'optimisation de problèmes industriels, le nombre d'évaluations de la fonction coût est un facteur déterminant vu le temps de calcul important des simulations numériques.

Mais le choix de la méthode convenable à utiliser et le réglage de ses paramètres dépendent du problème à optimiser.

Dans le choix de la fonction objectif, les contraintes imposées et les variables de conception et importantes pour la réussite de l'optimisation, si le problème d'optimisation est bien posé, il permet de :

- Réduire le délai et le coût de conception ;
- Automatiser la conception ;
- Utiliser un grand nombre de variables de conception et de contraintes.

Par contre, il existe les inconvénients de la méthode d'optimisation :

- Le temps de calcul augmente avec le nombre des variables de conception ;
- Les problèmes de convergence des algorithmes ;
- La recherche d'un optimum global.

Il existe différentes techniques de calcul des coûts, nous recensons, classifions et analysons les différentes approches existantes pour cette estimation de coûts, connues à ce jour, et de les classer selon le contexte de leur application.

3.5. Architecture d'une méthode d'estimation des coûts

De nos jours, les industriels vivent dans un monde de concurrence visant à maximiser leurs profits et à acquérir de plus en plus de marchés prometteurs.

Face à cette concurrence technico-économique, la maîtrise des coûts d'une pièce ou d'un produit devient un engagement pour la réussite de ces entreprises.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont porté sur les méthodes d'estimation des coûts dans divers secteurs industriel, parmi lesquels, nous citons, par exemple, le génie-civil (Hegazy et Ayed, 1998), le textile (Camargo et al. 2003) et le génie-logiciel (Idri et al. 2002).

La fonction « estimer un coût » touche à des nombreux domaines très variés ce qui la rend à la fois passionnante mais également difficile à maîtriser. En effet au cours d'une estimation il est important et nécessaire de disposer de bonnes informations techniques et économiques mais également de connaître les moyens et les conditions de production ainsi que les modèles mis en œuvre pour l'estimation.

Dans cette étude, un modèle mathématique est proposé permettant la minimisation du coût total en polissage automatique sur MOCN 5-axes incluant (le coût d'utilisation des machines/outils, le coût de changement d'outils, et le coût de changement machine, ...) ainsi que le temps total de réalisation d'une unité du produit.

Sur la base d'une conception initiale basée sur un certain nombre de paramètres de valeur variable, appelés variables de conception, l'optimisation vise à déterminer de manière automatique la conception qui est la meilleure au regard de critères liés à des performances structurales.

Dans l'optimisation, on utilise les informations liées aux valeurs de réponses calculées, par la fonction objectif et contraintes comprises, de manière à identifier une nouvelle estimation des variables de conception minimisant, la valeur de l'objectif tout en restant dans le domaine admissible (contrainte).

Nous nous sommes intéressés dans ce travail aux méthodes d'optimisation du coût employées en fabrication mécanique. Une méthodologie de qualification a donc été proposée afin d'optimiser la fabrication, tout en respectant les critères qualités définis par le cahier des charges du client. Cette méthodologie est constituée par trois étapes successives (Figure 3.2) :

La première étape est basée sur l'étude de la qualité de la surface à usiner, le respect du critère qualité est effectivement placé en amont de la démarche d'optimisation. C'est pourquoi, les paramètres liés à l'outil et les conditions de coupe doivent être choisis de façon à respecter la qualité spécifiée par les tolérances dimensionnelles et les spécifications géométriques du cahier des charges. Durant cette première étape, les influences des paramètres opératoires sur le critère qualité sont analysées et leurs éventuelles limitations sont déterminées.

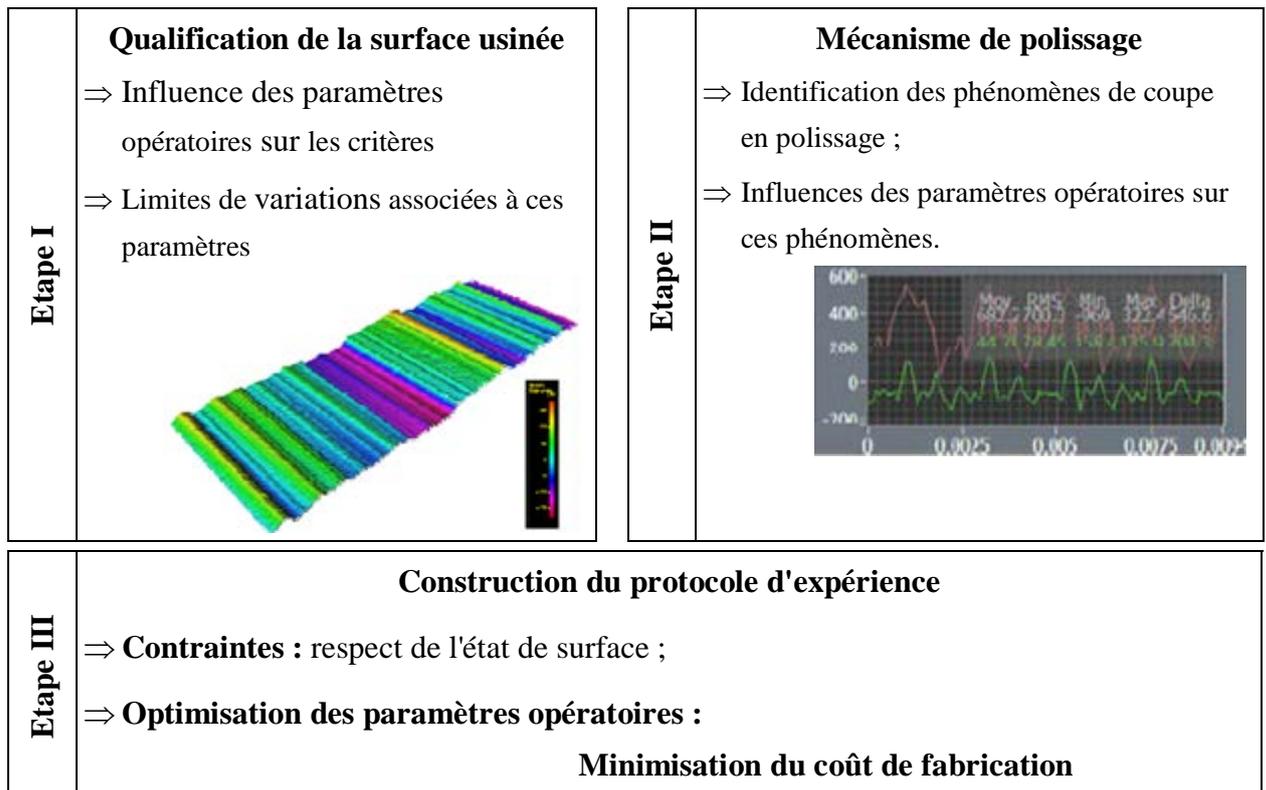


Figure 3.2 : Méthodologie d'optimisation par plan d'expérience

Dans une seconde étape, les phénomènes de coupe observés durant l'opération de polissage sont étudiés à partir de mesures d'efforts et/ou de puissance. L'objectif est de détecter d'éventuels phénomènes de polissage pouvant limiter le processus. Ces derniers sont identifiés à travers une analyse de la qualité de surface réalisée. L'influence des paramètres opératoires sur l'apparition de ces phénomènes est également étudiée.

A partir des résultats obtenus dans les deux étapes précédentes, dans la troisième étape, un protocole de sélection des paramètres opératoires associé aux opérations de coupe en polissage est construit. Ce dernier apporte un soutien à l'utilisateur pour sélectionner les paramètres opératoires adaptés à son application (paramètres outils et conditions de polissage), tout en optimisant la productivité et en assurant le respect de la qualité de surface requise. La construction de ce protocole, proche de celle définie par Le fur et al. [Lef90], se déroule en deux temps.

Tout d'abord, des fonctions contraintes sont identifiées à partir des limitations observées durant les expérimentations : respect de la qualité, phénomènes de coupe limitant, ... Ainsi, le domaine de définition de chaque paramètre opératoire est déterminé.

Les valeurs de ces paramètres sont ensuite sélectionnées, afin d'optimiser la productivité. Dans notre étude, cela se traduit par une minimisation du coût de polissage tout en respectant une rugosité imposée.

Afin d'appliquer ce protocole dans le cadre de notre processus de polissage, il est nécessaire, dans un premier temps, de définir les critères permettant d'évaluer l'influence des paramètres opératoires sur la qualité de la pièce et sur les phénomènes de coupe en polissage.

3.6. Méthodes de calcul des coûts de fabrication

Toute méthode de détermination des coûts de fabrication répond à une même structure qui se base sur un calcul des temps et des coûts.

En effet l'entrée de ce système est le produit et la sortie du système est le coût de fabrication estimé (figure 3.2). Les résultats sont influencés par les caractéristiques du produit et par la méthode elle même de détermination des temps (des coûts) de fabrication adoptée.

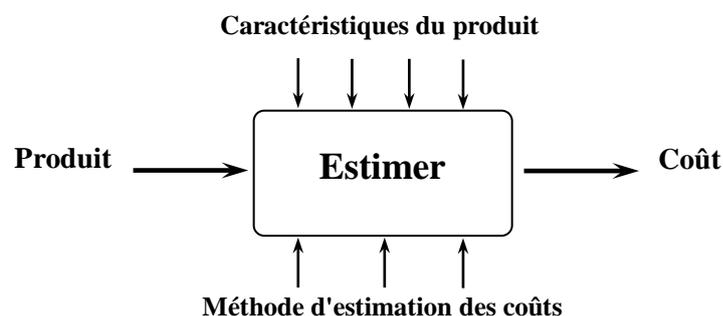


Figure 3.3 : Structure de l'estimation des coûts

Une revue bibliographique sur les différents travaux nous a permis de classer les différentes méthodes existantes en 4 grandes catégories principales : les méthodes analytiques, les méthodes paramétriques, les méthodes analogiques et les systèmes experts qui, en plus de l'estimation du coût, font la sélection des matériaux, des procédés, etc. et sont souvent des outils d'aide à la décision pour les concepteurs.

3.6.1. La méthode intuitive ou empirique

C'est la méthode la plus utilisée dans l'élaboration des estimations de temps et des coûts. Elle repose surtout sur l'expérience et le savoir-faire de l'opérateur. L'estimation d'un temps est élaborée de façon intuitive en prenant en compte les difficultés de l'acquis et certains paramètres que le préposé aux estimations de temps intègre dans son savoir-faire.

Cette méthode est difficilement automatisable. En effet, seul un système expert pourrait le permettre. Elle présente des risques d'erreur importants, des difficultés au niveau de formation et de transmission du savoir-faire dans les ateliers de production.

3.6.2. La méthode analytique

La méthode analytique évalue le temps de fabrication d'un produit grâce à la décomposition en un ensemble d'opérations du processus de fabrication qui transforme le produit brut en un produit fini. Elle attribue ensuite à chaque opération un temps que l'on somme pour obtenir le temps total de fabrication.

Les opérations peuvent être regroupées en sous-phases (ensemble d'opérations effectuées sans remise en position de la pièce) et en phase (ensemble de sous-phase effectuée sans changement de machine).

Dans cette méthode on peut se faire en additionnant les temps élémentaires ou en prenant des temps forfaitaires. Dans ces deux cas, ces temps peuvent être modulés pour prendre en compte l'effet de série de pièces. Cet effet se présente essentiellement au niveau de la souplesse qu'acquiert l'opérateur au fur et à mesure de la réalisation d'une série de pièces et ceci grâce à des courbes d'analyse des temps et des mouvements (accoutumance, habilité opérateur, ...).

La méthode analytique exige des connaissances au niveau de :

- Calcul des paramètres géométriques : Surface d'une poche par exemple.
- Calcul du débit opératoire en fonction des conditions technologiques de réalisation : choix d'un outil, d'une vitesse de coupe, d'une avance, etc.

Le fait que la méthode analytique nécessite beaucoup d'informations très détaillées, tant sur le produit que sur le procédé de fabrication, laisse supposer qu'elle est souvent très longue et difficile à utiliser. On l'utilise, dans la plupart des cas, pour calculer le coût réel et constituer ainsi une base de données utilisable par d'autres méthodes pouvant les introduire à priori pour une estimation de coût telle que les méthodes paramétriques.

Dans la réalité, ce moyen d'estimation est utilisé principalement durant la phase de production en série car il nécessite des informations détaillées sur le produit et sur les procédés de fabrication (nomenclature du produit, gammes opératoires, ...) qui ne sont pas toujours disponibles lors de la conception.

3.6.3. La méthode paramétrique

La méthode paramétrique peut être considérée comme une variante de la méthode de fonction coût. Néanmoins, elle est plus détaillée. Elle inclue plus de variables et d'expressions mathématiques dans ses analyses, des Formules d'Estimation de Coût (FEC) lient des paramètres de coût (Dinars ou Taux horaire) avec des paramètres physiques ou de performance.

La méthode paramétrique est basée sur l'utilisation de relations mathématiques établies à partir de données historiques et actuelles de l'entreprise. Ces relations sont fondées sur la collecte d'informations semblables en quantité suffisante de façon à être capable de déterminer s'il existe des corrélations entre une évolution d'un temps et les paramètres.

3.6.4. La méthode analogique

La méthode analogique se base sur des classifications et des codages rationnels des produits déjà fabriqués par l'entreprise. Cette méthode repose sur une comparaison entre le produit actuel et des produits similaires antérieurs dont les coûts sont connus. La similarité est recherchée surtout du point de vue fonctionnel. Dans ce cas, on parle de jugement d'experts et l'exploitation de leurs expériences acquises durant les projets précédents.

Le rendement de cette méthode dépend en grande partie de la capacité de l'expert à identifier les différences et les similarités entre les produits actuels et précédents. Le principal avantage de cette méthode est sa rapidité et son faible coût de mise en œuvre. Par contre, elle implique que les comparaisons entre le projet courant et ceux passés soient adéquates, ce qui suppose que le projet ne soit pas fondamentalement différent des réalisations passées, aussi bien dans sa conception technique que dans la conception des processus de production.

3.7. Modélisation des données

Dans les procédés d'usinage par enlèvement de matière, le coût de l'opération d'usinage et la qualité du produit final sont des contraintes à prendre en compte dans un environnement de plus en plus compétitif où les investisseurs exigent un meilleur rendement.

La réduction des coûts est une offre toujours plus innovante pour le client. Il faut donc, d'une part, optimiser les moyens de production, et d'autre part, concevoir de nouveaux produits dans les meilleurs délais. L'atteinte de ces deux objectifs passe systématiquement par une phase expérimentale, laquelle mérite, elle aussi, d'être optimisée. C'est le rôle des plans d'expériences.

Dans notre travail nous optimisons conjointement deux objectifs: le coût total, le temps total en un seul modèle sous contrainte de la qualité d'état de surface qui sera par la suite résolu en se basant sur les techniques d'optimisation par plans d'expériences :

- Minimiser le coût total ;
- Meilleur état de surface R_a .

Après avoir défini la fonction à optimiser, il faut choisir une méthode d'optimisation adaptée au problème posé.

3.7.1. Les paramètres de la production

La qualité des pièces fabriquées dépend d'un certain nombre de facteurs qui affectent leurs caractéristiques mécaniques et géométriques en cours de fabrication. De nombreux facteurs (forme géométrique de l'outil, vitesse de rotation de la broche, profondeur de passe, lubrification, trajectoire de l'outil, ...) agissent sur la qualité de l'opération de polissage. Par conséquent, la fonction objective était de réduire le coût de polissage avec le maintien d'une qualité de surface pour éviter le surcoût lors de l'étape de finition. Il aura donc besoin d'un outil objectif afin de traduire les différentes variables du procédé en caractéristiques qu'il peut comprendre et contrôler, soit les temps et les coûts d'usinage.

Pour ces raisons, nous croyons qu'il est impératif de développer un modèle mathématique qui représente bien le procédé réel et une méthode qui permet l'optimisation de ce modèle. De plus, étant donné que le modèle va comprendre des contraintes, il permettra d'identifier les limites de l'opération et de fournir des pistes de solution afin d'augmenter les taux de production et de diminuer les coûts.

⇒ Le coût d'une pièce :

Les composantes du prix de revient d'une pièce sont :

- Coût machine : amortissement, entretien, salaire opérateur, ... ;
- Coût montage : prix du montage à amortir sur l'ensemble de la série, ..) ;
- Coûts non productifs : chargement, déchargement, montage, mouvements rapides d'approche, retour de la table. Ces coûts sont indépendants des paramètres de coupe.
- Coût relatif à l'usure de l'outil: prix des plaquettes, des porte-outils, porte-plaquettes, coûts des changements d'outils, coûts d'affutage, arrêt machine pour réglage, ...) ;
- Coût d'enlèvement de métal (Coût d'usinage) : Décroit quand la vitesse augmente.

Les coûts des outils et le coût d'enlèvement de métal dépendent des conditions et paramètres de coupe.

⇒ Le temps de production :

- Les temps auxiliaires (changement de pièce, prises de passes, ...) ;
- Le temps de coupe ;
- Les temps de changement d'outils.

⇒ Position du problème :

On a :

$$CP = f(\text{Profondeur de passes, granulométrie, vitesse de broche, vitesse d'avance, ...})$$

Le problème est de chercher les conditions de coupe en polissage « Profondeur de passes, granulométrie, vitesse de broche, vitesse d'avance, ... tel que CP soit minimal.

3.7.2. Critères d'optimisation

L'usinage d'une surface complexe sur une pièce mécanique correspond généralement à une forte valeur ajoutée. Dans un contexte concurrentiel, un des objectifs est de diminuer le coût de ces opérations tout en garantissant la qualité de réalisation.

Ceci entraîne nécessairement la diminution du temps d'usinage. Or il existe de nombreuses stratégies d'usinage possibles pour une même surface à réaliser : trajectoires, outils, paramètres de coupe différents. Au sens de la productivité, la stratégie d'usinage la plus adaptée est celle qui minimise le temps d'usinage, le choix d'une stratégie d'usinage est donc un problème d'optimisation sous contraintes (figure 3.4).

L'intérêt de l'optimisation en usinage réside dans l'amélioration de certains critères de jugement économiques et techniques tels que le coût de production, la productivité (minimisation du temps de production ou maximisation du débit de copeau), la durée de vie des outils de coupe et dans la plupart des cas cherche à améliorer la qualité de l'état de surface produite.

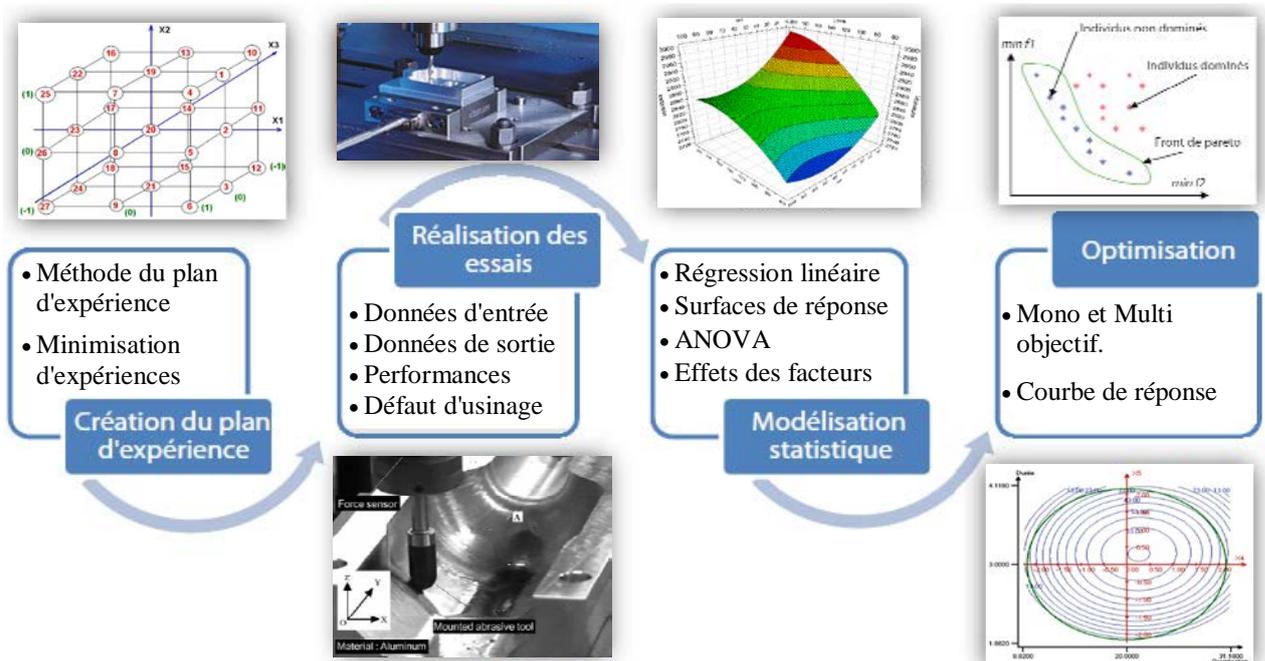


Figure 3.4 : Procédures d'optimisation par plan d'expérience

3.8. Optimisation de la fonction objectif

L'élaboration d'un produit, passe toujours par une phase d'optimisation destinée à minimiser les coûts ou/et maximiser ces performances.

De façon schématique un problème d'optimisation consiste à maximiser ou à minimiser une fonction appelée fonction objectif ou réponse sous un certain nombre de conditions appelées contraintes.

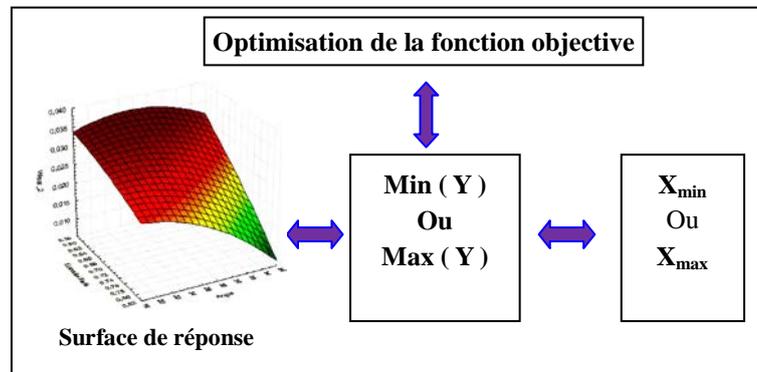


Figure 3.5 : Optimisation de la fonction objective

Le but d'une telle démarche est de minimiser le volume de calculs nécessaires à la réalisation des produits afin de réduire au minimum le temps de fabrication, facteur très important pour la réussite d'une entreprise.

Mais il ne faut pas oublier que le processus de fabrication dans sa complexité est soumis à un très grand nombre de contraintes telles que :

- Contraintes techniques ;
- Contraintes du marché dont les besoins évoluent sans cesse (attentes des clients, nouveaux produits concurrents, ...) ;
- Contraintes économiques.

La méthodologie des plans d'expériences nous a permis de définir une surface de réponse pour chaque fonction objectif à optimiser (Figure 3.5).

L'équation de la surface de réponse établie par cette voie permet de déterminer les conditions optimales du processus en utilisant la fonction de Lagrange avec multiplicateur.

3.8.1. Optimisation du processus d'usinage en pré-polissage

L'opération de pré-polissage est une opération de super-finition. Son principal objectif est de supprimer les différentes crêtes causées par les opérations d'usinage précédentes.

Par conséquent, l'objectif de la fonction objective est de réduire le coût de polissage, le maintien d'une qualité de surface pour éviter le surcoût lors de l'étape de finition. (équation 3.8) présente le calcul du coût de polissage $PPCost$.

Ce coût est composé de quatre termes :

1. Coût du temps de la machine pour réaliser l'opération de polissage. Ce coût est calculé avec le coût horaire de la machine multiplié par le temps de polissage.
2. Coût de changement de l'outil. C'est le produit du coût horaire machine par le nombre de changements de l'outil nécessaire pour atteindre l'opération de polissage et la durée de changement.
3. Coût de l'outil (*Tool_cost*). Il comprend le coût du capuchon et de son support, mais ne prend pas en compte le coût du porte-outil.
4. Coût constant (*Cst*). Il comprend, par exemple, le coût pour fixation de la pièce, le coût de préparation, etc. ...

$$PPcost = Time * Cost/h + N_change * Time_change * Cost/h + Tool_cost + Cst. \dots\dots\dots (3.8)$$

Avec :

Time : Durée d'usinage en polissage, temps où la machine-outil usine la pièce ;

Cost/h : Coût de la machine CNC 5-axes par heure ;

N_change : Nombre de changement d'outil ;

Tool_Cost : Coût des outils ;

Cst : Coûts constants.

On a :

$$Time = Vol/Q. \dots\dots\dots (3.9)$$

$$N_Change = Time/Tool_Life_duration. \dots\dots\dots (3.10)$$

$$Tool_Life_duration = Tool_usable/Wear_speed. \dots\dots\dots (3.11)$$

$$Tool_Cost = N_Change * (Caps + Support/10). \dots\dots\dots (3.12)$$

Où :

Vol : Volume de matière enlevée ;

Q : Débit de matière enlevée.

Tool_life_duration : Durée de vie de l'outil ;

Tool_usable : Volume d'outil utilisé.

Wear_speed : Vitesse d'usure par volume de l'outil ;

Caps : Coût du capuchon ;

Support : Coût de support capuchon.

Par la suite, le coût de polissage sera calculé en utilisant :

- l'Usure de l'outil (*Wear_speed*) : Le profil de chaque outil est mesuré avant et après l'opération de pré-polissage. Ce profil est obtenu à la mesure de plusieurs diamètres d'outil, dans la zone de travail de l'outil, avec une option de machine CNC laser.

Enfin, la zone d'usure entre le profil de l'outil avant et après pré-polissage est divisée par le temps d'usinage (fourni par la machine CNC) pour obtenir la vitesse d'usure de l'outil. *Wear_speed* est exprimé en mm^2/s .

- Le débit de matière enlevée (*Q* en mm^3/s): Ce paramètre est calculé en divisant la matière enlevée par le temps d'usinage. L'enlèvement de matière est calculé en multipliant la longueur usinée (40 mm) par la surface usinée moyenne. La surface usinée, est calculée en utilisant une formule géométrique relative à l'engagement radiale réel de l'outil en micromètre.

Finalement, la fonction objective pour le calcul du coût de pré-polissage *PPCost* s'écrit sous la forme :

$$PPCost = \left(\frac{Vol}{Q}\right) * \left[Cost/h + \frac{Wear_speed}{Tool_usable} * \left\{Time_change * Cost/h + \left(Caps + \frac{Support}{10}\right)\right\}\right] + Cst \dots\dots\dots (3.13)$$

L'estimation des coûts développée dans cette section a permis de générer les différents coûts alternatifs du processus d'usinage en pré-polissage. Le cout nommé *PPCost*, est composé des coûts des opérationnel de pré-polissage, de préparation des machines et de réglage.

Pour répondre à ces exigences, plusieurs essais expérimentaux basés sur le choix des conditions de polissage sont souvent nécessaires avant d'aboutir à une pièce satisfaisante.

Actuellement, l'utilisation de ces méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants est coûteuse et donne une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins. Il est donc d'un grand intérêt, de connaître un outil permettant de choisir les conditions de coupe de façon intelligente à partir d'un nombre suffisant d'expériences tout en prenant en compte des intérêts parfois contradictoires, comme l'état de surface des pièces usinées, l'usure de l'outil de coupe et la productivité.

3.9. Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire un modèle d'optimisation plus complet, incluant les fonctions objectives et les contraintes à été élaboré. Ce modèle permet d'optimiser les opérations de pré-polissage selon deux fonctions objectifs : coût d'usinage minimal et/ou la qualité d'état de surface. Après avoir présenté les différentes méthodes d'estimation et leurs domaines d'emploi, on constate qu'il n'y a pas de concurrence des méthodes mais une complémentarité.

L'estimation du coût de produits est une étape cruciale pour les entreprises industrielles des pièces mécanique d'aujourd'hui. Leurs performances sont difficilement comparables dans l'absolu. Elles ne peuvent être appréciées que dans un contexte industriel donné pour un type de produits défini. Ce qui a permis à un développement de nouvelles approches qui consistent à combiner les méthodes entre elles en fonction du domaine à traiter.

De plus, on a constaté qu'il n'existe pas de « meilleure méthode pour estimer un coût » en soi. Pour ces raisons, il est nécessaire de fournir au concepteur/fabricant les outils nécessaires afin d'arriver à une estimation efficace de coûts et adaptée aux connaissances relatives au produit en question. En effet, l'estimation du coût est un processus de chiffrage qui permet à son utilisateur de prévoir le coût final d'un futur produit, sans que tous les paramètres et/ou conditions soient connus lorsque cette estimation est mise en place.



Chapitre 04

**Méthodologie d'optimisation par plans
d'expériences**

4.1. Introduction

L'optimisation des procédés de fabrication est une exigence économique pour les ingénieurs compte tenu de l'évolution rapide du marché qui entraîne une concurrence de plus en plus forte.

À chaque fois qu'un produit est développé, le concepteur tente de trouver la meilleure solution possible, l'optimisation des produits n'est donc pas une notion nouvelle. Cependant, le processus d'identification du produit est souvent fait manuellement de manière progressive, impliquant un temps de développement important.

La qualité des pièces mécaniques se présente comme l'un des enjeux majeurs dans le processus de fabrication pour l'amélioration des conditions opératoires d'un procédé ou de la mise au point d'un nouveau produit, alors, l'expérimentateur est amené à effectuer une série d'essais consistant à faire varier différents paramètres du procédé, en effet, l'analyse du produit fini doit permettre, d'une part, de maîtriser leur processus de fabrication, et, d'autre part, réajuster les conditions de fabrication afin de les adapter à des phénomènes dérivés tels que l'usure des outils, la dégradation de l'état de surface, la modification des condition d'usinage, ... etc.

Dans ce paragraphe, après avoir montré l'intérêt des plans d'expériences, nous aborderons la méthodologie à mettre en œuvre pour les utiliser.

4.2. Historique

La Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE) est une méthode qui a été initiée dans les années 20 par Sir Ronald A. Fisher (Statisticien anglais) au début des années 30. Le terme plan d'expériences vient de l'anglais « Design Of Experiments » qui se traduit par planification des expériences. Fisher introduisit les bases de l'expérimentation moderne (carré latins, blocs et analyse de la variance).

On peut représenter l'évolution des méthodes de plan d'expériences pour l'étude des effets des facteurs (études de criblage) par la figure 4.1.

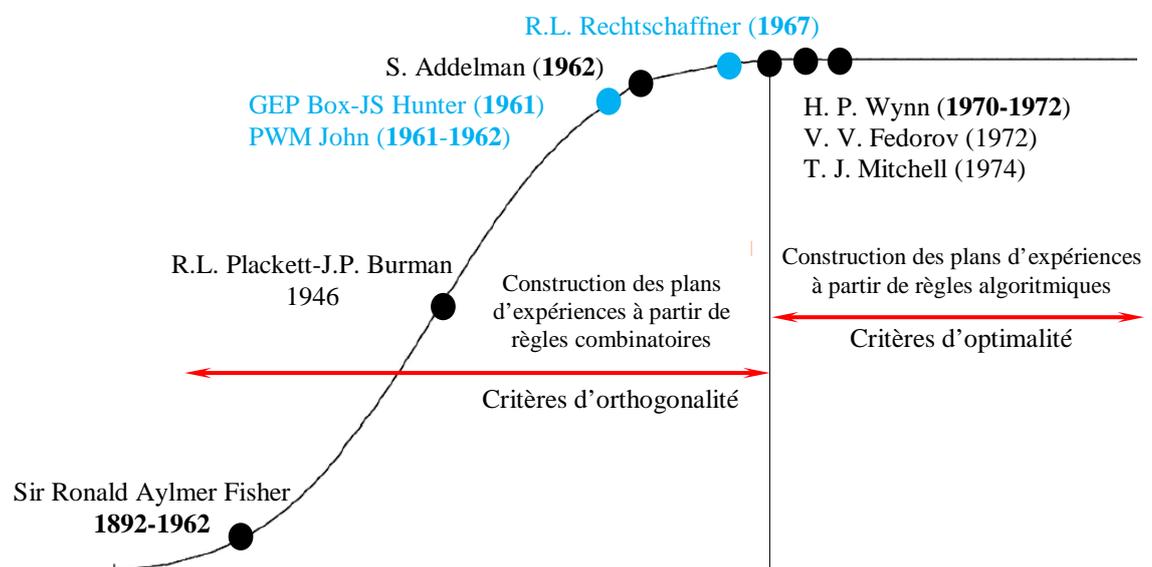


Figure 4.1 : Evolution des techniques de criblage [Louvet- 06]

Les premiers utilisateurs de cette méthode sont les agronomes qui ont vite compris l'intérêt des plans d'expériences. Cependant, à l'époque, seuls des statisticiens spécialistes pouvaient mettre en œuvre ces méthodes. A partir des années 50, avec l'introduction et la mise en place de la qualité, Taguchi et Masuyama élaborent des tables permettant de construire des plans d'expériences adaptés à la majorité des problèmes industriels. En même temps, les travaux de Taguchi ont contribué à une méthodologie facile à appliquer.

Les travaux de Fisher font apparaître les notions de répétition, de répartition au hasard ou randomisation, de constitution de blocs, d'expériences factorielles, d'effets principaux et d'interactions, (Fisher, 1925, 1926). En 1931, Fisher et Yates (1902-1993) ces collaborations résultent de nouveaux développements théoriques tels que les expériences factorielles fractionnaires, les notions d'expériences en blocs aléatoires incomplets. À partir des années 1935-1940, les notions d'expérimentation interviennent également dans le secteur industriel. Des concepts nouveaux apparaissent alors, tels que les plans de Placket et Burman (1946), la notion de surface de réponse (1952), les plans optimaux (1959) et les plans Taguchi (1959).

Depuis, les plans d'expérience ont pris un essor considérable avec le développement de l'informatique et la puissance de calcul qui l'accompagne.

Plusieurs auteurs ont utilisé des plans d'expérience pour solutionner des problèmes de pré-polissage automatique, notamment pour étudier l'influence des conditions de coupe sur la surface des pièces usinées.

L'application des plans d'expérience pour l'étude des procédés d'usinage remonte à très loin, [Wu 1964] a présenté une étude sur la durée de vie des outils de coupe basée sur la méthodologie des surfaces de réponse. Il a utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan composite pour étudier la durée de l'outil sous l'influence de variables indépendantes : l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe axiale. Ces travaux sont conduits en usinage par tournage, le matériau est un acier au carbone SAE 1 0 18, le matériau de l'outil de coupe est 162P4 78B, et les études sont réalisées sans lubrification. [Kline et al. 1982] ont étudié le fraisage en bout par le biais des plans d'expérience, ils se sont intéressés à l'impact des efforts de coupe qui se résument en la déflexion de l'outil par rapport à la pièce à usiner sur les écarts dimensionnels de la surface finie. Les équations de prédiction sont en fonction des conditions de coupe, des propriétés de l'outil et du matériau à usiner.

[Chua et al. 1993] se sont consacrés, quant à eux, à l'optimisation des conditions de coupe en utilisant des modèles mathématiques de durée de vie d'outil, des forces de coupe et de puissance consommée.

Les modèles sont développés seulement en termes de facteurs jugés influents qui se résument en la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale. L'expérimentation est conduite avec un plan complet en tournage pendant l'opération d'ébauche de la matière T4 (C 0,45 %, Si 0,25 %, Mn 0,70 %) avec un outil au carbure Sandvik 425 P25 TiN revêtu.

[Astakhnov et al. 1997] se sont penchés sur l'analyse et la méthodologie d'application des plans d'expérience dans le domaine de l'usinage des métaux.

[Kuang-Hua et Hung-Yen 1997] ont développé un modèle par la méthode de surface de réponse pour l'usinage en fraisage périphérique sans lubrification d'un alliage d'aluminium, sous l'influence de la dureté Brinell du matériau à usiner, de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur de coupe axiale et de la profondeur de coupe radiale.

[Alauddin et al. 1997] se sont intéressés, à travers les plans d'expériences, au développement d'un modèle de durée vie de l'outil en fraisage en bout de l'acier (190 HB) en usinage grande vitesse sans lubrification. Le modèle développé est fonction de la vitesse de coupe, de l'avance par dent et de la profondeur de coupe axiale.

[Darwish et al. 1997] ont présenté une étude concernant le développement d'un modèle de surface de réponse de la rugosité en tournage du super alliage au Nickel 718 (300 BHN), pour différentes matières d'outil, CBN (Nitre de bore cubique), carbure et céramique sans lubrification avec un rayon d'outil à bout sphérique constant. Le modèle est développé en termes de vitesse de coupe, d'avance par dent et de profondeur de coupe axiale. Ils ont étudié ces variables à travers les plans d'expériences utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM).

[Fuh et al. 1997] ont développé un modèle d'optimisation dimensionnelle par la méthode des surfaces de réponse pour l'usinage en fraisage périphérique sans lubrification d'un alliage d'aluminium, sous l'influence de la dureté Brinell du matériau à usiner, de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur de coupe axiale et de la profondeur de coupe radiale.

[Songmene et al. 1998] se sont servis du modèle de Darwish pour étudier l'influence de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la rugosité des pièces en composite d'aluminium GrA-Ni, usinées en tournage. Le matériau d'outil utilisé est le diamant poly-cristallin (PCD).

[Choudhury et al. 1999] ont utilisé les plans d'expériences pour étudier l'effet de l'avance, de la vitesse et de la profondeur de passe sur la durée de vie de l'outil, le fini de surface et les forces de coupe lors du tournage de l'inconel 718. Leur étude porte sur le développement et la modélisation des surfaces de réponse du système concernant la durée de vie de l'outil, le fini de surface et les forces de coupe à l'aide des plans d'expériences utilisant la méthodologie des surfaces de réponses.

[Davim 2001], l'objectif d'une de ses recherches est l'établissement d'une corrélation entre la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale avec l'évaluation de la rugosité R_a et R_t . Il a ensuite présenté l'influence des conditions de coupe sur la rugosité de surface en tournage de l'acier 9SMnPb28k (DIN) et se basant sur le plan d'expérience de Taguchi.

[Axinte et Dewes 2002] présentent un résultat détaillé de leur analyse statistique et leur modèle empirique concernant la rugosité et les contraintes résiduelles. L'influence des paramètres de coupe a été étudiée en utilisant un plan factoriel et une analyse de variance (ANOVA) qui est utilisée pour identifier l'influence des paramètres sur le rendement.

[Wang et al. 2005] présentent l'influence des conditions de coupe en fraisage sur la rugosité de surface en utilisant une machine-outil miniaturisée. Le modèle développé est fonction de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance, de la profondeur de coupe et du diamètre de la fraise. L'effet de l'interaction des paramètres sur la qualité de surface est discuté et un modèle mathématique du fini de surface est présenté.

[Kurt 2008] utilise les plans d'expériences pour prédire le fini de surface lors des opérations de perçage de l'Aluminium 2024 en fonction de l'avance, de la vitesse de coupe et du type de revêtement du foret.

4.3. Modèles empiriques et analytiques utilisés dans l'optimisation

La modélisation de l'usinage peut être développée en utilisant des approches classiques telles que la régression linéaire ou des méthodes basées sur l'intelligence artificielle. Plusieurs paramètres peuvent avoir des effets sur le processus d'usinage : vitesse de coupe V_c , l'avance f et profondeur de passe a_p seront variés simultanément lors des essais.

Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques et expérimentales a été mise en œuvre. En effet, les avantages de la méthodologie des plans d'expériences sont nombreux, on les trouve dans le développement de :

1. **Modèle de prédiction de la durée de vie de l'outil** : [Wu 1964], [Chua et al. 1993], [Alauddin et al. 1997] et [Choudhury et al. 1999], qui se sont intéressés, à travers les plans d'expériences, à développer des modèles mathématiques basés sur l'optimisation des conditions d'usinage pour prédire la durée de vie de l'outil de coupe sous la forme :

$$T = C^{ste} \cdot V_c^\alpha \cdot V_f^\beta \cdot a_e^\delta \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Avec :

- T : Durée de vie de l'outil (min) ;
- C^{ste} , α , β et δ : Constantes ;
- V_c : Vitesse de coupe (m/min) ;
- V_f : Avance (t/min) ;
- a_e : Profondeur de coupe (mm).

Ensuite, pour faciliter la détermination des constantes et des paramètres, les modèles mathématiques ont été linéarisés en effectuant une transformation logarithmique :

$$\ln(Y) = \ln(C^{ste}) + \alpha \ln(V_c) + \beta \ln(V_f) + \delta \ln(a_e) \dots\dots\dots (4.2)$$

Les paramètres et les constantes C^{ste} , α , β et δ peuvent être déterminés en utilisant l'analyse de régression multiple.

2. Modèle de la rugosité : [Darwish et al. 1997], [Choudhury et al. 1999], [Alauddin et al. 1997], [Songmene et al. 1998], [Davim, J. 2000], [Kurt et al. 2008], l'objectif de leurs travaux de recherche est l'établissement d'une corrélation entre les paramètres et les conditions de coupe en usinage avec l'évaluation de la rugosité R_a et la finition du surface des pièces.

❖ [Darwish et al. 1997] et [Choudhury et al. 1999] ont développé le modèle du fini de surface ayant la forme suivante :

$$R_a = C^{ste} \cdot V_c^k \cdot V_f^\alpha \cdot a_e^\beta \dots\dots\dots (4.3)$$

Avec :

- R_a : Fini de surface (μm) ;
- C^{ste} , k , α et β : Constantes ;
- V_c : Vitesse de coupe (m/min) ;
- V_f : Avance (t/min) ;
- a_e : Profondeur de coupe (mm).

❖ [Fuh et al. 1997], leur modèle mathématique développé pour prédire l'erreur dimensionnelle, est sous la forme :

$$\delta = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^5 b_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^5 b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \varepsilon \dots\dots\dots (4.4)$$

Avec :

- δ : Erreur dimensionnelle (μm) ;
- X_1 : Dureté Brinell du matériau à usiner (HB) ;
- X_2 : Vitesse de coupe (m/min) ;
- X_3 : Avance (t/min) ;
- X_4 : Profondeur de coupe radiale (mm) ;
- X_5 : Profondeur de coupe axiale (mm) ;
- $X_i X_j$: Interactions des facteurs ;
- b : Constantes ;
- ε : Erreur expérimentale.

❖ [Choudhury et al. 1999] et [Paulo Davim 2001] se sont aussi servis du modèle mathématique de [Fuh et al. 1997] pour étudier et optimiser la rugosité. Le modèle mathématique est le suivant :

$$R_a = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \varepsilon \dots\dots\dots (4.5)$$

Avec :

- R_a : Erreur dimensionnelle (μm) ;
- X_1 : Vitesse de coupe (rn/min) ;
- X_2 : Avance (t/min) ;
- X_3 : Profondeur de coupe (mm) ;
- $X_i X_j$: Interactions des facteurs ;

❖ Pour [Songmene et al. 1998], le modèle mathématique du fini de surface développé afin de prédire la rugosité R_a est sous la forme :

$$R_a = K_0(\alpha_1 V^k + \alpha_2 f^l + \alpha_3 d^m) \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

Avec :

- R_a : Fini de surface (μm) ;
- k_0, k, l, m et α_i : Constantes à déterminer ;
- V_c : Vitesse de coupe (rn/min) ;
- f : Avance (t/min) ;
- d : Profondeur de coupe (mm).

3. Modèle de forces de coupe : [Chua et al. 1993], [Choudhury et al. 1999], le modèle mathématique utilisé pour les forces de coupes est représenté comme suit :

$$F_{total} = C_2 V_c^k f^\alpha d^\beta \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

Avec :

- P : Puissance consommée (μm) ;
- C_2, k, α et β : Constantes à déterminer ;
- V_c : Vitesse de coupe (rn/min) ;
- f : Avance (t/min) ;
- d : Profondeur de coupe (mm).

4. Modèle de la puissance consommée : [Chua et al. 1991], [Choudhury et al. 1999], ont développé pour la puissance consommée, le modèle suivant :

$$P = C_3 V_c^k f^\alpha d^\beta \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Avec :

- P : Puissance consommée (μm) ;
- C_3, k, α et β : Constantes à déterminer ;
- V_c : Vitesse de coupe (rn/min) ;
- f : Avance (t/min) ;
- d : Profondeur de coupe (mm).

En raison du grand nombre de facteurs pouvant influencer la performance de l'usinage, il serait préférable de développer des stratégies optimales en se servant des méthodes de plan d'expériences. Les plans d'expériences permettent dans certains cas de déterminer les effets des paramètres et des éventuelles interactions, et de modéliser la réponse à partir des équations de prédiction. La réponse est ensuite optimisée et validée.

Beaucoup de chercheurs se sont concentrés sur l'élaboration des modèles empiriques de prédiction de la rugosité de surface pour un matériau donné et un outil de coupe donné.

4.4. Contexte des plans d'expériences ...

L'origine des plans d'expériences remonte au début du siècle dernier et concerne l'aspect agronomique. Ils reposent essentiellement sur des expérimentations multi facteurs et sur un traitement des résultats à l'aide de régressions multiples et d'analyse de la variance.

La méthodologie des plans d'expériences (MPE) est une stratégie de planification d'expériences scientifiques et industrielles dans le but de retirer l'information correspondant à l'objectif que l'on s'est préalablement fixé. Elle consiste à mettre en œuvre une stratégie de travail dans le but de réduire le nombre d'essais tout en atteignant rapidement les réponses aux questions posées.

Selon les textes de la littérature, le contexte d'utilisation des plans d'expérience recouvre les phénomènes de type « Boîte noire » que l'on cherche à « éclaircir » pour mieux en comprendre le fonctionnement et en optimiser les performances (figure 4.2). Cela impose une connaissance minimale du phénomène étudié avant d'entreprendre les essais. On doit être en mesure de lister les paramètres susceptibles d'agir sur le fonctionnement de la boîte noire.

Ces paramètres sont les « Entrées » appelées par la suite Facteurs ou Variables. Les performances obtenues sont les « Sorties » appelées par la suite Réponses :

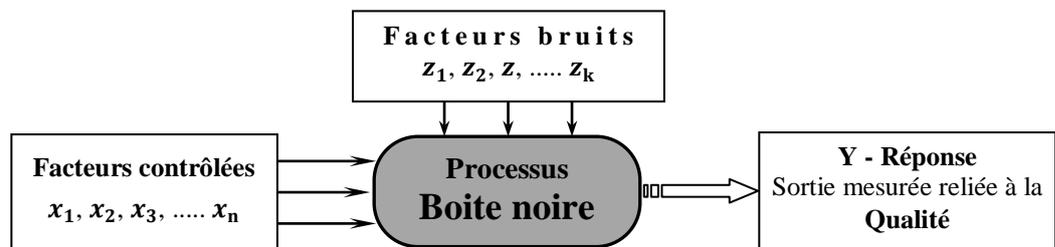


Figure 4.2 : Contexte d'utilisation des plans d'expérience

La méthode des plans d'expérience permet en effet d'obtenir un maximum d'informations à un coût minimal. En résumé, les avantages les plus reconnus des plans d'expérience sont :

- Diminuer le nombre d'essais (ou de calculs) ;
- Connaître les effets des paramètres ;
- Dédire les paramètres influents ;
- Evaluer les interactions entre paramètres ;
- Avoir une meilleure précision sur les résultats ;
- Etablir une modélisation mathématique de la réponse.

L'objectif de cette étude est, d'une part d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance par tour, caractéristiques de l'outil de polissage) sur l'état de surface des pièces usinées, la productivité, les efforts de coupe, et, d'autre part de choisir les paramètres de coupe optimaux en polissage automatique sur centre d'usinage 5-axes d'un acier (100Cr6) pour une configuration choisie à partir d'un minimum d'essais.

4.5. Méthodologies des plans d'expérience

Comme nous l'avons rappelé ci-dessus, les plans d'expériences peuvent être utilisés pour étudier des phénomènes complexes souvent non linéaires, afin de comprendre leur fonctionnement et d'optimiser leurs performances. En fait, la méthode englobe aussi bien la définition de la séquence d'essais à réaliser pour étudier un problème donné que l'analyse statistique des résultats de ces essais.

Les étapes principales constituant la démarche méthodologique d'un plan d'expérience sont les suivantes :

- **Formalisation du problème**

Cette étape consiste à recueillir un maximum d'informations concernant le phénomène étudié. On détermine l'objectif final, les contraintes de l'étude et l'optimisation à atteindre.

- **Choisir les facteurs, niveaux et interactions (Modèle de base)**

Il s'agit de définir les facteurs, leurs niveaux et les interactions retenues. C'est de loin l'étape la plus importante dans la conduite d'un Plan d'Expérience.

L'expérience permet de sélectionner certains facteurs, de définir leurs niveaux de variation, d'en figer d'autres, de sélectionner certaines interactions susceptibles d'être influentes sur la réponse.

- **Construire le plan (Choix des affectations) :**

Il s'agit de choisir le plan retenu qui peut être soit factoriel complet, soit factoriel fractionné (tables de Taguchi), et d'affecter les facteurs et interactions aux colonnes (graphe linéaire associé à la table).

- **Réaliser les essais du plan (Résultats)**

La réalisation des essais doit se faire dans des conditions optimales. Les facteurs variables sont bien aux niveaux préconisés, les facteurs figés restent stables. L'environnement de la campagne d'essais est contrôlé autant que possible, la réponse est donnée avec la plus grande précision, l'essai est, si possible, répété et les mesures sont réalisées par une unique personne compétente.

- **Analyser les résultats (effets, graphiques, variances)**

Les valeurs des réponses doivent être analysées afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur la variation constatée de la réponse. La principale méthode statistique répondant à cet objectif est l'analyse de la variance.

L'analyse des résultats sera réalisée à l'aide d'un modèle de régression multiple, les étapes de l'analyse sont :

- Analyse de la variance (ANOVA), permettra de vérifier le niveau de corrélation entre le modèle exprimé et les résultats par R^2 ;

- Éliminer les facteurs et les interactions non significatifs ;
 - Vérifier l'homogénéité des variances et la normalité des résidus ;
 - Exprimer la réponse en fonction des paramètres et des interactions significatifs, à partir d'un R^2 satisfaisant, des variances homogènes et des résidus normalement distribués ;
 - Optimiser la réponse dans le domaine expérimental.
- **Optimiser la réponse (Modèle)**

L'optimisation est retenue pour le modèle matriciel final, les effets influents et statistiquement significatifs. Les coefficients retenus du modèle donnent l'extrémum recherché pour la réponse. L'expérience permet ainsi l'élaboration d'un modèle représentatif du phénomène, l'estimation des quantités d'intérêt, la comparaison entre modèles concurrents ou de reprendre d'autres expériences avec plus d'information et de compréhension du phénomène.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. Pour cela, le choix du plan d'expérience à mettre en œuvre dépend du problème posé. Dans notre travail de recherche, seuls deux type de plans seront abordés : les plans de criblage et les plans d'optimisation.

- **Les plans de criblage** permettent de déterminer le poids des facteurs sur les réponses d'un système à partir d'un modèle.
- **Les plans d'optimisation** ou **plans à surface de réponse** permettent à partir d'un modèle mathématique polynomial, de déterminer les valeurs des facteurs influents correspondant à une réponse particulière du système.

De par le principe même du screening, l'expérimentateur a tout intérêt à tester l'influence d'un grand nombre de facteurs, même s'il présuppose la présence de grandeurs non influentes.

4.5.1. Plan de criblage par plan d'expériences

Les plans d'expériences ont pour but d'apporter le maximum d'informations avec un minimum d'expériences. La méthodologie des plans d'expériences consiste à fabriquer un modèle approximatif qui apportera des éléments d'informations à l'expérimentateur encore appelé « modèle empirique »

Pour l'ensemble des points constituant le domaine expérimental, nous voulons connaître la valeur de la réponse étudiée. Mais, pour des contraintes de coût et de temps, nous ne pouvons pas réaliser toutes les expériences du domaine expérimental.

C'est pourquoi, nous allons utiliser un modèle empirique, qui nous permettra d'avoir cette information en effectuant le minimum d'expériences.

Cette première technique et l'étape pour un plan d'expérience permet de répondre à ces quelques questions :

- Quel est l'effet d'un changement de modalités d'un facteur sur la réponse observée ?
- Comment comparer le plus objectivement possible les effets de plusieurs facteurs ?
- Les effets d'un facteur sont-ils indépendants des modalités des autres facteurs ?

De façon plus générale, des tests statistiques qui permettent de classer les facteurs entre eux, relativement à leur influence propre, seront effectués. Cela permet ainsi de rejeter ou non l'hypothèse selon laquelle le facteur n'induit pas de variation sur la réponse étudiée.

Ce modèle est de la forme générale : $f(\text{facteurs}) = \text{Réponse}$

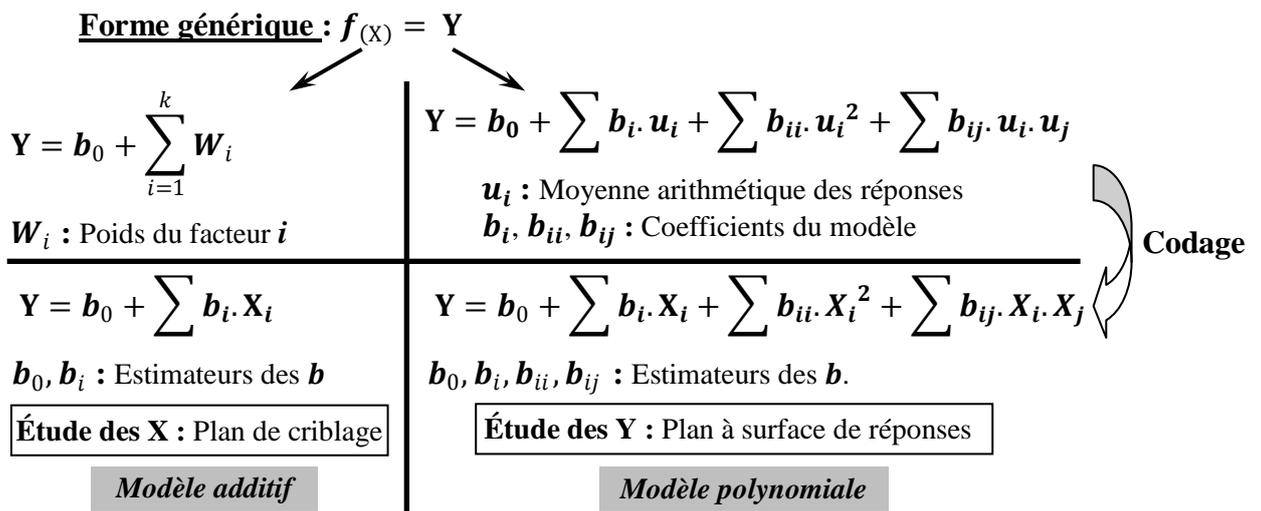


Figure 4.3 : Modèle du plan d'expérimentation [Sandrine -2004]

Ces fonctions polynomiales contiennent P coefficients ($b_0, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$) qu'il faudra estimer grâce à l'analyse des résultats d'essais.

Les plans de criblage sont des plans expérimentaux visant à identifier les facteurs les plus influents au sein d'un ensemble plus large. La nature et la qualité du modèle dépendent donc de ce que l'on souhaite établir comme relation entre les réponses et les facteurs.

Pour cela, il existe plusieurs stratégies d'expérimentation, comme, les plans factoriels complets, les plans factoriels fractionnaires, Hadamard et de Rechtschaffner sont présentés dans cette partie.

4.5.1.1. Plans factoriels complets

Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et à exploiter. Plusieurs exemples d'application dans le domaine de l'industrie illustrent leur utilisation pour estimer les effets des facteurs et de leurs interactions avant d'entreprendre une étude d'optimisation par l'application de la méthodologie des surfaces de réponses.

La matrice d'expériences d'un plan factoriel complet à k facteurs à deux niveaux est obtenue par la combinaison, de toutes les manières possibles, des deux niveaux attribués à chaque facteur.

Le nombre d'expériences se calcule avec la formule suivante :

$$N = n^k \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

n : Nombre de niveau des facteurs, généralement 2 ;

k : Nombre de facteurs au total ;

Les plans factoriels complets permettent de tester toutes les combinaisons des paramètres sélectionnés à la fois à chaque expérience, mais de manière programmée et raisonnable, c'est une stratégie très longue et coûteuse.

Pour illustrer la croissance rapide du nombre d'expériences, voici un comparatif en prenant en compte le fait qu'il faut 5 minutes par expérience :

- 3 facteurs à 2 niveaux, 2^3 : 8 expériences soit 40 mn.
- 5 facteurs à 2 niveaux, 2^5 : 32 expériences soit plus de 2 h.
- 7 facteurs à 2 niveaux, 2^7 : 128 expériences soit plus de 10 h.
- 9 facteurs à 2 niveaux, 2^9 : 512 expériences soit plus de 42 h.
- 9 facteurs à 3 niveaux, 3^9 : 19683 expériences soit plus de 69 jours.
- 15 facteurs sur 3 niveaux, 3^{15} : 14348907 soit plus de 136 ans.

Ces plans permettent, certes, le calcul de tous les effets principaux et de toutes les interactions mais la plupart de ces interactions ne présentent aucun intérêt pour l'expérimentateur.

Un plan fractionnaire permet de réduire le nombre d'essais à effectuer ; on n'effectue dans l'expérimentation qu'une fraction des essais du plan complet.

4.5.1.2. Plans factoriels fractionnaires

Les plans fractionnaires sont très utiles et mettent en évidence l'intérêt primordial de la méthode des plans d'expériences, ils permettent d'associer une bonne qualité des résultats tout en limitant le nombre d'essais. Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs, mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets.

Mais cependant, il est prudent de garder un certain esprit critique face aux résultats que fournissent les plans fractionnaires, car ils nécessitent une certaine maîtrise de leur construction et de l'interprétation des résultats.

À la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de n équations à p inconnues avec $p \gg n$, ce type de système d'équations est impossible à résoudre.

Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les inconnues et on résout le système pour ces groupes d'inconnues. On appelle ces groupes d'inconnues des contrastes et on dit que les inconnues sont aliasées dans les contrastes.

Le nombre d'essai est réduit et se calcule de la manière suivante :

$$N_{essais} = n^{k-p} \dots\dots\dots (4.10)$$

Avec :

- n : Nombre de niveau des facteurs, généralement 2 ;
- k : Nombre de facteurs au total ;
- p : Nombre de facteurs aliésés dans le modèle initial.

4.5.1.3. Notion d'alias et de contraste

La théorie des alias est à la base de la mise en place d'un plan fractionnaire. Maîtriser cette théorie est essentielle pour construire les plans fractionnaires et surtout savoir interpréter les résultats.

Supposons que l'on réalise un plan factoriel fractionnaire pour étudier k facteurs. Le modèle appliqué de la réponse est un polynôme contenant $p = 2^k$ coefficients : une constante, des effets principaux et des interactions.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \varepsilon \dots\dots\dots (4.11)$$

Si l'on réalise n expériences, on obtient un système de n équations à p inconnues avec $p > n$ (on ne tient pas compte des résidus) :

$$[Y]_{(n, 1)} = [X]_{(n, p)} [A]_{(p, 1)} \dots\dots\dots (4.12)$$

Le système d'équations (4.12) est impossible à résoudre, puisque $p > n$.

On recoure à un autre modèle, c'est, le modèle de substitution, ne contenant que n inconnues. Cela revient à regrouper les coefficients du modèle (4.12) dans de nouvelles inconnues, les *contrastes*.

Les *contrastes* sont notés ℓ . On s'arrange pour que le système possède n équations et n inconnues, il s'écrit :

$$[Y]_{(n, 1)} = [X_s]_{(n, n)} [\ell]_{(n, 1)} \dots\dots\dots (4.13)$$

La matrice $[X_s]$ dépend de l'emplacement des points expérimentaux du plan fractionnaire et du modèle (4.13).

Pour interpréter les résultats, Il faut trouver la relation qui existe entre les contrastes du modèle (4.13) et les coefficients du modèle (4.12).

Cette relation dépend de la matrice $[X_s]_{(n, n)}$ et de la matrice $[X]_{(n, p)}$.

On décompose la matrice $[X]_{(n, p)}$ de la formule (4.12) en 2 sous-matrices, $[X_s]_{(n, n)}$ et $[X_\beta]_{(n, p-n)}$:

$$[X] = [X_s \quad X_\beta] \dots\dots\dots (4.14)$$

La relation (4.14) est développée de la manière suivante, en décomposant la matrice $[A]_{(p, 1)}$ en deux sous-matrices $[A_\alpha]_{(n, 1)}$ et $[A_\beta]_{(p-n, 1)}$:

$$[Y]_{(n, 1)} = [X]_{(n, p)}[A]_{(p, 1)} = [X_s \quad X_\beta] \begin{bmatrix} A_\alpha \\ A_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.15)$$

Soit :

$$[Y]_{(n, 1)} = [X_s]_{(n, n)}[A_\alpha]_{(n, 1)} + [X_\beta]_{(n, p-n)}[A_\beta]_{(p-n, 1)} \dots\dots (4.16)$$

En égalant les expressions (4.13) et (4.16) du vecteur réponse $[Y]$, on obtient :

$$[Y] = [X_s][\ell] = [X_s][A_\alpha] + [X_\beta][A_\beta] \dots\dots\dots (4.17)$$

D'où :

$$[\ell] = [A_\alpha] + ([X_s]^T[X_s])^{-1}[X_s]^T[X_\beta][A_\beta] \dots\dots\dots (4.18)$$

Il est donc possible de calculer les contrastes du modèle (4.13) en fonction des coefficients du modèle (4.16).

La matrice, est de la forme :

$$([X_s]^T[X_s])^{-1}[X_s]^T[X_\beta][A_\beta] \dots\dots\dots (4.19)$$

C'est la matrice des aliases. C'est une matrice de $(n, p - n)$.

Cette technique consiste à rassembler les inconnues du plan d'expériences (les effets des différents facteurs et des interactions) par groupes.

4.5.1.4. Plans de Hadamard

Les matrices d'expériences de criblage les plus connues pour des facteurs à 2 niveaux sont les matrices d'Hadamard ou de Plackett-Burman, qui permettent une estimation efficace des effets principaux des facteurs d'un système supposé exclusivement additif sans interaction. Pour estimer les effets principaux de N paramètres, un plan de Hadamard nécessite $N+1$ expériences.

Les matrices de Hadamard sont composées, comme les matrices factorielles, de +1 et -1. Ces matrices permettent un tri efficace d'un grand nombre de facteurs et elles constituent une classe de matrices d'expériences orthogonales dédiées au criblage de facteurs à 02 niveaux.

Elles n'existent que pour N (nombre d'expériences) = 2 et des valeurs de N multiple de 4. N est appelé : Nombre d'Hadamard, c'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, ... lignes. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui, eux, ont seulement 2^k lignes (4, 8, 16, ... etc.).

Le modèle mathématique est alors un modèle sans interaction :

$$Y = b_0 + \sum b_i \cdot X_i + \varepsilon \dots\dots\dots (4.20)$$

Avec :

- Y : Réponse du modèle ;
- b₀ : Moyenne théorique de la réponse ;
- b_i : Effets principaux des facteurs X_i ;
- ε : Estimateur d'erreur du modèle.

4.5.1.5. Critère de construction " Matrice d'Hadamard "

L'analyste français Jacques Hadamard a démontré que pour atteindre en N expériences la variance minimale de Cauchy-Schwartz, la matrice X associée au plan doit vérifier la relation :

$$(X^T \cdot X) = N \cdot I \dots\dots\dots (4.21)$$

Où : X^T est la matrice transposée de X, I : la matrice unité.

Comme cité précédemment, les matrices d'Hadamard sont des matrices orthogonales et ont pour éléments 1 ou -1, elles n'existent que pour N = 2 ou N multiple de 4. La matrice d'Hadamard pour N = 2 s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

et pour N = 4, la matrice s'écrit :

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Si N est multiple de 4, les matrices d'Hadamard se construisent à partir des N - 1 derniers termes de la première ligne.

Ces premières lignes sont données par :

- N = 8 + + + - + - -
- N = 12 + + - + + + - - - + -
- N = 16 + + + + - + - + + - - + - - -
- N = 20 + + - - + + + + - + - - - - + + -
- N = 24 + + + + + - + + - - + + - - + - + - - - -

Ainsi, la matrice complète se construit de la manière suivante :

- La première ligne : Les N - 1 signes ;
- De la deuxième ligne et jusqu'à la (N - 1)^{ème} ligne : Prendre le dernier signe de la ligne précédente et compléter par les N - 2 signes restants.
- La dernière ligne : des signes -.

On obtient ainsi un tableau de dimension N×(N -1), on lui rajoute une première colonne de signes + pour avoir une matrice d'Hadamard.

4.5.2. Obtention de la matrice d'expérience

« Le choix du plan d'expériences dépend de la nature des questions à traiter, du degré de généralité recherché pour les conclusions et des ressources disponibles »

Norme ISO 3534-3

Les matrices d'expériences correspondent à une représentation mathématique de l'organisation des effets. Il s'agit de la matrice du modèle qui sera nommée [X] dans la suite. L'intérêt d'un Plan d'Expériences consiste à gérer au mieux tous les facteurs susceptibles, compte tenu de la connaissance préalable du système, d'avoir une influence sur la réponse, et de les étudier en un minimum d'expériences.

Connaissant les facteurs qui ont une influence sur le processus de polissage, il était naturel de tester ceux-ci vis-à-vis de la qualité du processus de polissage.

Les réponses recherchées sont :

- **Débit matière** : Volume utilisé / temps usinage ;
- **Usure de l'outil** (Capuchon) : Mesure directe des diamètres à différentes hauteurs grâce à un laser placé dans la machine ;
- **Rugosité** : R_a , P_a , ...

La technique du criblage permet d'avancer dans la compréhension de tout système. Elle donne ainsi la possibilité de ne retenir que les grandeurs dignes d'intérêt.

Huit facteurs ont été inventoriés et le criblage a non seulement permis d'estimer leur influence "poids".

Donc, on souhaite mesurer l'influence des facteurs suivants :

❖ Outil

- Granulométrie : 150 / 320
- Lubrifiant : Non / Oui

❖ Conditions de coupe

- a_e : 0,05/0,1 mm
- N : 6000/12000 tr/min
- Vf : 1000/3000 mm/min

❖ Paramètre de motif

- **Forme de la "Trochoïde"**
 - R/a ($R = 4$ mm) : 0,1/ 4
- N° / mm : 0,5/ 4

❖ Forme du motif : Trochoïdal / Triangulaire

4.5.3. Choix des facteurs et du domaine expérimental

Huit facteurs ont été inventoriés pour l'étape du criblage. Afin de tester d'éventuels effets de ces facteurs, deux niveaux ont été affectés à chacun d'entre eux. Pour un plan complet, il faudrait $2^8 = 256$ expériences.

Dans le plan de 15 expériences choisi, chaque niveau de chaque facteur intervient 9 fois dans le plan, ce qui en fait un plan fractionnaire orthogonal. Ce plan, classique, a été déterminé par le logiciel Nemrod. Celui-ci est le suivant :

Tableau 4.1 : Domaine de variation des facteurs ou domaine d'étude

Facteurs	Niveau 1	Niveau 2
Granulométrie (#)	150	320
Lubrification	Non	Oui
Profondeur de passe (a_e)	0,05	0,1
Vitesse de rotation (N)	6000	12000
Vitesse d'avance (V_f)	1000	3000
R/a ($R = 4$ mm)	0,1	4
N^{bre} (motif/mm)	0,5	4
Forme du motif	Trochoïdal	Triangulaire

4.5.4. Codage des variables

L'intérêt du codage de variables, tient à l'homogénéité de l'équation polynomiale (modèle) que l'on établit pour la représentation mathématique de la réponse.

En présence des grandeurs exprimées dans des unités différentes ou bien présentant des étendues différentes, il est nécessaire de transformer les variables afin de comparer les influences des facteurs entre elles. Etant donnée une variable x à une valeur dans l'intervalle $[a, b]$, la variable codée qui lui est associée est x^* à valeurs dans $[-\Delta, \Delta]$, obtenue par la transformation affine suivante :

$$x^* = \Delta \cdot \left[\frac{2 \cdot x - (a + b)}{(b - a)} \right] \dots\dots\dots (4.22)$$

Une telle transformation est intéressante si l'on utilise la même valeur de Δ pour tous les facteurs de l'étude (toutes les variables prendront leurs valeurs dans l'intervalle commun $[-\Delta, \Delta]$). Dans la plupart des cas la valeur $\Delta = 1$ est utilisée. Dans le cas où les variables sont codées, toutes varient entre les mêmes valeurs minimales et maximales (respectivement -1 et $+1$ notation largement acceptée quand il y a deux niveaux par facteur) elles n'ont plus de dimension, et les coefficients b_i ont tous alors la dimension de la réponse. Le codage des variables améliore ainsi la précision des calculs et permet de comparer un facteur par rapport aux autres sans l'influence de leurs grandeurs, ceci est intéressant pour déterminer l'importance relative de chaque facteur et le sens de sa contribution (+ ou -).

D'après Goupy J. [Goupy 2000] lorsque l'on attribue la valeur -1 au niveau bas et la valeur $+1$ au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- On change l'unité de mesure ;
- On déplace l'origine des mesures.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites (**v.c.r.**) ou variables codées (*centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité*).

Les variables centrées réduites x^* sont utilisées pour faciliter les comparaisons et l'étude des variations. L'intérêt de ce type de codage est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quels que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs.

Exemple

Supposons que la variable t (température d'entrée en °C) soit à valeurs dans l'intervalle $[60, 80]$.

On peut donc coder cette variable en utilisant t^* telle que :

$$t^* = \Delta \cdot \left[\frac{2t - (a+b)}{(b-a)} \right] \Rightarrow t^* = \frac{t-70}{10} \Rightarrow t = 10 \cdot t^* + 70$$

On a alors les correspondances suivantes :

t [°C]	60	70	80
t^*	-1	0	+1

En travaillant avec ces variables codées, nous pouvons comparer directement leurs différents effets sans tenir compte de leurs unités d'origine.

Mentionnons que seules les valeurs extrêmes et centrales de chaque facteur seront testées. À cette fin, ces valeurs sont codées de la manière présentée dans le tableau 4.2 ci-dessous. Les variables sont codées en tenant compte des conditions extrêmes de coupe de la MOCN et des recommandations d'utilisation de l'outil, pour éviter les vibrations et les éventuels incidents.

Table 4.2 : Codage des facteurs pour criblage

	Facteur	Unité	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
X_1	Granulométrie (#)	Sans	- 1 : 150	+ 1 : 320
X_2	Lubrification	Sans	- 1 : Non	+ 1 : Oui
X_3	Profondeur de passe (a_e)	mm	- 1 : 0,05	+ 1 : 0,1
X_4	Vitesse de rotation (N)	t/min	- 1 : 6000	+ 1 : 12000
X_5	Vitesse d'avance (V_f)	mm/min	- 1 : 1000	+ 1 : 3000
X_6	R/a ($R = 4$ mm)	Sans	- 1 : 0,1	+ 1 : 4
X_7	N^{bre} (motif/mm)	Sans	- 1 : 0,5	+ 1 : 4
X_8	Forme du motif	Sans	- 1 : Trochoïdal	+ 1 : Triangulaire

4.5.5. Codage de la matrice d'expériences

La matrice des expériences $[X_N]$ est une entité mathématique présentée sous forme de tableau comportant autant de colonnes que de facteurs (k), et autant de lignes que de combinaisons (N) de niveaux ou de modalités retenues dans le plan d'expérience.

La matrice s'exprime sous forme codée (au moyen des nombres -1 et +1), et représentée dans le tableau 4.3, qui indique le nombre d'expériences à réaliser avec la façon de faire varier les facteurs et l'ordre dans lequel il faut réaliser les expériences.

Table 4.3 : Matrice des expériences pour criblage des facteurs

N° Expérience	Granulométrie	Lubrification	a_e	N	V_f	R/a ($R = 4$ mm)	N ^{bre} /mm	Forme du motif
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

La mise en œuvre des expériences ne pose pas à ce stade de problèmes particuliers, l'affectation des variables de prédiction dans les colonnes du tableau représentant le plan d'expériences reprend l'ordre de présentation de ces variables. Les expériences ont été effectuées dans l'ordre du tableau ci-dessous :

Table 4.4 : Organisation des essais pour plan d'expérience

N° Expérience	Granulométrie	Lubrification	a_e (mm)	N (t/mm)	V_f (mm/min)	R/a ($R = 4$ mm)	N ^{bre} /mm	Forme du motif
1	320	Oui	0,05	12000	3000	4	0,5	Trochoïdale
2	150	Oui	0,1	6000	3000	4	4	Trochoïdale
3	320	Non	0,1	12000	1000	4	4	Triangulaire
4	150	Oui	0,05	12000	3000	0,1	4	Triangulaire
5	150	Non	0,1	6000	3000	4	0,5	Triangulaire
6	150	Non	0,05	12000	1000	4	4	Trochoïdale
7	320	Non	0,05	6000	3000	0,1	4	Triangulaire
8	320	Oui	0,05	6000	1000	4	0,5	Triangulaire
9	320	Oui	0,1	6000	1000	0,1	4	Trochoïdale
10	150	Oui	0,1	12000	1000	0,1	0,5	Triangulaire
11	320	Non	0,1	12000	3000	0,1	0,5	Trochoïdale
12	150	Non	0,05	6000	1000	0,1	0,5	Trochoïdale

4.5.6. Construction de la matrice du modèle

La matrice des essais à réaliser pour obtenir le plan d'expériences optimal se déduit en fait des critères permettant d'obtenir les coefficients avec le maximum de précision. Le système d'équations à résoudre doit présenter des coefficients devant les inconnues (qui sont les coefficients du modèle à déterminer) pouvant se mettre sous la forme d'une matrice nommée matrice des effets.

La matrice $[X]$ du modèle ou matrice des effets, servant au calcul des coefficients du modèle, s'obtient en ajoutant à gauche de la matrice des expériences une colonne ne contenant que des + 1, Cette colonne servira au calcul de la constante du modèle β .

Table 4.4 : Matrice du modèle

b	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
1	1	-1	1	1	-1	1	1	1
1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

La notion de **matrice du modèle** traduit l'application de l'équation du modèle pour chacune des combinaisons définies à partir de la matrice d'expérience. De manière générale, la matrice du modèle est définie à partir de N lignes et de p colonnes. Le nombre de colonnes correspond au nombre de coefficients à estimer dans le modèle.

La matrice d'information est obtenue à partir du produit matriciel entre la transposée de la matrice du modèle $[X]^T$ et la matrice du modèle $[X]$ elle-même. Il s'agit d'une matrice carrée de rang p qui joue un rôle essentiel dans la construction des plans optimaux.

Parmi les critères d'optimalité les plus répandus, celui qui consiste à définir des combinaisons des niveaux des facteurs de manière à maximiser le déterminant de la matrice d'information s'appelle le critère de D-optimalité.

En présence d'un arrangement orthogonal, la matrice d'information est diagonale, donc, elle garantit une estimation des effets moyens avec une incertitude minimale.

La méthode des moindres carrés conduit ensuite à inverser la matrice d'information pour définir la matrice de dispersion. Les termes diagonaux de cette matrice étant proportionnels à l'incertitude associée à l'estimation des coefficients du modèle.

4.5.7. Formulation mathématique : Choix du modèle

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne, a priori, une loi d'évolution dont la formulation la plus générale.

Soit \mathcal{P} un plan d'expérience, \mathcal{U} l'ensemble des n unités expérimentales et $Y_{u, x}$ l'aléatoire observé lorsque le traitement $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ est appliqué à l'unité expérimentale. Les (x_1, x_2, \dots, x_m) sont les réalisations de m facteurs quantitatifs (X_1, X_2, \dots, X_m) contrôlés. On cherche à modéliser une variable quantitative $Y_{u, x}$ en fonction de variables explicatives quantitatives (X_1, X_2, \dots, X_m) .

$$\text{On suppose que : } Y_{u, x} = f(x) + \varepsilon_{u, x} \dots \dots \dots (4.23)$$

Il est donc naturel d'analyser dans les détails cette composante primordiale.

4.5.7.1. Modèle additif sans couplage (ou des facteurs principaux)

Lorsque l'objectif consiste à hiérarchiser les effets moyens des facteurs à partir d'une étude de criblage, la forme générale suivante, appelée modèle additif sans couplage, peut être adoptée.

La relation mathématique reliant ces variables sera de la forme :

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot X_i + \varepsilon \dots \dots \dots (4.24)$$

Le coefficient β_0 représente la moyenne arithmétique des réponses mesurées Y à partir des N expériences du plan.

$$\beta_0 = \bar{Y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Y \dots \dots \dots (4.25)$$

Pour ce modèle, le nombre d'inconnues à estimer est défini à partir de la relation suivante :

$$P = 1 + \sum_{i=1}^k (m_i - 1) \dots \dots \dots (4.26)$$

Avec :

m_i : Nombre de modalités du facteur X_i .

Pour 3 facteurs, l'équation peut s'écrire :

$$Y_{\text{modèle}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 = \beta_0 + [X_1 \quad X_2 \quad X_3] \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}$$

Ce type de modèle est typiquement utilisé dans le cadre de la méthodologie des plans d'expériences. Il est également employé pour le criblage avec certains plans où les interactions entre facteurs ne sont pas gérées (plans de Plackett-Burman, Taguchi, ...).

4.5.7.1. Calcul des coefficients du modèle additif

L'analyse mathématique des résultats d'essais a pour objectif de calculer les coefficients du modèle et par la suite les résidus qu'engendre ce modèle.

On cherche à modéliser la relation entre la variables réponses (variables à expliquer Y_i) et les variables opératoires de l'opération de polissage (variable explicative X_i). Le modèle le plus simple est la régression linéaire simple qui s'écrit sous la forme :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_{i1} + \beta_2 \cdot X_{i2} + \dots + \beta_p \cdot X_{ip} + \varepsilon_i \quad \text{pour } i = 1 \dots n$$

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j \cdot X_{ij} + \varepsilon_i \dots\dots\dots (4.28)$$

Où :

ε_i : Erreur du modèle (v.a.r.) (part de variabilité de Y qui n'est pas expliquée par le lien fonctionnel linéaire).

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: Coefficients du modèle, constantes (valeurs fixes dans la population).

Avec les hypothèses suivantes :

1. Les ε_i sont des termes d'erreur, non observés, indépendants et identiquement distribués : $E(\varepsilon_i) = 0$; $Var(\varepsilon) = \sigma^2 I$.
2. Les termes x_i sont supposés déterministes (facteurs contrôlés) ou bien l'erreur ε est indépendante de la distribution conjointe de (X_1, X_2, \dots, X_m) .

On écrit dans ce dernier cas que :

$$E(Y|X_1, X_2, \dots, X_m) = \beta_0 + \beta_{i1} \cdot X_{i1} + \beta_{i2} \cdot X_{i2} + \dots + \beta_{pm} \cdot X_{pm}$$

$$Var(Y|X_1, X_2, \dots, X_m) = \sigma^2$$

3. Les paramètres inconnus $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ sont supposés constants.
4. En option, pour l'étude spécifique des lois des estimateurs, une quatrième hypothèse considère la normalité de la variable d'erreur ε ($N(0 ; \sigma^2 I)$).
Les ε_i sont alors i.i.d. de loi $N(0 ; \sigma^2)$.

Les données sont rangées dans une matrice $X_{(n \times (p+1))}$ de terme général x_i^j , dont la première colonne contient le vecteur 1 ($x_0^j = 1$), et dans un vecteur Y de terme général y_i .

En notant les vecteurs $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p]$ et $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p]$.

Le modèle s'écrit sous forme matricielle comme suit :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad \dots \dots \dots (4.32)$$

\mathbf{X} : la matrice ($n \times p$), appelée *matrice du modèle* ou *matrice des effets* $[\mathbf{X}]_{(n \times p)}$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p-1} \\ \mathbf{1} & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{1} & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np-1} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (4.33)$$

p : le nombre de coefficients du modèle postulé ;

$\boldsymbol{\beta}$: le vecteur colonne des paramètres à estimer $\beta_i, [\boldsymbol{\beta}^T = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (4.34)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$: le vecteur colonne des erreurs expérimentales aléatoires $\varepsilon_i, [\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]$.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (4.35)$$

Le modèle matriciel, s'écrit sous la forme classique suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p-1} \\ \mathbf{1} & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{1} & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np-1} \end{bmatrix} \mathbf{X} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (4.36)$$

Les réponses calculées par les modèles utilisés ne sont généralement pas exactement égales aux réponses mesurées expérimentalement.

Pour chaque expérience existe alors un écart dit de modélisation.

Le vecteur $\boldsymbol{\varepsilon}$ représentera ces écarts.

4.5.7.3. Estimation par M.C.

Connaissant une estimation des coefficients du modèle, il est possible d'utiliser ce dernier afin de calculer une estimation de la réponse pour chacun des traitements du plan d'expériences.

Il faut estimer les paramètres $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ du modèle de régression et ce de manière optimale.

L'expression à minimiser sur $\beta \in \mathbb{R}^{p+1}$ s'écrit :

SCE : Somme des carrés des écarts, $\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i$

y_i : Valeur mesurée ;

\hat{y}_i : Valeur calculée de la façon suivante :

$$\hat{y}_i = b_0 - b_1 \cdot X_{i1} - b_2 \cdot X_{i2} - \dots - b_p \cdot X_{ip} \dots \dots \dots (4.37)$$

Minimisation de la SCE

⇒ Annulation des dérivées partielles de la SCE par rapport à chaque b_i .

$$SCE(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \sum_{j=1}^p (\epsilon_j)^2 = \sum_{j=1}^p \left(Y_j - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j \cdot X_{ij} \right)^2 = \|\epsilon\|^2$$

$$\begin{aligned} S(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) &= \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot X_{i1} - \beta_2 \cdot X_{i2} - \dots - \beta_p \cdot X_{ip} \right)^2 \\ &= \|Y - X \cdot \beta\| \\ &= (Y - X \cdot \beta)^T (Y - X \cdot \beta) \\ &= Y^T Y - 2\beta^T X^T Y + \beta^T X^T X \beta \dots \dots \dots (4.39) \end{aligned}$$

Par dérivation matricielle de la dernière équation on obtient les équations normales :

$$X^T Y - \beta^T X^T X \beta = 0 \dots \dots \dots (4.40)$$

Dont la solution correspond bien à un minimum car la matrice Hessienne $2\beta^T X^T$ est semi définie-positive.

Nous exécutons l'hypothèse supplémentaire que la matrice $X^T X$ est inversible, c'est-à-dire que la matrice X est de rang $(p + 1)$ et donc qu'il n'existe pas de colinéarité entre ses colonnes.

En pratique, si cette hypothèse n'est pas vérifiée, il suffit de supprimer des colonnes de X et donc des variables du modèle.

Alors, l'estimation des paramètres β_i est donnée par :

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \dots \dots \dots (4.41)$$

Intervalle de confiance sur les β_i

$$IC_{(1-\alpha)}(\beta_i) =]\mathbf{b}_i - t_{(\alpha/2, \nu)}S\beta_i; \mathbf{b}_i + t_{(\alpha/2, \nu)}S\beta_i[\dots\dots\dots (4.42)$$

$S\beta_i$: écart-type estimé de β_i ;

$t_{(\alpha/2, \nu)}$: Valeur seuil lue dans la table de Student pour $\nu = n - k - 1$

k : Nombre de variables explicatives X_i

Estimation S_ε^2 de σ_ε^2

Par la méthode du maximum de vraisemblance, on obtient :

$$S_\varepsilon^2 = \frac{\sum_{j=1}(\varepsilon_j)^2}{n - k - 1} \dots\dots\dots (4.43)$$

Décomposition

$$\sum_i(y_i - m_y)^2 = \sum_i(\hat{y}_i - m_y)^2 + \sum_i(y_i - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots (4.44)$$

$$SCE_t = SCE_e + SCE_r \dots\dots\dots (4.45)$$

Signification des termes

Terme	SCE	ddl
$\sum_i (y_i - m_y)^2$	SCE_t : Somme des carrés totale	$n - 1$
$\sum_i (\hat{y}_i - m_y)^2$	SCE_e : Somme des carrés expliquée	k
$\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$	SCE_r : Somme des carrés résiduelle	$n - k - 1$

Coefficient de détermination

$$R^2 = \frac{\sum_i(\hat{y}_i - m_y)^2}{\sum_i(y_i - m_y)^2} = \frac{SCE_e}{SCE_t} \dots\dots\dots (4.46)$$

Remarques

- R^2 rend compte de la qualité de l'ajustement (= pouvoir explicatif du modèle = % de variation expliquée par les variables X_i) ;
- Il s'agit du carré du coefficient de corrélation multiple ;
- $0 \leq R^2 \leq 1$
 - $R^2 = 1$: Très bon ajustement ;
 - $R^2 = 0$: Pas d'ajustement linéaire.
- R^2 augmente avec le nombre de données (pertinentes).

4.6. Méthodologie des surfaces de réponse

La méthodologie des surfaces de réponses constitue le second volet de la méthode des plans d'expériences. L'objectif de cette méthodologie est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, permet grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie et le variables d'entrée pour optimiser les paramètres du procédé afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \varepsilon \dots\dots\dots (4.47)$$

Où : f est la fonction-réponse qui dépend des variables aléatoires x_i indépendantes ; ε est un terme qui représente d'autres sources de variabilité (Erreurs).

Nous avons choisi un plan d'expérience basé sur la méthode de Box-Behnken permettant de faire varier les principaux facteurs du procédé de polissage automatique sur centre d'usinage 5-axe afin de choisir un optimum grâce à un modèle quadratique.

4.6.1. Construction de la méthodologie de surface de réponse

Nous avons vu dans le quatrième chapitre qu'une étude de criblage permet, à travers l'obtention d'un modèle additif, d'identifier les éléments ayant une influence significative sur une réponse parmi une liste de facteurs.

La méthodologie de surface de réponse consiste à représenter une réponse y comme la somme d'un méta-modèle polynomial de faible degré (le plus souvent d'ordre deux) et d'un terme d'erreur ε ayant une distribution normale avec une moyenne nulle $E(\varepsilon) = 0$.

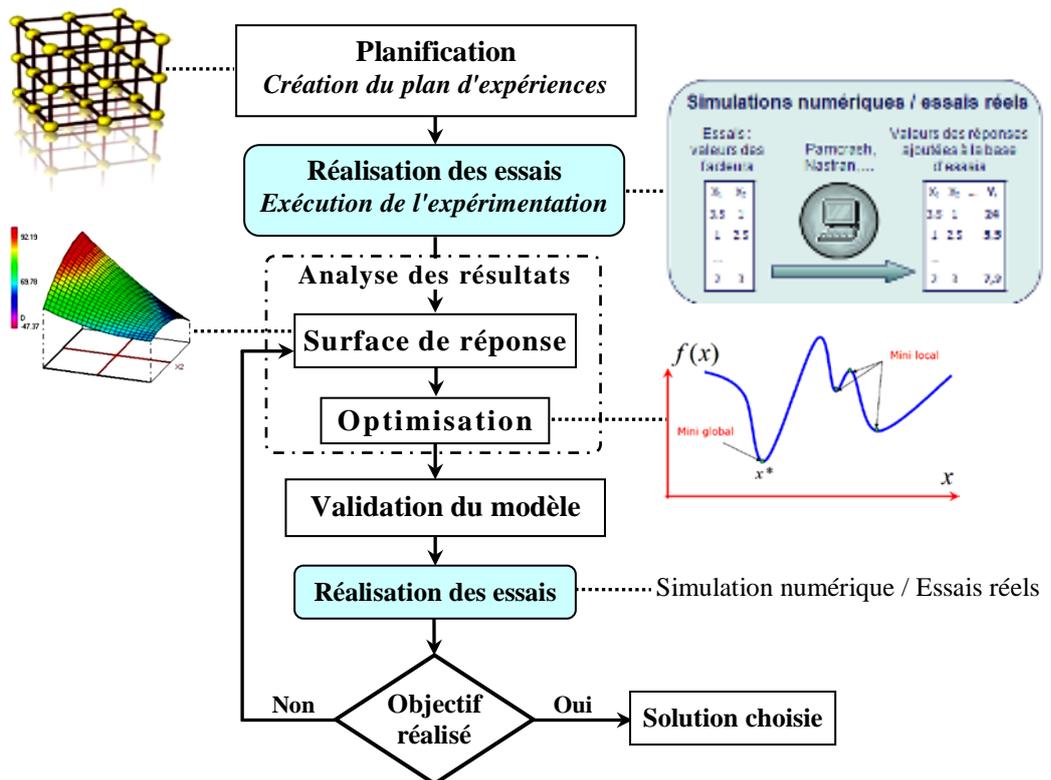


Figure 4.5 : Méthodologie d'optimisation par surface de réponse

Les étapes à suivre dans le cas d'une étude de surface de réponse sont les mêmes que celles réalisées lors d'une étude de criblage.

Cependant, leur contenu est différent. En effet, le modèle à établir lors d'une étude de surface de réponse n'a pas la même forme que celui recherché dans une étude de criblage. Or, le contenu des étapes à suivre lorsqu'on mène une étude par plan d'expériences est étroitement lié à la forme du modèle recherché (figure 4.5).

Les différentes étapes à suivre pour mener à bien une étude de surface de réponse par plan d'expériences sont rappelées ici :

1. Planification :

- Définir problème/processus - objectifs ;
- Choix d'une stratégie ;
- Définition des facteurs ;
 - Choisir les variables de réponse (s) Y à mesurer ;
 - Choisir les variables facteurs x et l'espace de variation ;
- Définition du domaine expérimental ;
- Définition du modèle empirique.

2. Exécution de l'expérimentation

- Construction du plan d'expériences ;
- Préparer l'expérience ;
- Conduire l'expérimentation.

3. Analyse statistique des résultats

- Analyse globale des résultats d'essais ;
- Analyse mathématique des résultats d'essais ;
- Analyse statistique du modèle ;
- Analyse graphique du modèle.

4. Validation du modèle et des informations obtenues.

4.6.2. Analyse statistique des données

Le comportement de la surface de réponse a été expliqué par un modèle polynomial complet de second ordre comme selon l'équation suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad \dots \quad (4.48)$$

Ce type de modèle permet l'estimation d'une surface de réponse pour étudier les effets linéaires, les effets quadratiques et les effets d'interaction :

- y : Représente la fonction de réponse ;

- β_0 : Constante polynomiale qui exprime l'effet moyen général des facteurs ;
- β_i : Coefficients des effets linéaire des facteurs ;
- β_{ii} : Coefficients des effets quadratiques des facteurs ;
- β_{ij} : Coefficients des effets d'interaction entre les facteurs ;
- x_i et x_j : Représentent les variables codées indépendant.

Avec la condition liée aux degrés de liberté $N = p$ (N : nombre d'expériences et p : nombre de coefficients du modèle), et pour les situations les plus courantes $N > p$, les modèles utilisés ne passent pas exactement par les points d'expériences.

Les coefficients des polynômes modélisateurs sont alors calculés par l'équation :

$$y = X \cdot \beta + \varepsilon \dots\dots\dots (4.49)$$

L'estimation $\hat{\beta}$ du vecteur β doit être réalisée de telle façon que l'erreur de modélisation soit minimale. Le critère des moindres carrés traduit cette exigence par un objectif équivalent : Minimisation des carrés des écarts ou encore, en supposant la normalité de la valeur d'erreur $\varepsilon(N(0, \sigma^2))$.

$$\| \varepsilon \|^2 = \| y - X \cdot \hat{\beta} \|^2 \dots\dots\dots (4.50)$$

Minimal tel que :

$$\frac{\partial \varepsilon^T \cdot \varepsilon}{\partial \beta} = 0$$

L'expression à minimiser sur β s'écrit :

$$\| y - X \hat{\beta} \|^2 = (y - X \hat{\beta})^T (y - X \hat{\beta}) = y^T y - 2 \hat{\beta}^T X^T y + \hat{\beta}^T X^T X \hat{\beta}$$

Par dérivation matricielle de la dernière équation, on obtient les « équations normales » dont la solution correspond bien à un minimum :

$$X^T y + X^T X \hat{\beta} = 0 \dots\dots\dots (4.53)$$

Nous faisons l'hypothèse supplémentaire que la matrice $X^T X$ est une matrice inversible. Alors, l'estimation des paramètres β est donnée par :

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \dots\dots\dots (4.54)$$

Les valeurs ajustées (estimées ou prédites) de y ont pour expression :

$$\hat{y} = X \hat{\beta} = X (X^T X)^{-1} X^T y \dots\dots\dots (4.55)$$

On note ε le vecteur des résidus :

$$\varepsilon = y - \hat{y} = y - X \hat{\beta} = (1 - X (X^T X)^{-1} X^T) y \dots\dots\dots (4.56)$$

4.6.3. Validation du modèle

Les valeurs expérimentales introduites dans le modèle présentent des erreurs expérimentales (grandeurs aléatoires) qui se transmettent aux coefficients β du modèle $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$, puis aux valeurs calculées (\hat{y}). Des tests statistiques permettent d'évaluer la qualité du modèle et la significativité des coefficients.

En utilise le logiciel Excel (sous Windows) pour déterminer les coefficients des polynômes pour chaque réponse. Le degré de signification des coefficients a été déterminé à l'aide du test « Student » et de la valeur de n .

Pour chacun des modèles, un test de « Student » a été appliqué pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, l'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la validité des modèles. Une série de tests statistiques est menée pour juger de la qualité du modèle basée sur l'analyse globale du système, l'étude des coefficients du modèle et l'analyse des résidus.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, un rappel théorique sur les plans d'expériences a été présenté. Ces plans constituent une méthodologie efficace pour mener une étude paramétrique avec un nombre réduit d'expériences.

La méthodologie des plans d'expériences a été présentée dans ce premier chapitre en mettant l'accent sur les plans plus spécifiques qui ont été utilisés pendant ces travaux de recherche (les plans de fractionnaire "Hadamard" et les plans composites centrés pour les surfaces de réponse). Plusieurs auteurs ont déjà utilisé des plans d'expérience pour solutionner des problèmes d'usinage, notamment pour étudier l'influence des conditions de coupe sur la surface des pièces usinées ou sur la durée de vie des outils de coupe.

La Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE) nous offre un outil approprié, permettant de résoudre des situations délicates rencontrées dans le processus d'optimisation des procédés de fabrication. Cette méthode permet une interprétation rapide et sans ambiguïté des résultats en offrant un modèle mathématique précis du système étudié.

Ainsi, plusieurs facteurs pouvant influencés les performances de l'usinage sont prises en compte dans une modèle empirique puis validité est testée par une analyse de la variance.

Une étude détaillée sur l'analyse des modèles mathématiques est abordée afin de lancer l'optimisation multicritère. Pour les rendre comparables, les réponses (Coûts de polissage, état de surface) sont transformées en fonctions mathématiques qui nous servent à calculer la fonction objective que l'on cherche à maximiser. Ces différentes étapes seront utilisées dans le chapitre suivant afin de mettre en œuvre la méthode des plans d'expériences et son application pour l'optimisation des facteurs les plus influents sur la qualité de surface en polissage automatique sur machine 5-axes.

Cette étude va ainsi permettre de choisir les conditions de coupe optimales en fonction de l'importance des critères de sélection définis par l'utilisateur entre état de surface et la productivité (cout de polissage).



Chapitre 05

**Approche expérimental et interprétations
des résultats**

5.1. Introduction

Il a été démontré dans les chapitres passés que le processus de polissage est un procédé complexe dont la modélisation passe obligatoirement par une phase d'expérimentation, ainsi que le pouvoir abrasif dépend de plusieurs paramètres pour une opération de polissage donnée, dans le cas des opérations de polissage automatique sur MOCN5-axes avec des outils abrasifs, la capacité d'abrasion diminue fortement au cours du temps ce qui est néfaste pour l'obtention d'une abrasion homogène.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier et de modéliser l'évolution du pouvoir abrasif afin de maîtriser au mieux les défauts géométriques générés pendant une opération de polissage.

Après l'observation des phénomènes d'usure et d'encrassement sur un outil abrasif, les travaux traitant de la modélisation de l'abrasion prenant en compte ces variations sont passés en revue. Ensuite, un essai permettant d'observer ces variations d'efficacité est mis en place.

L'influence des paramètres opératoires sur l'enlèvement de matière est étudiée par la méthode des plans d'expériences, puis un modèle prenant en compte les variations du pouvoir abrasif est proposé. Le modèle et le protocole expérimental, permettant d'identifier le modèle qui seront finalement discutés avant de conclure.

Un plan d'expérience est choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats. L'ensemble des paramètres d'usinage dont la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe, la lubrification, les trajectoires de polissage et les caractéristiques de l'outil (type et grosseurs des grains) seront variées simultanément lors des essais expérimentaux.

Nous voulons tester l'influence de huit facteurs (intrants) pour le processus de polissage automatique sur machine 5-axes dont nous avons des réponses expérimentales (extrants). La figure ci-dessous représente cette situation.

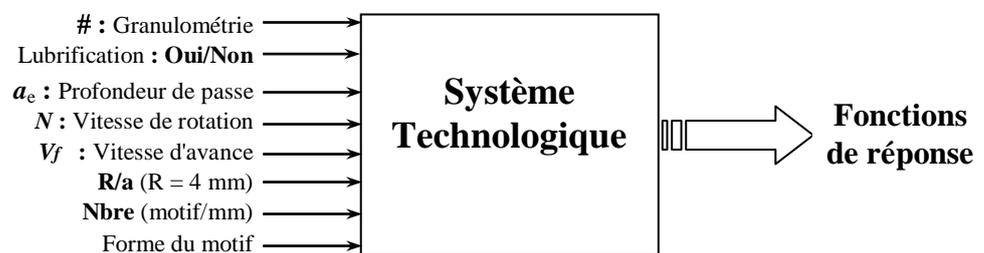


Figure 5.1 : Diagramme expérimental

Pour raffiner le processus présenté à la figure 5.1, nous pouvons résumer les étapes proposées pour le déroulement des expériences comme suit :

- Choix des réponses ;
- Choix des facteurs et de leurs niveaux ;
- Choix d'un plan d'expériences ;
- Exécution des expériences ;
- Analyse des résultats ;
- Interprétation et recommandations.

5.2. Moyens matériels

5.2.1. Machine-outil

Le centre d'usinage utilisé dans le cadre de cette recherche est un centre d'usinage UGV 5-Axes Ultrasonique 20 Linear. Les 5-Axes sont repartis comme suit : 3-Axes linéaires X, Y, Z et deux-Axes rotatifs. L'un autour de l'axes Z et qui varie de 0 à 360° et l'autre autour de l'axe Y qui varie de 0 à 90°.

Le centre ULTRASONIC 20 Linear réunit dynamique, précision, compacité, polyvalence et intelligence dans une machine-outil de très haut qualité.

La technologie d'usinage ultrasonique ou l'usinage par ultrasons permet d'usiner des matériaux, qui sont soit pas possible d'usiner ou très difficile par les technologies classiques de l'usinage.

Cette machine UGV5-Axes dispose d'une assistance ultrasonique à la coupe (20000 à 30500 Hz) qui permet de faciliter l'usinage de matériaux très durs comme le verre, les céramiques, ... Elle est équipée d'une broche 15 KW tournant jusqu'à 42000 tr/min et une vitesse d'avance maximale de 50 m/min.

Caractéristiques de la machine

- ⇒ Intégration technologique grâce au système actionneur HSK-32 : UGV et fraisage ULTRASONIC sur une même machine ;
- ⇒ Très grande dynamique avec des accélérations > 2.g grâce aux entraînements linéaires des X, Y, Z ;
- ⇒ Machine 5-Axes à portique avec table bi-rotative CN intégrée ;
- ⇒ Changeur pour 24 outils en standard (60 outils en option) ;
- ⇒ Siemens 840D solution line avec ADC et ACC,



Figure 5.2 : Centre d'usinage UGV 5-Axes Ultrasonique 20 Linear

5.2.2. Mesure des efforts de coupe

La mesure des efforts de coupe occupe une place spéciale du fait de ses nombreuses applications. Elle est utilisée pour caractériser l'usinabilité des matériaux, connaître la puissance requise durant l'usinage, surveiller l'usure de l'outil, prédire l'état de surface, tester les modèles mécaniques de la coupe, ... etc.

La mesure des efforts de coupe d'usinage constitué d'une chaîne d'acquisition composée d'un dynamomètre Kistler 9257B à 4 capteurs piézo-électriques et d'un amplificateur de charge Kistler 5019A à trois canaux. Le dynamomètre à quartz à trois composantes permet de mesurer les composantes F_x , F_y et F_z . Ces composantes représentent les efforts exercés sur la pièce dans le repère fixe du capteur.

L'acquisition et le traitement des signaux correspondant à chaque composante F_x , F_y et F_z de la résultante de l'effort de coupe sont effectués sous LabVIEW.

L'acquisition de l'effort s'effectue au cours du temps sur ordinateur par le biais d'un dispositif de collecte de données USB (Vernier LabPro). Un dynamomètre piézoélectrique de type KISTLER 9257A est positionné sous la pièce à polir afin de mesurer la variation des efforts appliqués dans les trois directions de l'espace (figure 5.3).



Figure 5.3 : Dispositif expérimentale pour mesure des efforts

5.2.3. Mesure de l'état de surface

Les relevés de rugosité de surface sont utilisés généralement comme indicateur de l'endommagement de celle-ci et de l'état d'usure de l'outil. La qualité de l'état de surface de l'usinage peut influencer les performances mécaniques des pièces dans leur utilisation finale.

Toutes les mesures présentées ont été effectuées sur la station de micro-mesure 3D STIL avec capteur chromatique confocal du LURPA (figure 5.4).

Ce type de station permet de balayer la surface avec un capteur qui mesure en chaque point l'altitude Z , avec une résolution de $0,01 \mu\text{m}$. Le pas minimal de déplacement dans les deux directions X et Y est de $0,1 \mu\text{m}$. La fréquence d'acquisition maximale des points est de 300 Hz .

Les mesures doivent faire l'objet d'un compromis entre les dimensions de la surface balayée, la valeur du pas de déplacement, la fréquence d'acquisition et la durée de la mesure.

À titre d'exemple, il faut environ 45 minutes pour balayer une zone de $3 \times 3 \text{ mm}^2$ avec une fréquence de 300 Hz et un pas de déplacement de $3 \text{ }\mu\text{m}$. Les topographies 3D des surfaces relevées sont traitées avec le logiciel Mountains MapTopography XT 4, qui propose différents traitement numériques des surfaces mesurées, et permet en particulier de calculer les paramètres d'état de surface linéaires et surfaciques.

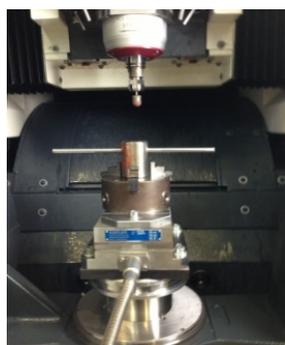


Figure 5.4 : Dispositif expérimental pour mesure de l'état de surface

5.2.4. Outil de polissage automatique

Les outils de polissage automatique sont les mêmes que ceux utilisés en polissage manuel à savoir principalement les disques abrasifs collés sur des portes-disques de formes toriques et des outils de formes sphériques (figure 5.5). Ces outils sont composés de deux parties distinctes. Un axe métallique permet de fixer l'outil sur les micromoteurs utilisés dans la broche des machines-outils. La seconde partie est souvent en élastomère, elle peut donc subir d'importantes déformations pour épouser la forme de la surface.

Les différents paramètres de constitution de l'outil comme la résistance mécanique et le pouvoir d'adhésion des résines synthétiques rentrent en jeu dans la caractérisation du procédé. Ces données ne sont pas généralement fournies par les industriels.



Outil flexible porte capuchon



Outil porte-disque [Deyang et Bia-2014]

Figure 5.5 : Outils de polissage automatique

5.3. Pré-polissage sur MOCN 5-axes

Le processus d'élaboration d'un produit industriel est défini par un ensemble d'étapes qui permettent, à partir d'un besoin ou d'une idée, la réalisation d'un produit. A chacune de ces étapes, des informations de types très divers contribuent à la définition du produit.

L'objectif de ces essais est d'étudier l'influence de différents paramètres d'exécution d'une opération de polissage sur l'enlèvement de la matière et la prédiction de l'état de surface.

5.3.1. Environnement de travail

Ce travail vise à maîtriser le procédé de pré-polissage et de polissage des surfaces de formes complexes sur MOCN 5-axes équipée d'un outil flexible cylindrique. Cet outil est composé d'un support en élastomère sur laquelle un capuchon en papier de verre abrasif est monté. La figure 5.6 présente le processus proposé.



Figure 5.6 : Processus de pré-polissage effectuée sur une machine CNC

Les paramètres influents sur l'état de surface sont nombreux. Dans le cadre du protocole expérimental proposé, le matériau, la géométrie de la surface et de l'outil sont fixées, il est ainsi proposé d'étudier l'influence de l'ensemble des autres paramètres opératoires qui sont : le choix du disque abrasif (grosseur des grains), la vitesse d'avance, la fréquence de rotation de la broche, l'enfoncement, type de motifs, trajectoire et lubrification. La méthode proposée est définie par des paramètres liés au processus et à la trajectoire de l'outil.

5.3.2. Paramètres liés aux opérations de pré-polissage sur MOCN 5-axes

Les paramètres influents sur la réponse étudiée (état de surface et débit) sont nombreux. Dans le cadre du protocole expérimental proposé, le matériau et la géométrie de la pièce (acier 100Cr6, pièce cylindrique) et l'outil (meule souple sur tige) sont fixés. L'étude porte sur les paramètres opératoires suivants : choix du capuchon abrasif (granulométrie des grains), vitesse d'avance, fréquence de rotation de la broche, profondeur de passe, paramètres et types de motifs élémentaires, trajectoire et lubrification. La Figure 5.7 représente une opération de polissage avec arrosage.

La déformation élastique de l'outil est utilisée pour contrôler la force radiale qui lui est appliquée au cours du polissage en fonction de l'engagement radial nominal programmé sur la MOCN. Le paramétrage géométrique utilisé pour piloter ces outils est le même que celui des outils utilisées en fraisage sur centre d'usinage 5-axes.

La méthode proposée est définie par des paramètres liés au processus et à la trajectoire de l'outil. Pendant l'opération de polissage, la lubrification peut être ajoutée pour améliorer l'opération de polissage.

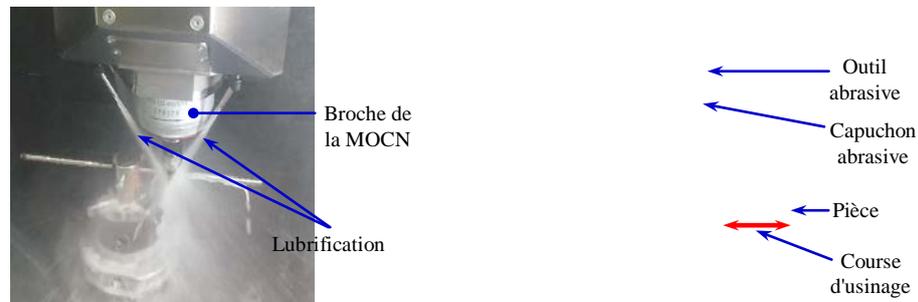


Figure 5.7: Illustration de l'environnement expérimentale (Outil de polissage et ces paramètres)

5.3.3. Paramètres liée à la trajectoire et l'outil

La trajectoire de l'outil utilisé comprend une trajectoire porteuse qui couvre toute la surface polie issue du modèle CAO, et des motifs élémentaires qui sont additionnés sur la trajectoire porteuse pour obtenir les mouvements de polissage. La figure 5.8 présente un exemple d'un motif de polissage sur une pièce.

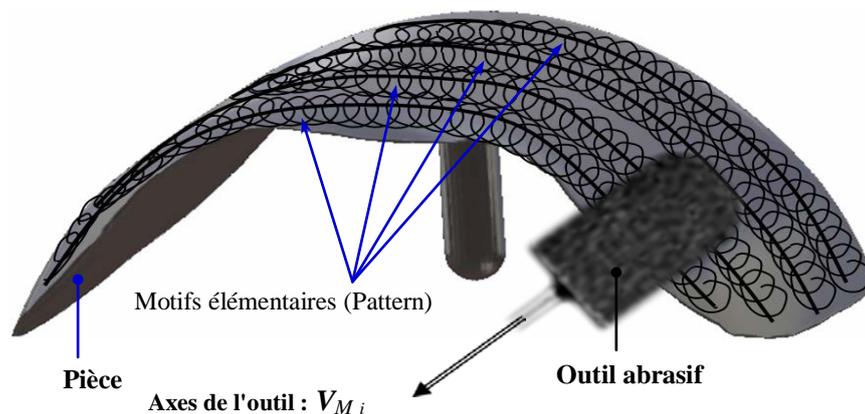


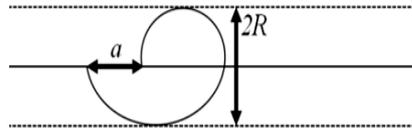
Figure 5.8 : Modèle de trajectoire de polissage

Le motif élémentaire est basé sur la courbe trochoïdal. La morphologie de ce modèle détermine directement le nombre de fois que l'outil va passer sur une surface élémentaire de la pièce. La figure 5.9 illustre le modèle trochoïdale et les principaux paramètres associés.

Le premier paramètre, R , définit l'amplitude du motif trochoïde, et le paramètre a définit la progression en boucle. Ainsi, ces deux paramètres définissent la forme du motif et le nombre de fois que l'outil passe au-dessus d'un point sur la surface.

Par la suite, ce motif est appliqué dans un espace 3D le long du support d'outil trajet d'imposer le nombre de motifs par millimètre. La figure 5.9-b illustre graphiquement et présente le paramètre N : nombre de motifs par millimètre.

a) Motif élémentaire 2D



b) Motif élémentaire 3D

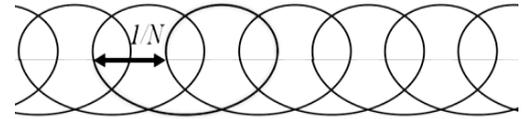
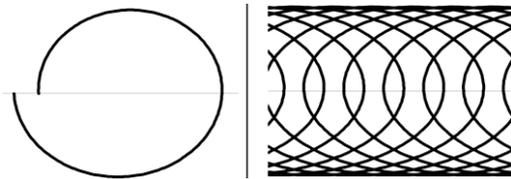


Figure 5.9 : a) Définition du motif élémentaire utilisé. b) Motif déformé sur la trajectoire porte-outil

Les figures 5.10 et 5.11 illustrent la forme du modèle utilisé. Au niveau bas ($a = 40$) le motif ressemble à une sinusoïde et l'outil passe qu'une seule fois sur la surface. Au niveau élevé ($a = 1$) le modèle ressemble à un cercle et l'outil passe plusieurs fois sur un point de la surface. Deux nombres de motifs par millimètre sont testés : 0,5 et 4 motifs/mm.

a) Trajectoire Trochoïdal

Motif élémentaire Couverture de polissage



b) Trajectoire Triangulaire

Motif élémentaire Couverture de polissage

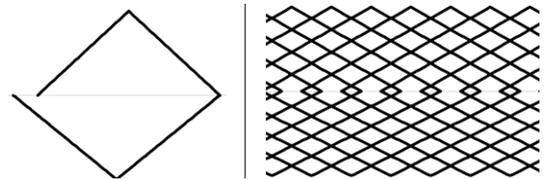
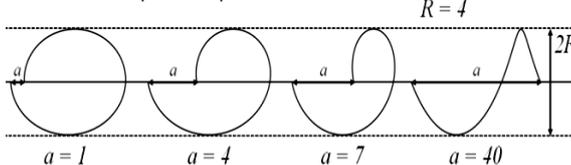


Figure 5.10 : Modèle des motifs utilisés

Pattern in 2D pattern space



Patterns in 3D toolpath space

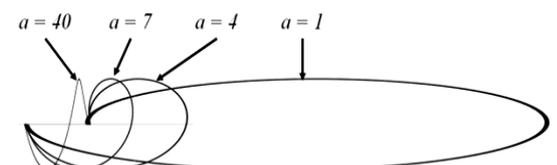


Figure 5.11 : Forme du motif testé par le plan d'expérience

5.4. Détermination des facteurs influents en utilisant un plan de criblage par plan d'expérience

Le processus de pré-polissage proposé a un grand nombre de paramètres. Ces paramètres n'ont pas tous la même influence sur l'efficacité du pré-polissage du processus et sur la qualité de l'état de surface.

Dans cette section, une méthode de criblage par plan d'expérience est mise en œuvre pour identifier les paramètres influençant le coût du pré-polissage.

5.4.1. Criblage par plan d'expérience pour définir les paramètres influents

Pour contrôler la force radiale de pré-polissage un plan d'expérience a été effectué pour déterminer les facteurs ayant l'influence la plus importante sur la force radiale.

Pour ce faire, un criblage a été mené pour étudier les effets des facteurs suivants :

- a_e : L'engagement radial nominal ;
- L_{Outil} : La longueur de sortie d'outil ;
- $R_{Surface}$: Le rayon de la surface de la pièce à usiner ;
- $L_{Contact}$: La position du point de contact le long de l'axe de la broche.

Ces paramètres sont définis à la figure 5.12 qui montre également le montage expérimental. Tous les essais ont été réalisés avec la broche placée dans l'état arrêté.

L'ensemble des paramètres expérimentaux a été définie par une matrice de Hadamard. Pour chaque essai, la force radiale ensuite a été mesurée avec précision par un dynamomètre piézoélectrique de type KISTLER 9257A.

La technique de criblage par plan d'expérience est utilisée afin d'identifier rapidement les facteurs actifs parmi les facteurs potentiellement influents avec un faible nombre d'expériences.

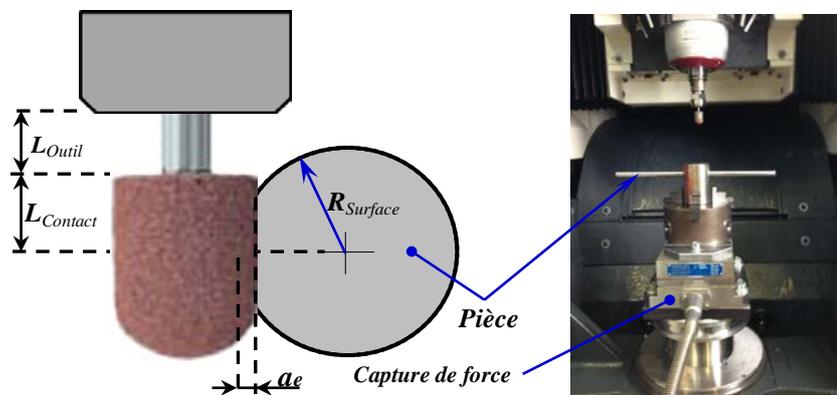


Figure 5.12 : Paramètres utilisés dans le plan d'expérience

Le tableau 5.1 présente l'ensemble des expériences réalisées et les résultats de la réponse mesurée de la force radiale (F_r). L'expérience N° 4 a été répétée six fois pour définir l'écart type des mesures.

Tableau 5.1 : Matrice d'expérience

N° Exp.	b	$a_e [X_1]$	$L_{Outil} [X_2]$	$R_{Surface} [X_3]$	$L_{Contact} [X_4]$	$F_r [N]$	F_r modele	$sc - F_r$
1	+1	+1	+1	+1	-1	4,954	4,718	0,056
2	+1	-1	+1	+1	+1	0,456	0,574	0,014
3	+1	-1	-1	+1	+1	1,223	1,105	0,014
4.6	+1	+1	-1	-1	+1	5,358	5,0615	0,088
5	+1	-1	+1	-1	-1	0,703	0,5245	0,032
6	+1	+1	-1	+1	-1	5,013	5,249	0,056
7	+1	+1	+1	-1	+1	4,234	4,5305	0,088
8.2	+1	-1	-1	-1	-1	0,877	1,0555	0,032
Niveau -1		0,05	8	60	11			
Niveau +1		0,01	1	6	2			

La réponse **Y** est liée aux variables opératoires par un modèle réel, nous faisons l'hypothèse que ce modèle réel peut être approché dans un premier lieu par le modèle linéaire suivant :

$$F_r = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 \dots\dots\dots (5.1)$$

D'où l'Equation de la force radiale, est de la forme :

$$F_r = b_0 + b_1 \cdot a_e + b_2 \cdot L_{Outil} + b_3 \cdot R_{Surface} + b_4 \cdot L_{Contact} \dots\dots\dots (5.2)$$

Les effets des variables pour les modèles présentés sont estimés par la méthode du moindre carré. Dans le cas d'une matrice de Hadamard, les coefficients peuvent aisément se calculer avec une simple calculatrice ou un tableur. D'où les résultats sont :

$$b_0 = 2,852 ; b_1 = 2,038 ; b_2 = -0,266 ; b_3 = 0,059 ; b_4 = -0,034$$

La figure 5.13 présente les coefficients d'influence du modèle avec leurs barres d'erreur associés. L'analyse de ces résultats a montré que, parmi les 4 facteurs étudiés, le facteur a_e (Profondeur de passe X_1) avait la seule influence significative sur la force radiale F_r .

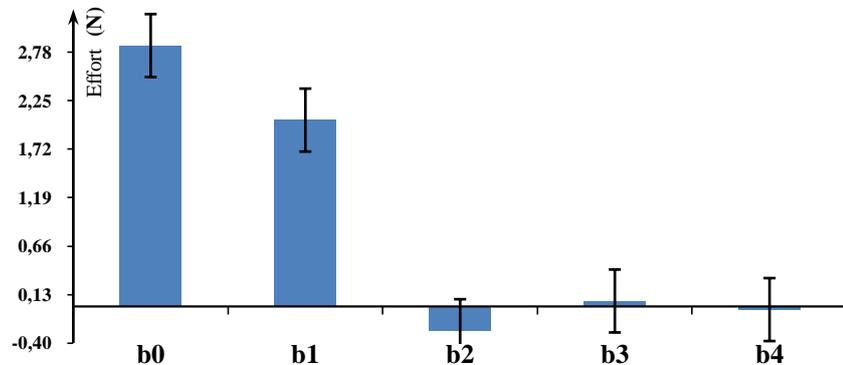


Figure 5.13 : Histogramme des paramètres influents

L'écart-type de meilleur ajustement est également dérivé du résidu des moindres carrés. Il a été estimé à 0,372 N et bien se compare à la valeur déjà déduit de la répétition du numéro d'expérience N° 4. Cela démontre la précision de l'ajustement du modèle.

5.4.2. Contrôle de la force radiale

La **section précédente** a démontré expérimentalement que la force radiale est le seul paramètre qui est influencée par l'engagement radial nominal de l'outil. D'autres tests ont été réalisés pour déterminer la raideur équivalente de l'outil utilisé.

Les expériences ont été réalisées sans rotation de la broche. Deux tailles de grains de papier de verre ont été testées : N° # 320 et N° # 150. Après trois cycles, la loi de comportement peut être modélisée par une relation linéaire. Une rigidité équivalente constante a donc été considérée et estimé à 94 N/mm pour les deux tailles de grains. La figure 5.14 présente la réponse cyclique du matériau constituant le porte-capuchon.

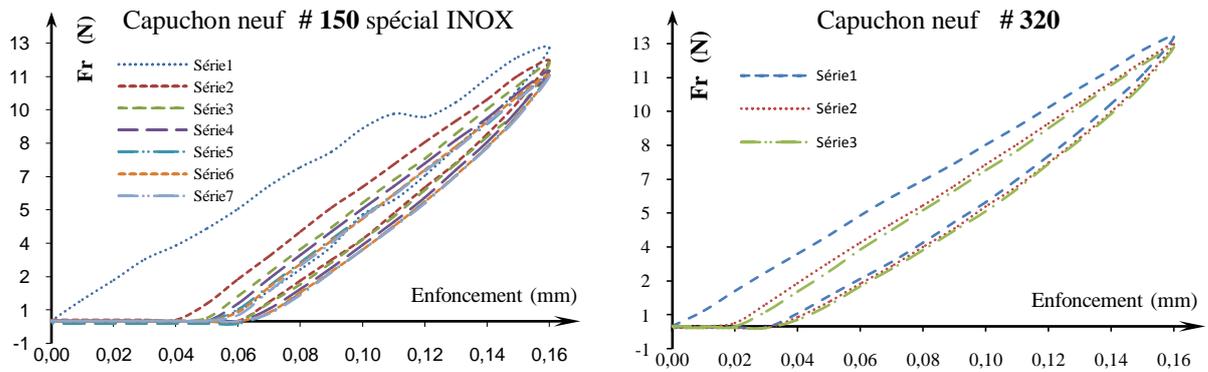


Figure 5.14 : Test de l'effort presseur pour définir la rigidité équivalente du porte-capuchon

5.4.3. Réalisation des premiers essais de pré-polissage automatique sur machine-outil 5-axes

Pour tester l'efficacité de la démarche du pré-polissage automatique sur machine-outil 5-axes, nous avons effectué les premiers essais de pré-polissage avec les outils standards qui se trouvent sur le marché. Dans notre démarche, nous supposons, que la forme cylindrique de l'outil est parfaite.

L'opération de pré-polissage est réalisée sur une surface cylindrique, un cylindre en acier de diamètre 8 mm et de longueur 60 mm. L'outil utilisé et supposons avait un diamètre nominal de 13 mm et une hauteur de travail de 12 mm. La figure 5.15 représente une cartographie de la profondeur de la surface obtenue après une opération de polissage.

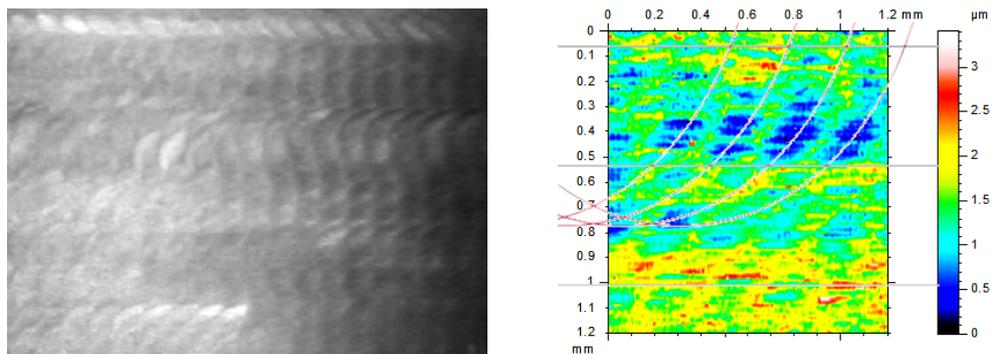


Figure 5.15 : Résultats du 1^{ère} essai de polissage

L'observation des traces de l'outil sur la surface, permet d'avoir une estimation de la répartition de pression pendant l'opération de pré-polissage, ce qui implique que l'effort exercé par l'outil sur la surface est non constant lors du polissage. Ces variations des efforts sont causés par :

- La forme non cylindrique de l'outil ;
- Ce qui implique, un engagement α_p non constant.

Comme conclusion, en réalité, l'outil ne correspond pas au cylindre nominale spécifié par le constructeur, mais présente une petite conicité. Pour cette raison, la trajectoire de l'outil doit être légèrement ajustée dans le programme de polissage pour compenser ce défaut géométrique.

5.4.3.1. Mesure de la forme de l'outil

Les expériences ont été réalisées avec une vitesse de rotation de la broche de 9000 t/min. Deux capuchons en papier verre ont été employés avec Numéro de grain de # 150 et # 320.

Le profil de chaque outil est mesuré avant chaque opération de pré-polissage. Ce profil est obtenu en effectuant plusieurs mesures en différents points de l'espace de travail de l'outil, à l'aide d'une option de la machine-outil CNC (Capteur laser) figure 5.16.

Mode opératoire pour mesurer la forme de l'outil

⇒ Mesures effectuées sur 10 capuchons différents pris aléatoirement dans une boîte de 100 pour les deux type de grains # 150 et # 320.

⇒ 4 mesures effectuées sur un capuchon ;

- Deux mesures (1 et 2) sans démonter le capuchon ;
- Démontage du capuchon entre les mesures 1-2 et 3-4

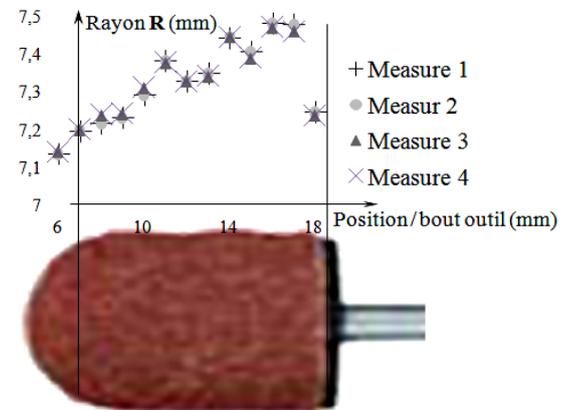
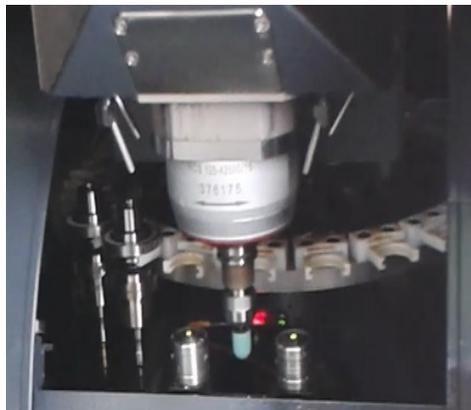
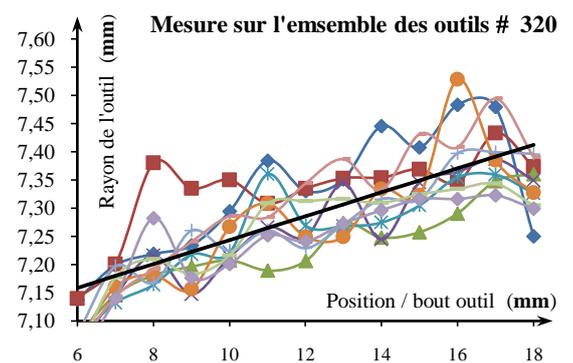
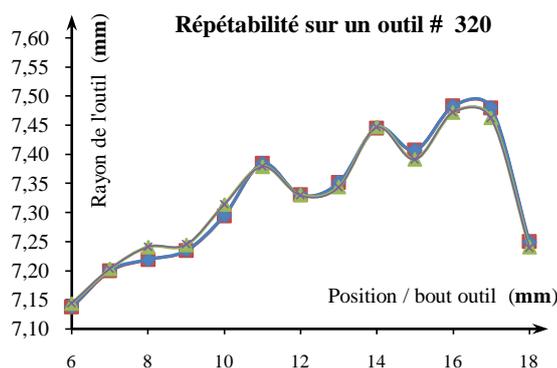


Figure 5.16 : Mode de mesure de la forme de l'outil sur la machine 5-axes

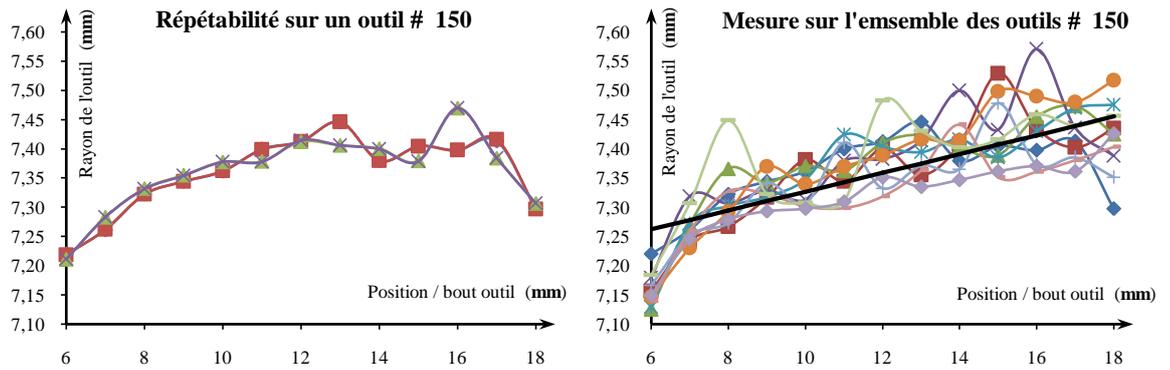
Mesure de la forme de l'outil

❖ **Granulométrie # 320** : Pente moyenne de 0,021 mm/mm ; Rayon au milieu de l'outil 7,285 mm.



⇒ Bonne répétabilité de la mesure de la forme du capuchon : Écart type 5,5 µm.

❖ **Granulométrie# 150** : Pente de 0,016 mm/mm ; Rayon au milieu de l'outil 7,358 mm.



⇒ Bonne répétabilité de la mesure de la forme du capuchon : Écart type 4,6 μm .

Figure 5.17 : Résultats des mesures de la forme de l'outil

5.4.3.1. Validation de la compensation de la forme de l'outil

Les essais réalisés en trois passes de polissage le long de la pièce avec un engagement radial nominale de **0,05 mm** pour chaque passage. Les essais ont été réalisés avec les conditions d'usinage suivantes:

❖ Outil

- Granulométrie : # 150/ # 320
- Lubrifiant : Non

❖ Conditions de coupe

- Profondeur de passe a_e : 03 passes de 0,05 mm
- Vitesse de rotation N : 9000 tr/min
- Vitesse d'avance V_f : 2000 mm/min

❖ Paramètre de motif

- **Forme de la "Trochoïde"**
 - R/a ($R = 4$ mm) : 1
- N° / mm : 1

❖ Forme du motif : Triangulaire

❖ Portion d'usinage : 60 mm

Deux tests de pré-polissage ont été réalisés : l'un utilisant une trajectoire d'outil non compensée et l'autre avec compensation de trajectoire d'outil en conicité.

Les résultats sur la figure 5.18 présentent les profils de forme de l'outil mesuré avant et après l'opération de pré-polissage. Il met en évidence une meilleure uniformité de l'usure de la partie centrale de l'outil utilisé lorsque le polissage est réalisé avec une trajectoire de pré-polissage compensé (Ajusté).

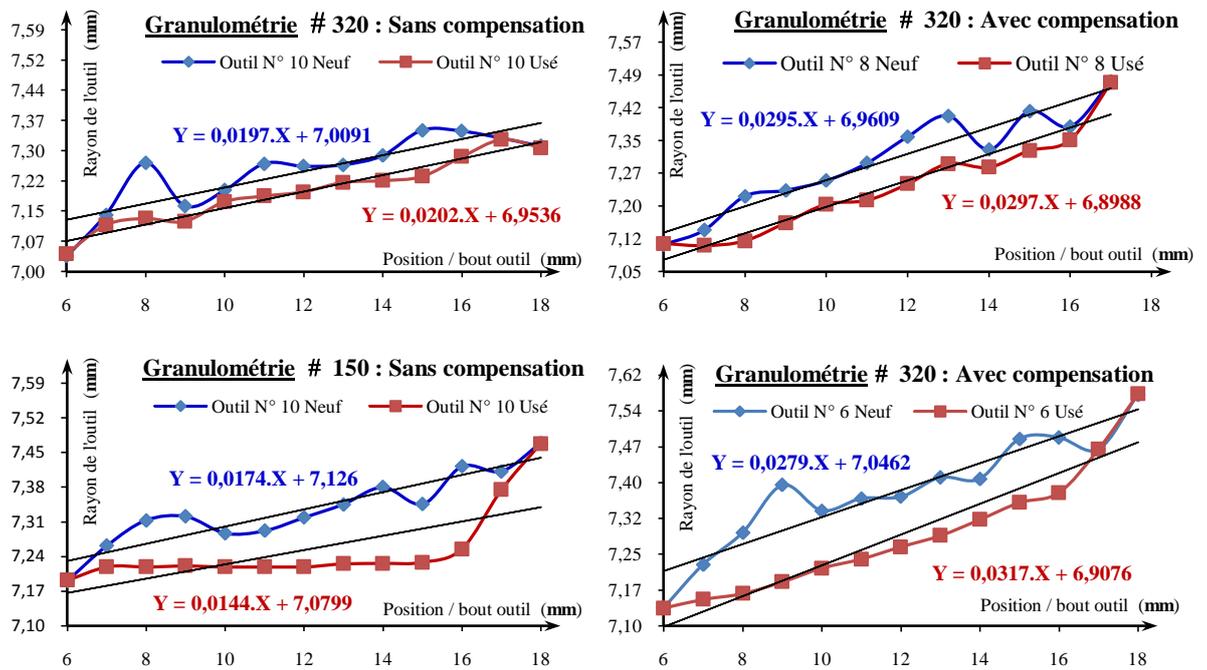


Figure 5.18 : Résultats des mesures de la forme de l'outil avant et après l'opération de pré-polissage

5.4.3.3. Mesure de l'effort de pré-polissage

On a vu l'importance de l'effort de polissage sur l'amélioration de la qualité d'état de surface et la suppression des différentes marques ainsi que les risques de déformer la surface, les centres d'usinage ne permettent pas de mesurer directement les efforts en temps réels. Il n'est donc pas possible d'asservir directement le positionnement de l'outil en fonction de l'effort de contact.

Nous avons donc exploité un système basé sur un capteur d'effort à quartz Kistler 9011 relié à une platine Kistler 5015 qui permet l'affichage de l'effort.

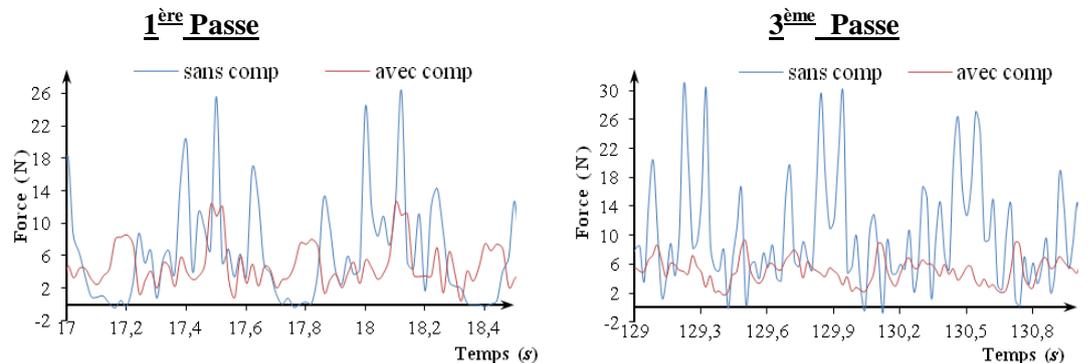
Il est ensuite possible de réaliser l'acquisition des courbes sur un ordinateur grâce à une interface Vernier LabPro. Ce dispositif nous permet de tracer l'effort de polissage en fonction de l'engagement de l'outil.

Les figures 5.19 présentent l'évolution de la force radiale en fonction de l'engagement de l'outil mesurée au cours de la première et dernière passe des opérations de pré-polissage. Il montre que les pics intenses de la force radiale sont générés lors de la première passe quand il est réalisé sans compensation. Ceci peut être lié à la conicité de l'outil qui conduit à augmenter localement l'engagement radial.

Lors de la troisième passe, les profils de force radiale sont trouvés similaires pour les deux conditions d'usinage. Par rapport à la première passe, une augmentation significative de la force moyenne est toutefois observée. Ceci peut être expliqué par la déformation de l'outil et l'augmentation résultante de l'épaisseur réelle qui reste à enlever.

La correction de la forme fournit une force de contact plus régulière et une pression constante ce qui augmente par suite la durée de vie de l'outil lors des opérations de pré-polissage.

Granulométrie : # 320 pour a_e : 03 Passes de 0,05 mm



Granulométrie : # 150

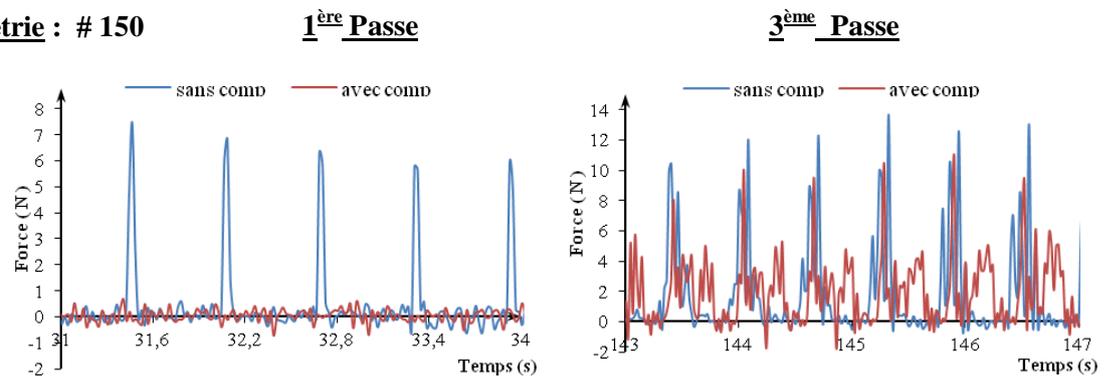


Figure 5.19 : Evolution de la force de polissage en fonction de l'engagement de l'outil

5.4.4. Réalisation du plan de criblage par plan d'expérience

Pour effectuer le test de criblage, les différents niveaux (Hauts et bas) doivent être définis pour tous les facteurs testés. Huit facteurs ont été choisis et le criblage à nous permet d'estimer leurs influences.

Le tableau 5.2 présente ces facteurs avec les noms et les niveaux de paramètres associés.

Tableau 5.2 : Domaine de variation des facteurs pour la conception de plan de criblage

Facteurs	Niveaux bas (-1)	Niveaux haut (+1)
X_1 : Granulométrie (#)	150	320
X_2 : Lubrification	Non	Oui
X_3 : Profondeur de passe (a_e)	0,05	0,1
X_4 : Vitesse de rotation (N)	6000	12000
X_5 : Vitesse d'avance (V_f)	1000	3000
X_6 : R/a ($R = 4$ mm)	0,1	4
X_7 : N^{bre} (motif/mm)	0,5	4
X_8 : Forme du motif	Trochoïdal	Triangulaire

5.4.4.1. Construction de la matrice modèle et matrice d'expériences

La matrice d'expériences ordonne les expériences à réaliser. En effet, un plan d'expériences correspond à une matrice d'essais ou d'expériences qui est la liste des combinaisons des niveaux des facteurs définis à l'avance.

Les matrices d'Hadamard sont des matrices orthogonales et ont pour éléments +1 ou -1, elles n'existent que pour $N = 2$ et N multiple de 4.

La matrice d'Hadamard pour $N = 2$ s'écrit comme suit :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

et pour $N = 4$, la matrice s'écrit :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Si N est multiple de 4, les matrices d'Hadamard se construisent à partir des $N - 1$ derniers termes de la première ligne.

Ces premières lignes sont données par :

$$N = 8 \quad + + + - + - -$$

$$N = 12 \quad + + - + + + - - - + -$$

$$N = 16 \quad + + + + - + - + + - - - -$$

$$N = 20 \quad + + - - + + + + - - - - + + -$$

$$N = 24 \quad + + + + - + + - - + + - - + - - - -$$

Ainsi, la matrice complète se construit de la manière suivante :

- La première ligne : Les $(N - 1)$ signes ;
- De la deuxième ligne et jusqu'à la $(N - 1)^{\text{ième}}$ ligne : Prendre le dernier signe de la ligne précédente et compléter par les $(N - 2)$ signes restants.
- La dernière ligne : des signes -.

On obtient ainsi un tableau de dimension $N.(N - 1)$, on lui rajoute une première colonne de signes + pour avoir une matrice d'Hadamard.

Dans notre étude, il n'y a que 8 facteurs et pas 11 (nous avons donc enlevé les 3 dernières colonnes du tableau constituant la matrice d'Hadamard).

L'arrangement orthogonal permet d'étudier les effets moyens des 8 facteurs ($k = 8$) à 2 modalités ($m_i = 2$) à partir de 12 traitements distincts ($N = 12$) au lieu de réaliser $2^8 = 256$ expériences initiales.

La matrice d'expériences obtenue après le rajout de la dernière ligne qui possède des propriétés d'orthogonalité donc, elle garantit une estimation des effets moyens avec une incertitude minimale, Voir le tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Matrice d'expérience relative à notre étude

N° Expérience	#	Lubrification	a_e	N	V_f	R/a (R = 4 mm)	N ^{bre} /mm	Forme du motif
1	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	+ 1	- 1	- 1
2	- 1	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	+ 1	- 1
3	- 1	- 1	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	+ 1
4	+ 1	- 1	- 1	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	+ 1
5	+ 1	+ 1	- 1	- 1	+ 1	+ 1	- 1	+ 1
6	+ 1	+ 1	+ 1	- 1	- 1	+ 1	+ 1	- 1
7	- 1	+ 1	+ 1	+ 1	- 1	- 1	+ 1	+ 1
8	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	+ 1	- 1	- 1	+ 1
9	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	+ 1	- 1	- 1
10	- 1	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	+ 1	- 1
11	- 1	- 1	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	+
12	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1

La matrice[**X**] du modèle ou matrice des effets, servant au calcul des coefficients du modèle, s'obtient en ajoutant à gauche de la matrice des expériences une colonne ne contenant que des + 1, Cette colonne servira au calcul de la constante **b** du modèle.

Pour construire un plan d'expérience satisfaisant à ces conditions, les mathématiciens ont énoncé des critères d'optimalité.

Fisher et Yates ont montré qu'une matrice orthogonale conduit à l'indépendance des estimations des coefficients du modèle, par la suite Hadamard a démontré que pour obtenir en *n* expériences une variance minimale, la matrice des effets X doit vérifier la relation :

$$\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^T = n \cdot \mathbf{I}_n \dots\dots\dots (5.3)$$

Où \mathbf{I}_n est la matrice identité d'ordre *n*.

La propriété précédente est appelée : **critère d'optimalité au sens d'Hadamard**.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} + & + & + & - & + & + & + & - & - \\ + & - & + & + & - & + & + & + & - \\ + & - & - & + & + & - & + & + & + \\ + & + & - & - & + & + & - & + & + \\ + & + & + & - & - & + & + & - & + \\ + & - & + & + & + & - & - & + & + \\ + & + & - & + & + & + & - & - & + \\ + & + & + & - & + & + & + & - & - \\ + & - & + & + & - & + & + & + & - \\ + & - & - & + & + & - & + & + & + \\ + & - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix}$$

5.4.4.1. Modèle de criblage

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse).

Lorsque l'objectif consiste à hiérarchiser les effets moyens des facteurs à partir d'une étude de criblage, la forme générale suivante, appelée modèle additif sans couplage, peut être adoptée. La relation mathématique reliant ces variables sera de la forme:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot X_i \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

Le coefficient b_0 représente la moyenne arithmétique des réponses mesurées Y à partir des N expériences du plan.

D'où :

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_6 + b_7 \cdot X_7 + b_8 \cdot X_8$$

Avec:

X_i : Valeur du facteur i ;

b_i : Coefficient associé au facteur i .

Le tableau 5.4 présente les expériences réalisées pour la réalisation du criblage des essais. Douze expériences sont prévues avec une matrice d'Hadamard avec deux répétitions pour la dernière expérience.

Tableau 5.4 : Expériences effectuées par criblage des paramètres avec plan l'expérience

N° Expérience	#	Lubrification	a_e	N	V_f	R/a (R = 4 mm)	N ^{bre} /mm	Forme du motif
1	320	Oui	0.05	12000	3000	1	0,5	Trochoïdale
2	150	Oui	0.1	6000	3000	1	4	Trochoïdale
3	320	Non	0.1	12000	1000	1	4	Triangulaire
4	150	Oui	0.05	12000	3000	40	4	Triangulaire
5	150	Non	0.1	6000	3000	1	0,5	Triangulaire
6	150	Non	0.05	12000	1000	1	4	Trochoïdale
7	320	Non	0.05	6000	3000	40	4	Triangulaire
8	320	Oui	0.05	6000	1000	1	0,5	Triangulaire
9	320	Oui	0.1	6000	1000	40	4	Trochoïdale
10	150	Oui	0.1	12000	1000	40	0,5	Triangulaire
11	320	Non	0.1	12000	3000	40	0,5	Trochoïdale
12	150	Non	0.05	6000	1000	40	0,5	Trochoïdale
12_1	150	Non	0.05	6000	1000	40	0,5	Trochoïdale
12_2	150	Non	0.05	6000	1000	40	0,5	Trochoïdale

5.4.5. Réponses du Criblage : Définition des fonctions objectives

L'opération de pré-polissage est une opération de semi-finition. Son principal objectif est de supprimer les différentes crêtes causées par les opérations d'usinage précédentes.

Par conséquent, la fonction objective était de réduire le coût pré-polissage, le maintien d'une qualité de surface pour éviter le surcoût lors de l'étape de finition. L'équation 5.5 présente le calcul du coût de pré-polissage *PPCost*.

Ce coût est composé de trois termes :

1. Tout d'abord, le coût du temps de la machine pour réaliser l'opération de pré-polissage. Ce coût est calculé avec le coût horaire de la machine multiplié par le temps de pré-polissage. Elle est le complément de la durée de pré-polissage réel, le temps calculé avec l'équation 5.6, et le temps de changement d'outil. Ceci est égal au nombre de changement d'outil nécessaire pour atteindre l'opération de pré-polissage (*N_change* calculé avec l'équation 5.7) multiplié par le temps de changer un outil (*Time_change*).
2. Deuxièmement, le coût de l'outil (*Tool_cost*) est déduit en utilisant l'équation 5.9. Cette équation ne prend pas en compte le coût de porte-outil.
3. Enfin, le coût constant (*Cst*) comprend, par exemple, le coût pour fixation de la pièce, le coût de préparation, etc. ...

$$PPcost = Time * Cost/h + N_change * Time_change * Cost/h + Tool_cost + Cst \dots (5.5)$$

Avec:

Time : Durée d'usinage en pré-polissage, temps où la machine-outil usine la pièce ;

Cost/h : Coût de la machine CNC 5-axes par heure ;

N_change : Nombre de changement d'outil au cours de l'opération de pré-polissage ;

Tool_Cost : Coût des outils pour réaliser l'opération de pré-polissage ;

Cst : Coûts constants dans les opérations de pré-polissage.

$$Time = Vol/Q \dots (5.6)$$

Avec :

Vol : Volume d'enlèvement de matière ;

Q : Débit de matière enlevée.

$$N_Change = Time/Tool_Life_duration \dots (5.7)$$

Avec :

Tool_life_duration: Durée de vie de l'outil ;

$$Tool_Life_duration = Tool_usable/Wear_speed \dots (5.8)$$

Avec :

Tool_usable : Volume d'outil usé.

Wear_speed : Vitesse d'usure de l'outil.

$$Tool_Cost = N_Change * (Caps + Support/10) \dots\dots\dots (5.9)$$

Avec :

Caps : Coût du capuchon ;

Support : Coût de support capuchon.

Par la suite, le coût de polissage sera calculé en utilisant :

- **Usure de l'outil (*Wear_speed*)** : Le profil de chaque outil est mesuré avant et après l'opération de pré-polissage. Ce profil est obtenu à la mesure de plusieurs diamètres d'outil, dans la zone de travail de l'outil, avec une option de machine CNC laser. Enfin, la zone d'usure entre le profil de l'outil avant et après pré-polissage est divisé par le temps d'usinage (fourni par la machine CNC) pour obtenir la vitesse d'usure de l'outil.

Wear_speed est exprimé en mm^2/s .

- **Débit de matière d'enlèvement (*Q* en mm^3/s)** : Ce paramètre est calculé en divisant la matière enlevée par le temps d'usinage. L'enlèvement de matière est calculé en multipliant la longueur usinée (40 mm) par la surface usinée moyenne. La surface usinée, est calculée en utilisant une formule géométrique relative à l'engagement radiale réel de l'outil en micromètre.

Finalement, la fonction objective pour le calcul du coût de pré-polissage *PPCost* :

$$PPCost = \left(\frac{Vol}{Q}\right) * \left[\frac{Cost}{h} + \frac{Wear_speed}{Tool_usable} * \left\{Time_Change * \frac{Cost}{h} + \left(Caps + \frac{Support}{10}\right)\right\}\right] + Cst \dots\dots (5.10)$$

Le but du travail présenté est d'optimiser le processus de pré-polissage, mais cette optimisation ne doit pas accroître le temps du pré-polissage, ainsi, la rugosité de la surface usinée doit être contrôlé.

5.4.5.1. Résultats du criblage et interprétations

On recherche dans un premier temps les influences réelles des 8 facteurs vis-à-vis des variations de la réponse.

Le modèle mathématique se présente en utilisant les méthodes statistiques, sous forme polynomiale, qui est une partie de la série de Taylor :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^8 b_i \cdot X_i \dots\dots\dots (5.11)$$

Avec :

X : Matrice des données d'entrée ;

β : Matrice des coefficients de régression ;

Y : Matrice des données de sortie.

Une fois le modèle mathématique obtenu (équation de régression), on procède à l'analyse statistique des résultats afin de vérifier la signification de ces coefficients de régression.

Le meilleur ajustement est effectué avec la méthode pseudo-inverse. Dans ce modèle, si b_i est positif, cela signifie que lorsque X_i change de faible à haut niveau de la valeur des augmentations de réponse. En outre, plus la valeur absolue du b_i est grande plus l'influence du facteur X_i sur la réponse est importante.

Le tableau 5.5 fournit tous les résultats expérimentaux. Le coût en volume du pré-polissage est calculé en utilisant l'équation 5.10.

Les valeurs numériques utilisées pour effectuer ce calcul sont :

- *Cost/h* : 125 h/€ ; - *Caps* : 0,5 € ; - *Support* : 3,6 € ; - *Time_change* : 10 min.

Tableau 5.5 : Résultats expérimentale

Essai N°	Q (mm ³ /s)	<i>Wear_speed</i> (mm ² /s)	<i>PPCost/Vol</i> (€mm ³)	<i>Rugosité</i> (μm)
1	0,0156	0,0190	17,35	0,838
2	0,0626	0,0085	2,55	1,57
3	0,0190	0,0028	5,19	0,815
4	0,0244	0,0052	5,12	1,03
5	0,1699	0,0302	2,30	1,77
6	0,0152	0,0020	6,02	1,05
7	0,0097	0,0051	12,64	1,09
8	0,0071	0,0067	19,64	0,896
9	0,0199	0,0024	4,76	0,458
10	0,2339	0,0185	1,14	6,71
11	0,1203	0,0518	5,15	6,02
12	0,0159	0,0196	17,42	3,71
12_1	0,0271	0,0180	9,60	3,53
12_2	0,0244	0,0188	11,07	4,89

5.4.5.1. Coûts du pré-polissage par volume

Le modèle présenté par l'équation 5.10 est associé au coût déterminé par volume (présentée dans le tableau 5.5) pour obtenir les coefficients b_i présentés dans le tableau 5.6.

La figure 5.20 fournit une présentation de l'histogramme des valeurs b_i et un diagramme de Pareto. Cette courbe est obtenue en traçant les effets cumulatifs en % de chaque facteur commençant par le plus influent. Cette courbe est utilisée pour déterminer la limite entre les facteurs d'influence et non-influents.

Voici ci-dessous le classement des facteurs, à commencer par les plus influents, pour réduire les coûts de production par unité de volume :

- X_3 (Très influente) : La valeur du b_3 est négatif, ce qui signifie que, pour réduire le coût du polissage, il est nécessaire d'augmenter l'engagement radiale a_e .
- X_1 (Influent) : à un numéro de grain faible (Gros grain 150) le coût de production réduit, ainsi, une taille du grain gros réduit le coût du polissage, c.-à-d. un taux d'enlèvement de matière élevée.
- X_7 (Influent) : Plus le nombre de motif/mm augmente plus le coût de pré-polissage est réduit et la durée de vie de l'outil augmente.
- X_4 (Influent) : L'Augmentation de la vitesse de rotation de l'outil diminue le coût de production.
- X_5 (Non-influent) : Une augmentation de V_f peut réduire le coût de polissage.
- X_8 (Non-influent) : Un motif triangulaire réduit le coût de polissage par rapport à un motif trochoïde.
- X_6 (Non-influent) : Un motif qui correspond à un cercle augmente le coût de polissage par rapport à un motif qui ressemble à une sinusoïde.
- X_2 (Non-influent) : La lubrification n'a pas d'influence significative le coût de polissage.

Tableau 5.6 : Modèle numérique du coût par volume enlevé

	Granulométrie	Lubrification	a_e	N	V_f	a	N	Motif
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
8,27	2,51	0,15	-4,76	-1,61	-0,75	0,57	-2,23	-0,60

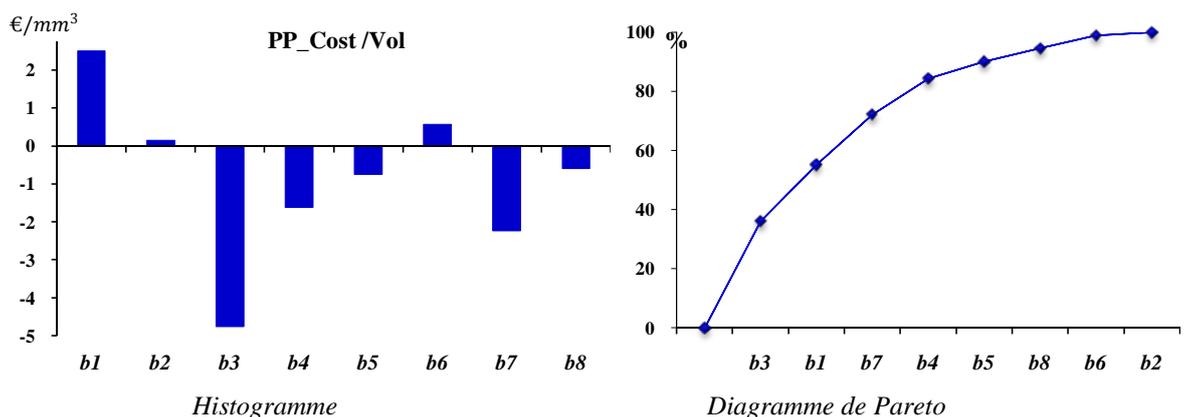


Figure 5.20 : Coefficients relative aux coûts de pré-polissage par volume

5.4.5.3. Rugosité de surface

La rugosité de surface est une contrainte importante à la fin du processus de pré-polissage. Les mesures de rugosité ont été caractérisées avec précision par des mesures optiques utilisant la détection confocale chromatique CMM. La résolution de cette CMM est d'environ 40 nm.

Les mesures ont été effectuées par étape sur une ligne de 30 mm avec 4 μm . Par la suite, la forme de défaut est supprimée et un autre filtre a été ajouté ; ainsi, l'ondulation de surface est considérée dans sa rugosité présentée. Ensuite, la moyenne arithmétique est calculée sans plus de filtrage que la suppression forme de défaut.

Le tableau 5.7 et la figure 5.21 présentent les valeurs des coefficients du modèle associé calculées par l'équation 5.11.

Voici ci-dessous, le classement des facteurs d'influence, en commençant par la plus haute, afin de réduire la rugosité de surface :

- X_7 (très influente) : Augmenter le nombre de motifs par millimètre réduit de manière significative la rugosité de la surface.
- X_6 (très influente) : Paramètre, R/a , détermine la forme de la configuration et le nombre de fois que le parcours passe sur un même point de la surface (voir § 5.5.3). Avec une faible valeur de X_6 , le modèle passe qu'une seule fois sur la surface (induisant une rugosité élevée), tandis que la valeur la plus élevée donne 17 fois.
- X_3 (influent) : Une augmentation de l'engagement radial induit une dégradation de la rugosité. Ce phénomène peut être expliqué par l'augmentation des forces pré-polissage.
- X_4 (influent) : Une augmentation de la rotation de la broche augmente la rugosité de surface.
- X_1 (influent) : Un niveau élevé du nombre de grains (# 320) réduit la rugosité de surface. Ainsi, une petite taille de grain réduit la rugosité.
- X_2 (non-influent) : La lubrification améliore légèrement la rugosité de surface.
- X_8 (non-influent) : Un motif triangulaire réduit la rugosité de surface légèrement par rapport à un modèle trochoïdale.
- X_5 (non-influent) : La vitesse d'avance n'a pas d'influence significative sur la rugosité de surface.

Tableau 5.7 : Modèle numérique de la rugosité de surface

	Granulométrie	Lubrification	a_e	N	V_f	a	N	Motif
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
2,16	-0,48	-0,25	0,73	0,58	-0,11	-0,11	-1,16	-0,11

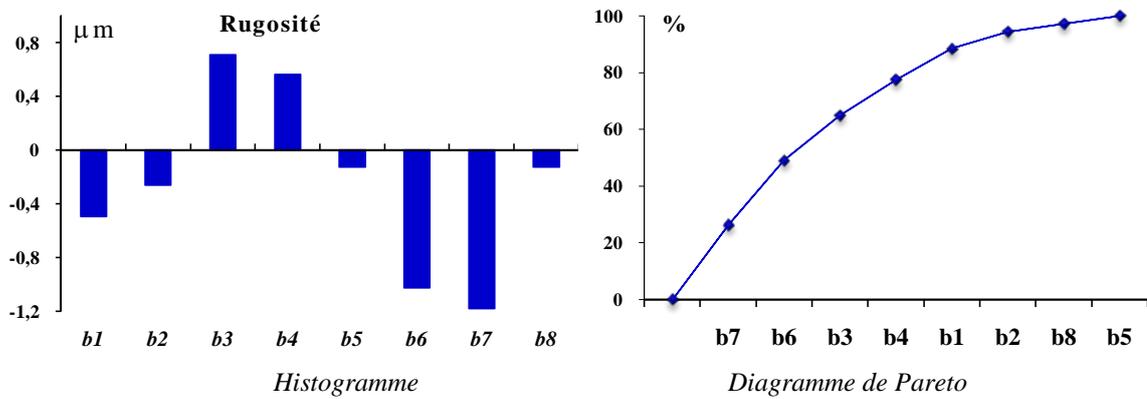


Figure 5.21: Coefficients relatifs à la rugosité de surface

5.5. Optimisation des facteurs : Surface de réponse par plan d'expérience

5.5.1. Mode expérimentale

La conception de criblage par plan d'expérience proposée (section § 5.4.4.1.) met en évidence les facteurs influents sur l'opération de pré-polissage :

1. Coûts de pré-polissage par volume : Trois principaux facteurs influents sont, (en commençant par le plus élevé) : X_3 , X_1 , X_7 et X_4 .
2. Rugosité de surface est influencée par les facteurs (en commençant par le plus élevé) : X_7 , X_6 , X_3 , X_4 et X_1 .

Comme il s'agit de rechercher une bonne qualité de surface, on élimine les coefficients X_1 et X_4 qui sont jugés non influents. On réduit ainsi considérablement le nombre d'expériences à réaliser. Finalement, les paramètres d'essais à retenir sont X_3 , X_6 , X_7 .

Ces facteurs seront optimisés pour réduire les coûts de pré-polissage par volume (fonction objective § 5.4.5.1.) sous contrainte de la rugosité (qualité de surface).

Par ailleurs, d'autres facteurs sont fixés pour la surface de réponse conception des essais expérimentaux :

1. Numéro de grain # 150 ($X_1 = -1$) : Pour réduire les coûts de production avec peu d'effet sur la rugosité de surface ;
2. Lubrification (Non) ($X_2 = -1$) : La lubrification est supprimé au cours des essais ;
3. Vitesse de rotation de la broche N (t/min) ($X_4 = 1$), ce facteur n'a pas de grand effet sur l'optimisation de pré-polissage et sera choisi égal à 12000 t/min.
4. Vitesse d'avance V_f ($X_5 = 0$) : Ce facteur ne possède pas une influence importante et il est fixé à 2000 mm/min pour les essais de surface de réponse.
5. Forme du motif ($X_8 = 1$) : En utilisant une forme triangulaire cela réduit le coût de production et réduit (améliore) la rugosité de surface.

La surface de la réponse proposée utilise trois niveaux pour chaque facteur (X_3 , X_6 et X_7). Ces niveaux sont présentés dans le Tableau 5.8.

Le Tableau 5.9 présente les expériences menées et les résultats obtenus. Deux paramètres de réponse sont mis en œuvre : Le coût de pré-polissage par volume et de la rugosité de surface.

Table 5.8 : Valeurs des facteurs testés dans la surface de réponse par plan d'expérience

	Niveaux bas (-1)	Niveaux moyenne (0)	Niveaux haut (+1)
X_3 : Engagement radial (mm)	0,05	0,1	0,15
X_7 : Motif (N^{bre}/mm)	0,5	2,5	4
X_6 : a ($R = 4$ mm)	7	4	1

Table 5.9 : Réponse expériences et les résultats de surface

Essai N°	X_3	X_7	X_6	Q (mm^3/s)	$Wear_speed$ (mm^2/s)	PP_cost/Vol ($€/mm^3$)	Rugosité (μm)
1	-1	-1	-1	0,0281	0,0182	4,74	2,34
2	1	-1	-1	0,5586	0,0402	0,45	6,74
3	-1	1	-1	0,0099	0,0018	4,50	1,08
4	1	1	-1	0,0987	0,0045	0,60	1,65
5	-1	-1	1	0,0215	0,0171	5,91	2,16
6	1	-1	1	0,3278	0,0216	0,46	1,83
7	-1	1	1	0,0120	0,0023	3,92	1,13
8	1	1	1	0,1964	0,0100	0,45	1,61
9	-1	0	0	0,0157	0,0045	3,75	1,23
10	1	0	0	0,1917	0,0089	0,43	1,32
11	0	-1	0	0,2272	0,0337	0,96	2,45
12	0	1	0	0,1170	0,0108	0,80	1,37
13	0	0	-1	0,0800	0,0064	0,87	1,63
14	0	0	1	0,0669	0,0070	1,09	1,83
15	0	0	0	0,0823	0,0072	0,90	1,71
15_1	0	0	0	0,0998	0,0068	0,72	1,31
15_2	0	0	0	0,0789	0,0074	0,95	1,63

5.5.2. Résultats et interprétation

Pour mener à bien l'étape d'optimisation, un modèle a été associé avec les deux réponses (le coût par volume et la rugosité).

Ce modèle est un modèle mathématique de deuxième ordre est donné par Équation 09:

$$Y = b_0 + b_3 \cdot X_3 + b_7 \cdot X_7 + b_6 \cdot X_6 + b_{33} \cdot X_3^2 + b_{77} \cdot X_7^2 + b_{66} \cdot X_6^2 + b_{37} \cdot X_3 \cdot X_7 + b_{36} \cdot X_3 \cdot X_6 + b_{76} \cdot X_7 \cdot X_6 \dots \dots \dots (5.12)$$

Le tableau 5.10 présente les valeurs des coefficients de l'équation 5.12 pour les deux réponses. Par la suite, le modèle du tableau 10 est présenté comme une nouvelle figure 5.22 et 5.23. Pour représenter les modèles de l'équation 5.12, un espace 4D est nécessaire : 3D pour les facteurs (X_3 , X_7 et X_6) et 1D pour les valeurs de réponse.

Tableau 5.10 : Coefficients des surfaces de réponse

	b_0	b_3	b_7	b_6	b_{33}	b_{77}	b_{66}	b_{37}	b_{36}	b_{76}
PPCost/Vol (€/mm ³)	0,73	-2,04	-0,23	0,07	1,41	19	0,29	0,30	-0,09	-0,24
Rugosité (µm)	1,42	0,52	-0,87	-0,49	-0,07	0,57	0,39	-0,38	-0,60	0,64

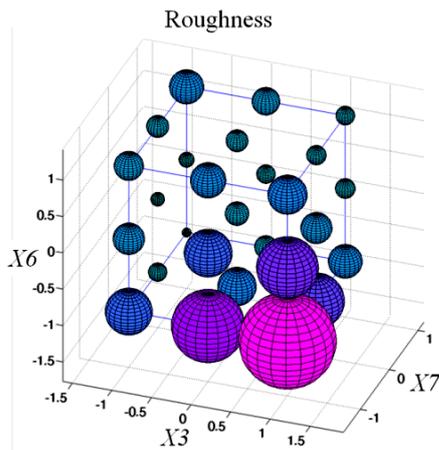


Figure 5.22 : Surface de réponse pour le coût du pré-polissage par volume enlevé

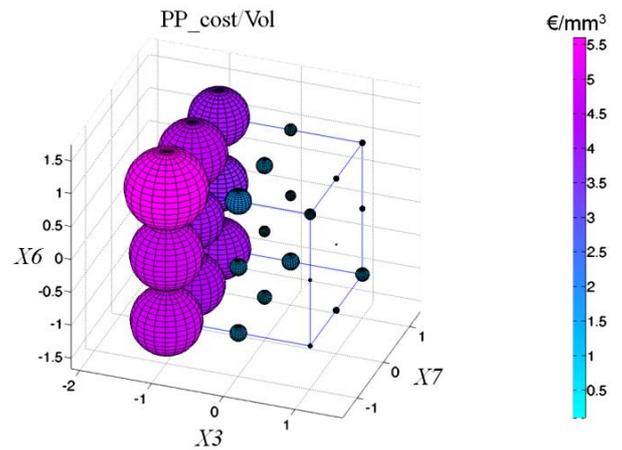


Figure 5.23 : Surface de réponse de la rugosité

Pour ce faire, nous proposons d'utiliser un espace 3D pour chaque facteur, par la suite, une sphère est placée le long d'une grille de points dans cet espace, cette grille est obtenue en utilisant les valeurs -1, 0 et 1 sur chaque axe induisant 27 points.

Le diamètre et la couleur de chaque sphère sont fonctions de la valeur de la réponse modélisée en chaque point. Cette représentation signifie que la direction de la variation peut être facilement appréciée.

5.5.3. Coût du pré-polissage par volume en surface de réponse

L'objectif est de réduire le coût de pré-polissage par volume. La figure 5.22 présente le graphique 4D du coût modélisé par volume pré-poli. Ce chiffre souligne que de faibles valeurs d'engagement radiales ($X_3 = -1$ qui correspondent à un engagement radial de 0,05 mm) doivent être exclues pour maintenir le coût de production raisonnable.

En outre, ce chiffre représente une valeur optimale du coût de production à proximité des points $X_3 = 1$, $X_7 = 0$ et $X_6 = 0$.

Mathématiquement parlant, une valeur optimale est calculée pour diminuer le coût de production :

- $X_3 = 0,7 \Rightarrow$ Engagement radial de 0,136 mm ;
- $X_7 = 0,04 \Rightarrow$ N^{bre} de motifs/mm = 2,58 Motifs/mm ;
- $X_6 = 0,01 \Rightarrow a = 3,96$, modèle qui passe 5 fois plus en chaque point sur le parcours.

5.5.4. Rugosité de surface

La figure 5.23 présente la représentation 4D de la rugosité de la surface modélisée. Le résultat obtenu confirme la conception de criblage de l'expérience.

Un faible niveau de X_7 , (quelques motifs par millimètre) et X_6 , combiné avec un haut niveau de X_3 , (d'engagement radiale élevée) des résultats dans la mauvaise rugosité de la zone testée. Avec ce modèle, le point optimisé vu dans la section § 4.3.2 fournit une rugosité de 1,7 μm .

5.5.5. Optimisation sous contrainte

Une optimisation sous contrainte est effectuée pour trouver les paramètres du polissage les moins chers correspondant à une rugosité spécifiée.

Dans notre étude, on utilise la fonction de Lagrange pour optimiser le coût de polissage sous contrainte de la rugosité.

Cette fonction introduit un coefficient multiplicateur de Lagrange et s'écrit sous la forme suivant :

$$\mathcal{L}_{(x,y,z,\lambda)} = f_{(x,y,z)} + \lambda \cdot \psi_{(x,y,z)} \dots\dots\dots (5.13)$$

Avec : x , y , z représentent respectivement la profondeur de passe (X_3), le nombre de motifs par millimètre (X_6) et la forme du motif (X_7), $f_{(x,y,z)}$ la fonction à optimiser (coût de polissage), λ le coefficient multiplicateur de Lagrange et $\psi_{(x,y,z)}$ la fonction contrainte (rugosité).

En effet, en utilisant un solveur numérique (Matlab et/ou MathCad) ainsi que le modèle obtenu du coût et de la rugosité pour résoudre les de calculs.

Solution de la fonction d'optimisation

La méthode du multiplicateur de Lagrange est une méthode permettant de trouver les points stationnaires (maximum, minimum...) d'une fonction dérivable d'une ou plusieurs variables, sous contraintes.

Les conditions du premier ordre, qui correspondent à l'annulation des dérivées premières (condition nécessaire) sont données par :

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \lambda \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y} + \lambda \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial z} + \lambda \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = \mathbf{g}(x, y, z) = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (5.14)$$

Les points candidats s'obtiennent en résolvant ce système de quatre équations à quatre inconnues (x, y, z, λ).

Mentionnons que la quatrième équation de ce système $\partial \mathcal{L} / \partial \lambda = g(x, y, z) = 0$ n'est rien d'autre que la contrainte. Les points candidats satisfont par conséquent cette contrainte.

La solution des trois premiers équations ci-dessus fournit les points candidats de la fonction sous contrainte.

Soient les fonctions :

CP(X_3, X_6, X_7) : Coût de polissage ;

Rug(X_3, X_6, X_7) : Rugosité ;

Rug : La valeur imposée (contrainte) de la rugosité.

On utilise la fonction de Lagrange avec multiplicateur pour déterminer les valeurs optimales de X_3, X_6, X_7 .

Cette fonction s'écrit sous la forme :

$$\mathcal{L}_{(X_3, X_6, X_7, \lambda)} = \mathbf{CP}_{(X_3, X_6, X_7)} + \lambda \cdot [\mathbf{Rug}_{(X_3, X_6, X_7)} - \mathbf{Rug}] \dots\dots\dots (5.15)$$

On optimise X_3, X_6, X_7 en annulant les dérivées de $\mathcal{L}_{(X_3, X_6, X_7, \lambda)}$, soit :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial X_3} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial X_6} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial X_7} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = 0 \dots\dots\dots (5.16)$$

La dérivée par rapport à λ donne la contrainte :

$$\mathbf{Rug}_{(X_3, X_6, X_7)} - \mathbf{Rug} = 0 \dots\dots\dots (5.17)$$

Les trois premières dérivées dépendent de λ . Dans le cas de surfaces de réponse du 2^{ème} ordre adoptées pour CP et Rug, ces équations constituent un système d'équations linéaire pour λ fixé.

Il est donc facile de résoudre ce système (Matlab permet de résoudre très facilement un système d'équations linéaires).

Les solutions dépendent évidemment de λ . On aura donc $X_3(\lambda), X_6(\lambda)$ et $X_7(\lambda)$.

On introduit ensuite ces solutions dans la fonction contrainte qui s'écrit :

$$Rug_{(X_3, X_6, X_7)} = Rug \dots\dots\dots (5.18)$$

Cette fonction *Rug* dépend uniquement de λ et est non linéaire. Pour la résoudre, on fait appel soit à une méthode numérique, soit on utilise un logiciel approprié.

Dans notre cas, nous avons utilisé le *logiciel Matcad* qui permet de résoudre aisément une équation non linéaire mais en lui donnant une solution approchée. Pour trouver cette solution approchée, on trace le graphe $Rug_{(X_3(\lambda), X_6(\lambda), X_7(\lambda))}$ et la droite $Rug = C^{st}$ en fonction de λ .

Leurs intersections sont les valeurs solutions de λ . Le graphe suivant représente cette fonction dans le domaine où les solutions $X_3(\lambda)$, $X_6(\lambda)$ et $X_7(\lambda)$ s'y trouvent.

Pour ce cas de $Rug = 1,4 \mu m$, il y a 4 valeurs de λ , ce qui donne 4 solutions pour $X_3(\lambda)$, $X_6(\lambda)$ et $X_7(\lambda)$. En remplaçant ces valeurs dans l'expression $CP(X_3, X_6, X_7)$, on trouve évidemment 4 valeurs du coût de polissage.

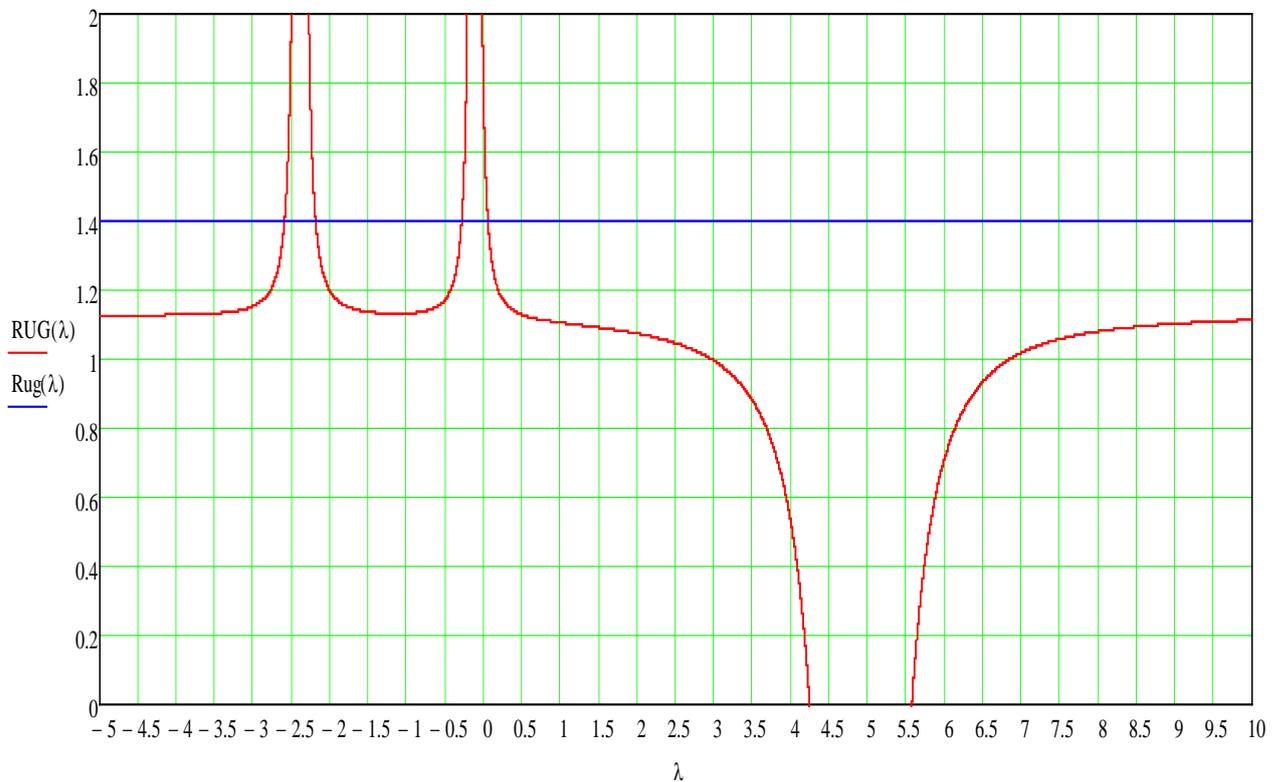


Figure 5.24 : Modèle de solution la fonction de Lagrange pour une rugosité de $1,4 \mu m$

La valeur optimale recherchée est la plus faible d'entre elles (en valeur absolue).

On obtient :

$$CP_{Optimal} = -0,001786 \text{ €mm}^3.$$

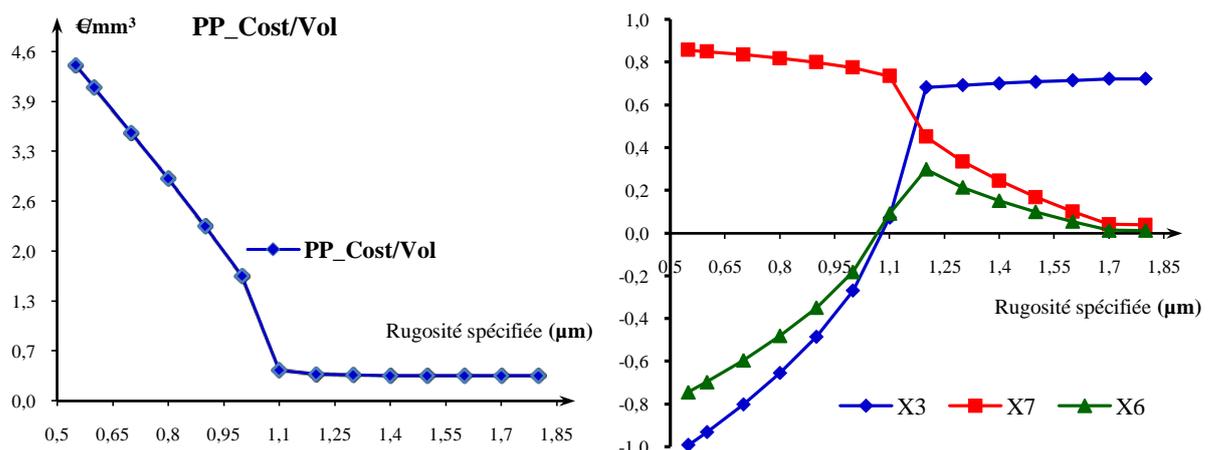
Le Tableau 5.11 présente les paramètres optimaux de pré-polissage pour réduire le coût et assurer une rugosité spécifiée.

Tableau 5.11 : Paramètres de pré-polissage optimal pour réduire le coût assurer une rugosité spécifiée

Rugosité (μm)	X_3	X_6	X_7	Coût polissage calculé suivant modèle
1,8	0,7252	-0,0276	-0,0119	-0,0077
1,7	0,7190	0,0094	0,0441	-0,0081
1,6	0,7124	0,0498	0,1050	-0,0076
1,5	0,7052	0,0948	0,1724	-0,0056
1,4	0,6972	0,1464	0,2490	-0,0018
1,3	0,6885	0,2087	0,3398	0,0051
1,2	0,6792	0,2937	0,4578	0,0180
1,1	0,7242	0,5037	0,6400	0,0604
1,0	1,0305	0,7835	0,6282	0,2919
0,9	1,2437	0,9512	0,6066	0,6146
0,8	1,4146	1,0834	0,5887	0,9712
0,7	1,5612	1,1961	0,5733	1,3468
0,6	1,6917	1,2960	0,5595	1,7352
0,55	1,7523	1,3423	0,5531	1,9330

Les résultats du tableau 5.11 sont repris sur la figure 5.24. Ces résultats mettent en évidence deux zones principales :

1. La valeur de la rugosité spécifiée est comprise entre 1,1 et 1,8 μm . Section § 5.5.2 démontrées que l'engagement radial (X_3) joue un rôle principal dans le coût de pré-polissage. Ainsi, dans cette première zone, la valeur optimale de X_3 est constante, seul le nombre de motifs par millimètre (X_7) et la forme du motif (X_6), qui définissent nombre de fois que l'outil passe au-dessus d'un point situé sur la surface, augmentent.
2. La valeur de la rugosité spécifiée est entre [0,55 ; 1]. Avec une rugosité déterminée de moins de 1 μm , il est impossible de maintenir l'engagement radial induisant une forte augmentation de coût pré-polissage.

**Figure 5.25** : Paramètres de pré-polissage optimaux pour réduire le coût et assurer une rugosité spécifiée

5.6. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de valider un modèle expérimental pour calculer le coût de polissage par volume de matière enlevé et de caractériser les efforts induits par le processus de polissage ainsi que la qualité d'état de surface en terme de rugosité R_a , mais avant cela, la découverte et la correction de la forme de l'outil de polissage au cours des premiers essais qui nous a permis de comprendre son origine, à proposer un protocole pour déterminer la pression minimale de polissage.

Les essais ont été organisés suivant une logique propre aux plans d'expériences suivant la méthode d'Hadamard, ils ont permis d'identifier les différents paramètres les plus influents pour caractériser correctement le comportement globale du processus de polissage.

La rugosité des différents échantillons polis a été relevée à l'aide d'un rugosimètre 3D équipé d'une sonde confocale. L'ensemble des paramètres introduits par la norme ISO a été considéré.

Les expériences réalisées soulignent que la lubrification, la vitesse de rotation de la broche, la vitesse d'avance de l'outil, la granulométrie et le type de motif de la trajectoire ne jouent aucun rôle majeur sur ces deux paramètres de sortie (réponses). Par contre, la profondeur de passe, le nombre de motifs/mm et la forme du motif sont donc les principaux facteurs décrivant les modèles des surfaces de réponse pour le coût de polissage et la rugosité, et entrant dans les considérations d'optimisation du processus de polissage.



**Conclusion Générale
et
Perspectives**

Conclusion générale

Les techniques de finition présentes sur le marché sont en constante évolution afin d'augmenter la productivité et réduire les coûts de fabrication. Actuellement, les processus d'usinage de pièces composées de formes complexes comportent de nombreuses opérations manuelles qui nécessitent l'emploi de mains d'œuvre qualifiées, une dépense considérable de temps et d'argent. Il devient donc important de développer une technique permettant l'automatisation de l'opération de finition, la reproductivité des résultats et la conservation des tolérances dimensionnelles.

Le polissage automatique des surfaces complexes sur MOCN multiaxes présente de nombreux avantages : possibilité d'améliorer la qualité des surfaces polies grâce à la répétabilité des axes de ces machines-outils, opérations de polissage pouvant être effectuées sur ces mêmes machines après les opérations d'usinage ce qui conduit à la suppression de transfert chez le sous-traitant.

L'étude propose une optimisation expérimentale de ce processus. Le but de cette optimisation consiste à réduire le coût polissage tout en contrôlant la rugosité.

Le travail est mené en choisissant un couple abrasif-matériau constitué d'un outil-abrasif cylindrique flexible constitué d'un capuchon en papier de verre monté sur un support en caoutchouc et une pièce cylindrique en acier inoxydable 100Cr6. L'opération de polissage est réalisée avec une trajectoire d'outil composée d'une trajectoire porteuse optimisée sur laquelle un motif élémentaire est répété.

L'étude nécessite tout d'abord de connaître la rigidité de l'outil utilisé afin de maîtriser le contact outil-pièce. Pour cela, des essais sont réalisés en statique dans le but de déterminer la flexion de la tige en prenant en compte la longueur de contact outil-pièce, la longueur de sortie de l'outil, le rayon de courbure de la pièce et en simulant la profondeur de passe. Un modèle mathématique décrivant l'effort de contact (effort radial) en fonction de ces paramètres montre que la profondeur de passe a une influence prédominante, les autres ont des effets négligeables.

Au cours de ces essais, l'effort radial a été mesuré à l'aide d'un dynamomètre Kistler 9257B à 4 capteurs piézo-électriques pour déterminer le comportement élastique du porte-capuchon. Les essais montrent que cet outil a un comportement quasi-linéaire en fonction de la profondeur de passe et est de raideur moyenne de 94 N/mm.

Un premier plan d'expérience est réalisée en prenant en considération les paramètres d'usinage suivants : profondeur de passe, granulométrie de l'abrasif, lubrification, vitesse de rotation de la broche, vitesse d'avance, paramètres du motif (nombre de motifs par mm, avance et type du motif). L'analyse de ces essais est portée sur la qualité de surface obtenue. Elle est effectuée par l'observation des traces de l'outil sur la surface usinée, et a permis de conclure que le polissage s'est effectué avec une variation de pression de contact. Ce qui signifie que la forme de l'outil est très légèrement conique, par conséquent, ne correspond pas au cylindre nominal spécifié par le constructeur. Pour cette raison, la trajectoire de l'outil est ajustée dans le programme de polissage pour compenser ce défaut géométrique.

L'influence de ces huit paramètres de polissage est étudiée en organisant une série d'essais suivant le plan d'expériences par criblage en utilisant la méthode d'Hadamard. L'analyse est menée en mesurant l'état de surface et en calculant le coût de l'opération de polissage.

Les expériences réalisées soulignent que la lubrification, la vitesse de rotation de la broche, la vitesse d'avance de l'outil, la granulométrie et le type de motif de la trajectoire ne jouent aucun rôle majeur sur ces deux paramètres de sortie (réponses). Par contre, la profondeur de passe, le nombre de motifs/mm et la forme du motif sont donc les principaux facteurs décrivant les modèles des surfaces de réponse pour le coût de polissage et la rugosité, et entrant dans les considérations d'optimisation du processus de polissage.

L'optimisation du coût de polissage est conduite en utilisant la fonction de Lagrange avec coefficient multiplicateur où la rugosité est introduite comme contrainte. Elle met en évidence deux zones observées sur la rugosité de surface. La première zone correspondant aux valeurs élevées de la rugosité (R_a compris entre 1,1 et 1,8 μm) autorise des grandes profondeurs de passe ($> 0,136$ mm) avec un coût de polissage réduit. Dans la deuxième zone correspondant aux rugosités faibles, on observe le phénomène inverse.

Comme perspectives, nous proposons une continuation de ce travail sur les axes suivants :

- étendre la démarche suivie pour le cas étudié sur d'autres couples abrasifs-matériaux afin d'établir une base de données propres au polissage sur MOCN 5-axes et de faire apparaître de nouveaux paramètres d'étude comme la dureté du matériau ;
- étudier l'usure de l'outil ;
- établir une cartographie d'état de surface en prenant d'autres paramètres de rugosité 2D ou 3D ;
- étudier les contraintes résiduelles dues à l'effet de la température sur le comportement thermomécanique du couple matière-outil.



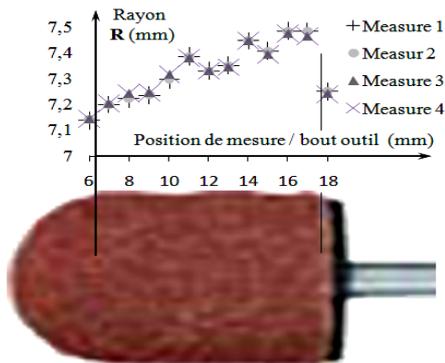
Annexes

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 01 : # 320

Granulométrie	320
Lubrification	Oui
a_e	0,05
N	12000
V_f	3000
R/a ($R = 4$ mm)	4
N^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Trochoïdal



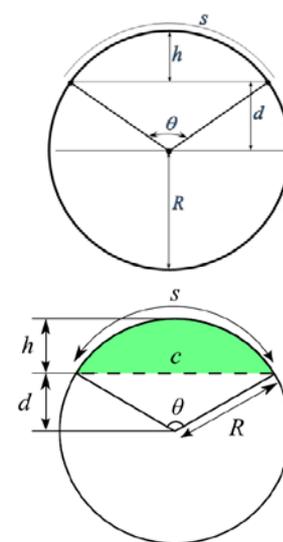
Temps d'usinage	
Passe 1	16 s
Passe 2	16 s
Passe 3	15 s
Temps total	47 s

$$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$$

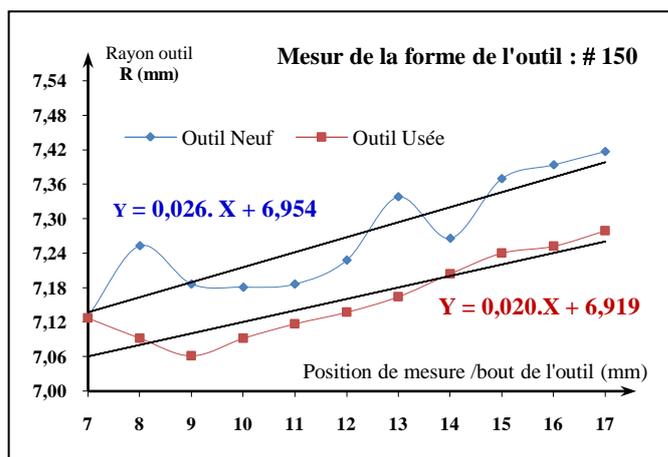
$$S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,1300	7,1270
8	7,2530	7,0920
9	7,1860	7,0610
10	7,1810	7,0920
11	7,1860	7,1170
12	7,2280	7,1370
13	7,3380	7,1640
14	7,2660	7,2040
15	7,3700	7,2400
16	7,3940	7,2520
17	7,4170	7,2790

	Droite
Pente	7,1360
0,0260	7,1620
	7,1880
Ordonnée origine	7,2140
6,9540	7,2400
	7,2660
	7,2920
	7,3180
	7,3440
	7,3700
	7,3960



Usure Outil	0,8915 mm²
0,1430	
0,1070	
0,0790	
0,0800	
0,1325	
0,1180	
0,0960	
0,1360	



$R_{pièce}$	3,9945 mm		
θ_1	0,02147°	θ_2	0,2611°
h_1	0,0230 mm	h_2	0,0340 mm
d_1	3,9715 mm	d_2	3,9605 mm
$SA1$	0,0131 mm ²	$SA2$	0,0236 mm ²
Surface Moy.	0,0184 mm ²		
Volume	0,7346 mm³		
Débit	0,0156 mm³/s		

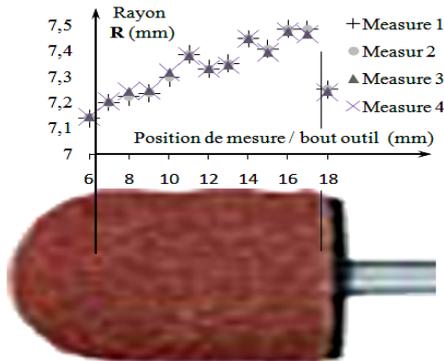
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9809 mm	7,9890 mm
Cote Usinée	7,9660 mm	7,8550 mm
Diminution de d	0,0230 mm	0,0000 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 02 : # 150

Granulométrie	150
Lubrification	Oui
a_e	0,1
N	6000
V_f	3000
R/a ($R = 4$ mm)	4
N^{bre} motif / mm	4
Forme du motif	Trochoïdal

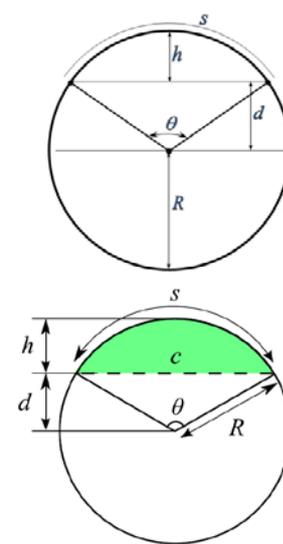


Temps d'usinage	
Passe 1	63 s
Passe 2	63 s
Passe 3	63 s
Temps total	189 s

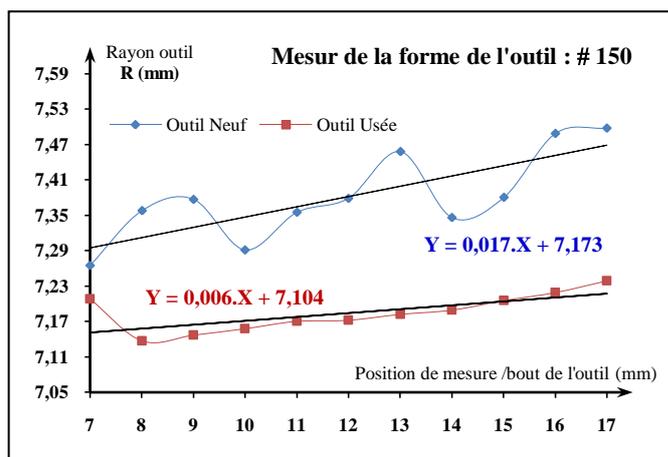
$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$
 $S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,2650	7,2080
8	7,3580	7,1370
9	7,3770	7,1470
10	7,2910	7,1580
11	7,3550	7,1700
12	7,3790	7,1720
13	7,4580	7,1820
14	7,3460	7,1890
15	7,3800	7,2050
16	7,4890	7,2190
17	7,4980	7,2390

	Droite
Pente	7,2920
0,0170	7,3090
	7,3260
Ordonnée origine	7,3430
7,1730	7,3600
	7,3770
	7,3940
	7,4110
	7,4280
	7,4450
	7,4620



Usure Outil	1,6085 mm²
0,2255	
0,1815	
0,1590	
0,1960	
0,2415	
0,2165	
0,1660	
0,2225	



$R_{pièce}$	3,9945 mm		
θ_1	0,6275°	θ_2	0,5908°
h_1	0,1950 mm	h_2	0,1730 mm
d_1	3,7995 mm	d_2	3,8215 mm
$SA1$	0,3221 mm ²	$SA2$	0,2694 mm ²
Surface Moy.	0,2985 mm ²		
Volume	11,8308 mm³		
Débit	0,0626 mm³/s		

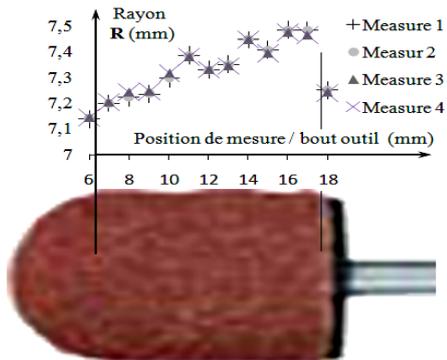
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9890 mm	7,9890 mm
Cote Usinée	7,7940 mm	7,8160 mm
Diminution de d	0,1950 mm	0,1730 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 03 : # 320

Granulométrie	320
Lubrification	Non
a_e	0,1
N	12000
V_f	3000
R/a (R = 4 mm)	4
N ^{bre} motif / mm	4
Forme du motif	Triangulaire



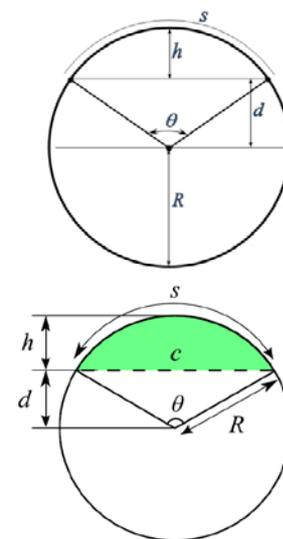
Temps d'usinage	
Passé 1	170 s
Passé 2	170 s
Passé 3	170 s
Temps total	510 s

$$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$$

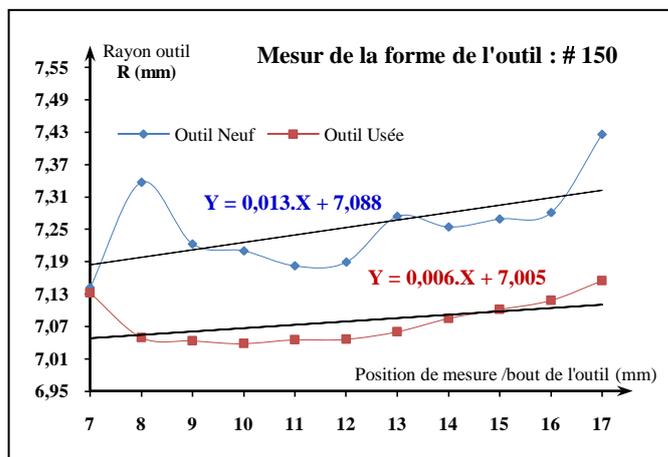
$$S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,1420	7,1320
8	7,3370	7,0490
9	7,2230	7,0430
10	7,2100	7,0380
11	7,1820	7,0450
12	7,1890	7,0460
13	7,2740	7,0600
14	7,2540	7,0850
15	7,2690	7,1010
16	7,2810	7,1180
17	7,4260	7,1550

	Droite
Pente	7,1790
0,0130	7,1920
	7,2050
Ordonnée origine	7,2180
7,0880	7,2310
	7,2440
	7,2570
	7,2700
	7,2830
	7,2960
	7,3090



Usure Outil	1,4085 mm²
0,2340	
0,1760	
0,1545	
0,1400	
0,1785	
0,1915	
0,1685	
0,1655	



$R_{pi\grave{e}ce}$	3,9955 mm		
θ_1	0,5924°	θ_2	0,5461°
h_1	0,1740 mm	h_2	0,1480 mm
d_1	3,1740 mm	d_2	3,8475 mm
$SA1$	0,2718 mm ²	$SA2$	0,2134 mm ²
Surface Moy.	0,2426 mm ²		
Volume	9,7035 mm³		
Débit	0,0190 mm³/s		

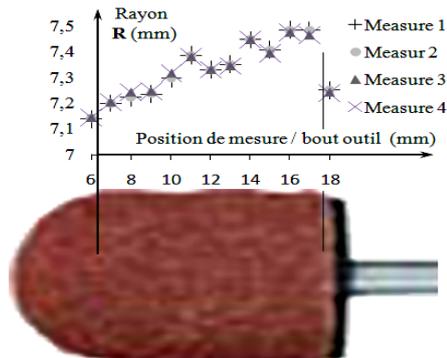
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9910 mm	7,9910 mm
Cote Usinée	7,817 mm	7,8430 mm
Diminution de d	0,1740 mm	0,1480 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 04 : # 150

Granulométrie	150
Lubrification	Oui
a_e	0,05
N	12000
V_f	3000
R/a (R = 4 mm)	0,1
N ^{bre} motif / mm	4
Forme du motif	Triangulaire



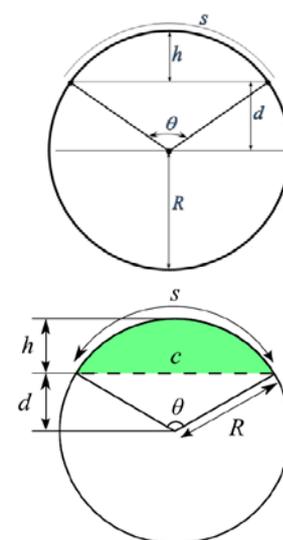
Temps d'usinage	
Passé 1	63 s
Passé 2	63 s
Passé 3	63 s
Temps total	190 s

$$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos} (d/R)$$

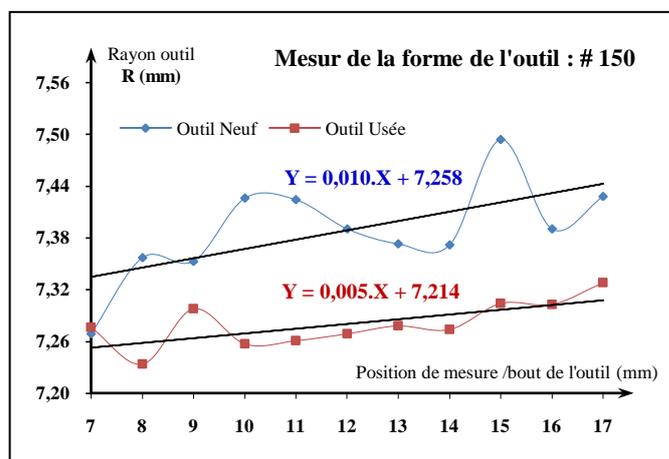
$$S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,2690	7,2760
8	7,3570	7,2340
9	7,3530	7,2980
10	7,4260	7,2570
11	7,4240	7,2610
12	7,3900	7,2690
13	7,3730	7,2780
14	7,3720	7,2740
15	7,4940	7,3040
16	7,3900	7,3030
17	7,4280	7,3280

	Droite
Pente	7,3280
0,0100	7,3380
	7,3480
Ordonnée origine	7,3580
7,2580	7,3680
	7,3780
	7,3880
	7,3980
	7,4080
	7,4180
	7,4280



Usure Outil	1,4510 mm²
0,1860	
0,1515	
0,1795	
0,2230	
0,2025	
0,1740	
0,1740	
0,1605	



$R_{pi\grave{e}ce}$	3,9950 mm		
θ_1	0,4935°	θ_2	0,3829°
h_1	0,1210 mm	h_2	0,0730 mm
d_1	3,8740 mm	d_2	3,9220 mm
$SA1$	0,1579 mm ²	$SA2$	0,0741 mm ²
Surface Moy.	0,1160 mm ²		
Volume	4,6408 mm³		
Débit	0,0244 mm³/s		

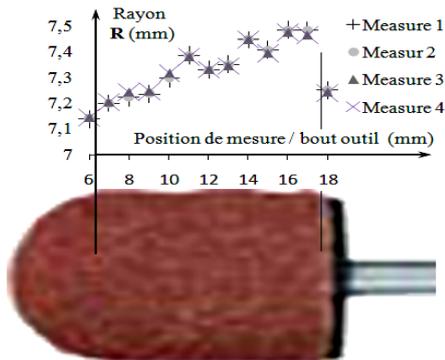
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9900 mm	7,9900 mm
Cote Usinée	7,8690 mm	7,9170 mm
Diminution de d	0,1210 mm	0,0730 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 05 : # 150

Granulométrie	150
Lubrification	Non
a_e	0,1
N	6000
V_f	3000
R/a ($R = 4$ mm)	4
N^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Triangulaire

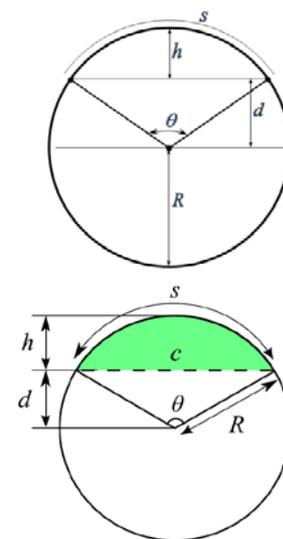


Temps d'usinage	
Passe 1	16 s
Passe 2	16 s
Passe 3	16 s
Temps total	48 s

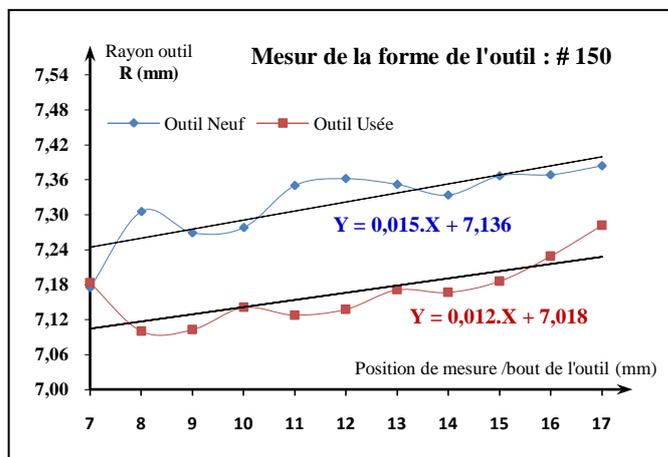
$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$
 $S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,1750	7,1830
8	7,3060	7,1000
9	7,2690	7,1030
10	7,2780	7,1410
11	7,3500	7,1280
12	7,3620	7,1380
13	7,3520	7,1710
14	7,3340	7,1670
15	7,3670	7,1860
16	7,3690	7,2290
17	7,3840	7,2820

	Droite
Pente	7,2410
0,0150	7,2560
	7,2710
Ordonnée origine	7,2860
7,1360	7,3010
	7,3160
	7,3310
	7,3460
	7,3610
	7,3760
	7,3910



Usure Outil	0,8915 mm²
0,1430	
0,1070	
0,0790	
0,0800	
0,1325	
0,1180	
0,0960	
0,1360	

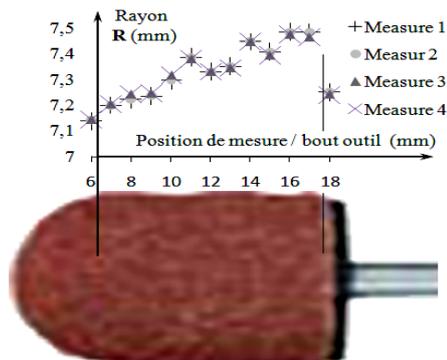


$R_{pièce}$	3,9960 mm		
θ_1	0,5479°	θ_2	0,5271°
h_1	0,1490 mm	h_2	0,1380 mm
d_1	3,8470 mm	d_2	3,8580 mm
$SA1$	0,2156 mm ²	$SA2$	0,1922 mm ²
Surface Moy.	0,2039 mm ²		
Volume	8,1561 mm³		
Débit	0,1699 mm³/s		

	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9920 mm	7,9920 mm
Cote Usinée	7,8430 mm	7,8540 mm
Diminution de d	0,1490 mm	0,1380 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01**Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme****Essai N° 06 : # 150**

Granulométrie	150
Lubrification	Non
a_e	0,05
N	12000
V_f	1000
R/a ($R = 4$ mm)	4
N^{bre} motif / mm	4
Forme du motif	Trochoïdal



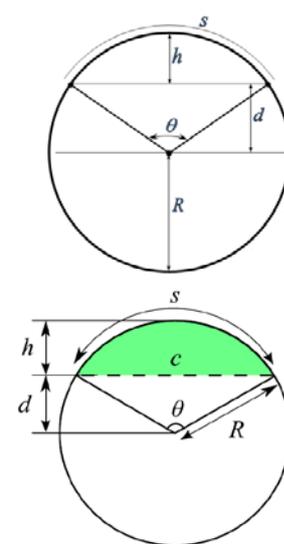
Temps d'usinage	
Passe 1	164 s
Passe 2	165 s
Passe 3	165 s
Temps total	494 s

$$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$$

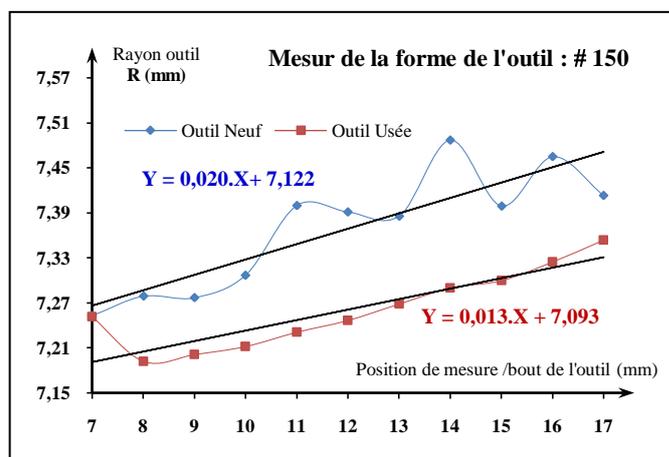
$$S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,2530	7,2520
8	7,2790	7,1920
9	7,2770	7,2010
10	7,3070	7,2120
11	7,4000	7,2310
12	7,3910	7,2470
13	7,3860	7,2690
14	7,4870	7,2900
15	7,3990	7,3000
16	7,4650	7,3250
17	7,4130	7,3540

	Droite
Pente	7,2620
0,0200	7,2820
	7,3020
Ordonnée origine	7,3220
7,1220	7,3420
	7,3620
	7,3820
	7,4020
	7,4220
	7,4420
	7,4620



Usure Outil	1,0105 mm ²
0,0815	
0,0855	
0,1320	
0,1565	
0,1305	
0,1570	
0,1480	
0,1195	



$R_{pièce}$	3,9950 mm		
θ_1	0,5733°	θ_2	0,4596°
h_1	0,1630 mm	h_2	0,1050 mm
d_1	3,8320 mm	d_2	3,8900 mm
$SA1$	0,2465 mm ²	$SA2$	0,1277 mm ²
Surface Moy.	0,1871 mm ²		
Volume	7,4845 mm³		
Débit	0,0152 mm³/s		

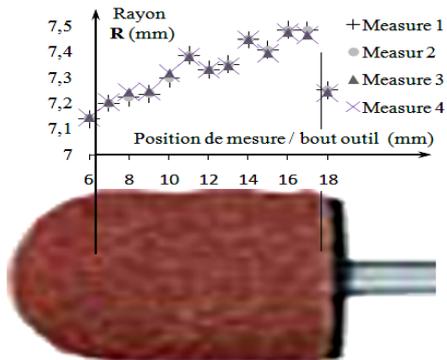
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9900 mm	7,9900 mm
Cote Usinée	7,8270 mm	7,8850 mm
Diminution de d	0,1630 mm	0,1050 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 07 : # 150

Granulométrie	150
Lubrification	Non
a_e	0,05
N	6000
V_f	3000
R/a (R = 4 mm)	4
N ^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Triangulaire

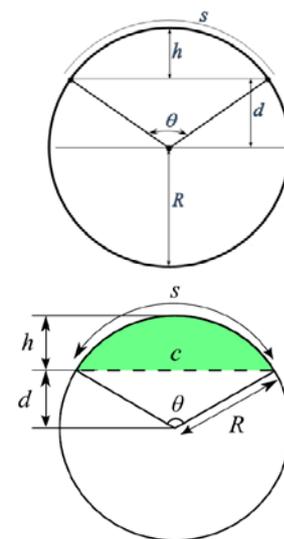


Temps d'usinage	
Passe 1	64 s
Passe 2	63 s
Passe 3	63 s
Temps total	190 s

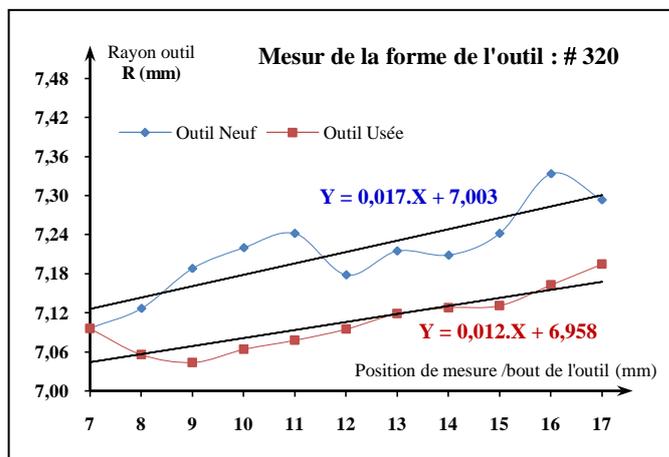
$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$
 $S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,0970	7,0960
8	7,1270	7,0560
9	7,1880	7,0440
10	7,2200	7,0640
11	7,2420	7,0780
12	7,1780	7,0950
13	7,2150	7,1190
14	7,2090	7,1280
15	7,2420	7,1310
16	7,3340	7,1630
17	7,2940	7,1950

	Droite
Pente	7,1220
0,0170	7,1390
	7,1560
Ordonnée origine	7,1730
7,0030	7,1900
	7,2070
	7,2240
	7,2410
	7,2580
	7,2750
	7,2920



Usure Outil	0,9560 mm²
0,1075	
0,1500	
0,1600	
0,1235	
0,0895	
0,0885	
0,0960	
0,1410	



$R_{pièce}$	3,9945 mm		
θ_1	0,3500°	θ_2	0,3005°
h_1	0,0610 mm	h_2	0,0450 mm
d_1	3,9335 mm	d_2	3,9495 mm
$SA1$	0,0566 mm ²	$SA2$	0,0359 mm ²
Surface Moy.	0,0463 mm ²		
Volume	1,8512 mm³		
Débit	0,0097 mm³/s		

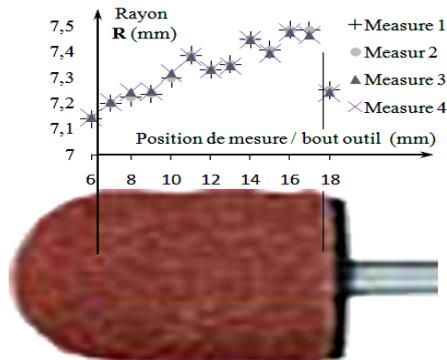
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9890 mm	7,9890 mm
Cote Usinée	7,9280 mm	7,8550 mm
Diminution de d	0,0610 mm	0,0450 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 08 : # 320

Granulométrie	320
Lubrification	Oui
a_e	0,05
N	6000
V_f	1000
R/a (R = 4 mm)	4
N ^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Triangulaire

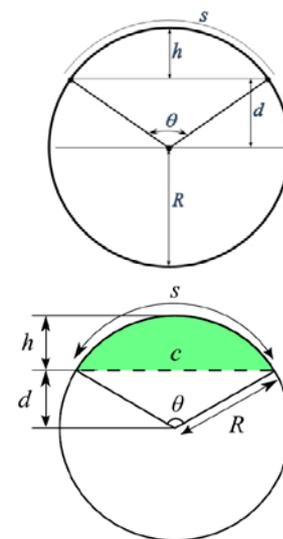


Temps d'usinage	
Passé 1	44 s
Passé 2	43 s
Passé 3	43 s
Temps total	130 s

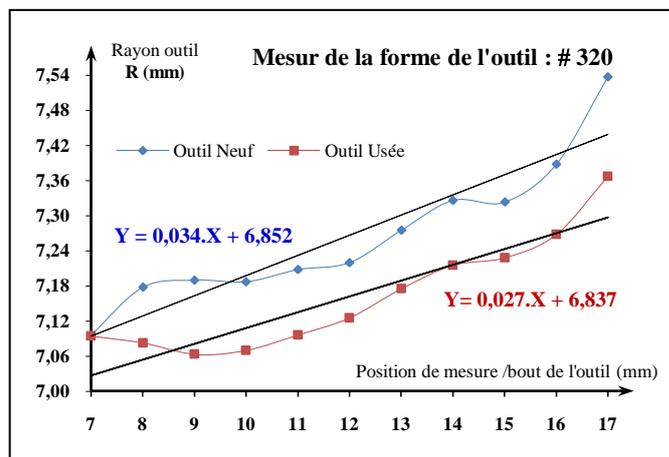
$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos} (d/R)$
 $S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,0960	7,0940
8	7,1780	7,0820
9	7,1900	7,0630
10	7,1870	7,0700
11	7,2080	7,0960
12	7,2200	7,1250
13	7,2750	7,1750
14	7,3260	7,2150
15	7,3230	7,2280
16	7,3880	7,2680
17	7,5370	7,3670

	Droite
Pente	7,0900
0,0340	7,1240
	7,1580
Ordonnée origine	7,1920
6,8520	7,2260
	7,2600
	7,2940
	7,3280
	7,3620
	7,3960
	7,4300



Usure Outil	0,8650 mm²
0,1115	
0,1220	
0,1145	
0,1035	
0,0975	
0,1055	
0,1030	
0,1075	



$R_{pi\grave{e}ce}$	3,9950 mm		
θ_1	0,02193 °	θ_2	0,2903°
h_1	0,0240 mm	h_2	0,0420 mm
d_1	3,9710 mm	d_2	3,9530 mm
$SA1$	0,0140 mm ²	$SA2$	0,0324 mm ²
Surface Moy.	0,0232 mm ²		
Volume	0,9278 mm³		
Débit	0,0071 mm³/s		

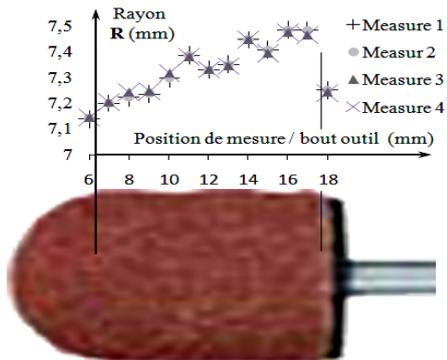
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9809 mm	7,9900 mm
Cote Usinée	7,9660 mm	7,9480 mm
Diminution de d	0,0240 mm	0,0420 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 09 : # 320

Granulométrie	320
Lubrification	Oui
a_e	0,1
N	6000
V_f	1000
R/a ($R = 4$ mm)	0,1
N^{bre} motif / mm	4
Forme du motif	Trochoïdal

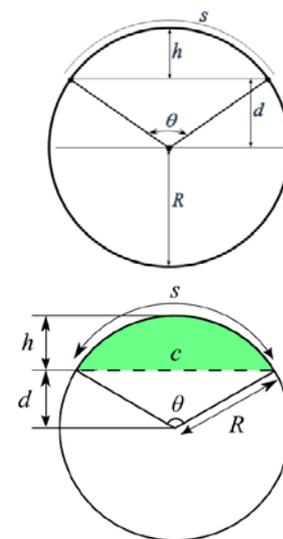


Temps d'usinage	
Passe 1	161 s
Passe 2	162 s
Passe 3	161 s
Temps total	484 s

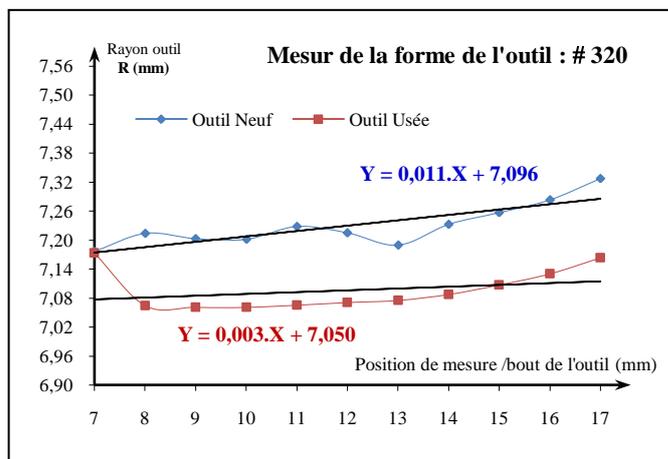
$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$
 $S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,1770	7,1730
8	7,2140	7,0640
9	7,2030	7,0610
10	7,2020	7,0610
11	7,2280	7,0650
12	7,2150	7,0710
13	7,1900	7,0750
14	7,2330	7,0880
15	7,2570	7,1070
16	7,2840	7,1300
17	7,3280	7,1640

	Droite
Pente	7,1730
0,0110	7,1840
	7,1950
Ordonnée origine	7,2060
7,0960	7,2170
	7,2280
	7,2390
	7,2500
	7,2610
	7,2720
	7,2830



Usure Outil	1,1520 mm²
0,1460	
0,1415	
0,1520	
0,1535	
0,1295	
0,1300	
0,1475	
0,1520	



$R_{pièce}$	3,9935 mm		
θ_1	0,5994°	θ_2	0,2611°
h_1	0,1780 mm	h_2	0,0340 mm
d_1	3,8155 mm	d_2	3,9605 mm
$SA1$	0,2811 mm ²	$SA2$	0,0236 mm ²
Surface Moy.	0,2408 mm ²		
Volume	9,6328 mm³		
Débit	0,0199 mm³/s		

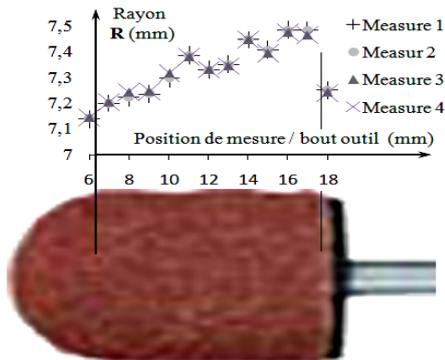
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9870 mm	7,9870 mm
Cote Usinée	7,8090 mm	7,8450 mm
Diminution de d	0,1780 mm	0,1420 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 10 : # 150

Granulométrie	150
Lubrification	Oui
a_e	0,1
N	12000
V_f	1000
R/a (R = 4 mm)	0,1
N ^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Triangulaire

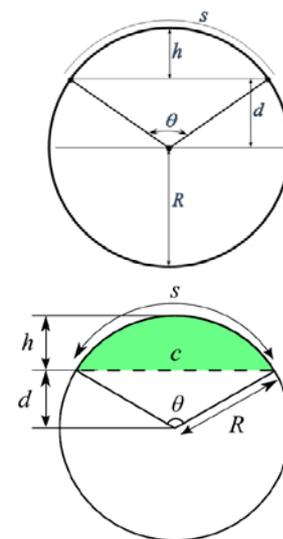


Temps d'usinage	
Passé 1	21 s
Passé 2	21 s
Passé 3	21 s
Temps total	63 s

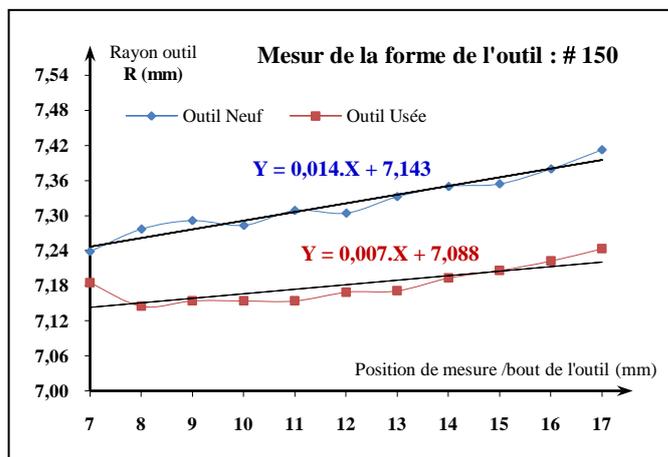
$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos} (d/R)$
 $S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,2390	7,1850
8	7,2770	7,1450
9	7,2910	7,1540
10	7,2830	7,1540
11	7,3090	7,1540
12	7,3040	7,1690
13	7,3320	7,1710
14	7,3500	7,1930
15	7,3540	7,2060
16	7,3800	7,2220
17	7,4120	7,2430

	Droite
Pente	7,2410
0,0140	7,2550
	7,2690
Ordonnée origine	7,2830
7,143	7,2970
	7,3110
	7,3250
	7,3390
	7,3530
	7,3670
	7,3810



Usure Outil	1,1670 mm²
0,1345	
0,1330	
0,1420	
0,1450	
0,1480	
0,1590	
0,1525	
0,1530	



$R_{pièce}$	3,9945 mm		
θ_1	0,6968°	θ_2	0,2611°
h_1	0,0240 mm	h_2	0,1850 mm
d_1	3,7545 mm	d_2	3,8095 mm
$SA1$	0,4391 mm ²	$SA2$	0,2978 mm ²
Surface Moy.	0,3684 mm ²		
Volume	14,7374 mm³		
Débit	0,2339 mm³/s		

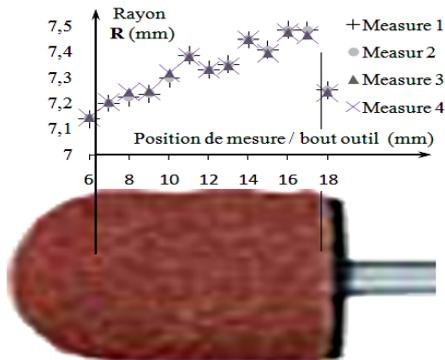
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9890 mm	7,9890 mm
Cote Usinée	7,7490 mm	7,8040 mm
Diminution de d	0,2400 mm	0,1850 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 11 : # 320

Granulométrie	320
Lubrification	Non
a_e	0,1
N	12000
V_f	3000
R/a (R = 4 mm)	0,1
N ^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Trochoïdal



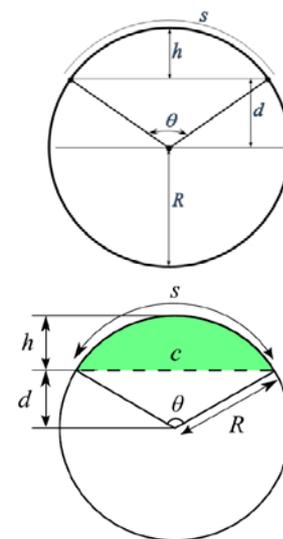
Temps d'usinage	
Passe 1	8 s
Passe 2	9 s
Passe 3	9 s
Temps total	26 s

$$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos} (d/R)$$

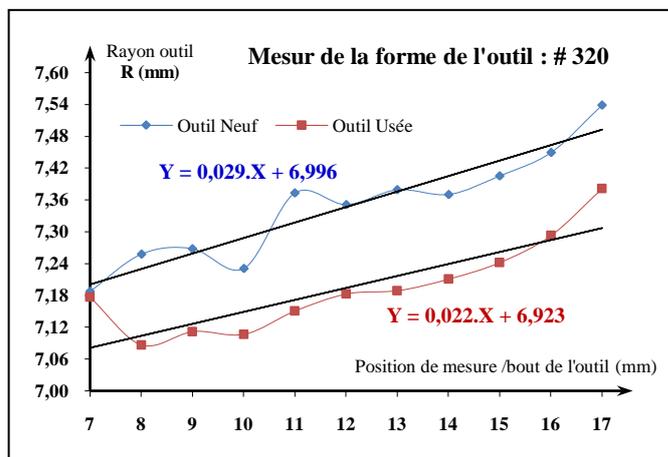
$$S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,1880	7,1770
8	7,2580	7,0870
9	7,2680	7,1120
10	7,2310	7,1070
11	7,3730	7,1510
12	7,3510	7,1830
13	7,3790	7,1890
14	7,3700	7,2110
15	7,4050	7,2420
16	7,4490	7,2930
17	7,5380	7,3810

	Droite
Pente	7,1990
0,0290	7,2280
	7,2570
Ordonnée origine	7,2860
6,9960	7,3150
	7,3440
	7,3730
	7,4020
	7,4310
	7,4600
	7,4890



Usure Outil	1,3455 mm²
0,1635	
0,1400	
0,1730	
0,1950	
0,1790	
0,1745	
0,1610	
0,1595	

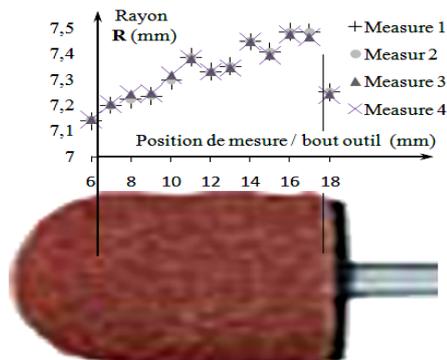


$R_{pi\grave{e}ce}$	3,9945 mm		
θ_1	0,4230°	θ_2	0,3500°
h_1	0,0890 mm	h_2	0,0610 mm
d_1	3,9055 mm	d_2	3,9335 mm
$SA1$	0,0997 mm ²	$SA2$	0,0566 mm ²
Surface Moy.	0,0782 mm ²		
Volume	3,1275 mm³		
Débit	0,1203 mm³/s		

	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9890 mm	7,9890 mm
Cote Usinée	7,9000 mm	7,9280 mm
Diminution de d	0,0890 mm	0,0610 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01**Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme****Essai N° 12 : # 150**

Granulométrie	150
Lubrification	Non
a_e	0,05
N	6000
V_f	1000
R/a ($R = 4$ mm)	0,1
N^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Trochoïdal



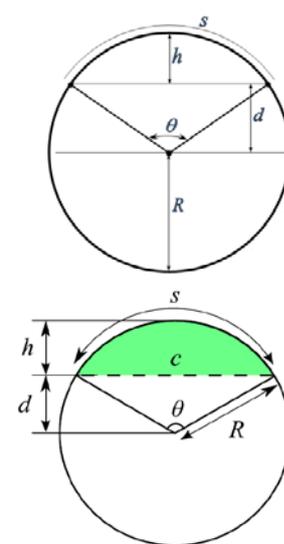
Temps d'usinage	
Passe 1	20 s
Passe 2	20 s
Passe 3	20 s
Temps total	60 s

$$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$$

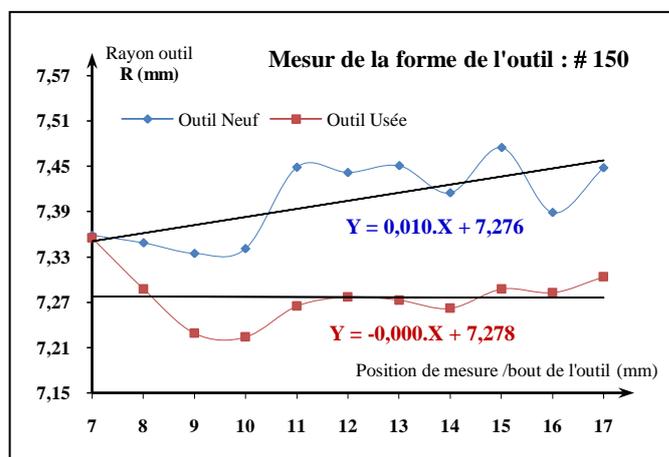
$$S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,3590	7,3550
8	7,3490	7,2880
9	7,3350	7,2290
10	7,3410	7,2240
11	7,4490	7,2650
12	7,4420	7,2770
13	7,4510	7,2730
14	7,4150	7,2620
15	7,4750	7,2880
16	7,3890	7,2830
17	7,4480	7,3040

	Droite
Pente	7,3460
0,0100	7,3560
	7,3660
Ordonnée origine	7,3760
7,2760	7,3860
	7,3960
	7,4060
	7,4160
	7,4260
	7,4360
	7,4460



Usure Outil	1,1735 mm ²
0,0835	
0,1115	
0,1505	
0,1745	
0,1715	
0,1655	
0,1700	
0,1465	



$R_{pièce}$	3,9950 mm		
θ_1	0,3038°	θ_2	0,2002°
h_1	0,0460 mm	h_2	0,0200 mm
d_1	3,9490 mm	d_2	3,9750 mm
$SA1$	0,0371 mm ²	$SA2$	0,0107 mm ²
Surface Moy.	0,0239 mm ²		
Volume	0,9554 mm³		
Débit	0,0159 mm³/s		

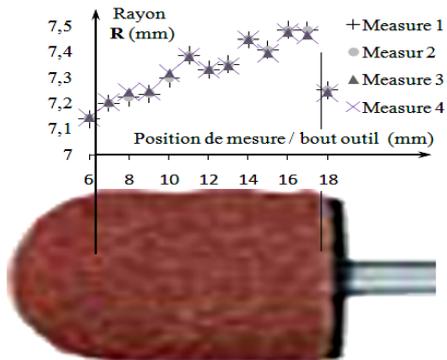
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9900 mm	7,9900 mm
Cote Usinée	7,9440 mm	7,9700 mm
Diminution de d	0,0460 mm	0,0200 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 12-1 : # 150

Granulométrie	150
Lubrification	Non
a_e	0,05
N	6000
V_f	1000
R/a (R = 4 mm)	0,1
N ^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Trochoïdal

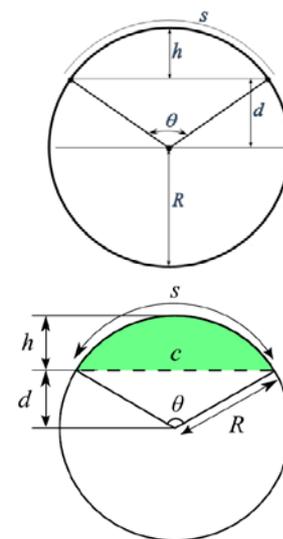


Temps d'usinage	
Passé 1	20 s
Passé 2	20 s
Passé 3	20 s
Temps total	60 s

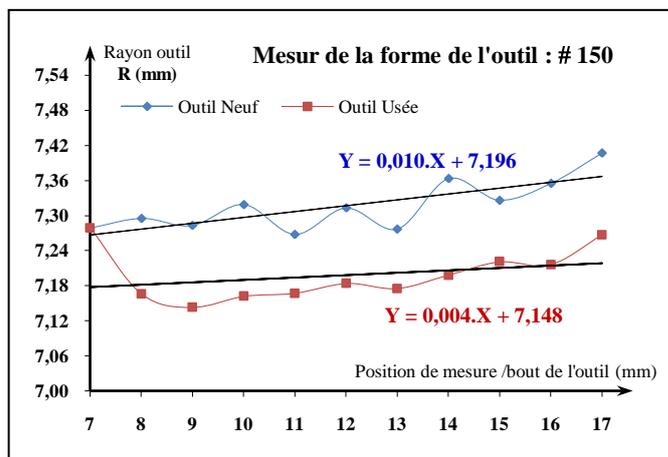
$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos}(d/R)$
 $S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,2790	7,2790
8	7,2950	7,1660
9	7,2830	7,1430
10	7,3190	7,1620
11	7,2680	7,1670
12	7,3130	7,1840
13	7,2770	7,1750
14	7,3630	7,1980
15	7,3260	7,2210
16	7,3550	7,2160
17	7,4070	7,2670

	Droite
Pente	7,2660
0,0100	7,2760
	7,2860
Ordonnée origine	7,2960
7,1960	7,3060
	7,3160
	7,3260
	7,3360
	7,3460
	7,3560
	7,3660



Usure Outil	1,0330 mm ²
0,1345	
0,1485	
0,1290	
0,1150	
0,1155	
0,1335	
0,1350	
0,1220	



$R_{pièce}$	3,9950 mm		
θ_1	0,4324°	θ_2	0,3038°
h_1	0,0930 mm	h_2	0,0460 mm
d_1	3,9020 mm	d_2	3,9490 mm
$SA1$	0,1065 mm ²	$SA2$	0,0371 mm ²
Surface Moy.	0,0718 mm ²		
Volume	2,8727 mm³		
Débit	0,0479 mm³/s		

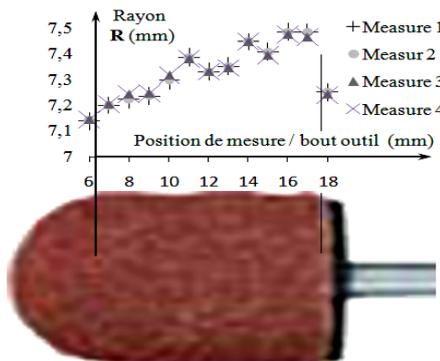
	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9900 mm	7,9900 mm
Cote Usinée	7,8970 mm	7,944 mm
Diminution de d	0,0930 mm	0,0460 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 01

Mesure de la forme de l'outil pour correction de la forme

Essai N° 12-2 : # 150

Granulométrie	150
Lubrification	Non
a_e	0,05
N	6000
V_f	1000
R/a (R = 4 mm)	0,1
N^{bre} motif / mm	0,5
Forme du motif	Trochoïdal



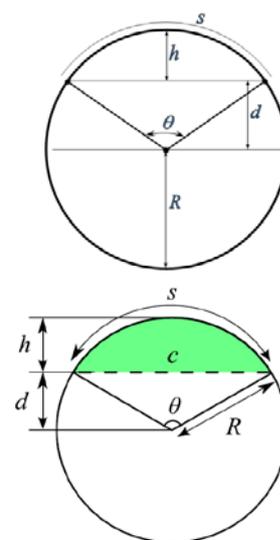
Temps d'usinage	
Passe 1	60 s
Passe 2	60 s
Passe 3	60 s
Temps total	120 s

$$\theta = 2 \cdot \text{ArcCos} (d/R)$$

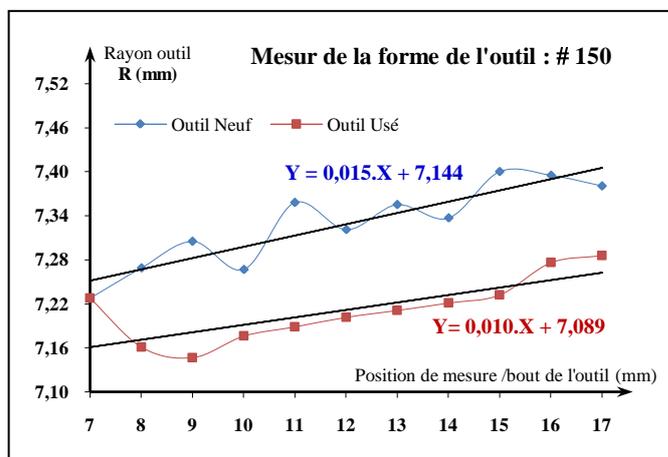
$$S_A = (R^2/2)(\theta - \text{Sin}(\theta))$$

R	Outil Neuf	Outil Usée
7	7,2280	7,2280
8	7,2690	7,1610
9	7,3050	7,1470
10	7,2670	7,1760
11	7,3580	7,1890
12	7,3210	7,2020
13	7,3550	7,2110
14	7,3370	7,2210
15	7,4000	7,2320
16	7,3950	7,2760
17	7,3810	7,2860

	Droite
Pente	7,2490
0,0150	7,2640
	7,2790
Ordonnée origine	7,2940
7,1440	7,3090
	7,3240
	7,3390
	7,3540
	7,3690
	7,3840
	7,3990



Usure Outil	1,0785 mm²
0,1330	
0,1245	
0,1300	
0,1440	
0,1315	
0,1300	
0,1420	
0,1435	



$R_{pièce}$	3,9945 mm		
θ_1	0,02147°	θ_2	0,2369°
h_1	0,0230 mm	h_2	0,0280 mm
d_1	3,9715 mm	d_2	3,9665 mm
$SA1$	0,0131 mm ²	$SA2$	0,0176 mm ²
Surface Moy.	0,0184 mm ²		
Volume	0,7346 mm³		
Débit	0,0156 mm³/s		

	Meure 1	Mesure 2
Cote Neuf	7,9809 mm	7,9890 mm
Cote Usinée	7,9230 mm	7,9610 mm
Diminution de d	0,0660 mm	0,0280 mm
L Usiné	40 mm	40 mm

Annexe N° 02**Résultats de mesure d'état de surface****Essai _01_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _01_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 0.838 \mu\text{m}$$

$$Pq = 1.17 \mu\text{m}$$

$$Pt = 9.37 \mu\text{m}$$

$$Psk = -1.86$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 0.395 \mu\text{m}$$

$$Rq = 0.498 \mu\text{m}$$

$$Rt = 4.6 \mu\text{m}$$

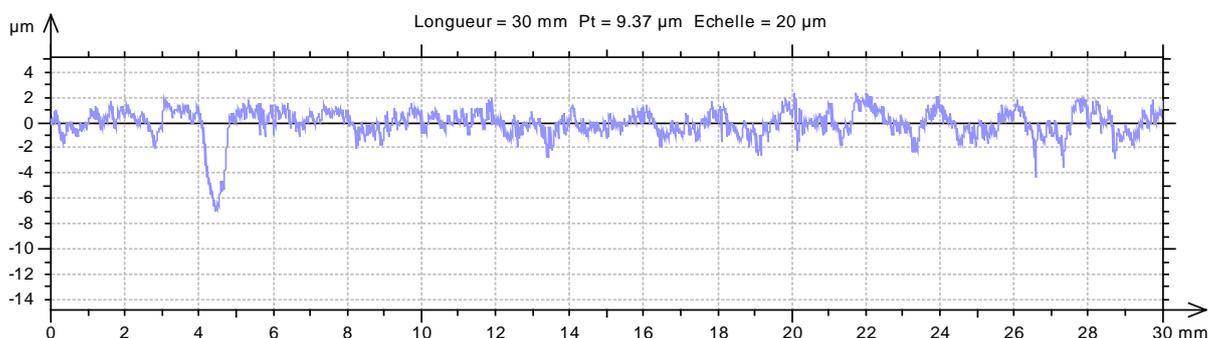
$$Rsk = -0.343$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.

**Essai _02_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _02_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 1.57 \mu\text{m}$$

$$Pq = 2.1 \mu\text{m}$$

$$Pt = 23.6 \mu\text{m}$$

$$Psk = -0.531$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 0.876 \mu\text{m}$$

$$Rq = 1.16 \mu\text{m}$$

$$Rt = 17.2 \mu\text{m}$$

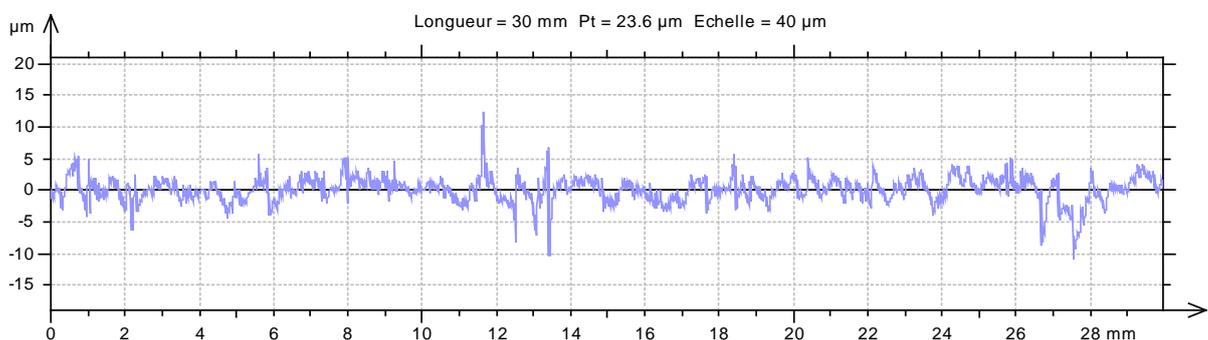
$$Rsk = -0.103$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.



Annexe N° 02**Résultats de mesure d'état de surface****Essai _03_60 mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _03_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 0.815 \mu\text{m}$$

$$Pq = 1.03 \mu\text{m}$$

$$Pt = 7.61 \mu\text{m}$$

$$Psk = 0.0775$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 0.529 \mu\text{m}$$

$$Rq = 0.658 \mu\text{m}$$

$$Rt = 5.08 \mu\text{m}$$

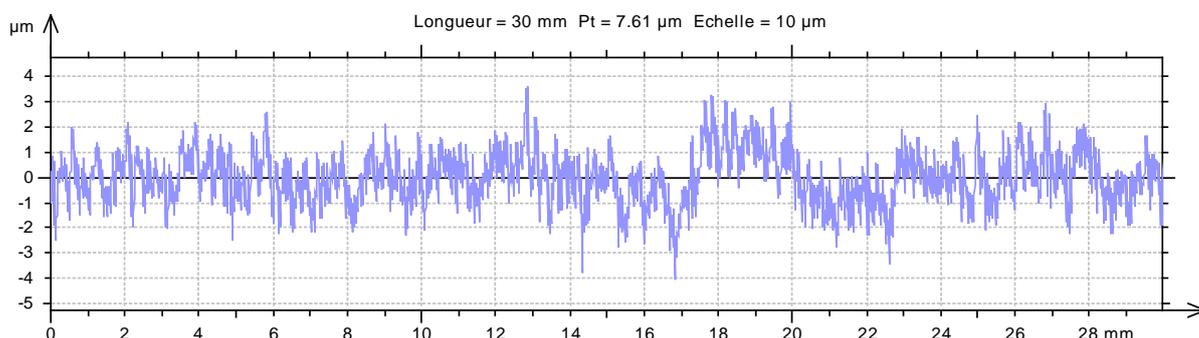
$$Rsk = -0.00619$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.

**Essai _04_60 mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _04_60- -1 mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 1.04 \mu\text{m}$$

$$Pq = 1.33 \mu\text{m}$$

$$Pt = 14.2 \mu\text{m}$$

$$Psk = 0.0686$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 0.601 \mu\text{m}$$

$$Rq = 0.76 \mu\text{m}$$

$$Rt = 11.2 \mu\text{m}$$

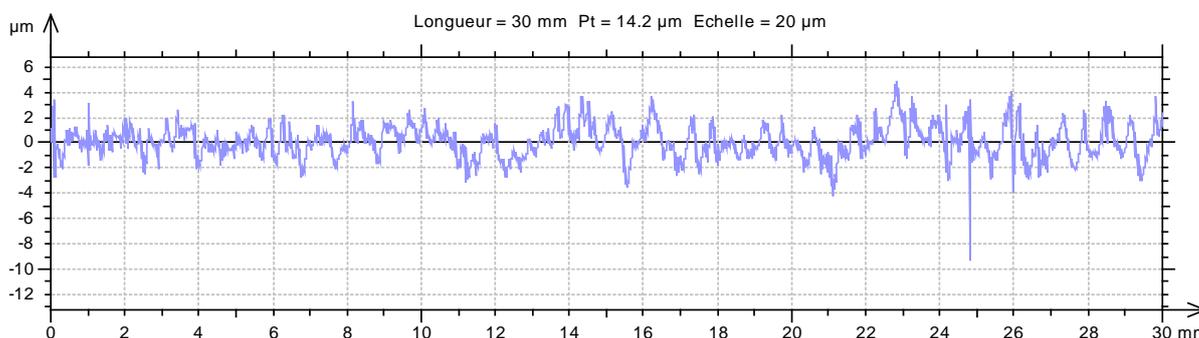
$$Rsk = -0.352$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.



Annexe N° 02**Résultats de mesure d'état de surface****Essai _05_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _05_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 1.77 \mu\text{m}$$

$$Pq = 2.26 \mu\text{m}$$

$$Pt = 17 \mu\text{m}$$

$$Psk = 0.117$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 0.822 \mu\text{m}$$

$$Rq = 1.05 \mu\text{m}$$

$$Rt = 14.5 \mu\text{m}$$

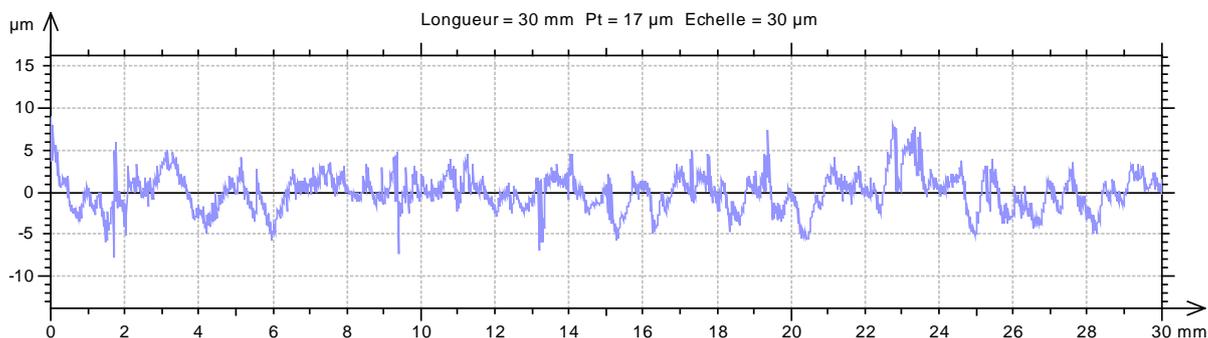
$$Rsk = 0.069$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.

**Essai _06_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _06_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 1.05 \mu\text{m}$$

$$Pq = 1.32 \mu\text{m}$$

$$Pt = 9.79 \mu\text{m}$$

$$Psk = -0.109$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 0.64 \mu\text{m}$$

$$Rq = 0.786 \mu\text{m}$$

$$Rt = 6.71 \mu\text{m}$$

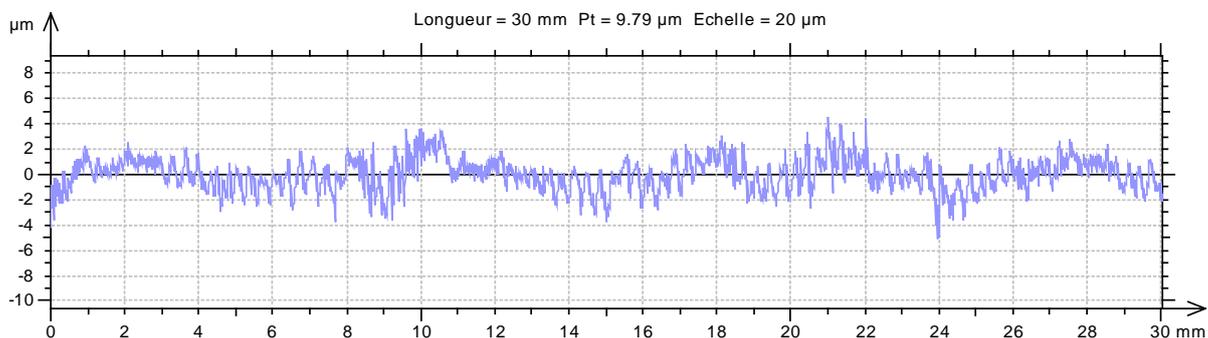
$$Rsk = 0.0435$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.



Annexe N° 02**Résultats de mesure d'état de surface****Essai _07_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _07_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

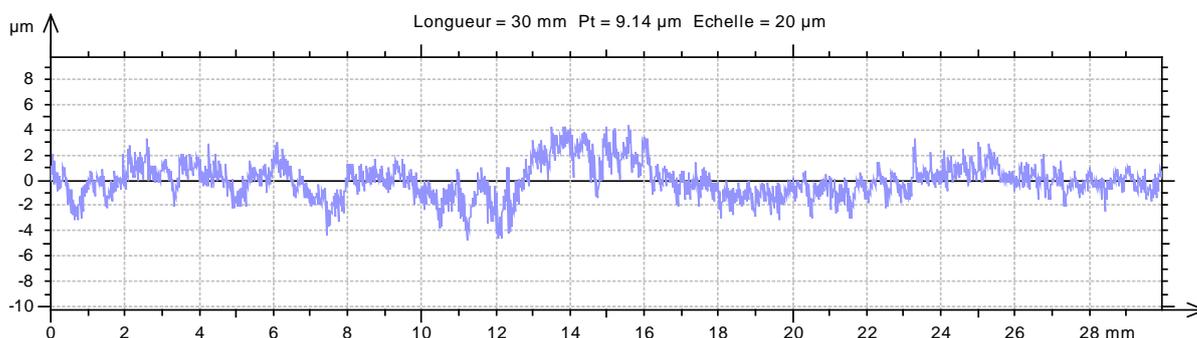
Pa = 1.09 μm
 Pq = 1.42 μm
 Pt = 9.14 μm
 Psk = 0.159

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.
 Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.
 Pt : Hauteur totale du profil brut.
 Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

Ra = 0.506 μm
 Rq = 0.639 μm
 Rt = 5.67 μm
 Rsk = -0.0456

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.
 Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.
 Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.
 Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.

**Essai _08_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _08_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

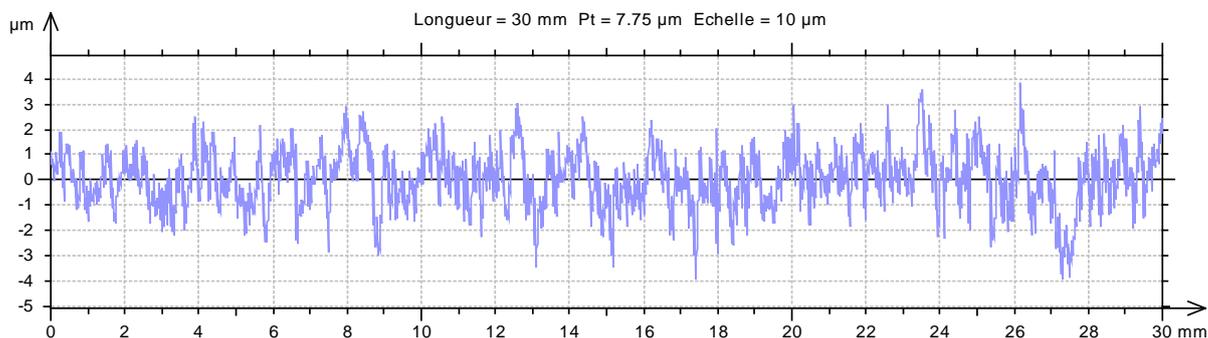
Ra = 0.579 μm
 Rq = 0.728 μm
 Rt = 5.36 μm
 Rsk = -0.197

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.
 Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.
 Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.
 Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.

Paramètres non filtrés

Pa = 0.896 μm
 Pq = 1.14 μm
 Pt = 7.75 μm
 Psk = -0.193

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.
 Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.
 Pt : Hauteur totale du profil brut.
 Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.



Annexe N° 02**Résultats de mesure d'état de surface****Essai _09_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _09_40_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 0.458 \mu\text{m}$$

$$Pq = 0.581 \mu\text{m}$$

$$Pt = 4.78 \mu\text{m}$$

$$Psk = -0.262$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 0.349 \mu\text{m}$$

$$Rq = 0.442 \mu\text{m}$$

$$Rt = 3.95 \mu\text{m}$$

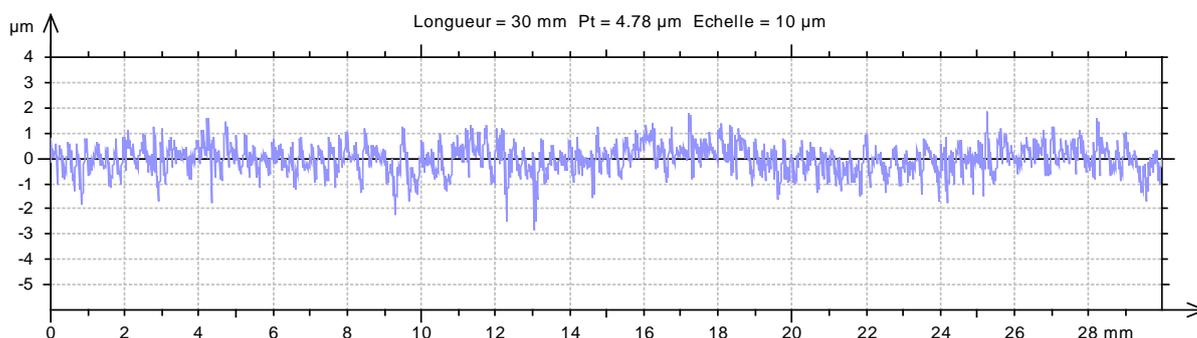
$$Rsk = -0.147$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.

**Essai _10_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _10_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

$$Pa = 6.42 \mu\text{m}$$

$$Pq = 7.25 \mu\text{m}$$

$$Pt = 35.2 \mu\text{m}$$

$$Psk = -0.316$$

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.

Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.

Pt : Hauteur totale du profil brut.

Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

$$Ra = 1.33 \mu\text{m}$$

$$Rq = 1.67 \mu\text{m}$$

$$Rt = 13.8 \mu\text{m}$$

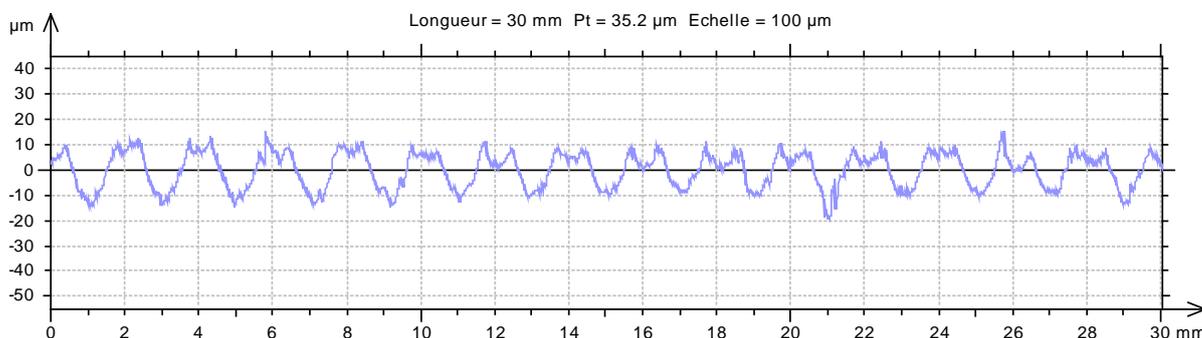
$$Rsk = 0.674$$

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.

Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.

Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.



Annexe N° 02**Résultats de mesure d'état de surface****Essai _11_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _11_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

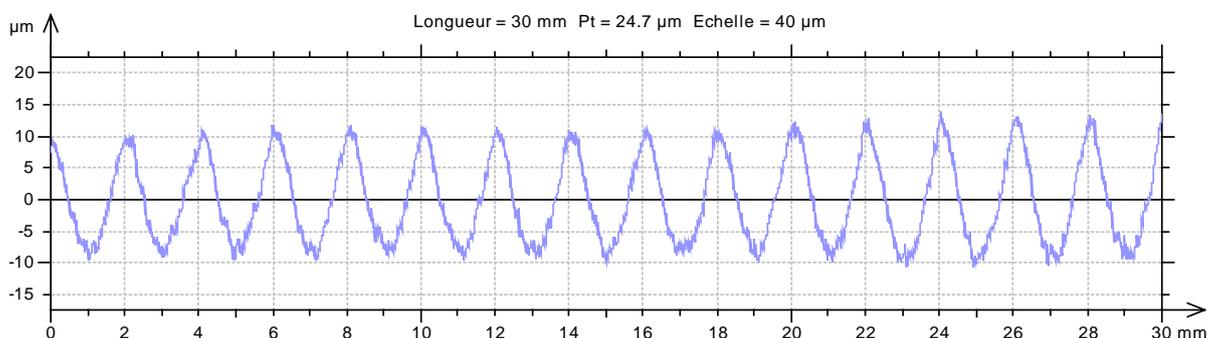
Pa = 6.02 μm
 Pq = 6.79 μm
 Pt = 24.7 μm
 Psk = 0.271

Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.
 Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.
 Pt : Hauteur totale du profil brut.
 Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

Ra = 0.585 μm
 Rq = 0.729 μm
 Rt = 5.89 μm
 Rsk = 0.138

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.
 Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.
 Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.
 Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.

**Essai _12_60_mm****Paramètres calculés sur le profil Essai _12_60_mm > Forme supprimée : Polynôme de degré 5**

* Paramètres calculés par moyenne de toutes les longueurs de base.

* Un filtre de microrugosité a été utilisé, avec un cut-off de 2.5 μm .

Paramètres non filtrés

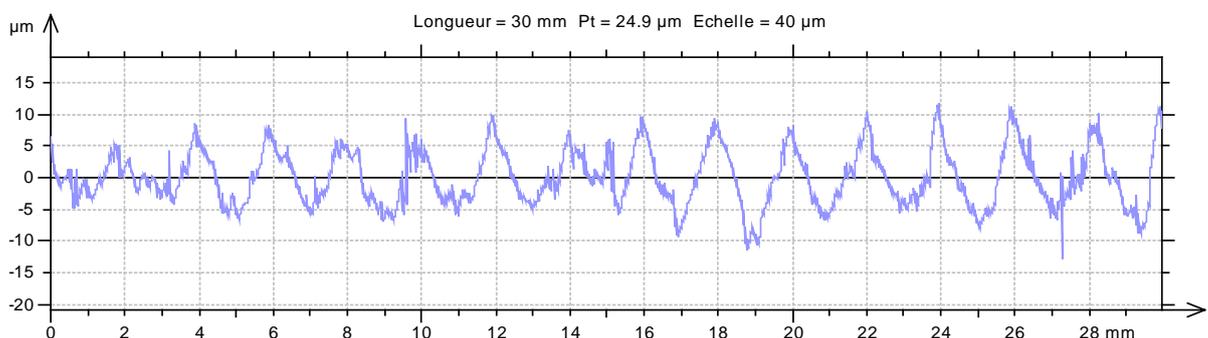
Pa = 3.71 μm
 Pq = 4.46 μm
 Pt = 24.9 μm
 Psk = 0.227

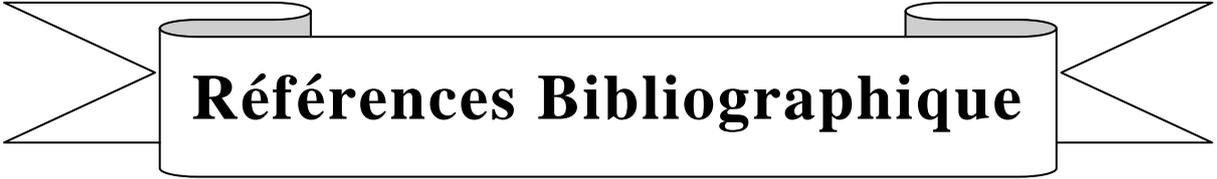
Pa : Ecart moyen arithmétique du profil brut.
 Pq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil brut.
 Pt : Hauteur totale du profil brut.
 Psk : Facteur d'asymétrie du profil brut.

Paramètres de rugosité, Filtre gaussien, 0.8 mm

Ra = 0.83 μm
 Rq = 1.07 μm
 Rt = 14.4 μm
 Rsk = 0.563

Ra : Ecart moyen arithmétique du profil de rugosité.
 Rq : Ecart moyen quadratique (RMS) du profil de rugosité.
 Rt : Hauteur totale du profil de rugosité.
 Rsk : Facteur d'asymétrie du profil de rugosité.





Références Bibliographique

Références bibliographique

- Ando et al. 1995** : Ando M, Negishi M, Takimoto M, Deguchi A, Nakamura N ; "Super-smooth polishing on aspherical surfaces". *Nanotechnology* 6 (4) : 111–120 - 1995,
- André 2008** : André ; "Modélisation par éléments discrets des phases d'ébauchage et de doucissage de la silice". Thèse de doctorat en mécanique et ingénierie, Université de Bordeaux 1, 2012.
- Chen et al. 2008** : 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". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 42, N° 11-12, P. 1118-1130 - 2008.
- Chibane h. 2013** : Chibane h. ; "Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire : Application aux matériaux métalliques et composites". Thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours, Tours, France, 2013.
- Felder 2009** : Éric FELDER ; "Usinage par abrasion : Analyses expérimentale et théorique". *Technique de l'Ingénieur*, BM 7053.
- Fletcher 1987** : R. Fletcher ; "Practical Methods of Optimization". John Wiley and Sons, ISBN 0-471-49463-1, 1987.
- Grandguillaume 2015** : L. Grandguillaume, Y. Quinsat, S. Lavernhe, C. Tournier ; "Optimisation der la fabrication de moule : Une approche globale des procédés de fraisage et polissage". 14ème colloque National AIP- PRIMECA, 2015.
- Guiot et al. 2012** : Anthony Guiot, Christophe Tournier, Yann Quinsat ; "Modélisation de l'usure des abrasifs pour garantir la qualité des surfaces polies". 13^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, Le Mont Dore – 27 au 30 Mars - 2012.
- Hilerio et al. 2004** : L. Hilerio, T. Mathia, C. Alepee ; "3D measurements of the knee prosthesis surfaces applied in optimizing of manufacturing process". *Wear*, Volume 257, N° 12, pages 1230-1234 - 2004.
- Huissoon et al. 2002** : J.P. Huissoon, F. Ismail A. Jafari, S. Bedi ; "Automated polishing of die steel surfaces". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Volume 19, N° Issue 4, pages 285-290, 2002.
- Huissoon et al. 2006** : J.P. Huissoon, F. Ismail, A. Jafari, S. Bedi, 2006 ; "Automated Polishing of Die Steel Surfaces". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, N°44, pages 101-107.
- Jeng et al. 2005** : Y. R. Jean, P. Y. Huang " A material removal rate model considering interfacial micro-contact wear behaviour for chemical mechanical polishing" *Journal of tribology*, volume 127, N° 1, pages 190-197 – 2005.
- Jha et Jain 2005** : Sunil Jha, V.K. Jain ; "Design and development of the magneto-rheological abrasive flow finishing process". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Issue 10, pages 1019 -1029 - 2005.
- Jones et al. 1998** : A.R. Jones, J.B. Hull ; "Ultrasonic flow polishing". *Journal of Ultrasonics* 36, Elsevier, pages 97-101 -1998.

- Kim et Choi-1997** : JEONG-DU kimt ; MIN-SEOG choi ; "Study on magnetic polishing of free-form surfaces" Internat. Jour. of Machine Tools and Manufacture, Volume 37, N° 8, pages 1179-1187 - 1997.
- Kim et Choi-1997** : Kim Jeong-Du, Choi Min-Seog ; "Study on magnetic polishing of free-form surfaces". International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 37, Issue 8, pages 1179 - 1187 - 1997.
- Klocke et al. 2008** : Fritz Klocke, Olaf Dambon, Richard Zunke ; "Modelling of contact behaviour between polishing pad and work-piece surface". Prod. Eng. Res. Devel., Volume 2, N° 1, pages 9-14 - 2008.
- Klocke et al. 2011** : F. Klocke, O. Dam bon, B. Behrens ; "Analysis of defect mechanisms in polishing of tool steels". Production Engineering - Research and Development. Volume 5, N° 5, pages 475-483 - 2011.
- Kuriyagawa et al. 2002** : T. Kuriyagawa, M. Saeki, K. Syoji ; "Electro-rheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts". Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Volume 26, pages 370–380 - 2002.
- L.M. Cook 1990** : L.M. Cook ; "Chemical processes in polishing". Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 120, N° 1-3, pages 152-171 - 1990.
- Lacharnay 2010** : V. Lacharnay, C. Tournier, G. Poulachon et E. Dufour ; "Optimisation d'une gamme de polissage sur MOCN 5-axes". Intercut 2010 - 6^{ème} Assises MUGV 2010.
- Lacharnay 2012** : V. Lacharnay, C. Tournier, G. Poulachon ; "Design of experiments to optimize automatic polishing on 5-axis machine tool". Int. J. of Machining and Machinability of Materials, Inderscience, 12 (1 - 2), pages 76-87 - 2012.
- Lasemi et al. 2010** : A. Lasemi, D. Xue et P. Gu; "Recent development in CNC machining of freeform surfaces : A state-of-the-art review". Computer-Aided Design, Volume 42 : 641 – 654 - 2010.
- Lin -2003** : Lin TR ; "The use of reliability in the Taguchi method for the optimization of the polishing ceramic gauge block". International Journal Advanced Manufacturing Technology 22 (3 - 4) : pages 237–242 - 2003.
- Lin et al. 2000** : Lin JL, Wang KS, Yan BH, Targ YS ; " Optimization of the electrical discharge machining process based on the Taguchi method with fuzzy logics. Journal Mater Process Technology 102 (1- 3) : 48 - 55 - 2000.
- Lin et Lo 2004** : Y.Y. Lin, S. P. Lo ; "A study of a finite element model for the chemical mechanical polishing process". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 23, N° 9-10, pages 644-650 - 2004.
- Liu et al. 1996** : C. Liu, B.T. Dai, W.T. Tseng, C.F. Yeh ; "Modelling of the wear mechanism during chemical-mechanical polishing". Journal of Electrochemical Society, Volume 143, N° 2, pages 716-721 - 1996.
- Luo et al. 2001** : J. Luo, D. A. Dornfeld " Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modelling" IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, volume 14, N° 2, pages 112-133 – 2001.
- Minoux 1983** : M. Minoux ; "Programmation mathématique : Tome 1 : Théorie et algorithmes". Edition Dunod - 1983.

- Mori et al. 2003** : T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima ; "Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism". J. of Material Processing Technology, Volume 143-144, Elsevier, pages 682-686 - 2003.
- Nguyen et Butler 2005** : Nguyen TA, Butler DL ; "Simulation of surface grinding process, Part 2 : Interaction of the abrasive grain with the work-piece". International J. of Machine Tools and Manufacture. Vol. 45, Issue 11, pages 1329 -1336 - 2005.
- Norme 1997** : Norme ; "Spécification géométrique des produits (GPS)-Etat de surface : Méthode du profil–Termes, définitions et paramètres d'état de surface, référence N° prEN 4287:1997. F, Comité Européen de Normalisation (CEN), juin 1997.
- Otkur et Lazoglu 2007** : M. Otkur et I. Lazoglu ; "Trochoidal milling". International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47 : 1324 –1332 - 2007.
- Quinsat et al. 2012** : Y. Quinsat, C. Tournier ; "In situ non-contact measurements of surface roughness". Precision Engineering, Volume 36, N° 1, pages 97-103 - 2012.
- Rauch et al. 2009** : M. Rauch, J.-Y. Hascoet, J.-C. L. Hamann et Y. Plenel ; "Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications". Computer-Aided Design 41 877_885 - 2009.
- Ryuh et al. 2006** : Ryuh B-S., Park S.M., Pennock G.R. ; "An automatic tool changer and integrated software for a robotic die polishing station". Mechanism and Machine Theory, N°41, pages 415-432 -2006.
- Shi et al. 1998** : F.G. Shi, B. Ahaio "Modelling of chemical-mechanical polishing with pads" Springer, Applied Physics A, Volume 67, N° 2, P. 249-252 - 1998
- Shimada et al. 2003** : Shimada Kunio, Yongbo Wu, Yat Choy Wong ; "Effect of magnetic cluster and magnetic field on polishing using magnetic compound fluid (MCF)". J. of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 262, Issue 2, pages 242-247 - 2003.
- Suh et al. 2003** : A.Y. Suh, A.A. Polycarpou, T.F. Conry ; "Detailed surface roughness characterization of engineering surfaces undergoing tribological testing leading to scuffing". Wear, Volume 255, N° 16, pages. 556-568 - 2003.
- Tam 1999** : Hon-yuen Tam ; "Toward the uniform coverage of surfaces by scanning curves". Computer-Aided Design, 31 (9) : 585 - 596, 1999.
- Tam et al. 1999** : Hon-yuen Tam, Osmond Chi-hang Lui, Alberet C.K. Mok ; "Robotic polishing of free-form surfaces using scanning paths". Journal of Materials Processing Technology, Volume 95, N° 1-3, pages 191-200 -1999.
- Toh 2004** : C. K. Toh ; "A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling". Journal of Materials Processing Technology, 152 : 346 – 356- 2004.
- Tsai 2006** : M.J. Tsai, J.F. Huang ; "Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 30, N° 9-10, pages 817-827 - 2006.
- Tsai et Huang 2006** : M. J. Tsai, J. F. Huang ; "Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool". International Journal of Advanced Manufacturing Technology 30, pages 817-827 -2006.
- Tseng et al. 1997** : W.T. Tseng, Y.L. Wang ; "Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during chemical-mechanical polishing processes". Journal of Electrochemical Society, Volume 144, N° 2, pages 15-17 - 1997.

- Ukar et al. 2010** : Ukar E., Lamikiz A., Lopez de Lacalle L. N., del Pozo D., Arana J.L. ; "Laser polishing of tool steel with CO₂ laser and high-power diode laser". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50 115–125 - 2010.
- Umehara et al. 2005** : N. Umehara, T. Hayashi, K. Kato ; "In situ observation of the behavior of abrasives in magnetic fluid grinding". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 149, Issue 1, pages 181-184 - 2005.
- Uno et al. 2007** : Y. Unoa, A. Okadaa, K. Uemurab, P. Raharjob, S. Sanoc, Z. Yuc, S. Mishimad ; "A new polishing method of metal mould with large-area electron beam irradiation". *Journal of Materials Processing Technology* Volume 187–188, Pages 77–80 - 12 June 2007.
- Wang et al. 2002** : C.C. Wang, S.C Lin, H. Hochen ; "A material removal model for polishing glass-ceramic and Al. magnesium storage disks". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 42, N° 8, P. 979-984 - 2002.
- Wang et al. 2008** : Y. Wang, Y. Zhao, J. Jiang, X. Li, J. Bai "Modelling effect of chemical-mechanical synergy on material removal at molecular scale in chemical mechanical polishing" *Wear*, Volume 265, N° 5-6, pages 721-728 – 2008.
- Warnock 1991** : J. Warnock ; "Atwo-dimensional process model for chemimechanical polish planarization". *Journal of Electrochemical Society*, Volume 138, N° 8, pages 2398-2402 - 1991.
- Yan et al. 2008** : Yan B.H., Tsai F.C., Sun L.W., Hsu R.T. ; "Abrasive jet polishing on SKD61 mold steel using SiC coated with Wax". *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 208, Issue 1, pages 318-329 - 2008.
- Yasuhiro et al. 2013** : Yasuhiro K., K. Igarashi, S. Katsura, Tojiro A. ; "Development of 5-axis polishing machine capable of simultaneous trajectory, posture, and force control". *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 62 : 379 –382 - 2013.
- Yin et Shinmura 2004** : S. Yin and T. Shinmura ; "A comparative study : polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, N°. 4, PP. 383-390, 2004.
- Zhang et al. 2005** : Zhang L., Kuriyagawa T., Kaku T., Zhao J. ; "Investigation into electro-rheological fluid-assisted polishing". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 45, PP. 1461-1467 - 2005.
- Zhang et al. 2009** : Zhang M. D., M. Lv, and H. L. Chen ; "Theoretical research on polishing free-form surface with magnetic abrasive finishing". *Key Engineering Materials*, Volume 392 - 394, pages 404 - 408 - 2009.
- Zhang et al. 2010** : L. Zhang, X. S. He, H. R. Yang, Y. Zhang ; "An integrated tool for five-axis electro-rheological fluid-assisted polishing". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 50, PP. 737-740 - 2010.
- Zhen et Komanduri 2003** : Zhen Bing Hou and Ranga Komanduri. ; "On the mechanics of the grinding process, Part I. Stochastic nature of the grinding process". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 : 1579 –1593, 2003.
- Zhu et al. 2009** : Zhu H.T., Huang C.Z., Wang J., Li Q.L., Che C.L. ; "Experimental study on abrasive water jet polishing for hard-brittle materials". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 49, Issue 7, P. 569 -578 - 2009.