

Étude et optimisation de la finition par polissage des arrêtes
des pièces en granit : qualité de surface et émissions de
particules

par

Haithem BAHRI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 20 JUILLET 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Haithem Bahri, 2022



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor SONGMENE, directeur de mémoire
Département mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre KENNE, président du jury
Département mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Fawzy-Hosny SAMUEL, membre du jury
Département mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 06 JUILLET 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je commence par présenter mes reconnaissances et mes respects les plus profonds à M. Victor Songmene, mon directeur de recherche qui m'a soutenu, moralement et financièrement, tout au long de ce projet, pour ses judicieux conseils, sa confiance accordée à mon égard et pour la mise à disposition de tous les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail, ainsi qu'à M. Jules Kouam pour sa disponibilité, son implication et sa présence pour contribuer à l'aboutissement de ce projet.

Un grand merci à l'organisme Mitacs, pour sa contribution dans la réalisation de mon travail de stage et de maîtrise en m'offrant un soutien financier via le programme de stage « Globalink » qui a donné suite au programme de maîtrise « Fellowship ».

Je tiens aussi à remercier les membres de jury qui m'ont honoré en acceptant d'examiner ce mémoire et juger ce modeste travail.

J'exprime également mes remerciements aux techniciens du laboratoire de fabrication mécanique de l'ÉTS pour avoir facilité le déroulement des travaux expérimentaux réalisés tout au long de cette maîtrise, sans oublier les professeurs ; M. Antoine Tahan et Mme. Sylvie Gervais, qui m'ont supporté à un certain stade de cette maîtrise.

Je ne puis m'empêcher d'exprimer ma vive reconnaissance à ma tendre mère qui, grâce à ses encouragements et ses énormes sacrifices, a pu créer le meilleur climat pour la poursuite de mes études. Pareillement, je dédie ce travail à la mémoire de mon père, ainsi qu'à ma grand-mère et mes frères pour leur soutien inconditionnel.

Finalement, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui ont bien voulu m'assister par leurs encouragements et qui ont contribué à leur façon à me faire sourire, particulièrement ma chère amie Amina.

Étude et optimisation de la finition par polissage des arêtes des pièces de granit : Qualité de surface et émissions de particules

Haithem BAHRI

RÉSUMÉ

La finition des arêtes de pièces de granit par polissage est un procédé mécanique indispensable dans l'industrie de transformation de granit donnant une forme géométrique à l'arête tout en maintenant un bon fini de surface et une brillance exigée par les clients. Cependant, la réalisation de ces opérations de polissage dégage des quantités importantes de particules fines et ultrafines qui peuvent pénétrer par inhalation et se déposer dans le système respiratoire des travailleurs qui sont exposés à ces particules pour des longues périodes. L'accumulation de ces particules contenant de la silice cristalline (SiO_2) dans les voies respiratoires des travailleurs peut causer des maladies respiratoires et pulmonaires graves comme la bronchite chronique et la pneumoconiose appelée silicose. L'objectif principal de ce travail est d'optimiser ce processus par la diminution des concentrations de poussières générées tout en assurant le fini de surface qui permette de répondre aux exigences des clients.

Des essais expérimentaux sur des échantillons de granit ont été réalisés selon un plan d'expérience factoriel complet dans lequel on a fait varier les paramètres de polissage, afin d'étudier leurs effets sur les émissions des poussières et sur les finis de surface des arêtes réalisées. Deux formes d'arête ont été étudiées (chanfrein et concave) en utilisant les outils de taille de grit G150 (phase d'ébauche) et G600 (phase de finition). Le plan d'expérience a été appliqué sur chaque configuration (Forme de l'arête / Taille de grit) faisant varier les facteurs suivants: vitesse de rotation (1500, 2500, 3500 tr/min), vitesse d'avance (500, 1000, 1500 mm/min) et débit de lubrification (20, 40, 60 ml/min).

Il a été démontré que l'effet des paramètres de polissage sur les émissions de particules ainsi que sur le fini de surface dépendent de la forme de l'outil utilisée et de sa taille de grit. Une optimisation du processus a pu ressortir les meilleures combinaisons des paramètres de coupe selon la forme désirée et la phase de polissage, garantissant un bon fini de surface tout en minimisant les émissions de poussières. Quant à la lubrification, il s'est avéré qu'elle est primordiale. Plus le débit de MQL est grand, mieux est la qualité de surface finie et moins est la concentration des particules fines, d'où la lubrification abondante est recommandée.

Mots-clés : polissage, granit, finition des arêtes, MQL, particules fines, particules ultrafines, rugosité

Study and optimization of edge finishing of granite pieces by polishing: Surface quality and particle emissions

Haithem BAHRI

ABSTRACT

Edge-finishing of granite workpieces by polishing is an essential mechanical process in the granite transformation industry that generates a given geometrical shape to the edge while maintaining a good surface finish and a gloss required by the customers. However, these polishing operations release significant quantities of fine and ultrafine particles that can penetrate by inhalation and deposited in the respiratory system of the workers when they are exposed to these particles for long periods. The accumulation of these particles containing crystalline silica (SiO_2) in workers' respiratory system can cause serious respiratory and lung diseases such as chronic bronchitis and pneumoconiosis called silicosis. The main objective of this work is to optimize this process by reducing the concentrations of dust generated while ensuring a surface finish that meets customer requirements.

Experimental tests on granite samples were carried out using a full factorial design in which polishing parameters were varied, in order to study their effects on dust emissions and on the surface finishes of produced edges. Two edge shapes were studied (chamfer and concave) using G150 (roughing phase) and G600 (finishing phase) grit size tools. The experimental design was applied on each configuration (Edge shape/Grit size) varying the following factors: spindle speed (1500, 2500, 3500 rpm), feed rate (500, 1000, 1500 mm/min) and lubrication flow rate (20, 40, 60 ml/min).

It has been shown that the effect of polishing parameters on particle emissions as well as on surface finish depends on the tool shape used and its grit size. An optimization of the process was able to bring out the best combination of cutting parameters depending on the desired shape and polishing phase, ensuring a good surface finish while minimizing dust emissions. Regarding lubrication, it has been found to be essential. The higher the MQL flow rate, the better the finished surface quality and the lower the concentration of fine particles, therefore wet lubrication is recommended.

Keywords: polishing, granite, edge-finishing, MQL, fine particles, ultrafine particles, roughness

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Le procédé de polissage du granit.....	5
1.2.1 Le matériau granit.....	5
1.2.2 Le polissage manuel.....	7
1.2.3 Le polissage mécanique	8
1.2.4 Les outils utilisés en polissage.....	8
1.2.5 Le polissage des bords de granit	10
1.2.6 Le polissage rotatif régulier du granit.....	13
1.3 Emissions des particules lors des opérations de polissage des granits	14
1.3.1 Définition d'un aérosol	14
1.3.2 Effet de la poussière de quartz sur la santé des travailleurs.....	15
1.3.3 Les métriques recommandées pour la mesure des particules	17
1.3.4 Les études faites sur les émissions de particules et les facteurs qui l'influencent	18
1.3.5 Les dispositifs de protection contre l'exposition aux poussières.....	25
1.4 Productivité et qualité de surface obtenue par polissage	29
1.4.1 États de surface	29
1.4.2 Productivité	35
1.5 Conclusion	37
CHAPITRE 2 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	39
2.1 Introduction.....	39
2.2 Description du plan d'expérience	39
2.3 Environnement expérimental	41
2.3.1 Machine de polissage.....	41
2.3.2 Les outils de polissage	42
2.3.3 Echantillon de granit	44
2.3.4 Système de contrôle du débit de lubrification MQL.....	44
2.3.5 Appareils de captation des particules.....	46
2.3.6 Appareils de mesure de rugosité	47
2.4 Protocole expérimental	49
2.5 Limites de la recherche et aléas rencontrés.....	51
2.6 Conclusion	53
CHAPITRE 3 ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES.....	55
3.1 Introduction.....	55
3.2 Analyse des effets directs sur les réponses des particules fines.....	55
3.2.1 Concentration en nombre des PF	57

3.2.2	Concentration en surface spécifique des PF	59
3.2.3	Concentration en masse des PF.....	61
3.3	Analyse des distributions granulométriques des particules ultrafines	62
3.4	Analyse statistique	64
3.4.1	Phase d'ébauche (grit 150).....	65
3.4.1.1	Diagramme Pareto	65
3.4.1.2	Analyse ANOVA.....	66
3.4.1.3	Les modèles de prédition proposés	70
3.4.1.4	Analyse des surfaces de réponse.....	74
3.4.2	Phase de finition (grit 600)	76
3.4.2.1	Diagramme Pareto	76
3.4.2.2	Analyse ANOVA.....	76
3.4.2.3	Les modèles de prédition proposés	79
3.4.2.4	Analyse des surfaces de réponse.....	81
3.5	Conclusion	83
CHAPITRE 4 FINIS DE SURFACE.....85		
4.1	Introduction.....	85
4.2	Analyse des effets directs sur la rugosité.....	85
4.2.1	Effet de la forme de l'arête réalisée	87
4.2.2	Effet de la taille de grit.....	89
4.3	Analyse statistique	90
4.3.1	Diagramme Pareto	91
4.3.2	Analyse ANOVA	92
4.3.3	Les modèles proposés	95
4.3.4	Analyse des surfaces de réponse.....	97
4.4	Conclusion	98
CHAPITRE 5 DISCUSSION DES RÉSULTATS.....99		
5.1	Introduction.....	99
5.2	Essais de validation.....	99
5.3	Émissions des particules	101
5.3.1	Effet des paramètres de polissage sur la génération des PF	101
5.3.2	La génération des PF en rapport avec la PEL	104
5.4	État de surface.....	106
5.5	Optimisation des paramètres de polissage	108
5.6	Conclusion	117
CONCLUSION.....119		
RECOMMANDATIONS		
121		
ANNEXE I	ARTICLE: CNC EDGE FINISHING OF GRANITE: EFFECT OF MACHINING CONDITIONS ON PART QUALITY, CUTTING FORCES, AND PARTICLE EMISSIONS.....	123

ANNEXE II	TABLEAUX DES RÉSULTATS DES ESSAIS RÉALISÉS	125
ANNEXE III	ANALYSE DES CONCENTRATIONS TOTALES EN SURFACE SPÉCIFIQUE	131
ANNEXE IV	ANALYSE DES CONCENTRATIONS TOTALES EN MASSE.....	141
ANNEXE V	ANALYSE DE LA RUGOSITÉ Rt.....	151
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		155

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Correspondance grandeur de grain et diamètre de grain selon les standards ANSI
	10
Tableau 1.2	Liste des outils les plus vendus avec le volume de matière enlevé lors de l'opération du polissage de l'arête
	12
Tableau 1.3	Valeurs des constantes « a » et « n ».
	32
Tableau 2.1	Les paramètres d'entrée du procédé de polissage de l'arête de granit blanc.....
	40
Tableau 2.2	Les variables de réponse du procédé de polissage de l'arête de granit blanc.....
	40
Tableau 2.3	Images des outils utilisés
	43
Tableau 2.4	Longueur d'échantillonnage et longueur d'évaluation standard pour la mesure de Ra à partir de profils de rugosité non périodiques.....
	49
Tableau 3.1	Table ANOVA de Cn_PF pour la forme chanfrein (grit 150)
	67
Tableau 3.2	Table ANOVA de Cn_PF pour la forme concave (grit 150).....
	68
Tableau 3.3	Indices de performance du modèle de $\ln(Cn_PF)$ pour la forme concave (Grit 150)
	71
Tableau 3.4	Table ANOVA de Cn_PF pour la forme chanfrein (phase de finition grit 600).....
	77
Tableau 3.5	Table ANOVA de Cn_PF pour la forme concave (phase de finition grit 600).....
	77
Tableau 3.6	Indices de performance du modèle de $\ln(Cn_PF)$ pour la forme chanfrein en phase de finition (Grit 600).....
	80
Tableau 4.1	Équations de tendance de Ra et Rt en fonction de grit en utilisant les outils de forme chanfrein et concave
	88
Tableau 4.2	Évolution des profils de surface et de rugosité Ra de l'arête de granit blanc en forme chanfrein et concave en fonction des tailles de grit
	90
Tableau 4.3	Table ANOVA de Ra pour la forme chanfrein (grit 600).....
	93

Tableau 4.4	Table ANOVA de Ra pour la forme concave (grit 600).....	93
Tableau 4.5	Indices de performance du modèle de Ra en utilisant l'outil de forme chanfrein et concave en phase de finition (Grit 600)	96
Tableau 5.1	Valeurs des erreurs relatives à la validation des modèles de Cn_PF et de Ra	101
Tableau 5.2	Nombre d'heures permises pour un travailleur selon son niveau d'exposition aux poussières de silice.....	106
Tableau 5.3	Résumé des paramètres de la fonction de désirabilité en utilisant l'outil de forme chanfrein et concave en phase d'ébauche.....	110
Tableau 5.4	Résumé des paramètres de la désirabilité globale en utilisant l'outil de forme chanfrein et concave en phase de finition.....	113
Tableau 5.5	Récapitulatif des valeurs optimales versus les paramètres recommandés du constructeur lors du polissage de l'arête de granit blanc	117

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Distribution minérale de l'échantillon de granit blanc7
Figure 1.2	Distribution minérale de l'échantillon de granit noir7
Figure 1.3	Outil de polissage rotatif; (a) Schéma des constituants, (b) Outil avec liant en résine, (c) Outil avec liant métallique9
Figure 1.4	Images des outils de polissage d'arête de granit sur CNC11
Figure 1.5	Différents paramètres intervenants lors de l'opération de polissage rotatif13
Figure 1.6	Concentration moyenne en nombre pour les PF et UFP émises en fonction des diamètres des particules ; (a) granit blanc, (b) granit noir19
Figure 1.7	Banc d'essai pour l'étude des émissions des PF lors du polissage linéaire de granit20
Figure 1.8	Moyenne de la concentration massique des particules en fonction de la vitesse de coupe pour le granit noir et blanc.....20
Figure 1.9	Concentration en nombre de particules lors du polissage du granit noir à différentes conditions de lubrification ; a) particules ultrafines, b) particules fines22
Figure 1.10	Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation en phase d'ébauche et de finition ; (a) granit blanc, (b) granit noir23
Figure 1.11	États « Avant / Après » des échantillons utilisés pour l'étude de la finition des arêtes de granit24
Figure 1.12	Concentration en masse de (a) la poussière respirable et (b) quartz, en fonction de la position de prélèvement pour le granit blanc25
Figure 1.13	Cabine ventilée avec flux d'air (a) oblique, (b) vertical, (c) horizontal27
Figure 1.14	Ventilation locale et influence d'air sur la captation.....28
Figure 1.15	Paramètres d'état de surface30

Figure 1.16	Variation de la rugosité en fonction des tailles de grit.....	31
Figure 1.17	Rugosité moyenne Ra à différentes vitesses de coupe du granit blanc et noir	32
Figure 1.18	Résultats des finis de surface de l'arête des échantillons de granit noir et blanc après un polissage lubrifié	33
Figure 1.19	Caractéristiques de l'arête de granit blanc polie jusqu'au grit 600 avec et sans lubrification	34
Figure 2.1	Machine de polissage CNC Huron K2X10.....	42
Figure 2.2	Echantillon de granit blanc	44
Figure 2.3	Système de lubrification MQL ;	45
Figure 2.4	Appareils de captation des particules ; (a) APS, (b) SMPS	46
Figure 2.5	(a) Mitutoyo Surftest SJ-201, (b) Gabarit de montage du rugosimètre sur la machine de polissage, (c) Mitutoyo Surftest SJ-410, (d) Courbe de validation des mesures de rugosité	48
Figure 2.6	Détails du montage sur la machine de polissage	50
Figure 2.7	Détails du système de montage du rugosimètre.....	51
Figure 2.8	Courbe de C_n _PUF en fonction du numéro d'essai lors du polissage avec l'outil grit 150 de forme (a) Concave, (b) Chanfrein	52
Figure 2.9	Usure de l'outil chanfrein et concave grit 1500	53
Figure 3.1	Diagramme des effets principaux de ; (a) C_n _PF, (b) C_s _PF, (c) C_m _PF	56
Figure 3.2	Distribution granulométrique de la C_n _PF pour les formes d'arête chanfrein et concave ; ($N = 1500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min, $Q_w = 60$ ml/min).....	58
Figure 3.3	Concentration totale en nombre des PF en utilisant les outils de forme chanfrein et concave en fonction des tailles de grit	59
Figure 3.4	Concentration totale en surface spécifique des PF en fonction de la vitesse de rotation N pour les formes d'arête chanfrein et concave	60
Figure 3.5	Distribution granulométrique de la C_s _PF pour différentes vitesses d'avance	61

Figure 3.6	Distribution granulométrique de la Cm_PF à différents débits de lubrification.....	62
Figure 3.7	Concentration des PUF en nombre en fonction des diamètres aérodynamique des particules pour les deux formes chanfrein et concave et en utilisant les outils grit 150 et grit 600 (N = 1500 tr/min, Vf = 1500 mm/min, Qw = 60 ml/min)	63
Figure 3.8	Distribution granulométrique des PUF à différents débits de lubrification.....	64
Figure 3.9	Diagramme Pareto de Cn_PF en utilisant les outils de forme chanfrein et concave en phase d'ébauche	66
Figure 3.10	Diagrammes d'interaction de ; (a) N et Vf, (b) N et Qw, (c) Vf et Qw	69
Figure 3.11	Courbe de $\ln(Cn_PF)$ pour les valeurs expérimentales et les valeurs prédites du modèle (Forme concave-Grit 150)	72
Figure 3.12	Diagramme des valeurs résiduelles pour $\ln(Cn_PF)$ (Forme concave-Grit 150).....	73
Figure 3.13	Surface de réponse 3D montrant l'effet de Cn_PF en utilisant l'outil de forme concave et chanfrein en phase d'ébauche pour différentes vitesses d'avance.....	75
Figure 3.14	Diagramme Pareto de Cn_PF en utilisant les outils de forme chanfrein et concave en phase de finition	76
Figure 3.15	Diagrammes d'interaction significative de ; (a) Vf et Qw (forme chanfrein), (b) N et Qw (forme concave), (c) Vf et Qw (forme concave)	78
Figure 3.16	Courbe de $\ln(Cn_PF)$ pour les valeurs expérimentales et les valeurs prédites du modèle (Forme chanfrein-Grit 600)	80
Figure 3.17	Graphiques des valeurs résiduelles pour $\ln(Cn_PF)$ (Forme chanfrein-Grit 600).....	81
Figure 3.18	Surface de réponse 3D montrant l'effet de Cn_PF en utilisant l'outil de forme concave et chanfrein en phase de finition (grit 600) à Vf = 1000 mm/min ((a ₁) et (b ₁)) et à Qw = 20 ml/min ((a ₂) et (b ₂))	82
Figure 4.1	Diagramme des effets principaux de ; (a) Ra, (b) Rt	86
Figure 4.2	Courbe de Ra en fonction de la taille de grit pour l'outil de forme chanfrein et concave	87

Figure 4.3	Courbe de Rt en fonction de la taille de grit pour l'outil de forme chanfrein et concave	88
Figure 4.4	Effet de la taille de grit de l'outil sur la surface de l'arête concave du granit blanc.....	89
Figure 4.5	Diagramme Pareto de Ra pour l'outil de forme chanfrein et concave.....	92
Figure 4.6	Graphiques des moyennes de Ra en utilisant l'outil de forme chanfrein ..	94
Figure 4.7	Graphiques des moyennes de Ra en utilisant l'outil de forme concave	95
Figure 4.8	Surfaces de réponse de Ra en utilisant l'outil de forme ; (a) concave, (b) chanfrein (Grit 600 ; N = 1500, 2500 et 3500 rpm)	97
Figure 5.1	Courbes de validation des modèles de Cn_PF pour ; (a) Concave G150, (b) Chanfrein G600	100
Figure 5.2	Courbes de validation des modèles de Ra pour ; (a) Concave G600, (b) Chanfrein G600	100
Figure 5.3	Distribution granulométrique des PF en nombre avec différents modes de lubrification.....	104
Figure 5.4	Variation de la rugosité Ra en fonction de la taille de grit pour différentes vitesses de rotation.....	107
Figure 5.5	Rugosité de surface polie à sec, MQL et lubrifié (Forme chanfrein, Grit 600, N = 2500 tr/min, Vf = 1000 mm/min).....	108
Figure 5.6	Diagramme d'optimisation de la réponse Cn_PF en phase d'ébauche pour : (a) forme chanfrein, (b) forme concave.....	111
Figure 5.7	Diagramme d'optimisation des réponses Cn_PF et Ra en phase de finition en utilisant l'outil de forme chanfrein.....	115
Figure 5.8	Diagramme d'optimisation des réponses Cn_PF et Ra en phase de finition en utilisant l'outil de forme concave.....	116

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANOVA	Analysis Of Variance (Analyse de variance)
APS	Aerodynamic Particle Sizer (Spectromètre de mesure des diamètres aérodynamiques des particules)
CNC	Computerized Numerical Control (Commande numérique par calculateur)
CPC	Condensation Particle Counter (Compteur de particules de condensation)
CSST	Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail
CNESST	Commission des Normes, de l'Equité, de la Santé et de la Sécurité de Travail
DOE	Design Of Experiments (Plan d'expériences)
ÉTS	École de Technologie Supérieure
ÉPI	Équipement de Protection Individuel
INSPQ	Institut National de Santé Publique du Québec
IRSST	Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail
IC	Intervalle de Confiance
LEV	Local Exhaust Ventilation (Ventilation locale par aspiration)
MQL	Minimum Quantity of Lubrication (Lubrification à quantité minimale)
MEB	Microscope Électronique à Balayage
NIOSH	National Institute for Occupational Safety & Health (Institut national pour la sécurité et la santé au travail)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (Administration de la sécurité et de la santé au travail)
PUF	Particules UltraFines
PF	Particules Fines
PM	Particle Matter (Indice de qualité d'air pour certaines tailles de particules)

PME	Petites et moyennes entreprises
PEL	Permissible Exposure Limit (Limite d'exposition admissible)
RSST	Règlement sur la Santé et la Sécurité du Travail
REL	Recommanded Exposure Limit (Limite d'exposition recommandée)
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
VEMP	Valeur d'Exposition Moyenne Pondérée

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Cn_PF	Concentration en nombre des particules fines [#/cm ³]
Cm_PF	Concentration en masse des particules fines [mg/m ³]
Cs_PF	Concentration en surface spécifique des particules fines [μm ² /cm ³]
d	Fonction de désirabilité d'une réponse
D	Désirabilité globale d'un processus
G	Taille de grit d'un outil abrasif
m	Masse des particules suspendues dans un volume de gaz [mg]
N_e	Nombre d'employés [#]
N	Vitesse de rotation de la broche [rpm]
$Q_{permise}$	Quantité de silice autorisée à respirer par jour de travail de 8 heures [mg]
Q_{SiO_2}	Quantité de silice cristalline dans un échantillon [mg]
Q_{totale}	Quantité totale de poussière dégagée
Qw	Débit de lubrification MQL [ml/min]
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [μm]
Rt	Hauteur totale du profil [μm]
s	Pondération de la fonction de désirabilité d'une réponse
S	Surface des particules suspendues dans un volume de gaz [μm ²]
S_{moy}	Moyenne des salaires annuels des travailleurs d'ébavurage [\$]
$V_{air_respiré}$	Moyenne du volume d'air aspiré par un humain pendant un quart de travail de 8 heures [m ³]
V_E	Volume de matière enlevée [mm ³]
Vf	Vitesse d'avance [mm/min]

V_G	Volume de gaz [cm ³]
V_P	Volume occupé par les particules [cm ³]
y	Coûts d'ébavurage moyennes par année [\$]
ρ_{granit}	Masse volumique du granit [kg/m ³]
τ_{SiO_2}	Taux de silice cristalline dans un échantillon de granit [%]

INTRODUCTION

Plusieurs usines de granit situées au Québec transforment environ 80 à 90 % des gros blocs de granit de diverses provenances du Canada, en façonnant une variété de produits destinés à des constructions contemporaines dans plusieurs villes nord-américaines et dans d'autres pays du monde, ou bien aux constructeurs de comptoirs de cuisine et autres pièces de mobilier. Entre 1991 et 2000, la production annuelle du granit brut au Québec a augmenté de 67 000 tonnes à 175 000 tonnes, soit d'environ 11 % (MERN, 2019).

Afin de répondre aux exigences des clients et obtenir des pièces de granit aux arêtes voulues ayant un bon fini de surface, les industriels se retrouvent obligés à procéder au polissage qui, comme tous les autres procédés de mise en forme par enlèvement de matière, génère des particules de poussière ayant un impact important sur la qualité de l'air dans les ateliers et pouvant menacer la santé des travailleurs. Étant donné que le granit est un matériau qui contient un pourcentage de quartz (silice cristalline) variant selon le type de granit de 2 % à 60 % (Winter, 2001), son usinage peut générer des particules fines et ultrafines contenant de la silice cristalline (SiO_2) qui constituent un danger pour la santé des travailleurs. En effet, la silice cristalline a été classée comme cancérogène pour l'homme par l'ARC (Agency for Research on Cancer) et est liée au cancer du poumon (Liu et al., 2013). Plusieurs études ont démontré qu'une exposition prolongée à des taux élevés de ces cristaux provoquent des maladies pulmonaires et respiratoires graves comme la bronchite chronique et la pneumoconiose appelée silicose (Antão, Pinheiro, Kavakama, & Terra-Filho, 2004 ; Guo et al., 2016 ; Steenland & Ward, 2014). Selon Rushton (2007), une concentration massique de quartz comprise entre 0.1 et 0.2 mg/m³ mène à des pertes de fonctions pulmonaires. La taille de ces particules intervient aussi sur les réponses immunitaires où les PUF de taille nanométrique (diamètre compris entre 1 et 100 nm) sont considérés plus dangereuses sur les tissus des poumons que les PF de taille micrométrique (diamètre compris entre 0.1 et 10 μm) (Ahmad, Khan, & Patil, 2011 ; Kusaka et al., 2014).

Au Québec, le secteur de transformation de granit est reconnu par un nombre élevé de travailleurs qui sont touchés par les maladies reliées à l'exposition au quartz. Selon l'INSPQ, il a été enregistré 360 nouveaux cas de silicose, qui sont tous d'origine professionnelle, dans la période entre 2006 et 2017 (Krupoves, Adib, & Sassine, 2019). Cette maladie peut être développée après plus que 10 ans d'exposition à des taux relativement élevés de silice cristalline, ou bien elle peut être aigüe et survenir après une exposition aussi courte que quelques semaines, dépendamment des concentrations auxquelles les travailleurs vont se retrouver (NIOSH, 2002).

Afin de faire face à ce danger, plusieurs législations ont été créées partout dans le monde pour réglementer les concentrations de poussière de silice cristalline dans l'air intérieur, particulièrement la fraction inhalable (diamètre inférieur à 50 µm). Dans le cas de l'Espagne, la valeur limite environnementale pour l'exposition quotidienne à la poussière inhalable de silice cristalline est inférieur à 0.1 mg/m³ (Tejado, Guillén, & Baeza, 2016). Au Québec, le règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) a mis une valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) de quartz qui ne doit pas dépasser 0.1 mg/m³ en une période de 40 heures/semaine à raison de 8heures/jour (LégiQuébec, 2021). Aux États-Unis, la norme est considérée plus sévère, puisque la NIOSH a réduit cette valeur en 2016 à 0.05 mg/m³ (Ashley & Fey O'Connor, 2017). C'est pourquoi les fabricants de granit et des matériaux pierreux contenant du quartz se retrouvent obligés à réduire les concentrations de poussière respirable de silice en urgence, même si ces valeurs sont proches ou égales à la valeur limite. La recherche des moyens de réduction des risques d'exposition à ces particules lors de l'usinage et de polissage de ces matériaux est donc devenue un gros défi à relever.

Plusieurs recherches ont été menés sur les moyens de réduction des émissions des particules fines et ultrafines (PF et PUF) lors du polissage des pièces de granit en surface plane (Bahloul et al., 2019 ; Kouam, Songmene, & Bahloul, 2013 ; Kouamou Njouokep, 2020 ; Saidi, Songmene, Kouam, & Bahloul, 2015, 2018 ; Victor Songmene, Miazza, Hechmi, Olufayo, & Kouam, 2018). Ces études ont mis en évidence les effets qui influencent la génération des particules lors du polissage surfacique des échantillons de granit tels que la taille de grains

d'abrasifs dans les outils, leurs trajectoires, le débit de lubrification, la vitesse de coupe, la profondeur de passe, etc.

La finition des bords de ce matériau reste toujours un axe de recherche qui n'avait pas encore entamé jusqu'à ce qu'un premier article ait été publié en 2021 (Bahri et al., 2021) (voir Annexe I). Ce travail a mis en lumière les effets des paramètres de coupe sur la génération des PF et PUF lors du polissage des arêtes de granits blancs et noirs, avec un seul type d'outil de forme concave de rayon 10 mm, et en utilisant une lubrification abondante et quelques essais à sec.

Dans la présente étude, l'objectif principal est d'étudier l'influence de la forme de l'outil ainsi que la variation du débit de lubrification et d'autres paramètres d'usinage sur la génération des particules fines (PF) afin d'améliorer la qualité d'air et ainsi protéger les travailleurs des hautes concentrations de particules dans leur environnement de travail, tout en gardant un bon état de surface de l'arête des pièces qui permette aux industriels d'assurer une certaine compétitivité et satisfaction des exigences de leurs clients.

Ce travail est basé sur des essais expérimentaux selon un plan d'expérience suivis par une étude statistique. L'étude se limitera sur un seul type de granit, le granit blanc, qui est riche en silice cristalline (environ 50 % de quartz). Le travail se fera en utilisant des outils de forme chanfreinée et concave de différentes tailles de grit. Sur chaque configuration (forme d'outil-taille de grit) se fera un plan d'expérience dans lequel on varie la vitesse de rotation de la broche, la vitesse d'avance et le débit de lubrification MQL.

La répartition de ce mémoire est comme suit :

- Chapitre I : Revue de littérature ; présente une vue globale de l'état de l'art des recherches en lien avec la présente étude. Les sujets abordés sont ; le procédé du polissage et ses paramètres, les émissions de particules et leurs effets sur la santé des travailleurs, le fini de surface et la productivité.
- Chapitre II : Étude expérimentale ; détaille les ressources utilisées pour la réalisation des essais expérimentaux tels que les machines, les outils, les systèmes de mesure, ainsi que le plan d'expérience et le protocole expérimentale élaboré.

- Chapitre III : Émissions de poussières ; porte sur l'analyse des résultats en émission de PF lors du procédé de polissage des arêtes de granit blanc. Une étude statistique a été faite lors de la phase d'ébauche et de la phase de finition qui a permis d'identifier les paramètres les plus signifiants à la génération des PF.
- Chapitre IV : Finis de surface ; est dédié à l'étude de la rugosité des arêtes polies. Les paramètres qui influent la qualité de surface de l'arête chanfreinée et concave de granit blanc lors de la phase de finition ont été dégagés suite à l'étude statistique réalisée.
- Chapitre V : Discussion des résultats ; dans lequel les résultats du Chapitre III et Chapitre IV sont discutés et analysés ensemble et ensuite une optimisation des paramètres de polissage a été réalisée dans le but de satisfaire à l'objectif principal de notre présente étude.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

L'amélioration de la qualité de surface à travers le procédé de polissage est primordial dans les industries de transformation des matériaux pierreux (granit, quartz, marbre, etc.). Ce procédé donne non seulement un bel aspect et une brillance aux surfaces traitées mais aussi une plus longue durée de vie du matériau. Les différents aspects de polissage de granit ainsi que les caractéristiques de ce matériau vont être élaborés dans cette revue de littérature, avec une attention particulière aux émissions de particules fines (PF) et ultrafines (PUF) et le fini des surfaces générées lors du polissage des matériaux granit afin de relever la pertinence de l'étude.

1.2 Le procédé de polissage du granit

Le polissage se fait par abrasion en faisant enlever des matériaux sous forme de petits éclats arrachés par les arêtes vives de nombreux grains abrasifs. Il peut se réaliser manuellement ou avec une polisseuse automatique ou semi-automatique, à sec ou lubrifié selon les besoins.

Ce procédé se fait dans le but d'améliorer l'état de surface de la pièce visant à avoir un bel aspect brillant et de bonne qualité, en supprimant ses défauts, en augmentant son pouvoir réflecteur et en lui conférant un beau fini de surface. La surface obtenue à la fin est caractérisée par une rugosité, une brillance et un éclat.

1.2.1 Le matériau granit

Le granit est très résistant et prend un beau poli, ce qui le rend un matériau très apprécié dans le secteur de construction et de fabrication des comptoirs de cuisines et des salles de bain, grâce à ses caractéristiques tels que ses bonnes qualités esthétiques, son excellente stabilité dimensionnelle et sa résistance aux environnements agressifs, aux chocs et à l'usure sans qu'il ait un changement de sa couleur ni de sa forme. C'est un matériau qui est difficile à détériorer

contrairement aux bois et à d'autres matériaux. Sa surface ne peut pas être endommagée d'aucune manière avec des tâches de nourriture ou avec la chaleur des poêles, des casseroles et des plats chauds.

Ce matériau est extrait d'une roche volcanique, plutonique d'aspect cristallin qui se forme par le refroidissement lent du magma en profondeur de la croûte terrestre. Ce refroidissement donne à cette roche une texture grenue caractérisée par des minéraux jointifs qui sont en contact les uns avec les autres (GeologyIn, 2015). Le granit se compose essentiellement de trois minéraux ; le quartz, le feldspath (orthose ou plagioclase) et le mica (biotite). Dans sa composition minérale, le quartz, qui est un minéral composé de dioxyde de silicium (SiO_2) appelé aussi silice, est présent soit sous la forme de grands cristaux incolores, colorés ou fumés, soit sous la forme de cristaux microscopique d'aspect translucide (Bahloul et al., 2019). Le feldspath, qui est le plus important groupe des minéraux de la croûte terrestre, constitue la plus grande partie de la roche. Il est hautement cristallisé et il a la propriété de former des macles et de rayer le verre. On le trouve souvent opaque, blanc, gris ou rose clair. Quant au mica, il se présente sous une structure feuillettée en paillettes régulières de couleur noir brillant généralement (MIGAN, 2015). L'observation de la structure cristalline d'un échantillon de granit à l'œil nu, à la loupe ou à l'aide d'un microscope révèle sa composition en différents matériaux (quartz, feldspath et mica) avec leurs dispositions, leurs tailles et leurs textures.

Un échantillon de chaque granit blanc utilisé dans l'étude de (Bahloul et al., 2019) a été analysé sous MEB (Figure 1.1). Il contenait des grains à textures automorphes granulaires et de tailles grossières à moyennes. Sa roche était constituée de 41% de quartz de taille variant de 1 à 5.5 mm et les autres éléments principaux étaient le plagioclase et le feldspath-K avec des tailles qui varient entre 0.5 et 7 mm.

Pour le granit noir, un échantillon utilisé dans l'étude de Kouam et al. (2022) a révélé que le granit noir est une anorthosite, dont la composition se situe à la limite du domaine des leuco-ferronorites, en raison de la teneur élevée en orthopyroxène (21 %) dans sa composition. Sa roche était noire, massive, à gros grains principalement constitués de plagioclase (67%) avec la présence de orthopyroxène (21 %), biotite (4 %), olivine (2 %), oxydes de fer-titane (4,5 %) et elle ne contenait pas de quartz (Figure 1.2).

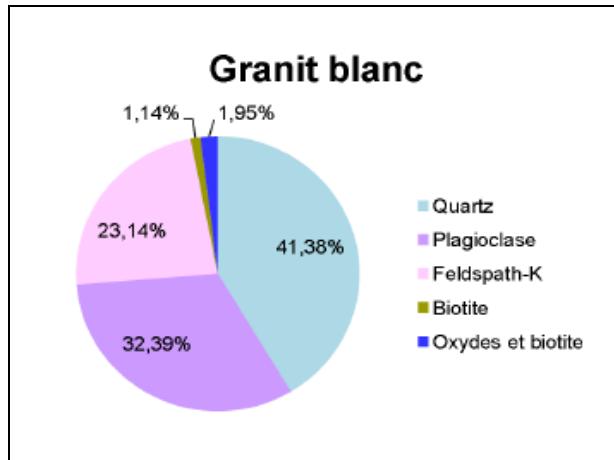


Figure 1.1 Distribution minérale de l'échantillon de granit blanc
Tirée de Bahloul et al. (2019)

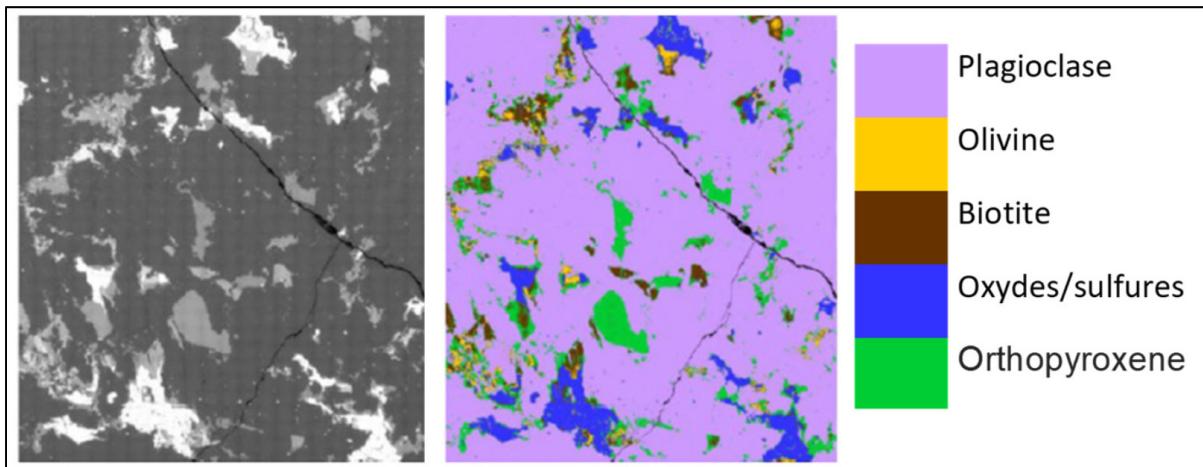


Figure 1.2 Distribution minérale de l'échantillon de granit noir
Tirée de Kouam et al. (2022)

1.2.2 Le polissage manuel

Le polissage manuel est une opération nécessitant une main d'œuvre hautement qualifiée et spécialisée, donc qui coûte cher. Ce type d'opération est généralement destiné aux pièces ayant une forme compliquée ou une grande fragilité qui ne permettent pas l'utilisation d'autres types de polissage et nécessitent une grande précision, une bonne qualité et un faible échauffement

de la pièce au cours de son polissage. Le polissage des arêtes de granit est considéré comme une opération délicate et nécessite généralement l'intervention du travailleur.

1.2.3 Le polissage mécanique

Le polissage mécanique est la méthode la plus utilisée dans l'industrie. Ce procédé se fait en deux étapes commençant par un polissage grossier de la surface avec des abrasifs de grosses tailles, en arrivant à la finition avec des abrasifs plus fins. A la fin du polissage, la surface de la pièce est caractérisée par une diminution de sa rugosité ainsi qu'une plus grande brillance. Il peut être automatique ou semi-automatique où les pièces sont présentées devant l'outil de polissage qui est animé d'un mouvement de rotation préprogrammé, continu et régulier.

Les machines CNC sont capables d'assurer une fixation et un détachement automatisés, faciles et rapides des outils de fraisage, ce qui permet en fait de bénéficier simultanément de plusieurs outils standards et de diverses conditions de polissage et d'améliorer ainsi la flexibilité, la cadence et le temps de production (Niknam, Davoodi, Davim, & Songmene, 2018).

1.2.4 Les outils utilisés en polissage

Un outil de polissage (une meule) est constitué de plusieurs grains d'abrasifs de grosseur déterminée, liés par une matrice (agglomérant). Les particules abrasives doivent être réparties régulièrement afin d'obtenir une meule homogène susceptible de fournir un travail satisfaisant. Comme l'abrasif est capable de polir par frottement, il est considéré comme un corps dur qui peut découper les copeaux d'un corps moins dur que lui-même par une action mécanique. Il est caractérisé par une forme, des dimensions et des propriétés mécaniques. Il est à noter que la taille, la dureté et la forme des grains d'abrasifs, en plus de la vitesse de rotation, la pression et la nature du liant, sont des facteurs qui influencent de plus l'efficacité de ces grains d'abrasifs (MIGAN, 2015).

La Figure 1.3 montre les différents composants principaux de l'outil abrasif destiné pour le polissage rotatif. On trouve, avec des grandeurs variantes et orientation arbitraires, les particules de diamant, de carbure de silicium ou d'oxyde d'aluminium comme étant des

abrasifs pour le procédé de polissage, puisque ces particules sont caractérisées par une grande dureté. Le liant utilisé pour agglomérer les abrasifs peut être un métal (Figure 1.3-b), une céramique ou de la résine (Figure 1.3-c). Afin d'assurer l'agglomération des particules d'abrasifs, il est nécessaire que la dureté du liant soit égale ou légèrement supérieure à celle de l'abrasif pour que les deux s'usent de la même façon. D'après Malkin et al. (2008), la concentration des abrasifs en diamant dans le liant varie généralement entre 12.5 et 37.5 % du volume total de la partie active de l'outil abrasif.

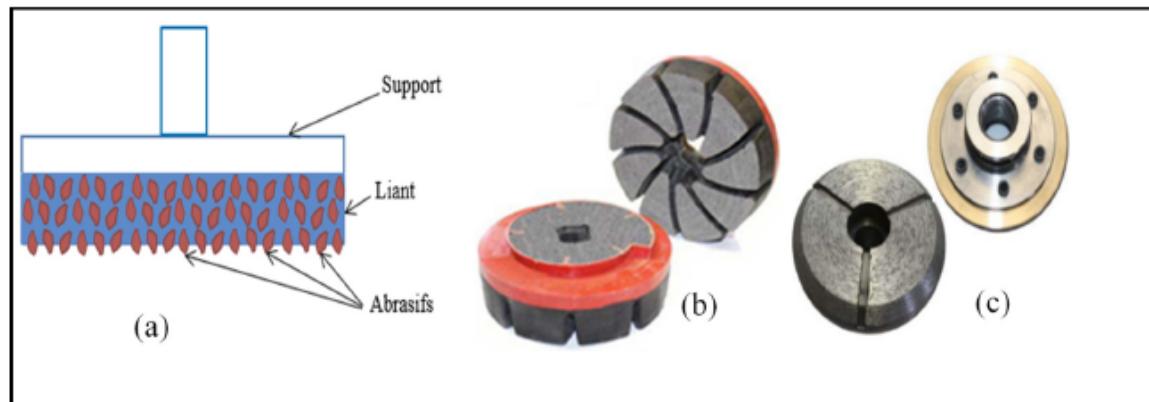


Figure 1.3 Outil de polissage rotatif; (a) Schéma des constituants, (b) Outil avec liant en résine, (c) Outil avec liant métallique
Tirée de Saïdi (2018)

Les abrasifs en diamant, appelés aussi super-abrasifs, sont les plus durs qui existent dans l'industrie ayant des durées de vie plus grande comparant aux autres abrasifs conventionnels, ce qui signifie leurs aptitudes à polir les matériaux difficilement usinables tels que le granit. Ces outils diamantés se composent de segments de support et d'abrasifs, comprenant des grains de diamant et d'une matrice. Les grains de diamants sont connus comme des matériaux avec des qualités physiques superlatives dont la plupart proviennent de la forte covalence de liaison entre ses atomes (Kenda & Kopa, 2009).

Ajoutons que le diamant synthétique est préféré en raison de sa conductivité thermique élevée et de l'absence des microfissures en particulier. Dans l'industrie, les abrasifs sont classés par leur taille de grit qui correspond à une grandeur de grain abrasif. Le Tableau 1.1 donne une

correspondance entre la grandeur de grain abrasif et son diamètre moyen associé selon les standards ANSI (American National Standards Institute).

Tableau 1.1 Correspondance grandeur de grain et diamètre de grain selon les standards ANSI
Tiré de Media Blast & Abrasive (2015)

GRIT	Diamètre moyen de grain (μm)	GRIT	Diamètre moyen de grain (μm)
8	2210	100	122
10	1854	120	102
12	1600	150	89
14	1346	180	76
16	1092	220	63
20	940	240	50
24	686	280	39
30	559	320	31
36	483	400	22
46	356	500	19
54	305	600	16
60	254	700	14
70	203	800	12
80	165	900	9
90	145	1000	7

1.2.5 Le polissage des bords de granit

L'opération de polissage des bords de granit, appelée aussi finition des arêtes de granit, est une opération essentielle réalisée sur une pièce en granit qui a été déjà polie en surface. Pour atteindre la même valeur de rugosité et brillance des surfaces de la pièce déjà polie, et pour enlever les traces des outils de polissage sur les arêtes, des opérations de polissage des bords s'avèrent nécessaires avant de livrer le produit final au client. Cette opération se ressemble à l'ébavurage des matériaux métalliques, qui est de même considérée nécessaire à la suite de l'apparition des bavures sur les arêtes dues à l'usinage d'un matériau métallique, généralement assez ductile pour favoriser la création de ces bavures.

Le polissage des arêtes de granit peut se faire manuellement avec les mêmes polisseuses et les outils abrasifs utilisés en polissage de surface mais avec des techniques différentes, ou bien sur

les machines CNC à l'aide des outils conçus pour donner aux bords des pièces les formes désirées dès le premier passage de l'outil d'ébauche par l'arête vive (Figure 1.4). Le choix de cet outil se fait selon la demande des clients qui exigent une forme et des dimensions de l'arête (angle de chanfreinage, rayon de l'arrondi, etc.) se trouvant dans le catalogue du fournisseur des outils.

Selon L. K. Gillespie (1999), la sélection de machines CNC pour le polissage ou l'ebavurage de précision exige la prise en compte des facteurs suivants :

- Les fraises rotatives sont conçues pour être utilisées à des vitesses élevées et à des forces faibles. De nombreuses fraises sur les machines CNC ne s'approchent pas des vitesses de coupe recommandées pour ces outils.
- Les pierres abrasives ou les outils en caoutchouc remplis génèrent un grand nombre de fines particules abrasives qui peuvent se loger dans les pinces de serrage, les dispositifs de fixation et les machines.
- Le caoutchouc de certains produits de frottement remplis d'abrasifs réagit avec les liquides de refroidissement, produisant des surfaces collantes pour les machines.

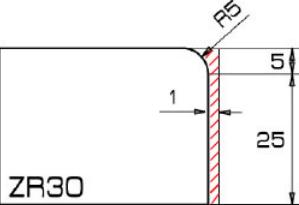
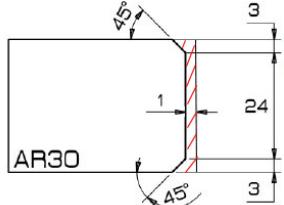
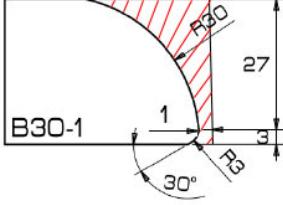
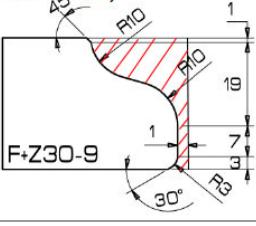
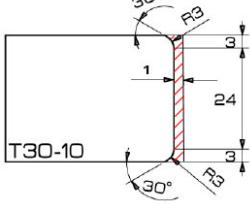


Figure 1.4 Images des outils de polissage d'arête de granit sur CNC
Tirée de GranQuartz Canada Inc. (2020)

Dans ce projet, une étude du polissage automatique sur CNC des arêtes de granit blanc a été faite. Le choix des outils pour faire les essais était basé sur deux critères, qui sont la demande des clients et le volume de la matière enlevée après polissage. Dans une première étape, une liste des outils les plus demandés et les plus vendus par les clients a été fournie par l'entreprise

GranQuartz de fabrication des outils de polissage sur CNC. Une étude a été faite dans une deuxième étape sur ces outils afin de les classifier par volume de matière enlevé après tout le processus de polissage de l'arête d'un carré de granit de dimensions 200*200*30 mm³ comme indiqué dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Liste des outils les plus vendus avec le volume de matière enlevé lors de l'opération du polissage de l'arête

Référence de l'outil	Image du profil réalisé (matière enlevée hachurée en rouge)	Volume de la matière enlevée (mm ³)
ZR30		6838.6
AR30		7562
B30-1		28 756.2
F+Z30-9		46 048.2
T30-10		6539.7

Les outils de référence B30-1 et F+Z30-9 enlèvent des volumes de matière lors des opérations de polissage qui sont beaucoup plus grands comparant aux autres références. Ceci rend les résultats issus des essais faits avec ces outils incomparables, surtout au niveau des émissions de particules, et nous obligent à choisir les outils qui enlèvent des volumes de matière assez proches. A ce stade-là, notre choix s'est limité entre les 3 références ZR30, AR30 et T30-10. Parmi ces 3 références, on peut remarquer qu'il y a deux formes similaires (formes concave) mais avec des dimensions différentes, et une autre forme différente (forme chanfrein). Comme les formes des arêtes finies avec les outils AR30 et T30-10 seront très ressemblantes (chanfrein $3*45^\circ$ et concave R3) ce qui permettra une comparaison des résultats plus convaincante, alors ces deux outils ont été choisis pour la suite de l'étude.

1.2.6 Le polissage rotatif régulier du granit

Le polissage rotatif régulier est obtenu par la combinaison de la rotation et de la translation de l'outil abrasif. La Figure 1.5 montre les différents paramètres qui interviennent lors de l'opération de polissage rotatif dont la pression de l'outil sur la pièce à polir, l'avance de l'outil et la vitesse de rotation de la broche. Ces paramètres dépendent de plusieurs facteurs dont le type de l'opération réalisée (façonnage ou polissage de champ ou travail des contours), le type de granit, le type d'abrasif utilisé et la stratégie utilisée (lubrifié ou humide ou à sec).

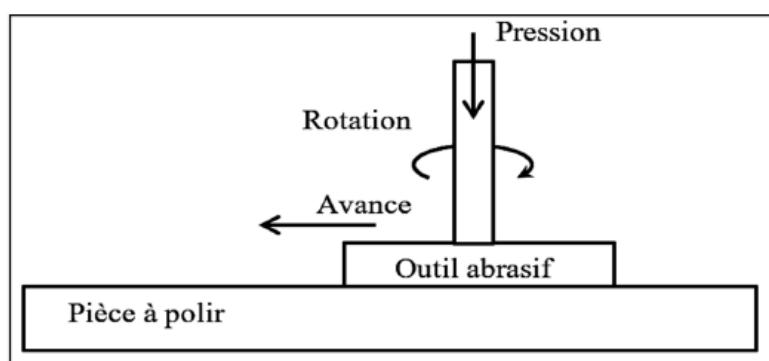


Figure 1.5 Différents paramètres intervenants lors de l'opération de polissage rotatif
Tirée de Saïdi (2018)

Selon la stratégie de l'entreprise et la demande de ses clients, le nombre d'étapes de polissage est défini. L'industrie GranQuartz de fabrication des outils pour machines CNC propose pour le polissage des arêtes de granit des sets de 6 outils de taille d'abrasif croissant allant de 45 jusqu'à 3000 grit pour chaque forme de l'arête finie. Chaque outil est utilisé en une étape du processus de polissage avec des paramètres de coupe recommandée par l'industrie dont la vitesse de rotation de la broche de l'outil qui peut atteindre 5500 tr/min. Ces étapes sont réparties comme suit :

- La 1^{ère} étape s'applique à l'aide d'un outil abrasif en diamant de grit 45 avec un liant métallique, où la coupe est dite grossière donc une grande quantité de matière sera enlevée de la surface de granit.
- La 2^{ème} étape s'applique avec un outil de grit 150 afin d'éliminer les grosses rayures.
- La 3^{ème} étape, comme la 2^{ème}, s'applique avec un outil abrasif de grit 300 pour éliminer encore les grosses rayures.
- La 4^{ème} étape s'applique avec un abrasif de grandeur de grain 600. A partir de cette étape, la surface de granit commence à avoir une faible rugosité.
- La 5^{ème} et la 6^{ème} étape s'appliquent successivement avec des outils de grit 1500 et 3000, permettant de rendre la surface du granit plus réfléchissante. Il est recommandé à ce niveau-là, d'ajouter un produit de densification lors de l'application de cette étape pour permettre de remplir les pores et les microfissures à la surface et rendre la surface plus brillante.

Il est recommandé d'utiliser des faibles vitesses ou d'appliquer une certaine pression pendant le polissage de finition à sec. Cela évite le cisaillement des particules de diamant dû au frottement et à la chaleur causés par les grandes vitesses et les pressions élevées.

1.3 Emissions des particules lors des opérations de polissage des granits

1.3.1 Définition d'un aérosol

Un aérosol est un ensemble de particules fines, solides ou liquides, d'une substance chimique ou d'un mélange de substances, en suspension dans un milieu gazeux (généralement dans l'air).

L'aérosol engendré par des particules liquides peut être un brouillard alors que celui engendré par les particules solides peut être une fumée ou de la poussière (Saïdi, 2018). Selon Hinds (1999), on peut classer les particules dans un aérosol en 3 catégories par leur diamètre :

- Particules nanométriques : de 0.001 à 0.1 μm (de 1 à 100 nm)
- Particules submicroniques : de 0.1 à 1 μm (de 100 à 1000 nm)
- Particules micrométriques : de 1 à 10 μm (de 1000 à 10 000 nm)

On peut classer ces particules aussi en particules ultrafines (PUF) de diamètre allant de 0.001 à 0.1 μm (1 à 100 nm) et en particules fines (PF) de diamètre entre 0.1 et 10 μm . Il est accepté que les particules ultrafines sont générées non intentionnellement, alors que les nanoparticules sont fabriquées ou générées de façon intentionnelle pour d'autres utilisations ultérieures.

Une autre échelle de classification des matières particulaires (PM) est proposée selon US EPA (2016) :

- PM_{10} : les particules inhalables, dont le diamètre est généralement de 10 micromètres et moins, et
- $\text{PM}_{2.5}$: les fines particules inhalables, dont le diamètre est généralement de 2.5 micromètres et moins.

1.3.2 Effet de la poussière de quartz sur la santé des travailleurs

La considération des particules de poussière dégagées lors de certains processus industriels soulève la question des risques liés à l'exposition professionnelle. Ces particules peuvent être inhalées et pénètrent par la suite dans les voies respiratoires de l'être humain. Elles peuvent aussi pénétrer dans le système gastro-intestinal après ingestion ou après déglutition en cas d' inhalation (Ricaud & Witschger, 2012). Cependant, la pénétration à travers la peau des particules fines et ultrafines est une hypothèse encore à l'étude.

Les particules toxiques qui se trouvent dans la poussière, tels que la silice cristalline (quartz), peuvent menacer la santé du travailleur qui en est exposé pour de longues périodes de temps, une fois inhalées. La silice cristalline se trouve dans la plupart des roches et se présente dans

plusieurs matériaux susceptibles de dégager des poussières. Ces poussières dangereuses ne sont pas visibles à l'œil nu et ne peuvent se voir qu'au microscope, par conséquent une atmosphère qui paraît peu polluée et quasi limpide ne signifie pas l'innocuité (INRS France, 1998).

L'inhalation de ce genre de particules peut engendrer la maladie de silicose, qui est une maladie pulmonaire et irréversible. Ses symptômes peuvent inclure la toux, la fatigue, l'essoufflement, jusqu'à entraîner des troubles respiratoires progressifs allant jusqu'à une déficience respiratoire très grave dont les complications (insuffisance cardiaque, tuberculose, etc.) peuvent être mortelles (Goyer, Bahloul, & Veillette, 2010).

On trouve le quartz dans plusieurs industries comme les mines, la construction, la fabrication du ciment et de la céramique, l'industrie du granit, etc. Une enquête sur les causes de mortalité réalisée sur un groupe de 7052 travailleurs dans le secteur de transformation de granit au Vermont (États-Unis) a révélé une relation entre leur niveau d'exposition à la poussière de quartz et certaines maladies pulmonaires comme la silicose et d'autres maladies respiratoires non malignes (Vacek, Verma, Graham, Callas, & Gibbs, 2011). Selon Li et al. (2019), la silicose est devenue la maladie professionnelle la plus courante au Hong Kong depuis plusieurs décennies, et plus que 250 travailleurs aux États-Unis meurent chaque année à cause de cette maladie.

Selon la CSST, 133 cas de silicose ont été acceptés entre les années 2002 et 2006 pour tous les secteurs d'activité concernés, sauf celui de la construction. Pour les travailleurs dans le secteur de transformation de granit, les pertes de fonctions pulmonaires peuvent se produire à une exposition prolongée avec des concentrations de silice cristalline comprise entre 0.1 et 0.2 mg/m³. Ce dysfonctionnement pulmonaire n'apparaît généralement que dans les périodes d'exposition aux poussières de quartz allant de 30 à 40 ans (Rushton, 2007).

Pour remédier à cela, le Règlement sur la Santé et la Sécurité du Travail (RSST) a établi une valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) à la poussière de silice cristalline respirable à 0.1 mg/m³ pour une période de travail de 8h par jour, en fonction d'une semaine de travail de 40 heures. En 2016, l'OSHA a publié deux normes pour protéger les travailleurs contre

l'exposition à la silice cristalline respirable. L'une pour le secteur de la construction, et l'autre pour le secteur maritime et l'industrie générale (y compris les entreprises de produits en pierre) afin de permettre aux employeurs de modifier les solutions en fonction des conditions spécifiques de leur lieu de travail.

Conformément aux nouvelles normes sur les contaminants atmosphériques, les employeurs doivent protéger les travailleurs contre les expositions à la silice cristalline respirable supérieures à la limite d'exposition admissible de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, calculée en moyenne sur une journée de 8 heures (Ashley & Fey O'Connor, 2017). La nouvelle norme de l'OSHA pour la silice cristalline est une limite d'exposition aux poussières respirables contenant de la silice cristalline qui sont des particules pouvant pénétrer profondément dans les poumons et provoquer le plus grand potentiel de maladie respiratoire et chronique (Natural Stone Institute, 2016).

1.3.3 Les métriques recommandées pour la mesure des particules

Les métriques d'exposition disponibles pour différentes techniques de mesure dans l'air, qui peuvent être utilisés pour évaluer l'exposition aux particules fines et ultrafines sont les suivants:

1.3.3.1 La concentration en nombre [$\text{particules } \#/ \text{cm}^3$]

La concentration en nombre est calculée par la division du nombre des particules par unité de volume du gaz porteur ($\text{particules}/\text{cm}^3$). Par définition, un environnement aérosol est un milieu où la concentration en nombre est élevée. L'air propre est considéré comme un air contenant moins de 10^3 particules par cm^3 , alors que l'air pollué contient 10^5 ou plus de particules par cm^3 (ISO, 2007).

1.3.3.2 La concentration en masse [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Cette quantité est calculée par la division de la masse ' m ' des particules suspendues dans un volume ' V ' sur la mesure de ce volume. Ce volume est la combinaison du volume du gaz ' V_G '

et du volume des particules ‘ V_P ’. Dans le cas de la pratique, le volume des particules ‘ V_P ’ est négligeable et donc la concentration massique ‘ C^m ’ peut être exprimée par :

$$C^m = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_G + V_P} \cong \frac{m}{V_G} \quad (1.1)$$

1.3.3.3 La concentration en surface [nm²/cm³]

Parmi les caractéristiques d'un milieu aérosol, on trouve une très grande surface d'échange existante entre les particules et le gaz porteur. Cette grande surface de matériau dispersé sous forme d'aérosol favorise les échanges thermiques ou chimiques entre les particules et le gaz qui les entourent (Djebara, 2012). La concentration surfacique ‘ C^s ’ est définie comme la surface ‘ S ’ des particules suspendues dans un volume ‘ V ’ rapportée à la mesure de ce volume :

$$C^s = \frac{S}{V} = \frac{S}{V_G + V_P} \cong \frac{S}{V_G} \quad (1.2)$$

1.3.4 Les études faites sur les émissions de particules et les facteurs qui l'influencent

Une étude faite sur les comptoirs en matériaux pierreux (quartz, marbre, granit) mettant en œuvre l'effet de la teneur en silice dans le matériau a révélé que dans un atelier de marbrerie, le broyage à sec du marbre vert (contenant 1.8 % de quartz) expose les travailleurs à des niveaux de silice en suspension dans l'air de 39 à 45 µg/m³ (inférieur au REL du NIOSH). Aucun contrôle technique, tel que les pulvérisations d'eau ou les systèmes LEV, n'a été utilisé lors de ces opérations. Cependant, dans l'atelier de granit (contenant au moins 10 % de quartz) et dans les mêmes conditions, les expositions à la poussière de silice cristalline en suspension dans l'air étaient considérablement plus élevées, allant de 89 à 460 µg/m³ (OSHA & NIOSH, 2015). Il est alors raisonnable de considérer que la réalisation d'opérations similaires avec des matériaux à plus forte teneur en silice, comme certains produits manufacturés en pierre, pourrait entraîner des expositions plus élevées.

Il a été montré que la simple inhalation de particules de diamètre inférieur à 2.5 μm (PM_{2.5}) de l'air urbain pouvait constituer une menace grave pour la santé humaine. Saidi et al. (2019) ont trouvé que le maximum de la concentration en nombre de PF émis dans l'espace de travail correspondait à des diamètres de particules comprises entre 0.626 et 0.777 μm pendant le processus de polissage du granit noir et blanc. Pour les PUF, le pic de concentration en nombre a été détecté pour la gamme de diamètre entre 14.1 et 34.6 nm (Figure 1.6). Ces particules se situent bien dans la gamme des PM_{2.5} et peuvent facilement atteindre la région alvéolaire des poumons et causer plusieurs problèmes de santé.

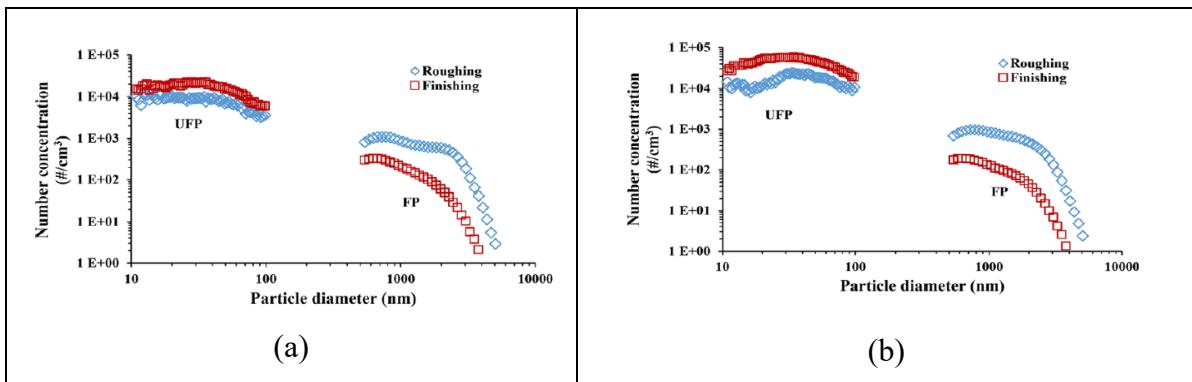


Figure 1.6 Concentration moyenne en nombre pour les PF et UFP émises en fonction des diamètres des particules ; (a) granit blanc, (b) granit noir

Tirée de Saidi et al. (2019)

La finition des arêtes de granit exige souvent une précision atténuable qu'avec le travail manuel. Les émissions de particules lors de ce genre d'opération n'étaient pas encore investiguées dans la littérature. Simcox et al. (1999) ont juste indiqué que la quantité de poussière émise lors du meulage des arêtes de comptoirs de granit dépendra en partie de la quantité d'aspiration produite par le système d'aspiration mis en place. La plupart des études menées sur la génération des particules lors de ce procédé s'intéressaient généralement au polissage en surface de ce matériau. Une étude mesurant la génération des PF de diamètre inférieur à 2.5 μm (PM_{2.5}) durant l'opération de polissage linéaire des granits blanc et noir à sec, a été réalisée par Kouam et al. (2013). Le banc d'essai utilisé dans l'investigation est représenté sur la Figure 1.7 montrant l'isolation de l'environnement expérimental afin de pouvoir collecter les particules émises.

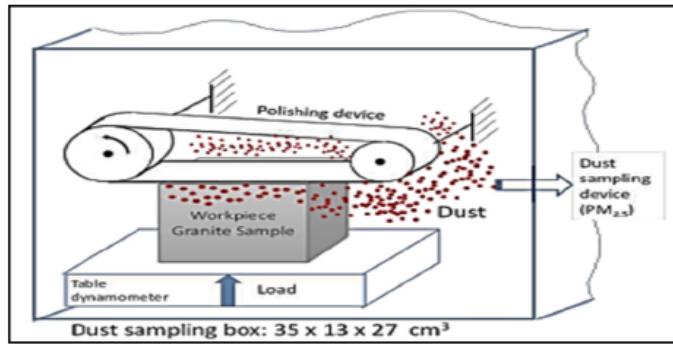


Figure 1.7 Banc d'essai pour l'étude des émissions des PF lors de polissage linéaire de granit
Tirée de Kouam et al. (2013)

Compte tenu que le granit blanc est considéré comme un matériau riche en quartz, avec une concentration de silice (SiO_2) d'environ 50 %, et que le granit noir n'en contient qu'une faible quantité d'environ 10 %, le résultat sur la Figure 1.8 montre que la concentration massique de la poussière des PF émise par le polissage du granit noir était plus élevée que celle issue du granit blanc. De plus, l'augmentation de la vitesse de coupe (vitesse de la bande abrasive) entraîne une augmentation rapide de la même concentration massique dans les deux types de granit blanc et noir.

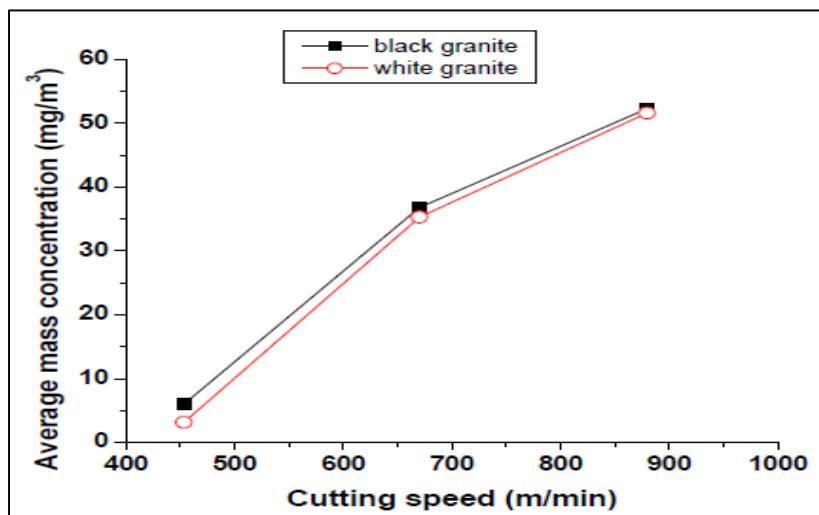


Figure 1.8 Moyenne de la concentration massique des particules en fonction de la vitesse de coupe pour le granit noir et blanc
Tirée de Kouam et al. (2013)

La génération des PF et des PUF augmente avec la vitesse de rotation de l'outil abrasif, mais elle diminue avec la vitesse d'avance. Selon l'analyse de Bahloul et al. (2019), assurer une combinaison de 1000 tr/min comme vitesse de rotation et 25.5 mm/sec comme vitesse d'avance, permettrait d'avoir un minimum d'émission de PF lors du polissage des granits blanc et noir en phase d'ébauche et de finition. Quant à la réduction des émissions des PUF, les vitesses de rotation et d'avance choisies devraient respectivement atteindre la plage entre 1000 et 1375 tr/min et 21.25 et 25.5 mm/sec.

Une investigation est faite par Simcox et al. (1999) sur l'exposition des travailleurs à la poussière de silice lors de la fabrication de granit dans six ateliers distincts de comptoirs de granit dans l'état de Washington. Parmi les résultats de cette étude, 63 % des échantillons pris durant le polissage à sec ont excédé la limite d'exposition admissible (PEL) pour la silice cristalline qui était à 0.1 mg/m^3 . De plus, il a été révélé qu'au moins une exposition personnelle était deux fois supérieure à la valeur de PEL pour chaque lieu de travail, et peut aller jusqu'à 7 fois cette valeur pour certains échantillons ($770 \text{ } \mu\text{g/m}^3$). En passant vers le travail humide, 18 échantillons pris ont marqué une réduction spectaculaire de l'exposition des travailleurs à la poussière de quartz allant de 20 à $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Cette étude a indiqué que les émissions des particules de silice cristalline dépendent de plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, on trouve ; la teneur en silice cristalline de la pierre, sa forme, l'équipement et les outils utilisés, la durée d'exécution des tâches, le type et le niveau de ventilation, les pratiques de travail, les méthodes de suppression de la poussière, etc. Donc pour réduire et prévenir l'exposition à la silice cristalline il faut penser à :

- L'utilisation des procédés humides avec leurs diverses options d'équipement,
- L'utilisation des outils blindés avec des aspirateurs d'ateliers, puisqu'il a été démontré qu'en migrant des scies et des meuleuses à angle aux nouveaux outils rénovés à lubrification continue, la moyenne de concentration en silice cristalline a diminué de $440 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.
- L'installation d'un système local de ventilation par aspiration.

De même, il a été démontré que la découpe des blocs de pierres par voie humide réduira très probablement les niveaux de poussières par rapport à la découpe à sec. Cependant, de nombreux facteurs peuvent influencer la quantité de poussière qui s'échappera et les niveaux qui résulteront d'un processus particulier, comme la vitesse et la façon avec laquelle l'eau a été appliquée (Natural Stone Institute, 2016). Dans le cas des granits, la CNESST conseille d'utiliser de l'eau en lubrification accompagné par d'autres méthodes de protection comme la ventilation et le confinement. Dans l'étude de Songmene et al. (2018), l'utilisation de l'eau en mode MQL (Minimum Quantity Lubrication) s'est avérée très efficace pour réduire les émissions de particules fines mais n'a pas réduit les émissions de particules ultrafines, comme montré dans la Figure 1.9.

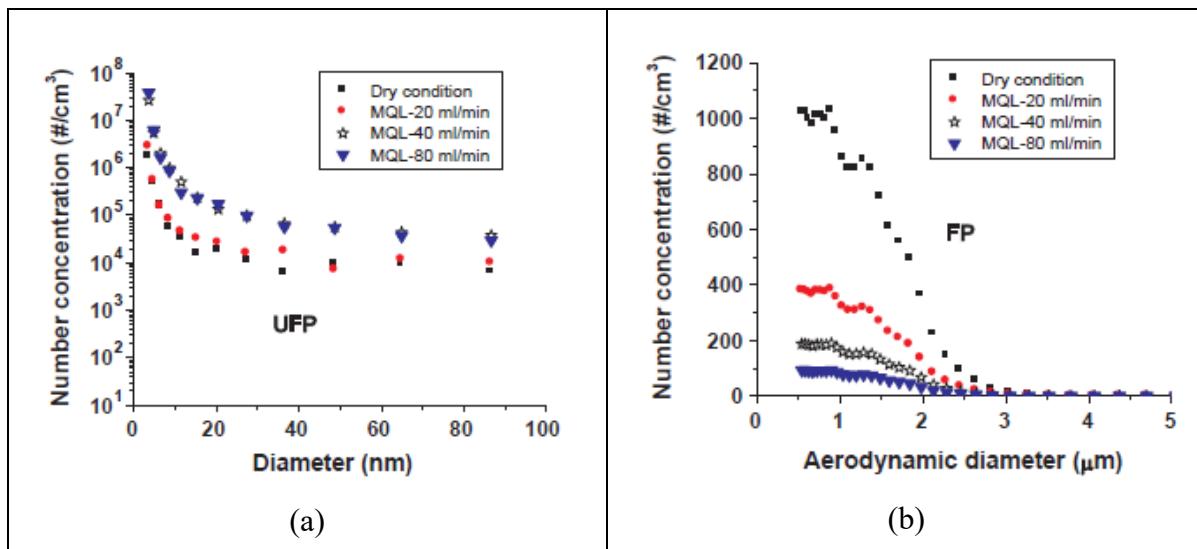


Figure 1.9 Concentration en nombre de particules lors du polissage du granit noir à différentes conditions de lubrification ; a) particules ultrafines, b) particules fines
Tirée de Songmene et al. (2018)

Il a été montré que la quantité en nombre de PUF émise en phase d'ébauche et de finition est plus importante que celle de PF lors du procédé de polissage du granit noir et blanc (Figure 1.10). Toutefois, la phase d'ébauche a généré plus de PF et moins de PUF que celle de finition (Bahloul et al., 2019). Ce résultat était attendu, puisque la phase d'ébauche est la phase où il y a le plus d'enlèvement de matière et de grosses particules pour éliminer les grands sillons du

matériau à l'état brut, alors que la phase de finition est juste pour donner la rugosité et la brillance désirée qui ne demande pas l'arrachement de grosses particules.

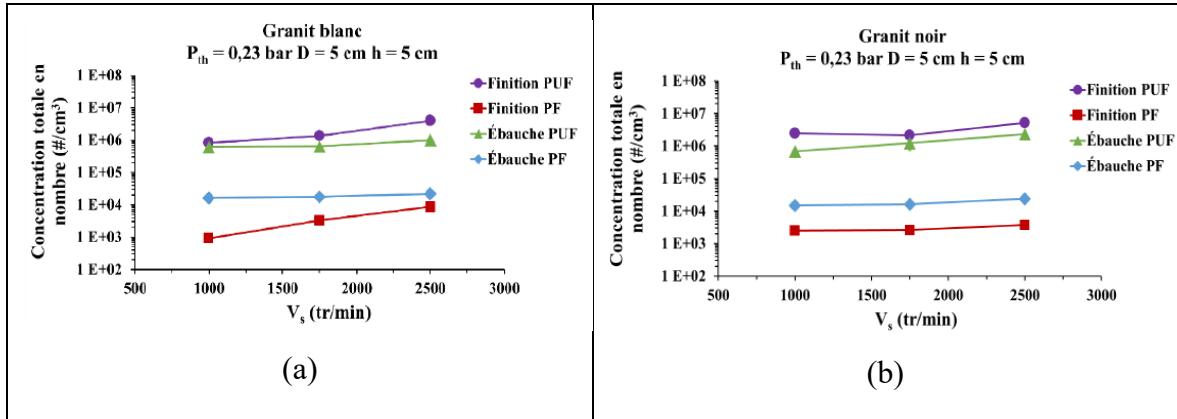


Figure 1.10 Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation en phase d'ébauche et de finition ; (a) granit blanc, (b) granit noir
Tirée de Bahloul et al. (2019)

L'étude de la finition des arêtes de granit a commencé avec des travaux réalisés dans le cadre d'un stage à l'ÉTS. Ces travaux ont abouti à la publication d'un premier article (Bahri et al. 2021) (Annexe I) qui portait sur l'étude des émissions des PF et des PUF, les efforts de coupe et la rugosité des surfaces lors du polissage des arêtes de granit noir et blanc. Mentionnons que dans cette étude, le contournage des échantillons de granit noir et blanc a été fait sur une seule arête de chaque échantillon, avec une séquence de passes de l'outil abrasif de grit croissant (6 outils ; grit de 45 à 3000) avec la forme arrondie concave de rayon 10 mm (Figure 1.11). Il a été démontré que la diminution des grosseurs d'abrasifs (augmentation des grit) diminue l'émission des PF, mais en contrepartie, elle augmente la génération des PUF. Comme tous les outils doivent être utilisés dans l'ordre pour obtenir un bon fini de surface brillant à la fin du procédé, l'émission des particules ne pourra pas être contrôlable par la taille des grains dans le cas des outils utilisés (Bahri, Songmene, Kouam, Samuel, & Samuel, 2021).

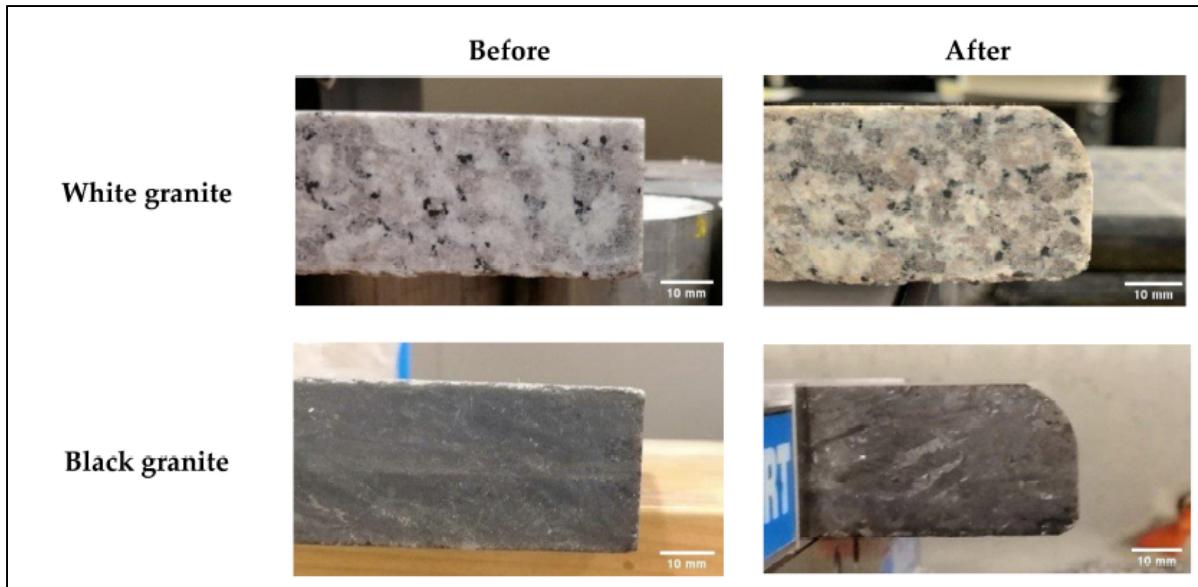


Figure 1.11 États « Avant / Après » des échantillons utilisés pour l'étude de la finition des arêtes de granit
 Tirée de Bahri et al. (2021)

Phillips et al. (2012) ont fait une étude sur 47 ateliers de fabrication des comptoirs dans trois zones métropolitaines d'Oklahoma. Parmi ces ateliers, 74 % ont déclaré utiliser principalement les méthodes à sec dans au moins une étape du processus de fabrication du comptoir, et seulement 9 % ont déclaré qu'ils utilisent des systèmes de collecte et de suppression de poussières. Les résultats de l'échantillonnage personnel de cette étude soulignent que les travailleurs sont à risque élevé que la VEMP de quartz respirable sur toute leur journée de travail soit au-dessus de la PEL. Ces travailleurs étaient exposés aux poussières de silice cristalline durant la fabrication des comptoirs en granit et en pierres artificielles à base de quartz, bien que les opérations à sec ne sont utilisées que dans une certaine mesure.

L'analyse des poussières respirables et des taux de quartz lors du procédé de polissage du granit blanc et noir a été élaborée aussi par Bahloul et al. (2019) en faisant des échantillonnages d'environ 8h à trois emplacements différents pendant les deux phases de polissage (ébauche et finition). Les concentrations massiques de la poussière respirable et du quartz représentés dans la Figure 1.12 étaient quasi constante pour les 3 positions de prélèvement, mais il était clair

que la phase d'ébauche du granit blanc a émis une plus grande masse de poussières respirable et de quartz comparé à la phase de finition. De plus, les concentrations massiques de quartz qui représentait 20 % de la poussière respirable en phase d'ébauche, dépassaient la VEMP pour la durée de 8h, ce qui rend l'exposition des travailleurs à ces poussières du granit blanc lors de cette phase se considère comme un risque sur leurs états de santé. Pour le granit noir, il a été montré qu'il n'émettait pas de quartz lors des deux phases de polissage, puisque ce matériau est faible en concentration de silice cristalline.

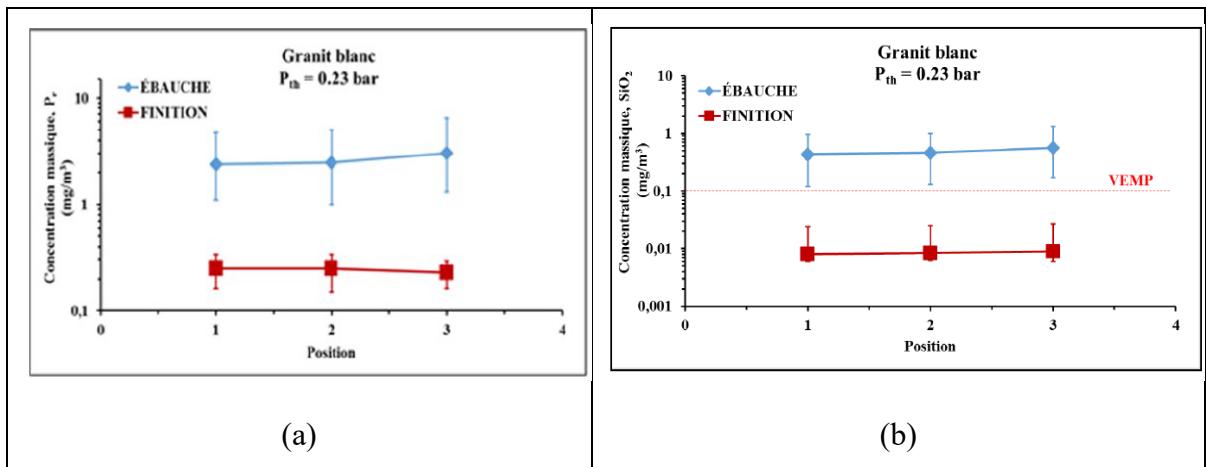


Figure 1.12 Concentration en masse de (a) la poussière respirable et (b) quartz, en fonction de la position de prélèvement pour le granit blanc

Tirée de Bahloul et al. (2019)

1.3.5 Les dispositifs de protection contre l'exposition aux poussières

Selon Grégory et al. (2012), la protection des travailleurs exposés aux poussières de quartz se fait par la suppression des produits et des procédés dangereux ou leur substitution en premier lieu. Si cette exposition est incontournable, des mesures strictes de prévention et de protection sont nécessaires pour faire face à ces risques, notamment celles prévues par les textes réglementaires. Par conséquent, la mise en place des protections collectives (isolement des tâches à hautes expositions au silice, captation des particules de poussières à la source, etc.), devient nécessaire en plus des ÉPI (masque FFP3, lunettes, etc.).

Les procédés de fabrications générateurs de grandes quantités de poussière comme le façonnage et le polissage des matériaux pierreux doivent faire l'objet de recherche et d'études menant à l'aménagement ou même la substitution en vue d'améliorer la qualité de l'air et les atmosphères de travail. Le deuxième article de la Loi sur la santé et la sécurité du travail indique : « l'élimination à la source même des dangers pour la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs ». Cette loi cite dans l'article 51 que pour atteindre cet objectif, l'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé de ses employés, dont :

- Développer des méthodes permettant le contrôle et l'élimination des risques pouvant affecter la santé et sécurité du travailleur.
- S'assurer que les émissions d'un contaminant ne mettent pas en danger la santé ni la sécurité de quiconque sur le milieu de travail.
- Former l'employé sur les risques qui l'entourent dans son milieu de travail, l'entraîner et le superviser afin qu'il ait l'habileté et les connaissances requises pour accomplir son travail de façon sécuritaire.

Avant d'effectuer les travaux, l'employeur doit évaluer les risques menaçant ses employés, à travers la vérification sur les procédés de travail et leurs émissions de poussières de silice cristalline (Côté, Djebbour, & Lafontaine, 2017). Une combinaison de contrôle technique, de pratiques industriels, d'équipements de protection, de formation des employés et d'autres mesures est nécessaire pour protéger les travailleurs contre une exposition excessive à la silice cristalline pendant la fabrication, la finition et l'installation des comptoirs en pierre (OSHA & NIOSH, 2015).

Le polissage des granits, qu'il soit manuel ou bien mécanique, exige une certaine précaution afin d'assurer aux travailleurs un minimum de sécurité et de bonnes conditions dans leurs ouvrages. Les normes de sécurité doivent être élaborées de façon à garantir non seulement la protection individuelle, mais aussi celle de toute l'équipe.

La CNESST exige de suivre une démarche de prévention contre l'exposition des travailleurs aux dangers. Pour cela, un guide des bonnes pratiques a été réalisé en collaboration entre la CNESST et l'IRSST pour la prévention de l'exposition des ouvriers aux poussières de quartz,

où les moyens de protection proposés consistaient généralement en des solutions de ventilation générale, de ventilation locale, de lubrification à l'eau et des équipements de protection individuelle (Goyer et al., 2010).

Une cabine ventilée a été conçue comme une solution en ventilation générale. Cette cabine peut avoir différents flux d'air (oblique, horizontal ou vertical) afin de diriger les particules vers une direction bien déterminée (Figure 1.13). Mais, cette solution n'était pas applicable sur le plan industriel, comme elle est encombrante, et surtout qu'il faut absolument une cabine pour chaque poste, ce qui n'est pas à la portée des entreprises de transformation de granit québécoises, considérées comme des PME.

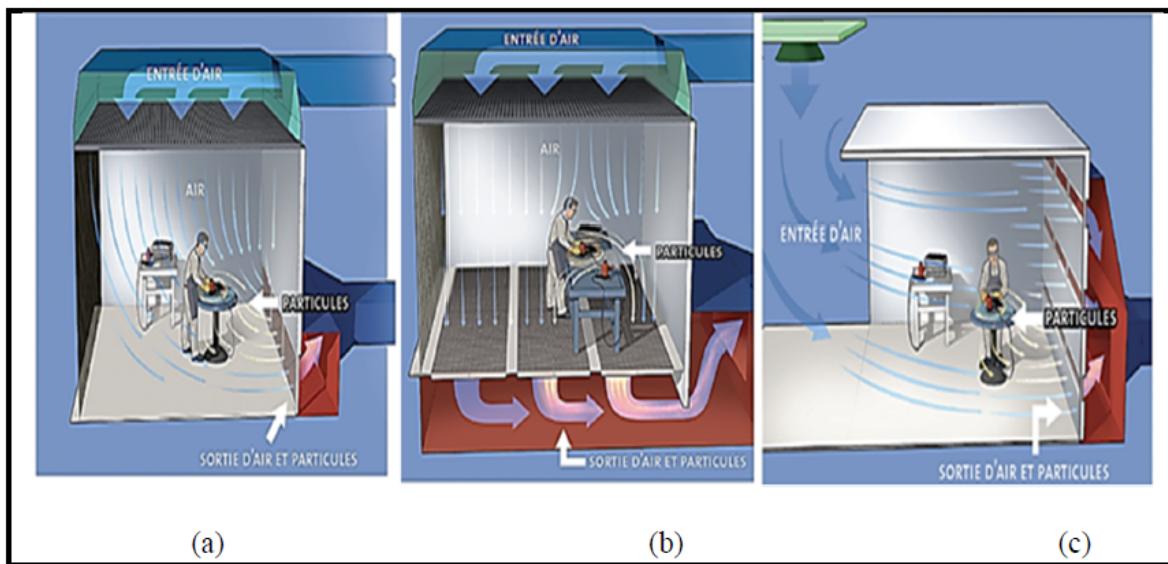


Figure 1.13 Cabine ventilée avec flux d'air (a) oblique, (b) vertical, (c) horizontal
Tirée de Goyer et al. (2010)

Quant à la ventilation locale, un aspirateur placé juste à côté de la source d'émission des particules, a été conçue afin de permettre de capter le maximum de poussière, mais bien évidemment cette solution ne permettra pas la captation de toutes les particules émises (Figure 1.14). Cependant, il faut éviter de créer des courants d'air qui peuvent perturber la captation de particules, mais s'assurer par contre de favoriser les techniques de travail qui orientent la

projection des poussières directement vers le système de captation tel que l'ajustement de l'angle d'attaque des outils (Goyer et al., 2010).



Figure 1.14 Ventilation locale et influence d'air sur la captation
Tirée de Goyer et al. (2010)

Parmi les autres moyens de protection contre l'exposition aux poussières les plus utilisés, on trouve la ventilation locale par aspiration (LEV) qui est un système d'ingénierie qui capte la poussière à la source ce qui minimise le risque que les travailleurs respirent de l'air contaminé. Ce système consiste à installer directement sur l'outil de polissage un carter ou une hotte d'aspiration de poussière. Dans une étude faite sur le sciage humide des comptoirs de granit, les travailleurs étaient exposés à des taux de 70 à 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de silice cristalline. Après l'utilisation des moyens de contrôle dont les systèmes LEV, une réduction de l'exposition au quartz à un taux de 15 à 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été constatée (OSHA & NIOSH, 2015). Cela confirme les travaux de Cooper et al. (2014), qui ont indiqué que l'installation d'un système LEV sur les scies circulaires portatives avec un système de lubrification semble être une mesure simple, peu coûteuse et efficace pour réduire les expositions au silice cristalline lors de la fabrication des comptoirs en pierre. La concentration massique moyenne des particules respirables était inférieure de 92 % en ajoutant un système LEV comparant à une scie uniquement lubrifiée. Une estimation de réduction de 95 % de l'exposition aux quartz et aux poussières respirables en passant des procédés non-contrôlés à l'utilisation des systèmes de LEV lors du découpage

des blocs de pierre a été faite par Li et al. (2019). Quant aux opérations de polissage, la réduction a atteint 98 % et 99 %.

La protection individuelle amène les ouvriers lors du polissage à porter des équipements de protection individuelle (EPI) tels que ; des lunettes de sécurité, des gants de sécurité, des masques anti-poussières et une protection faciale supplémentaire si les conditions de polissage sont sévères. De même, le personnel effectuant les opérations de polissage doit recevoir une formation sur l'utilisation correcte de toutes les machines et ne doit jamais excéder la vitesse maximale indiquée sur les outils abrasifs (MIGAN, 2015).

1.4 Productivité et qualité de surface obtenue par polissage

1.4.1 États de surface

Les propriétés d'une pièce comme sa résistance à l'usure, à la fatigue, à la corrosion, ainsi que son esthétique sont influencées par son état de surface. En effet, les états de surface des organes d'une machine ont une influence importante sur le bon fonctionnement d'un mécanisme. Les surfaces obtenues dans la fabrication des pièces mécaniques présentent souvent des irrégularités et imperfections. Mais, les produits de consommation exigent un niveau plus élevé de qualité de surface ainsi qu'une bonne précision dimensionnelle, même si les surfaces parfaites sont quasiment impossibles à avoir (MIGAN, 2015).

La mesure de la qualité de surface d'une pièce peut se faire par plusieurs paramètres (Figure 1.15) comme :

- La rugosité moyenne arithmétique (R_a) ; qui représente la moyenne des déviations de la hauteur du profil par rapport à la ligne moyenne.
- La hauteur totale du profil (R_t)
- La rugosité moyenne quadratique (R_{qz}) ; qui est la moyenne des moyennes de racine carrée des ordonnées de profil de rugosité.

- La profondeur maximale de vallée du profil (R_v) ; qui est la valeur de profondeur maximale de la vallée sous la ligne moyenne, dans une seule longueur d'échantillonnage.
- La hauteur des crêtes du profil (R_p) ; qui est la hauteur maximale du pic au-dessus de la ligne moyenne, dans une même longueur d'échantillonnage.
- La hauteur de pics éliminés (R_{pk}) ; qui représente la hauteur moyenne des pics dépassant la partie centrale du profil.
- La hauteur moyenne du profil (R_z) ; qui est la hauteur maximale de la crête à la vallée du profil, dans une longueur d'échantillonnage unique.

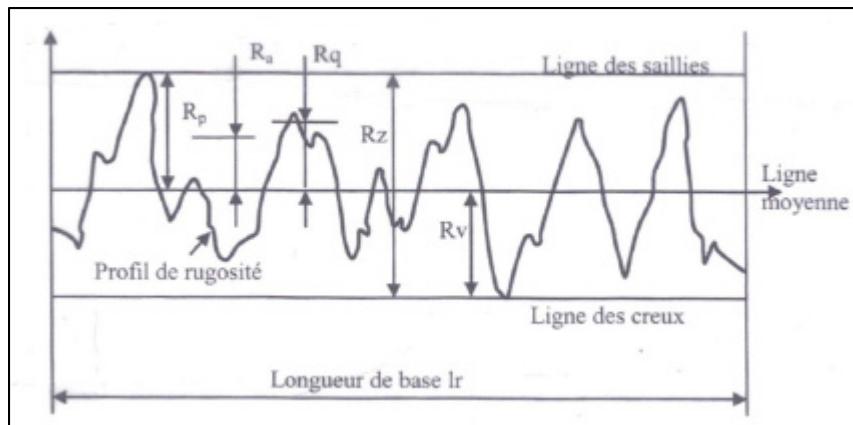


Figure 1.15 Paramètres d'état de surface
Tirée de Ben Mhenni (2007)

La qualité du polissage peut être définie par plusieurs paramètres tels que la planéité, le lustre, la porosité résiduelle ainsi que la résistance à l'usure, au vieillissement, et aux agents chimiques.

Lors du polissage du granit, les phases d'ébauche et de finition sont toutes les deux essentielles pour obtenir des pièces de bonne qualité. Par conséquent, le processus ne peut être optimisé si l'une des deux phases (la phase d'ébauche réalisée avec une granulométrie grossière ou la phase de finition réalisée avec une granulométrie fine) est éliminée (Saidi et al., 2019).

Les courbes données dans la Figure 1.16 nous montrent une variation de la rugosité des différents types de granit (blanc, noir et rouge) à travers les différentes étapes de polissage en changeant à chaque fois la taille des grains d'abrasif (grit). Le mécanisme d'enlèvement de matière avec les premiers outils d'ébauche était la rupture fragile où la quantité de matière enlevée est importante. Cela justifie l'état de surface rugueuse obtenue et la grande variation de la rugosité. Lors de la finition, en utilisant des outils de petites tailles de grains d'abrasif, le mécanisme d'enlèvement de matière devient une rupture ductile caractérisée par une légère quantité de matière enlevée donnant lieu à une surface lisse et brillante avec de petites variations de la rugosité (Xu, Huang, & Li, 2003).

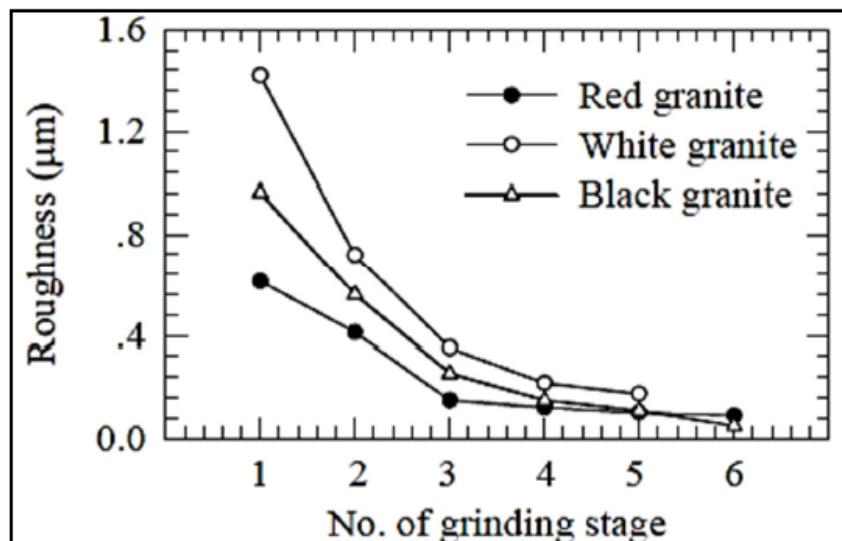


Figure 1.16 Variation de la rugosité en fonction des tailles de grit
Tirée de Xu et al. (2003)

Saïdi et al. (2015) ont étudié l'effet des tailles de grains d'abrasifs sur l'état de surface des granits et ils ont proposé une relation exponentielle entre la rugosité Ra et la taille des grains d'abrasif G avec de bons coefficients de corrélation. La rugosité Ra du granit blanc et noir en fonction de la taille des grit avaient respectivement un coefficient R^2 allant jusqu'à 92 % et 93 %. Cette relation s'écrit sous la forme :

$$Ra = a * G^{-n} \quad (1.3)$$

Avec ;

Tableau 1.3 Valeurs des constantes « a » et « n ».

Tiré de Saidi et al. (2015)

Matériaux	a	n
Granit blanc (52.11% Silicium)	78.40	0.94
Granit noir (10.94% Silicium)	54.92	0.82

On remarque clairement dans le Tableau 1.3 que les coefficients « a » et « n » dépendent de la quantité de silice contenue dans le matériau. Par conséquent, une grande quantité de silice dans le granit semble améliorer légèrement l'état de surface pendant le processus de polissage, mais cela doit être encore étudié plus profondément.

L'étude de Kouam et al. (2013) a révélé que la rugosité moyenne arithmétique Ra du granit (noir et blanc) diminue au fur et à mesure que la vitesse de coupe augmente. Ainsi, un meilleur état de surface fini est obtenu avec l'augmentation de la vitesse de coupe (Figure 1.17), mais il ne faut pas aller très loin, et toujours tenir compte de la capacité de l'outil à supporter les grandes vitesses, ainsi qu'aux émissions de poussières causées par ces vitesses.

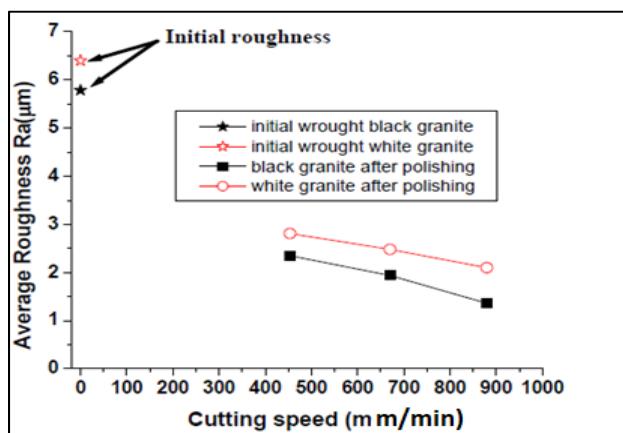


Figure 1.17 Rugosité moyenne Ra à différentes vitesses de coupe du granit blanc et noir
Tirée de Kouam et al. (2013)

L'étude de Bahri et al. (2021) a permis de révéler les images illustrées sur la Figure 1.18, indiquant l'évolution de la rugosité dans le procédé de polissage lubrifié d'une arête de granit noir et blanc, qui nous permet de voir clairement l'effet de la grandeur des grains d'abrasif de chaque outil.

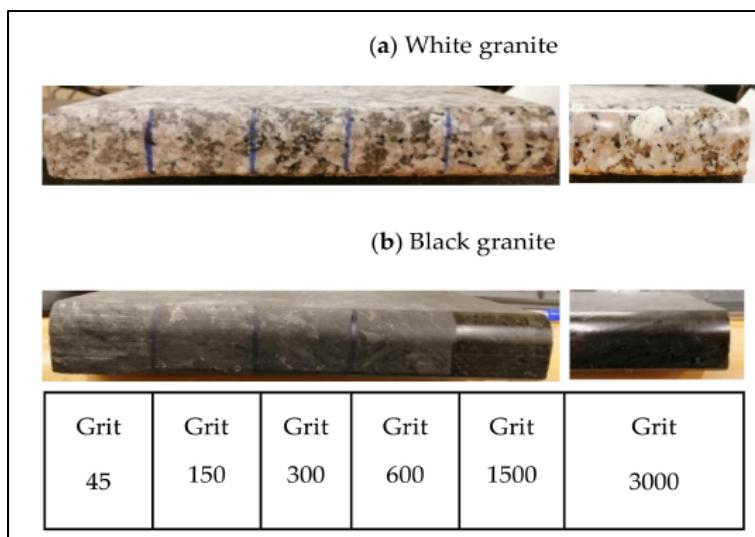


Figure 1.18 Résultats des finis de surface de l'arête des échantillons de granit noir et blanc après un polissage lubrifié
Tirée de Bahri et al. (2021)

Le polissage à sec a été réalisé aussi dans la même étude, mais seulement avec les outils d'ébauche et de demi-finition, puisque les outils de finition (grit 1500 et 3000) ne supportaient pas le polissage à sec. Par conséquent, les essais n'ont été réalisés que sur un seul échantillon de granit blanc et avec les 4 outils métalliques de grit 45, 150, 300 et 600 qui sont capables de travailler sans la lubrification.

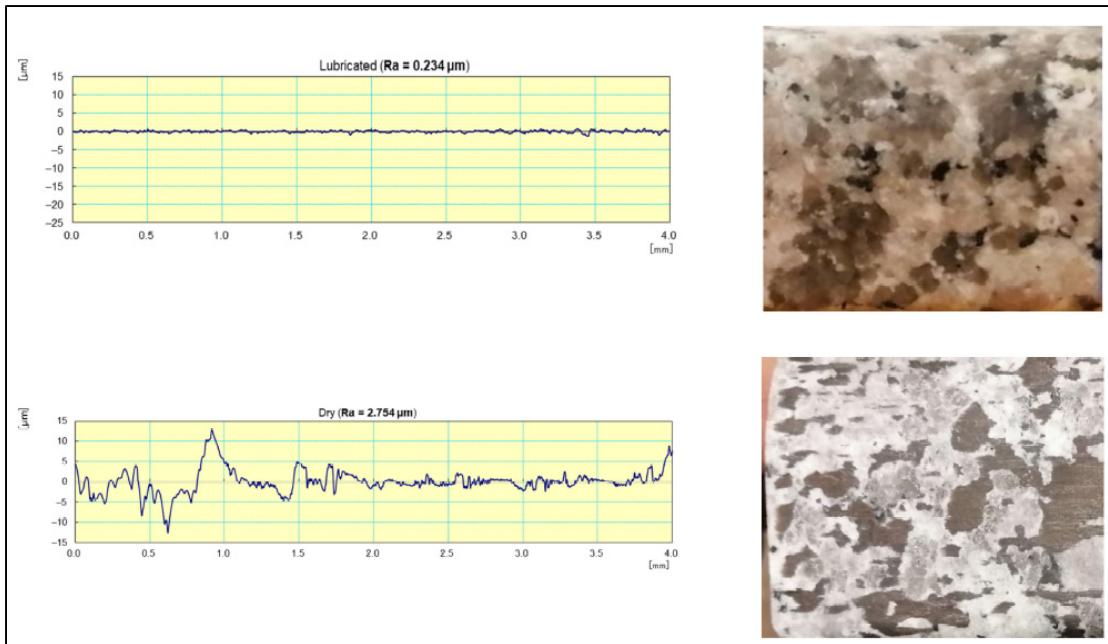


Figure 1.19 Caractéristiques de l’arête de granit blanc polie jusqu’au grit 600 avec et sans lubrification
Tirée de Bahri et al. (2021)

On voit très bien sur les résultats élaborés dans la Figure 1.19 qu’il y avait une large différence allant jusqu’à une valeur moyenne de rugosité arithmétique plus que 10 fois plus grandes dans le polissage à sec, par rapport à celle obtenue en polissage lubrifié. De plus, les profils de surface confirment ces écarts de Ra en voyant des pics au niveau du profil de polissage à sec, ainsi que sur les images réelles où la brillance sur l’arête polie avec lubrification est beaucoup plus importante que celle polie à sec.

La qualité de surface obtenue par le procédé de polissage peut être déterminée par plusieurs paramètres, parmi lesquels on trouve essentiellement deux qui sont inversement proportionnels. Ces paramètres sont la rugosité qui diminue, et la brillance qui augmente tout au long du processus. D’après Bahri et al. (2021), on a déduit que la rugosité de la surface lors de la finition des arêtes de granit est plus influencée par la lubrification et la grosseur des grains d’abrasifs, plutôt que par les autres facteurs étudiés (vitesse de coupe, d’avance, type de granit...).

1.4.2 Productivité

La productivité est définie par la capacité de production d'un intrant ou d'un groupe d'intrants dans une période de temps donnée (Da Silva & Santugini, 2009). Elle reflète alors l'efficacité avec laquelle les ressources sont transformées en production, et elle se calcule à partir d'un ratio qui met la production en relation avec un ou plusieurs facteurs de production mis en œuvre pour la réaliser.

La productivité et l'efficacité sont les deux préoccupations majeures dans le domaine de l'usinage de la pierre. Dans une étude menée par Gunes Yilmaz (2016) sur le sciage circulaire d'une pièce de granit, il a examiné la distribution et la taille des copeaux générés en fonction des paramètres de productivité et d'efficacité, tel que le taux d'enlèvement de matière Q_w . L'augmentation de ce paramètre à travers des profondeurs de coupe et des vitesses d'avance plus élevées, a donné des copeaux plus grossiers. Un nombre croissant de ces copeaux, dans une opération de sciage pourrait être un signe d'une amélioration de l'efficacité du processus.

En polissage, une bonne combinaison du type de grains de diamant utilisés et de la dureté de la matrice, permet un polissage productif et de qualité, ainsi qu'une longue durée de vie de l'outil. En effet, il est nécessaire de savoir comment le type de grains de diamant, la dureté de la matrice et le refroidissement à l'eau influencent la qualité et la productivité du procédé (Kenda & Kopa, 2009).

D'après L. K. Gillespie (2007), le fait de ne pas comprendre et de ne pas répondre aux véritables besoins de pointe dans le travail des bords et d'ébavurage des métaux, un excès de zèle qui peut coûter des dizaines de millions de dollars chaque année peut avoir lieu. Il peut en résulter des rayures, des coupures, des déchirures, des défaillances de produits, des arrêts de production, des rebut excessifs et des retards de cycles. Une autre étude économique plus approfondie sur l'ébavurage a été réalisée indiquant que les coûts d'ébavurage peuvent aller de moins d'un centime par pièce à plusieurs dollars par pièce, dans les opérations automatiques ou semi-automatiques (Laroux K. Gillespie, 2009). Pour réduire ces coûts, il y a cinq approches qui sont :

- Amélioration de la conception du produit
- Éviter au maximum possible les bavures
- Minimiser les propriétés des bavures
- Éliminer les bavures pendant le cycle d'usinage
- Développer des modifications innovantes des processus existants.

Afin d'améliorer le procédé d'ébavurage dans les usines, il faut comprendre les coûts des bavures sur le site de l'usine, dont les coûts des équipements et des outils, le coût de la main d'œuvre, les coûts de garantie des défaillances dues à des bavures insuffisamment traitées, etc. Laroux K. Gillespie (2009) fournit une estimation approximative du coût de l'ébavurage manuel, en se basant sur le fait que l'équivalent de 3 % des machinistes effectuent la finition des arêtes à la main. Le modèle développé permet d'estimer les coûts d'ébavurage annuelle (y) en fonction du nombre d'usiniers (N_e) et la moyenne de leurs salaires annuelles (S_{moy}) comme indiqué ci-dessous :

$$y = 0.03 * N_e * S_{moy} \quad (1.4)$$

Prenons comme exemple une entreprise qui emploie 50 opérateurs machinistes, chacun avec un salaire annuel de 50 000 \$. Le coût annuel des opérations d'ébavurage dans cette entreprise sera à l'ordre de 75 000 \$, soit le salaire annuel de 1.5 opérateurs.

La rentabilité du processus d'ébavurage est fonction de plusieurs paramètres tels que; la qualité de l'arête finie qui doit satisfaire aux exigences de clients, les quantités prévues pour ébavurage, les temps de cycle assignés à ces opérations, ainsi que les problèmes reliés aux santé, sécurité et environnement.

Une enquête a été réalisée sur 200 employés allemands concernant les effets de la fixation d'objectifs sur le respect des règles de sécurité par les employés. Les résultats ont révélé que la présence de récompenses pour la réalisation des objectifs de productivité est fortement associée à une diminution du respect des règles de sécurité (Mayer, Gerber, McDermott, Volkamer, & Vogt, 2017). Il vaut mieux alors fixer les objectifs de santé et sécurité pour atténuer les effets

néfastes dus à la fixation des objectifs de productivité. C'est pour cela qu'il demeure nécessaire de lier la productivité à la sécurité. En assurant un milieu de travail sain et sécuritaire, on pourra diminuer les coûts associés aux défaillances au niveau de la sécurité des travailleurs, causées par un excès d'émission de particules par exemple, quand la stratégie suivie dans l'industrie est l'augmentation continue de la productivité.

1.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons procédé par une fouille dans la littérature. Plusieurs travaux de recherche sur l'axe de polissage des granits ont été trouvés et nous ont permis de ressortir les informations pertinentes, mais la finition des bords (des arêtes) n'était pas suffisamment présente.

Les travaux présentés dans cette revue de littérature nous ont aidé à mieux saisir les mécanismes de génération de particules et les facteurs qui régissent le fini des surfaces lors du polissage des granits tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la lubrification, etc.

L'exposition prolongée des travailleurs aux poussières de quartz issues des pièces de granit peut avoir des effets néfastes sur leurs santés une fois ces poussières atteignent les poumons. Pour cela, le respect des réglementations sur ces émissions devient une obligation dans chaque industrie qui émet ce genre de particules lors de son processus de fabrication ce qui a permis d'accroître le nombre d'études et recherches visant à chercher encore à réduire ces émissions lors du polissage de granit.

Notre projet a pour objectif la recherche des méthodes de réduction des émissions de particules lors de la finition des arêtes de granit par polissage, qui rendent ce procédé plus sécurisé et compétitif. Il permettra de continuer l'étude sur la recherche des facteurs pouvant avoir des effets sur les émissions de poussières ainsi que sur le fini de surface, avec un nouveau facteur qui s'ajoute à la liste qui est la forme de l'arête obtenue.

La procédure expérimentale adoptée pour réaliser nos objectifs fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1 Introduction

Cette partie sera consacrée à la procédure expérimentale des essais réalisés au sein de l'atelier mécanique de l'ÉTS. Les conditions des expériences sont déterminées de façon qui nous permette de voir l'influence des paramètres de polissage tels que les vitesses d'avance, les vitesses de rotation de la broche, la forme de l'outil et les débits de lubrification sur l'émission des poussières ainsi que sur la qualité des finis de surface lors du polissage des arêtes de granit blanc. Le choix des modèles statistiques permettra l'analyse et l'optimisation de ces facteurs dans le but de l'obtention des solutions qui réduisent les émissions de particules tout en gardant le bon fini de surface demandé.

2.2 Description du plan d'expérience

Dans la présente étude, les paramètres de polissage ont été variés lors de l'expérimentation sur les pièces de granit blanc afin d'étudier l'influence de ces paramètres sur la génération des particules ainsi que sur la rugosité des surfaces. Pour le faire, un plan d'expérience factoriel complet a été généré variant les vitesses de coupe, les vitesses d'avance et les débits de lubrification lors du procédé de polissage de l'arête du granit blanc contenant 41.38 % de quartz (Songmene et al., 2018) en utilisant deux formes d'arête (chanfrein et concave) et lors des phases de polissage (ébauche et finition). Le Tableau 2.1 et le Tableau 2.2 décrivent les paramètres d'entrée-sortie du processus de polissage de l'arête de granit blanc étudiés.

Tableau 2.1 Les paramètres d'entrée du procédé de polissage de l'arête de granit blanc

Facteur	Niveaux		
Forme de l'arête	Chanfrein 3 mm x 45°		Concave R3 mm
Taille de grit	150	600	1500
Vitesse de rotation N [tr/min]	1500	2500	3500
Vitesse d'avance Vf [mm/min]	500	1000	1500
Débit de lubrification Qw [ml/min]	20	40	60

Tableau 2.2 Les variables de réponse du procédé de polissage de l'arête de granit blanc

Réponse		Description
Émission des particules fines	Cn_PF [#/cm³]	Concentration en nombre des particules fines
	Cs_PF [µm²/cm³]	Concentration en surface spécifique des particules fines
	Cm_PF [mg/m³]	Concentration en masse » des particules fines
Rugosité de surface	Ra [µm]	Écart moyen arithmétique du profil de surface balayé
	Rt [µm]	Hauteur totale du profil de surface balayé

Un plan d'expérience par bloc selon (Forme d'arête – Taille de grit) a été réalisé pour les 6 configurations suivantes : Chanfrein-G150, Chanfrein-G600, Chanfrein-G1500, Concave-G150, Concave-G600 et Concave-G1500. Pour chaque bloc, un plan factoriel complet a été généré variant les 3 paramètres (Vitesse de rotation, vitesse d'avance et débit de lubrification)

à 3 niveaux avec un point milieu pour chacun, donnant lieu à un nombre total d'essai égal à 27 pour chaque configuration (bloc), déterminé par la formule suivante :

$$nbr\ d'essais = (nbr\ de\ niveaux)^{(nbr\ paramètres)} = 3^3 = 27\ essais \quad (2.1)$$

Le logiciel Minitab 19.0 a été utilisé pour la création du plan factoriel complet de 3 facteurs à 3 niveaux utilisé pour chaque configuration. Comme le réglage du débit de lubrification était manuel, trop délicat et lent à faire, et vu le nombre d'essai très grand dans cette étude, une randomisation partielle des essais a été faite selon ce paramètre pour un déroulement plus rapide des essais. Rappelons que la randomisation des essais donne une meilleure analyse des données puisqu'elle réduit les effets de variables cachées comme les tendances par rapport au temps. Le tableau de la séquence des essais réalisés est illustré dans l'Annexe II.

2.3 Environnement expérimental

L'environnement expérimental comprend l'ensemble des équipements, des machines, des échantillons de granit ainsi que les outils nécessaires à la réalisation des essais dans l'atelier.

2.3.1 Machine de polissage

Le polissage des arêtes de granit était réalisé sur une machine à commande numérique CNC à 3 axes, modèle K2X10 du fabricant Huron (Figure 2.1). Cette machine peut exécuter des opérations très précises avec une grande qualité d'état de surface grâce à une broche qui peut atteindre 28 000 tr/min de vitesse de rotation développant une puissance de 40 kW avec un couple de 50 N.m et une avance allant jusqu'à 30 m/min. Elle peut travailler à sec sans l'utilisation d'aucun lubrifiant ou en mode de lubrification abondante avec un débit allant jusqu'à 30 L/min à une pression de 3 bars. Elle est munie d'un système d'aspiration de poussière et d'un système d'aspiration de brouillard d'huile.



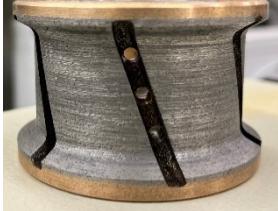
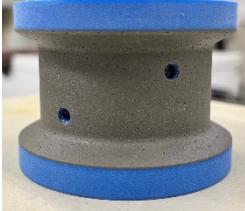
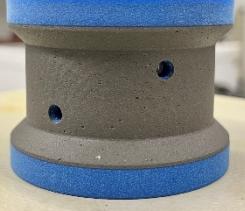
Figure 2.1 Machine de polissage CNC Huron K2X10

2.3.2 Les outils de polissage

Le choix des outils utilisés s'est basé sur une étude déjà élaborée dans la Section 1.2.5. Après une analyse faite sur les différentes formes des outils disponibles, une décision a été prise sur la forme chanfreinée (3 mm x 45°) et la forme arrondie concave (R3 mm). Pour chaque forme, il est nécessaire d'avoir un set d'outils avec les différentes grosseurs de grains pour donner à l'arête de l'échantillon de granit la forme désirée avec un bel aspect visuel. Ce set d'outil se compose de cinq outils de forme de différentes tailles de grit (Grit 45, 150, 300, 600 et 1500) qui transforment une arête vive à l'état brut en une arête polie brillante ayant la forme de l'outil. Le Tableau 2.3 montre tous les outils utilisés durant tout le processus avec la grosseur des grit de chacun. En général, les granulométries utilisées en fonction des trois étapes d'une opération d'usinage/polissage étaient les suivant :

- Ébauche : Grit 45 et 150.
- Semi-finition : Grit 300 et 600
- Finition : Grit 1500

Tableau 2.3 Images des outils utilisés

Taille de grit	Formes réalisées	
	Concave	Chanfrein
45		
150		
300		
600		
1500		

2.3.3 Echantillon de granit

Dans cette étude, l'échantillon de granit utilisé est un carré de granit blanc de dimensions 200x200x30 mm³ (Figure 2.2), de masse volumique égale à 2667 kg/m³ avec une teneur en silice cristalline de 41.38 % (Songmene et al., 2018) fournis par l'entreprise Lacroix Granit dans le cadre des études munies sur le procédé de polissage du granit.



Figure 2.2 Echantillon de granit blanc

La raison pour laquelle seulement le granit blanc a été étudié dans ce travail était principalement sa teneur élevée en silice cristalline (Bahloul et al., 2019 ; Bahri et al., 2021 ; Kouam et al., 2013 ; Saidi et al., 2018 ; V. Songmene et al., 2018), comparant aux autres types de granit, ce qui le rend un matériau critique pour la sécurité des travailleurs en utilisation dans l'industrie de granit.

2.3.4 Système de contrôle du débit de lubrification MQL

La technique d'usinage/polissage à quantité minimale de lubrifiant (MQL) consiste à fournir une lubrification avec des quantités très petites sur les endroits concernés (contact outil/pièce). Le lubrifiant utilisé est Novamet 100 (Oemeta, USA) qui est utilisé pour l'usinage, formage et le polissage des métaux ferreux et non ferreux, grâce à sa bonne protection contre la corrosion et sa bonne stabilité microbiologique. La lubrification se fait par la projection de microgouttelettes issues des tubes d'arrosage qui avaient deux buses de sortie ; une buse pour

le passage du lubrifiant, et une autre buse pour le passage de l'air comprimé. Le système MQL utilisé comprend 4 tuyaux de sortie (Figure 2.3.a), à travers lesquels se faisait le réglage du débit désiré, comme suit :

- Pour le débit 20 ml/min : seulement deux (2) tuyaux ont été utilisés, chacun réglé sur un débit de 10 ml/min
- Pour le débit 40 ml/min : quatre (4) tuyaux ont été utilisés, chacun réglé sur un débit de 10 ml/min
- Pour le débit 60 ml/min : quatre (4) tuyaux ont été utilisés, chacun réglé sur un débit de 15 ml/min

Le réglage du débit se fait avant le passage de l'air comprimé par le tuyau à travers la mesure d'une quantité de lubrifiant sortante de la buse par une durée de temps (chronométrage). Les buses sont équipées d'un potentiomètre qui permet d'agir sur la quantité du liquide sortante (Figure 2.3.b).

Il a été montré que lors de la découpe des métaux, cette méthode de lubrification permet d'avoir contrairement à la méthode à sec, une amélioration de l'état de fini de surface, une meilleure durée de vie des outils utilisés, et de point de vue économique la diminution d'utilisation des fluides de coupes qui sont considérés couteux et difficiles à recycler (Khettabi, 2009).

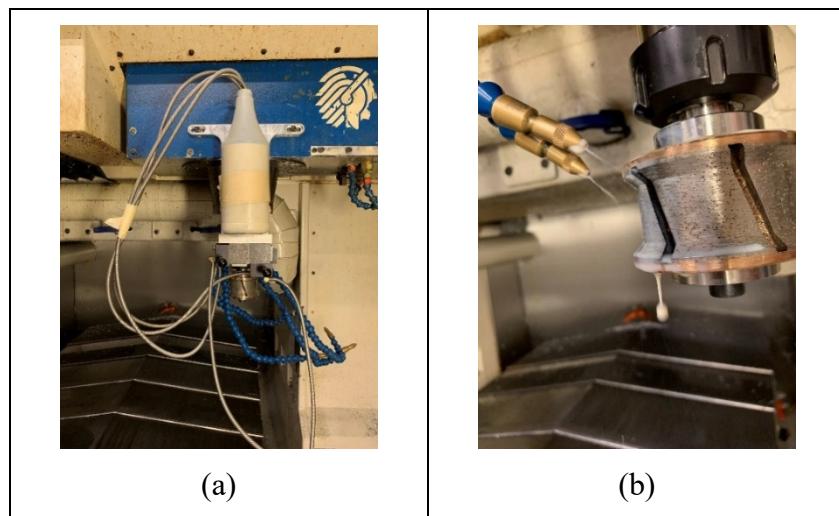


Figure 2.3 Système de lubrification MQL ;
(a) Montage, (b) Micro-pulvérisation.

2.3.5 Appareils de captation des particules

Durant le procédé de polissage, l'utilisation du spectromètre APS (Aerodynamic Particle Sizer) a permis la captation des particules à l'échelle micrométrique, ayant une taille variant de 0.5 à 20 μm (Figure 2.4-a). Le SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), quant à lui, mesure la distribution en taille de particules nanométriques de 2.5 à 333 nm en utilisant la technique de détection de la mobilité électrique des particules (Figure 2.4-b). La durée de collecte des données a été fixée à 50 secondes pour l'APS et le SMPS dans tous les essais réalisés. A la fin du temps d'échantillonnage, ces deux équipements fournissent des données consistant en des concentrations de particules (en nombre, en masse et en surface spécifique) en fonction des diamètres aérodynamiques des particules. La conversion du diamètre aérodynamique (D_a) mesuré par la machine au diamètre géométrique des particules (D_p) se fait à travers l'équation suivante (TSI, 2006):

$$D_p = D_a \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (2.2)$$

Avec ρ_0 est la densité unitaire (1 g/cm³) et ρ est la densité du matériau (granit).

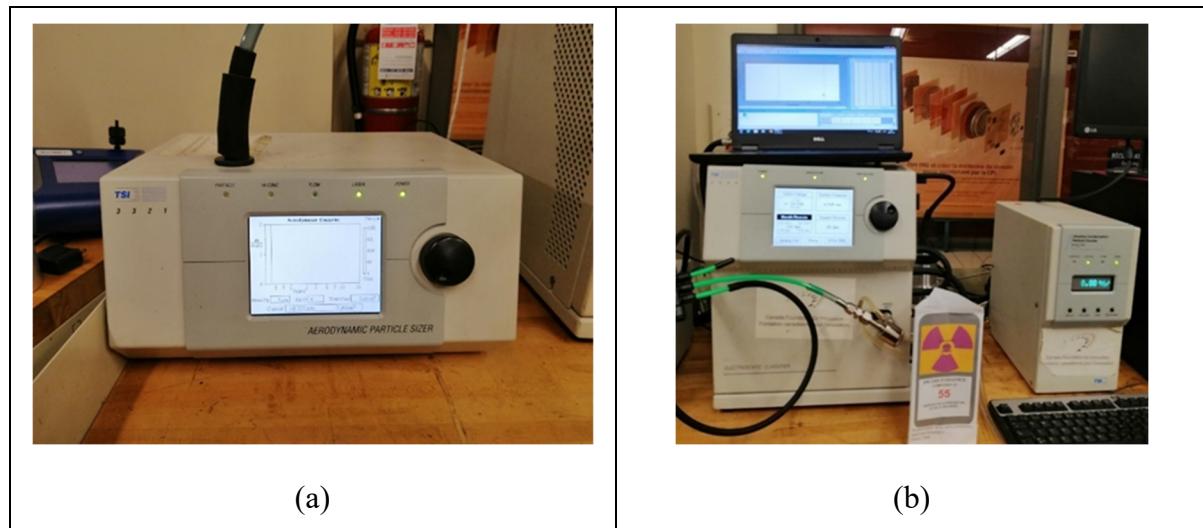


Figure 2.4 Appareils de captation des particules ; (a) APS, (b) SMPS

2.3.6 Appareils de mesure de rugosité

La rugosité de surface était mesurée à l'aide d'un profilomètre mobile de type Surftest SJ-210 de Mitutoyo (Figure 2.5-a) qui est équipé d'un palpeur faisant un balayage de la surface et génère les différentes valeurs de rugosité de la surface du matériau (Ra, Rt, Rq, Rz, etc.). Cet équipement a permis de faciliter la tâche de mesure des valeurs de rugosité après chaque essai réalisé à l'aide d'un gabarit qui a été conçu dans l'atelier de l'ÉTS (Figure 2.5-b). Afin de s'assurer de la bonne mesure des valeurs de rugosité, une validation a été faite à travers l'utilisation du Surftest SJ-410 (Figure 2.5-c) à un certain nombre d'essai durant le processus. La courbe illustrée à la Figure 2.5-d a été générée à cet effet montrant les valeurs mesurées par les deux équipements aux mêmes points de la surface polie avec les différentes tailles de grit en utilisant une vitesse $N = 2500$ tr/min, une avance $Vf = 1000$ mm/min et une lubrification abondante. Cet équipement a permis de générer en plus des différentes valeurs de rugosité, avec plus de précision, le profil de surface balayé. Avant de commencer à prendre les mesures, les appareils ont été calibrés à travers un étalon de rugosité $Ra = 2.95 \mu\text{m}$. Selon la norme ISO-4287-1997, la longueur d'échantillonnage (λ_c) a été varié en fonction de la rugosité de la surface mesurée, comme indiqué dans le Tableau 2.4.

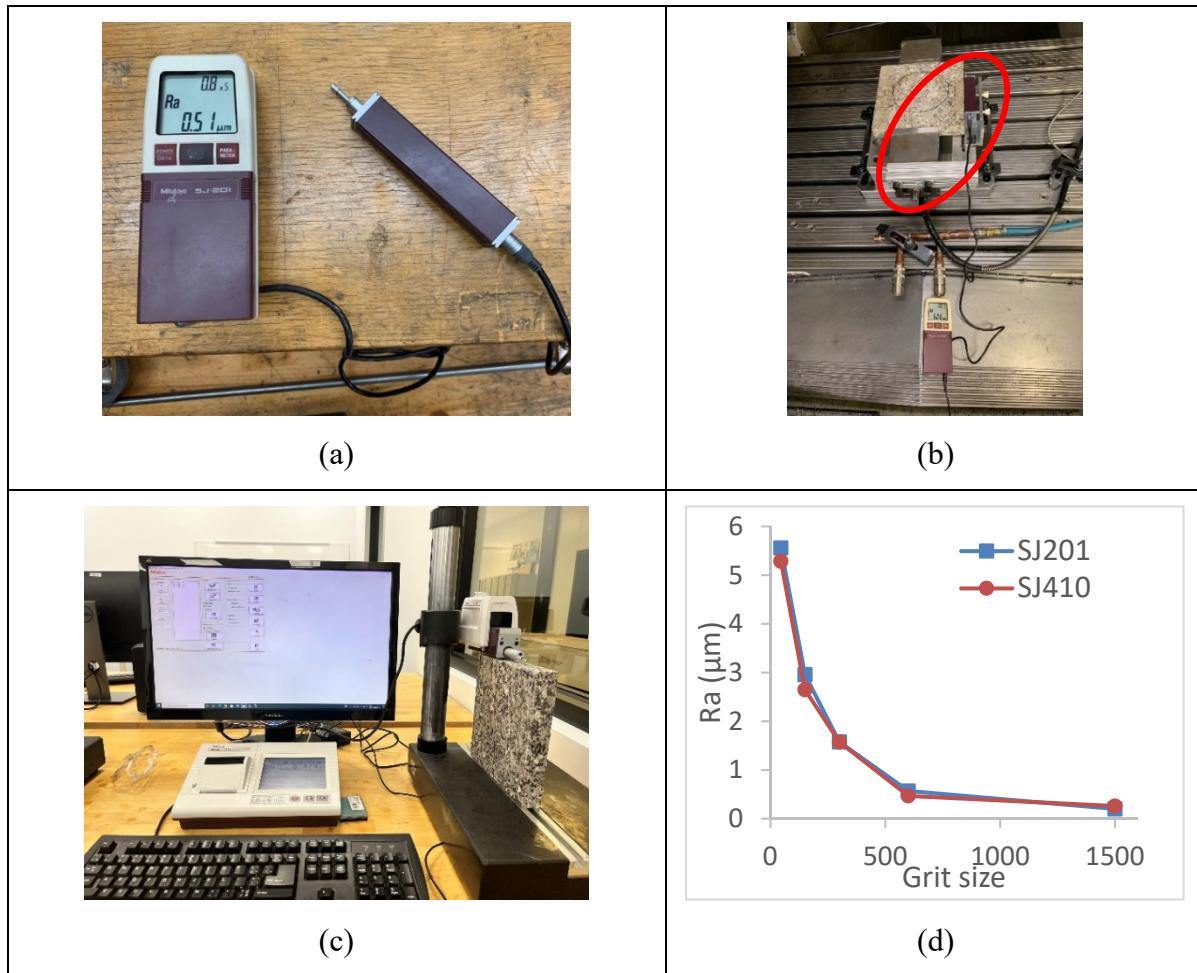


Figure 2.5 (a) Mitutoyo Surftest SJ-201, (b) Gabarit de montage du rugosimètre sur la machine de polissage, (c) Mitutoyo Surftest SJ-410, (d) Courbe de validation des mesures de rugosité

Tableau 2.4 Longueur d'échantillonnage et longueur d'évaluation standard pour la mesure de Ra à partir de profils de rugosité non périodiques
Tiré de Mitutoyo Corporation (2004)

Ra (µm)	Longueur d'échantillonnage (λ_c) (mm)	Longueur d'évaluation ($\lambda_{c,n}$) (mm)
$0.006 < Ra \leq 0.02$	0.08	0.4
$0.02 < Ra \leq 0.1$	0.25	1.25
$0.1 < Ra \leq 2$	0.8	4
$2 < Ra \leq 10$	2.5	12.5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

2.4 Protocole expérimental

Le protocole expérimental commence par la fixation de la pièce de granit sur la table de la machine de polissage CNC et le montage de l'outil de forme concave grit 45 sur le porte outil afin de faire l'essai de préparation de l'arête. Le tuyau d'aspiration des particules a été installé à une distance fixe $D = 120$ mm et une hauteur $H = 0$ mm de l'outil de polissage pour tous les essais comme indiqué dans la Figure 2.6.

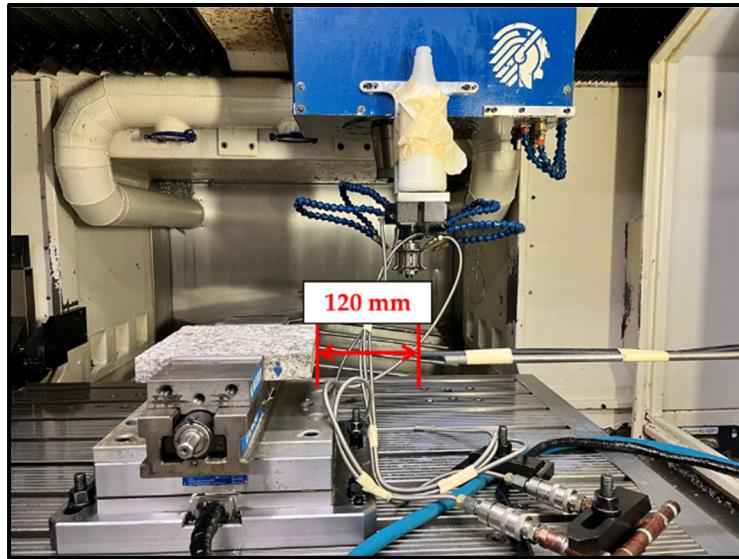


Figure 2.6 Détails du montage sur la machine de polissage

Une seule pièce de granit a été utilisée pour la réalisation des essais comme dans le plan d'expérience. Les deux formes, chanfrein et concave, ont été faites sur deux arêtes parallèles de la même pièce de granit. A une profondeur de passe de 0.1 mm, l'outil passe par une arête brute trois fois de suite avec des paramètres de coupe de l'essai d'ordre 5 du plan d'expérience ($N = 3500$ tr/min ; $Vf = 1500$ mm/min ; $Qw = 20$ ml/min).

Par la suite, un changement d'outil vers le grit 150 a eu lieu pour faire les 27 essais du plan d'expérience faisant varier les paramètres de coupe tels que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et le débit de lubrification selon l'ordre décrit dans le tableau à l'Annexe II. Chaque essai avec ses paramètres bien définis a été répété trois fois, et durant chaque passe, l'acquisition des PF et des PUF a été faite pour une période d'échantillonnage de 50 secondes. A la fin de la dernière répétition de chaque essai, le système de montage du rugosimètre SJ-201 va être fixé sur le mandrin de fixation de la pièce de granit, pour permettre la mesure de rugosité de l'arête. Le palpeur va être placé sur un point de l'arête polie qui permette au détecteur d'être serré contre la pièce à travers deux vis du système de montage pour avoir une mesure précise de la rugosité (Figure 2.7). La même mesure a été répétée trois fois.

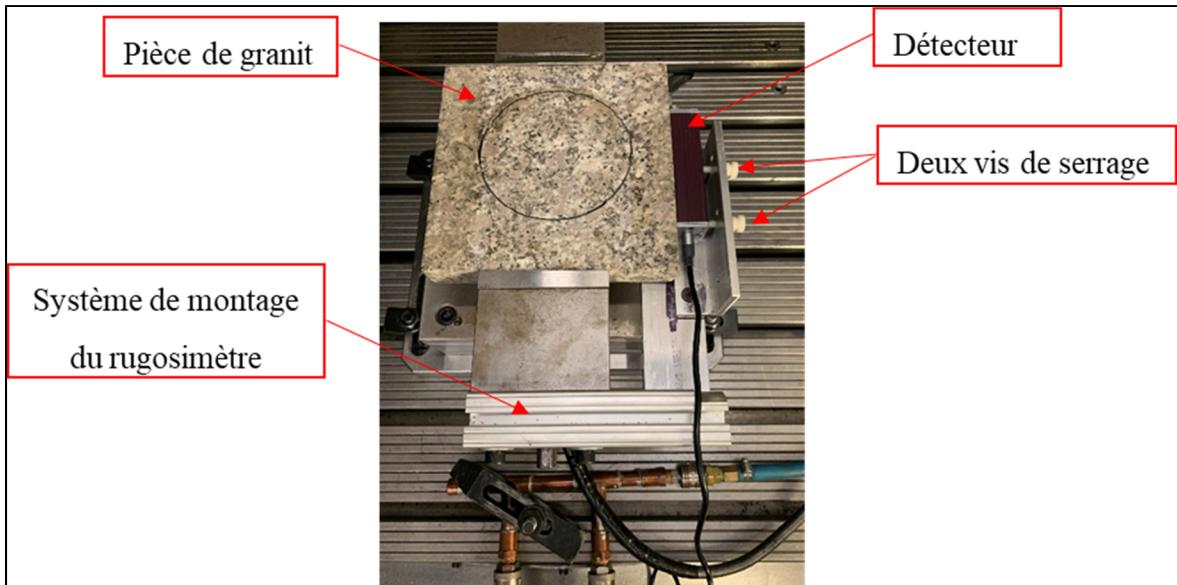


Figure 2.7 Détails du système de montage du rugosimètre

Une fois tous les essais avec l'outil concave grit 150 ont été faits, l'outil suivant qui est un outil de semi-finition de grit 300 a été monté sur la machine pour préparer l'arête avec 3 passes consécutifs ($N = 3500$ tr/min ; $Vf = 1500$; $Qw = 20$ ml/min).

Ensuite, l'outil de grit 600 va être monté pour faire les essais de la même manière décrite auparavant.

Finalement, l'outil de finition de grit 1500, qui n'est pas un outil métallique, va commencer les essais avec le débit 60 ml/min (essai d'ordre 19). Malheureusement, ce dernier n'a pas résisté aux conditions sévères de lubrification limitée et il s'est détruit après 8 essais seulement.

Toute la même procédure décrite ci-dessus a été réalisée sur une autre arête brute parallèle à l'arête déjà polie, en utilisant les outils de forme chanfrein.

2.5 Limites de la recherche et aléas rencontrés

Lors de la réalisation des essais, les deux principaux aléas rencontrés étaient :

- L'acquisition des données des PUF n'a pas été faite durant un bon nombre d'essais en raison de plusieurs pannes fréquentes du CPC. Dans la Figure 2.8, un exemple a été illustré en utilisant l'outil grit 150 où on voit clairement que les premiers essais avec les deux formes d'arête (jusqu'à l'essai N° 11 de la forme concave, et jusqu'à l'essai N° 18 de la forme chanfrein) n'ont pas aboutis à des résultats de concentrations de PUF. Mentionnons que ces dysfonctionnements ont été observés aussi en faisant le polissage avec les outils de grit 600 et 1500. Cela rend l'étude de comparaison ainsi que les interprétations faites à cet égard, difficile à faire et parfois même non corrects. Donc, l'étude sur les PUF ne va pas être élaborés dans la suite de ce mémoire.

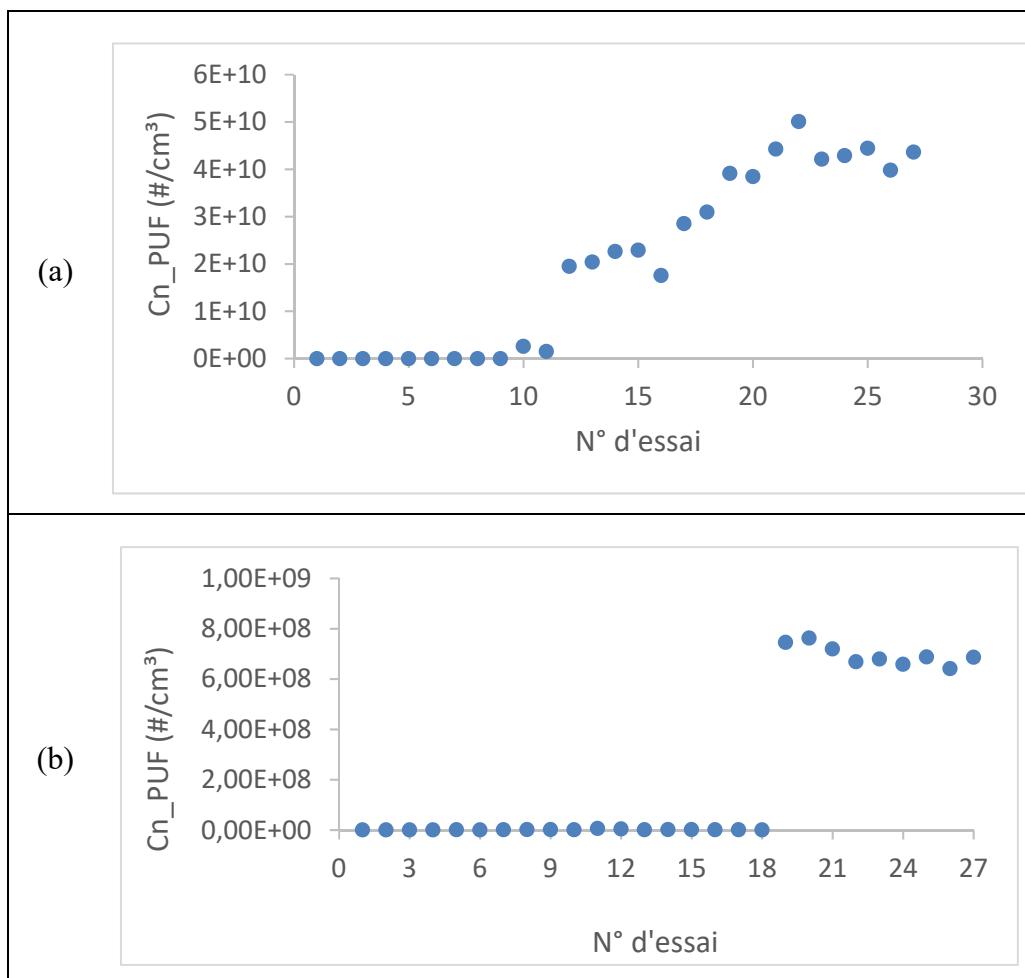


Figure 2.8 Courbe de C_n_{PUF} en fonction du numéro d'essai lors du polissage avec l'outil grit 150 de forme (a) Concave, (b) Chanfrein

- L'usure flagrante des outils de grit 1500 au fur et à mesure durant les 8 essais et en utilisant seulement le débit de lubrification de 60 ml/min a fait générer des copeaux du matériau de l'outil autre que la poussière de granit (caoutchouc, métal, diamants...). Pour cette raison, les résultats issus de cet outil ne vont pas être considérés dans l'étude statistique dans les chapitres qui suivent. En effet, ces copeaux générés pourraient biaiser les résultats de l'étude et l'amener à des conclusions qui ne sont pas forcément vraies. Donc, pour éviter tout cela, l'étude statistique se limitera seulement à l'outil grit 150 pour la phase d'ébauche et l'outil grit 600 pour la phase de finition. La Figure 2.9 montre les dégâts subis par les deux outils utilisés

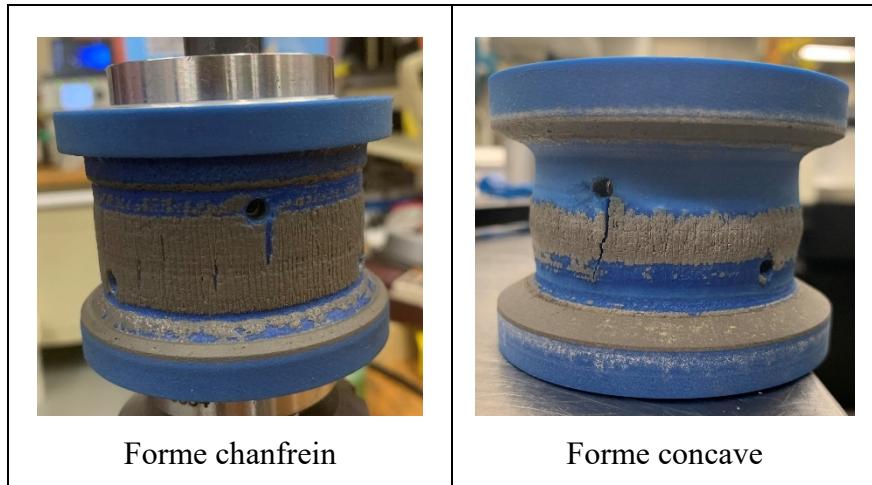


Figure 2.9 Usure de l'outil chanfrein et concave grit 1500

2.6 Conclusion

La démarche expérimentale qui a pour but de mener cette étude sur le polissage des arêtes de granit à différentes formes a été détaillée dans ce chapitre. Les machines et les équipements nécessaires à la réalisation de ces travaux expérimentaux ainsi que le plan d'expérience élaboré ont été présentés. Les données issues de l'expérimentation et leurs traitements qui visent à identifier les paramètres qui influencent la génération des particules et le fini des surfaces feront partie des chapitres qui suivent.

CHAPITRE 3

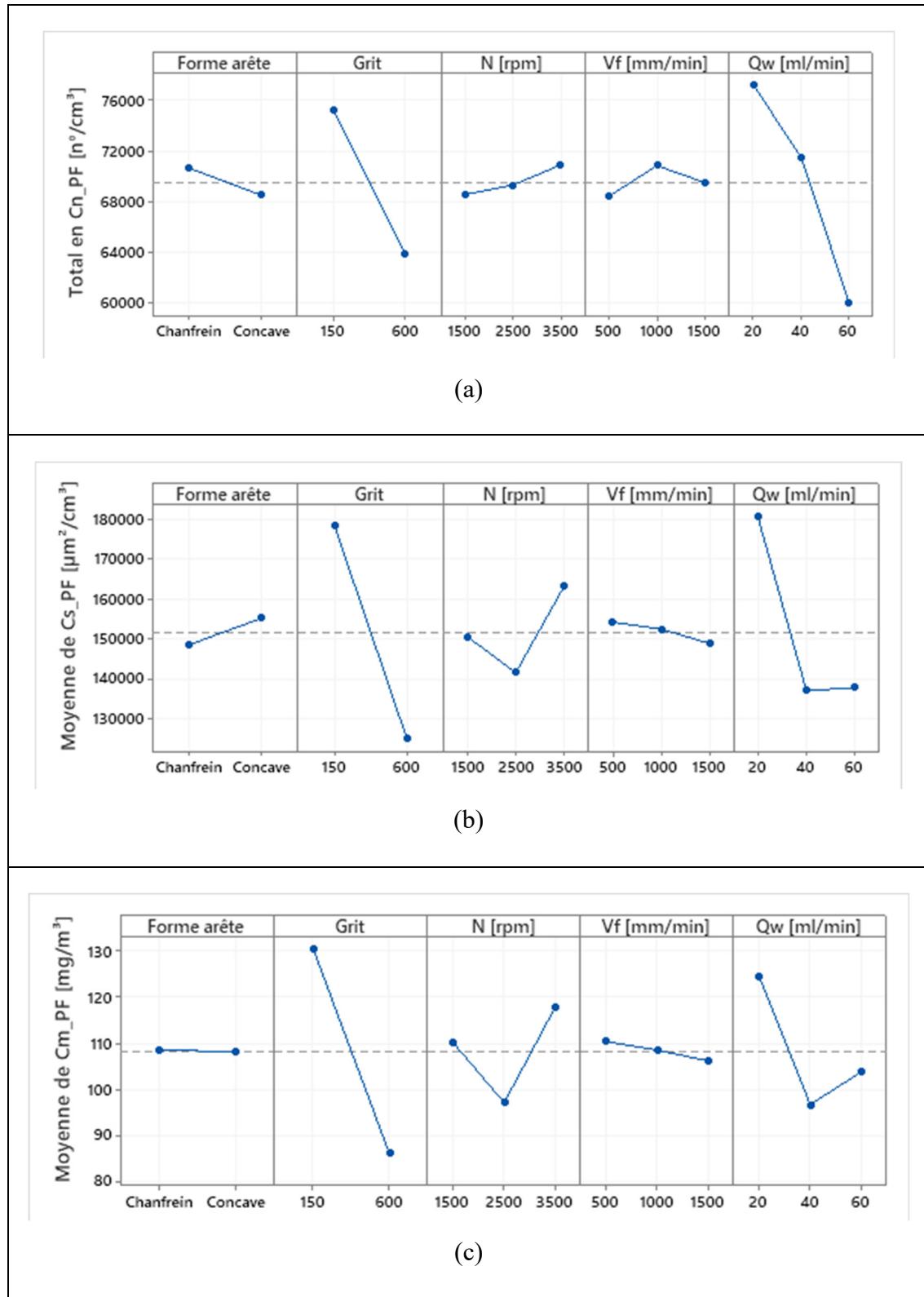
ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES

3.1 Introduction

La génération de particules lors du polissage des matériaux pierreux est un axe très intéressant à étudier, comme il s'agit généralement des substances qui n'ont pas la même taille ni la même forme et qui présentent une vitesse de chute très négligeable (Djebara, 2012). Une étude sur les concentrations et la taille de ces particules générées s'avère essentielle lors du polissage du granit. Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus de l'expérimentation faite sur l'échantillon de granit blanc. Notre objectif est de déterminer l'influence des paramètres qui ont été choisis dans le plan d'expérience sur les émissions de poussière. Pour le faire, les données vont être examinées statistiquement avec des outils pertinents afin de vérifier à quel point la forme de l'outil, la grosseur de grains abrasifs, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et le débit de lubrification peuvent influencer les concentrations de particules fines et ultrafines en nombre, en masse et en surface spécifique.

3.2 Analyse des effets directs sur les réponses des particules fines

Les résultats des concentrations totales de PF en nombre, en surface spécifique et en masse en fonction des différents paramètres étudiés issus des expériences ont été injectées dans le logiciel statistique Minitab afin de générer le diagramme des effets principaux pour chaque réponse. Ces graphiques nous permettront de constater l'effet des variables et leurs relations avec la réponse étudiée.

Figure 3.1 Diagramme des effets principaux de ; (a) Cn_PF , (b) Cs_PF , (c) Cm_PF

Une première analyse des résultats incluant tous les effets étudiés fait ressortir les diagrammes des effets principaux des concentration en nombre, en surface spécifique et en masse des PF illustrés dans la Figure 3.1. Un aperçu rapide de ces diagrammes permet d'identifier les paramètres qui avaient un impact très important sur la réponse parmi d'autres qui ne le sont pas.

La taille de grit est le seul paramètre qui a le même comportement sur les 3 réponses de concentration totale des PF et son augmentation a diminué significativement les émissions de PF en nombre, en surface spécifique et en masse.

En ce qui concerne la forme de l'arête réalisée, il s'est avéré que, contrairement à la concentration totale en surface spécifique, la concentration totale en nombre des PF était plus importante avec la forme chanfrein qu'avec la forme concave. Cependant, la forme de l'outil n'avait pas d'effet sur la concentration totale en masse.

La vitesse de rotation N, la vitesse d'avance Vf et le débit de lubrification Qw avaient un comportement similaire pour les concentrations totales en surface et en masse des PF, alors que ces paramètres ont réagi de manière différente sur la concentration totale en nombre, où l'augmentation du débit Qw a diminué significativement la réponse.

3.2.1 Concentration en nombre des PF

La Figure 3.2 montre l'effet de la forme d'outil sur la distribution granulométrique de la concentration en nombre des PF en fonction de leurs diamètres aérodynamiques pendant les phases d'ébauche et de finition. En fixant les paramètres $N = 1500$ rpm, $Vf = 1500$ mm/min et $Qw = 60$ ml/min, on voit que la forme chanfrein a dégagé plus de PF comparant à la forme concave avec les 2 tailles de grit. Ce résultat peut être expliqué par le fait que l'outil de forme chanfrein enlève un volume de matière plus important selon l'étude munie dans la Section 1.2.5 (Tableau 1.2). Cependant, on peut remarquer qu'en phase d'ébauche, le maximum de concentration des PF généré avec la forme concave qui émet moins de PF par rapport à la forme chanfrein, correspondait aux particules de diamètres aérodynamiques plus petits que

ceux générées avec la forme chanfrein. Cette différence entre la taille des diamètres et entre les maximums d'émission n'est pas très importante à l'étude, puisque la plus grande émission de PF a été observée dans la plage de diamètre située entre 0 et 2.5 μm et les particules de cette taille (PM_{2.5}) sont considérées dangereuses et néfastes pour les travailleurs à l'inhalation (Pozzi, De Berardis, Paoletti, & Guastadisegni, 2003).

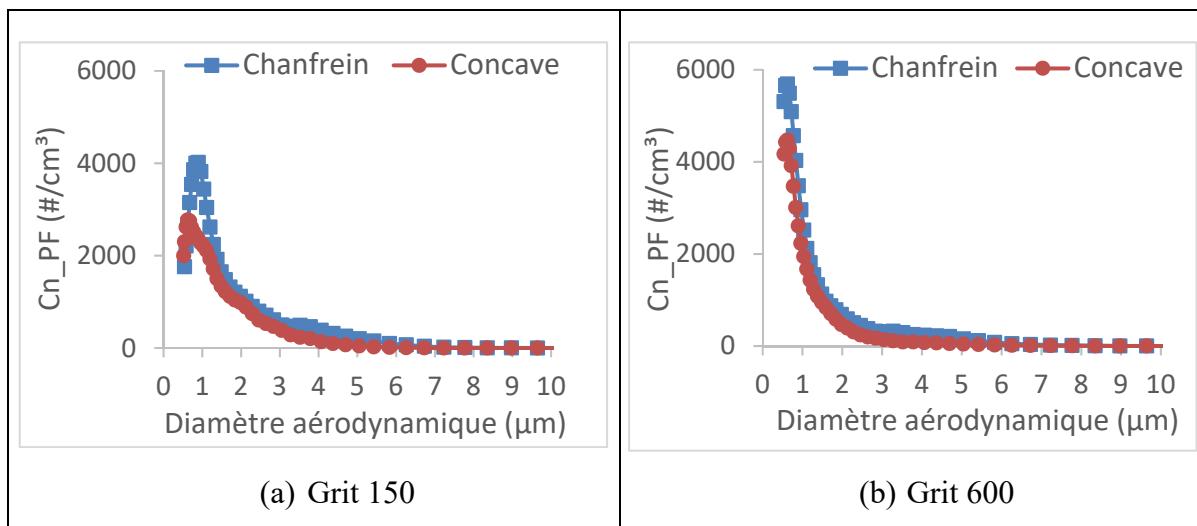


Figure 3.2 Distribution granulométrique de la Cn_PF pour les formes d'arête chanfrein et concave ; (N = 1500 rpm, Vf = 1500 mm/min, Qw = 60 ml/min)

La concentration totale en nombre des PF a été représentée dans la Figure 3.3 en fonction des tailles de grit des outils. Il est important de rappeler que la succession des outils partant de l'ébauche jusqu'à la finition en passant par la demi-finition est inévitable. Le polissage de l'arête ne peut jamais être fait avec l'outil de grit 600 sans avoir passé par le grit 45, 150 et 300. Mais il faut noter que ce passage d'une phase d'ébauche caractérisée par de faibles tailles de grit jusqu'à la finition avec les grandes tailles de grit ne fait que diminuer les concentrations de PF en nombre. Cette diminution s'explique par le fait qu'à la phase d'ébauche, où la rupture fragile est le mécanisme d'enlèvement de matière, l'outil a tendance à enlever le plus de matériau afin de donner la forme à l'arête de la pièce et attaque une surface rigoureuse présentant plusieurs stries, ce qui résulte à une concentration de particules importante. Quant à la phase de finition où le mécanisme d'enlèvement de matière est l'écoulement fluide,

caractérisé par une augmentation de pression de contact de l'outil-pièce et une diminution du coefficient de friction (Saidi et al., 2015), l'outil n'enlève pas une grande quantité de matière. Cela peut justifier la faible concentration de PF en nombre, expliqué par juste un frottement exercé sur l'arête qui donne lieu à une faible rugosité et une bonne brillance de la surface polie. Cette conclusion va bien avec ce qui a déjà été démontré dans l'article publié (Bahri et al., 2021).

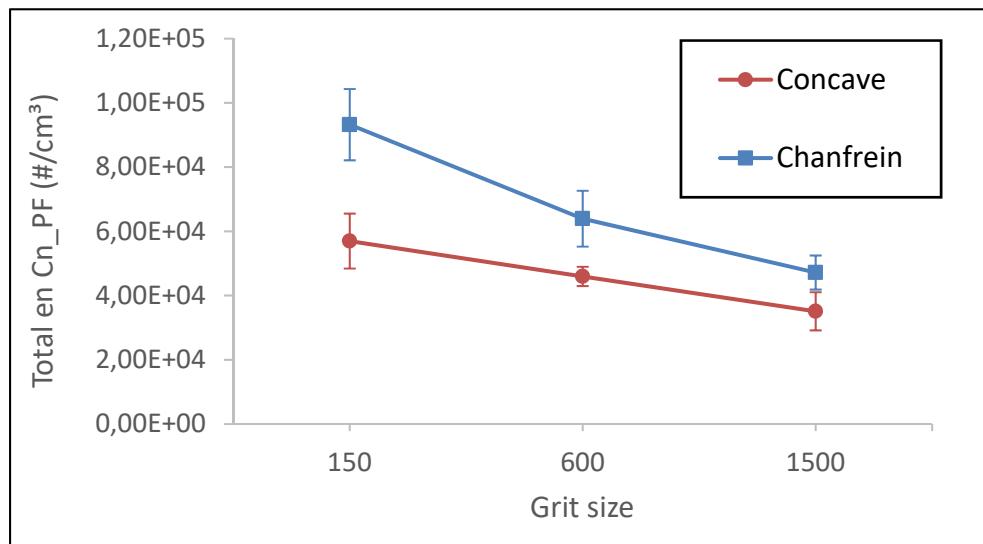


Figure 3.3 Concentration totale en nombre des PF en utilisant les outils de forme chanfrein et concave en fonction des tailles de grit
(N = 3500 rpm, Vf = 1000 mm/min, Qw = 60 ml/min)

3.2.2 Concentration en surface spécifique des PF

L'effet de la vitesse de rotation N et de la vitesse d'avance Vf sur la concentration en surface spécifique des PF va être étudié dans ce paragraphe. Dans la Figure 3.4, la concentration totale en surface spécifique des PF en phase d'ébauche (Grit 150) a été représenté pour les deux formes d'arête réalisée en variant la vitesse N et en fixant l'avance Vf à 1000 mm/min et le débit de lubrification à 20 ml/min. Avec la forme concave, on constate que l'augmentation de la vitesse N fait augmenter significativement la concentration totale surfacique des PF. Ce résultat valide les travaux de (Bahri et al., 2021 ; Kouam et al., 2013 ; Victor Songmene et al., 2018). Cependant, en utilisant l'outil de forme chanfrein, la vitesse de rotation n'avait pas

d'effet sur la concentration totale en surface des PF avec les paramètres déjà mentionnés. On peut dire alors qu'en phase d'ébauche (grit 150), l'effet de la vitesse de rotation sur la concentration totale des PF en surface spécifique dépend de la forme d'outil utilisé.

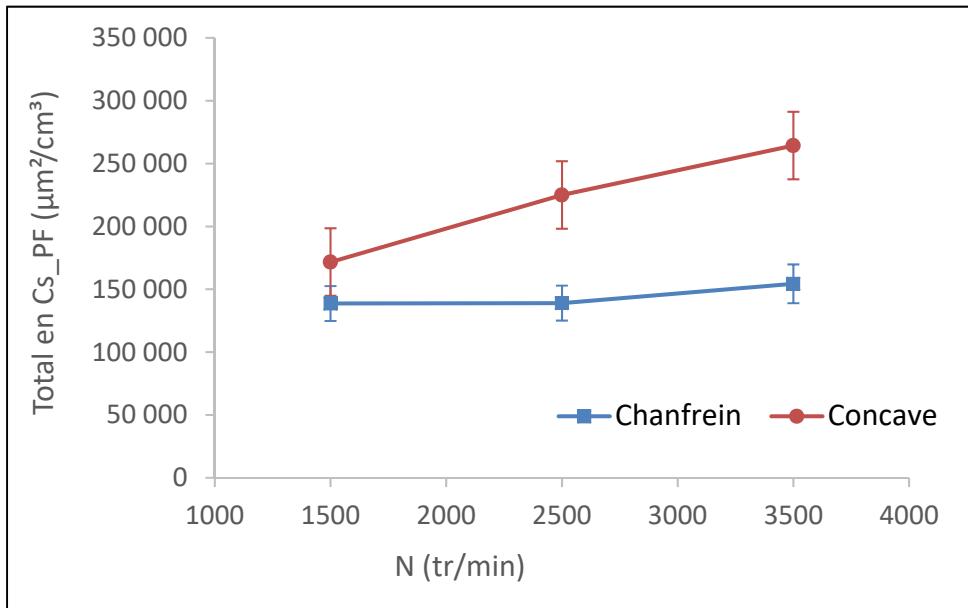


Figure 3.4 Concentration totale en surface spécifique des PF en fonction de la vitesse de rotation N pour les formes d'arête chanfrein et concave
(Grit 150, Vf = 1000 mm/min, Qw = 20 ml/min)

Dans la Figure 3.5 est représenté l'effet de la vitesse d'avance sur la distribution granulométrique des PF en surface spécifique. Pour cette configuration (Forme concave, Grit 150, N = 2500 rpm, Qw = 20 ml/min), on peut voir que l'augmentation de la vitesse d'avance diminue la concentration en surface spécifique. Les pics des concentrations correspondent à des diamètres aérodynamiques situés entre 2 et 4 μm . La signification statistique de cet effet sur la réponse, si elle existe, va être étudiée ultérieurement dans l'analyse statistique.

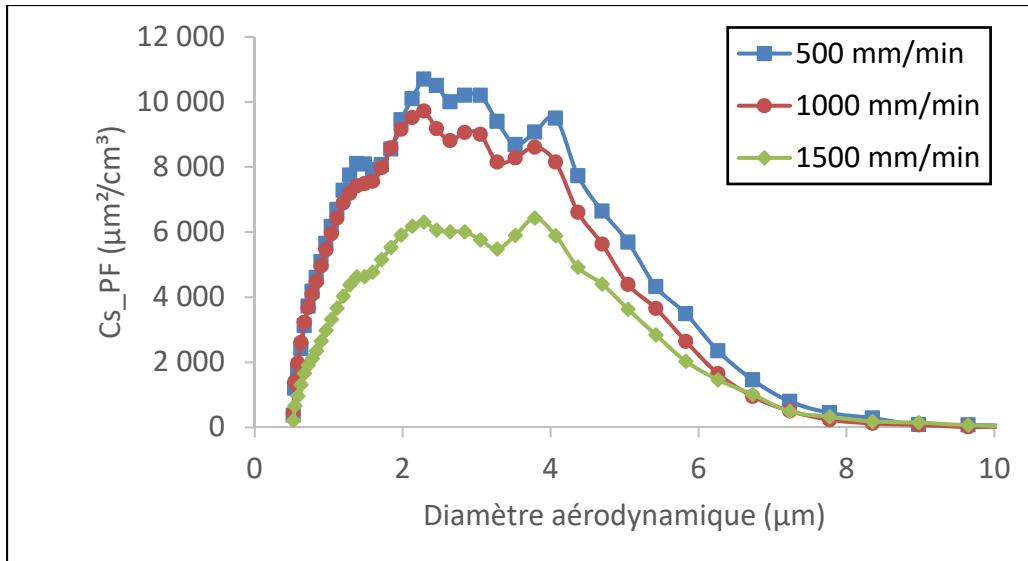


Figure 3.5 Distribution granulométrique de la Cs_PF pour différentes vitesses d'avance (Forme concave, Grit 150, N = 2500 rpm, Qw = 20 ml/min)

3.2.3 Concentration en masse des PF

En plus de la taille de grit, le débit de lubrification avait un effet très important sur la diminution de concentration en masse des PF. Dans la Figure 3.6, on constate que l'augmentation du débit de lubrification permet de générer une concentration de PF plus petite en masse. Les trois courbes correspondantes aux trois débits de lubrification ont gardé la même forme gaussienne et présentent des pics de concentration pour des particules de diamètre aérodynamique situés aux alentours de 4 µm. En utilisant le débit de 20 ml/min, le pic de concentration retrouvé est de 14.3 mg/m³ pour les particules de diamètre 4.068 µm. En revanche, l'utilisation du débit 60 ml/min a généré un pic de concentration massique de 3.78 mg/m³ pour les particules de diamètre 4.08 µm. Cette augmentation du débit de lubrification a diminué alors le pic de la concentration en masse des PF d'environ 74 % pour les particules de même taille. Ces résultats trouvés sont en bon accord avec Songmene et al. 2018 qui ont réussi à réduire la concentration en masse des PF du granit blanc de 75 % en utilisant un débit de lubrification de 80 ml/min.

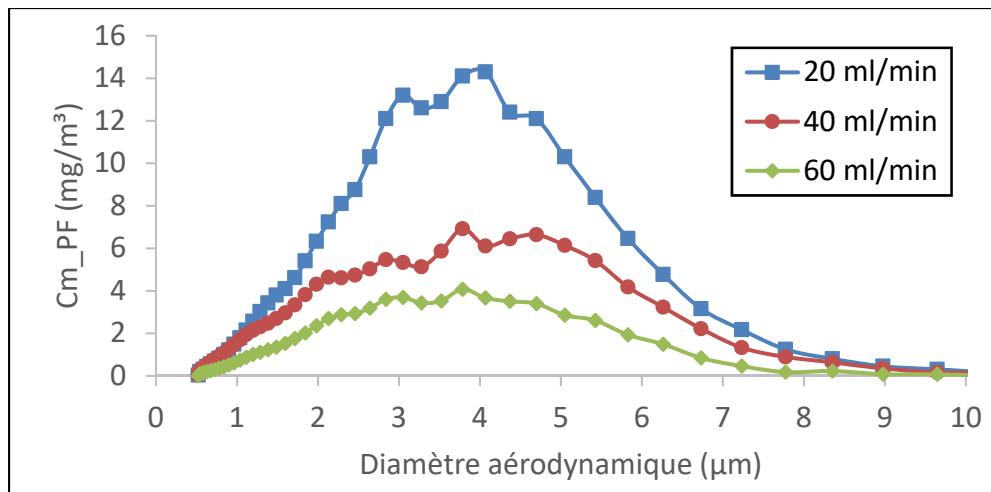


Figure 3.6 Distribution granulométrique de la Cm_PF à différents débits de lubrification (Forme concave, Grit 150, N = 1500 rpm, Vf = 1500 mm/min)

3.3 Analyse des distributions granulométriques des particules ultrafines

Lors des essais expérimentaux, l'acquisition des PUF à travers le SMPS n'a pas été faite durant plusieurs essais sur l'échantillon de granit blanc. Comme c'était déjà expliqué dans la Section 2.5, les nombreuses défaillances du CPC n'ont pas permis d'avoir les données nécessaires à l'analyse de tous les paramètres étudiés dans le plan d'expérience et à l'étude comparative. Mais, quelques interprétations pourront être faites à travers les distributions granulométriques qui ont été prises durant des essais où le CPC fonctionnait correctement et l'acquisition des PUF a été réalisée.

Dans la Figure 3.7, l'effet de la forme de l'arête réalisée ainsi que la taille de grit des outils sont illustrés dans la distribution des concentrations de PUF en nombre en fonction des diamètres aérodynamiques des particules. La forme chanfrein qui a dégagé une quantité plus grande de PF en concentration en nombre a dégagé une quantité plus petite en concentration en nombre de PUF lors du polissage avec les deux tailles de grit 150 et 600.

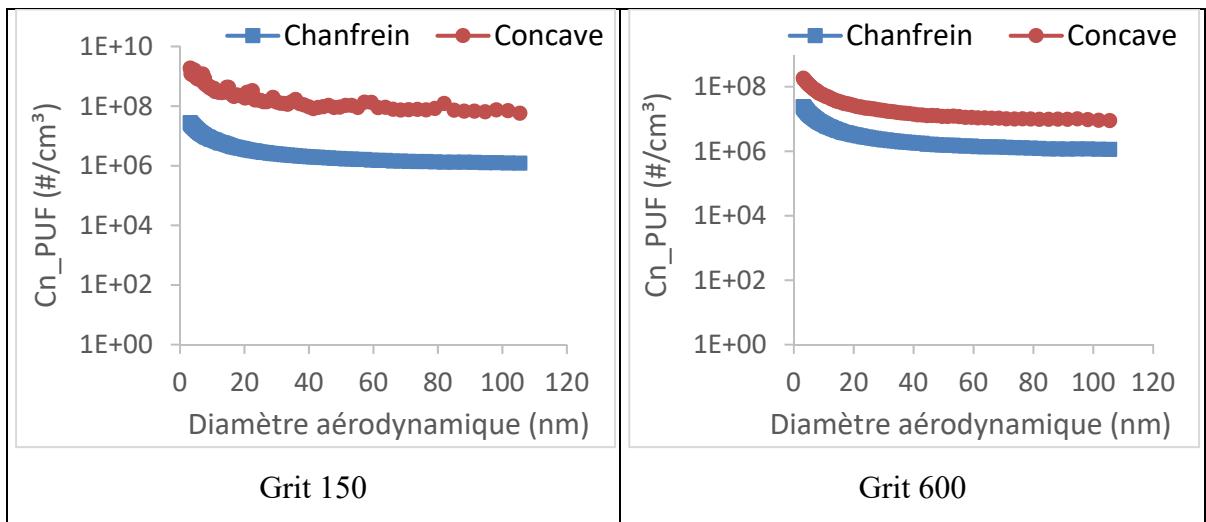


Figure 3.7 Concentration des PUF en nombre en fonction des diamètres aérodynamique des particules pour les deux formes chanfrein et concave et en utilisant les outils grit 150 et grit 600 (N = 1500 tr/min, Vf = 1500 mm/min, Qw = 60 ml/min)

Concernant le débit de lubrification, la Figure 3.8 montre la distribution granulométrique des PUF à différents débits MQL. A 20 ml/min, les concentrations massiques de PUF semblent être les plus importantes comparant à 40 ml/min et 60 ml/min. Pareillement à ce qui a été observé avec les PF, l'augmentation du débit de lubrification entraîne une diminution des concentrations de PUF, même si la différence entre 40 ml/min et 60 ml/min ne se voit pas grande devant celle avec le débit 20 ml/min.

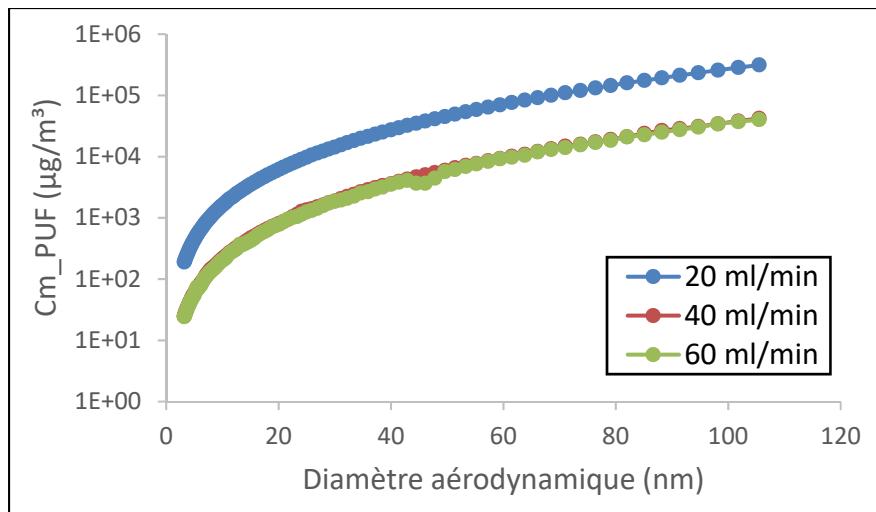


Figure 3.8 Distribution granulométrique des PUF à différents débits de lubrification ($N = 2500$ tr/min, $V_f = 1000$ mm/min)

A ce niveau-là, on pourra dire que l'utilisation de l'outil de forme chanfrein avec une lubrification à débit 60 ml/min est favorisée devant la forme concave et avec les autres débits de lubrification, afin de minimiser les concentrations de PUF lors du polissage de l'arête de granit blanc. Les autres paramètres tels que la vitesse de rotation ainsi que la vitesse d'avance n'ont pas été en mesure d'être analysés vu le manque de données qu'on disposait.

3.4 Analyse statistique

Dans la présente étude, l'effet des conditions de coupe sur la finition des arêtes de granit a été étudié. Dans notre plan d'expérience, un nombre assez important de facteurs a été introduit avec des niveaux différents. Par conséquent, l'analyse de ce grand nombre de données s'avère compliqué sans passer par une étude statistique qui va déterminer l'influence de ces paramètres sur les émissions de PF durant le polissage de l'arête de granit. L'objectif principal de cette étude est l'optimisation du processus d'obtention d'arête de granit en réduisant les émissions de particules et en assurant un bon fini de surface acceptable par les industriels.

Comme les plus grandes quantités de concentration de PF pour les diamètres de particules inférieurs à 1 µm n'a été observée que dans la concentration en nombre, alors que les pics des

concentrations surfaciques et massiques correspondaient à des diamètres de particules entre 2 et 4 μm , on s'intéressera seulement à l'étude et l'optimisation de la réponse de concentration totale en nombre des PF. Les courbes d'analyse statistique des concentrations totales en surface spécifique et en masse sont présentés respectivement dans l'Annexe III et l'Annexe IV.

Dans la suite, l'étude statistique et la modélisation des émissions de particules vont être réalisés sur chaque outil pendant chaque phase de polissage. Puisque l'enchainement des outils de tailles de grit croissantes est obligatoire durant le polissage, l'étude des effets de paramètres de coupe va être dépendante de l'outil utilisé (forme et taille de grit). Ainsi, les facteurs étudiés vont se limiter à 3 facteurs (vitesse de rotation ' N ', vitesse d'avance ' V_f ' et débit de lubrification ' Q_w ') par chaque phase de polissage (ébauche 'grit 150' et finition 'grit 600') en utilisant les deux formes d'outil (chanfrein et concave).

3.4.1 Phase d'ébauche (grit 150)

3.4.1.1 Diagramme Pareto

L'outil de diagramme Pareto permet de déterminer l'influence des paramètres choisis dans le plan d'expérience. Il compare selon un ordre décroissant l'importance et la signification statistique à un intervalle de confiance (généralement de 95%) des facteurs principaux et leurs interactions. Les facteurs significatifs dépassent la valeur de $p = 0.05$ repérée par la ligne bleue. Dans la Figure 3.9, on voit que seulement le facteur principal débit de lubrification Q_w était significatif dans la concentration totale en nombre des PF avec l'outil chanfrein, alors qu'en utilisant l'outil concave, tous les facteurs principaux étaient significatifs en plus des interactions $N * Q_w$, $N * V_f$ et les facteurs quadratiques V_f^2 et Q_w^2 .

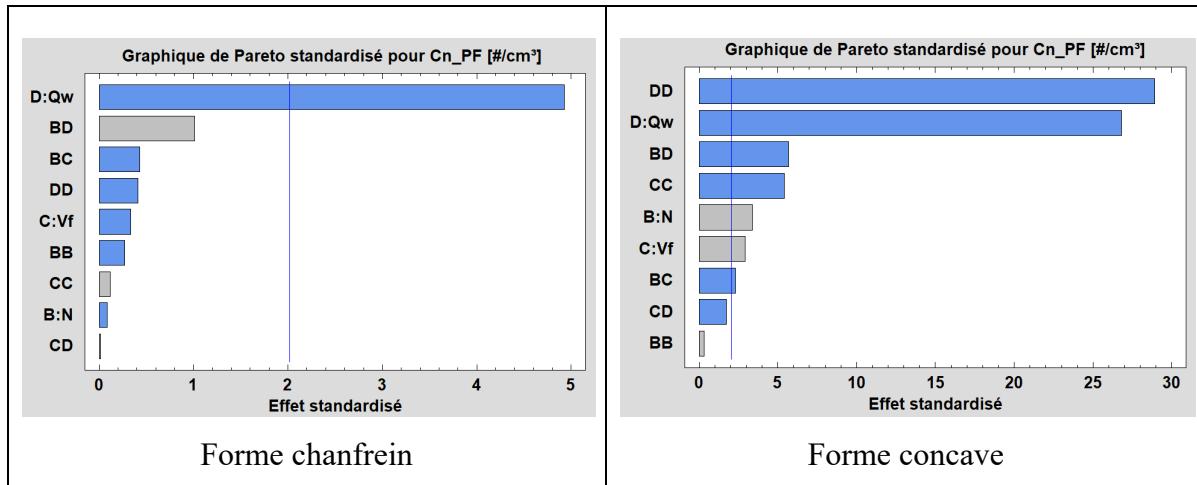


Figure 3.9 Diagramme Pareto de Cn_PF en utilisant les outils de forme chanfrein et concave en phase d'ébauche

C'est ainsi que le facteur débit de lubrification Q_w apparaît comme étant le facteur qui avait le plus d'effet et qui contrôle les émissions de PF en concentration en nombre. Pareillement, ce paramètre avait un effet important aussi sur les concentrations en surface spécifique et en masse dans la phase d'ébauche des arêtes de granit blanc pour les deux formes chanfrein et concave.

3.4.1.2 Analyse ANOVA

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode qui consiste à étudier les différences de moyenne entre les populations et non pas la différence entre les variances comme son nom l'indique (Tahan, 2016). La normalité des données étant déjà supposée par l'ANOVA, il est nécessaire cependant que la variance soit la même dans les différents groupes. Avant l'utilisation de l'ANOVA, le test d'homogénéité de la variance a été réalisé sur les données analysées.

Les tableaux ANOVA (Tableau 3.1 et Tableau 3.2) donnent les mêmes informations principales déjà vues avec les diagrammes Pareto, qui sont essentiellement la signification statistique des variables, mais de manière plus détaillée. Il comporte les termes suivants :

- Somme des carrées (Sum of Squares ‘SS’) : est la somme des différences au carré entre la valeur du modèle et la moyenne générale. En plus de la somme des carrés pour chaque terme, un carré moyen résiduel est calculé comme la somme des différences au carré entre les valeurs mesurées et modélisées.
- DDL (degrees of freedom ‘df’) : est le degré de liberté, où le degré de liberté total est égal à 52 ($N - 1$) avec N : le nombre total d’essai réalisé durant cette phase de polissage (53)
- Moyenne quadratique (Mean Square ‘MS’) : est le ratio entre la somme des carrés et le degré de liberté (ddl). Dans la suite de ce mémoire, ce terme ne sera pas représenté pour alléger les tableaux.

$$MS = \frac{SS}{df} \quad (3.1)$$

- Rapport F (F-ratio) : est égale au carré moyen du terme divisé par le carré moyen résiduel
- Proba. (p-value) : est la valeur de probabilité pour le rapport F qui permet de déterminer le degré de signification statistique des facteurs.

Tableau 3.1 Table ANOVA de Cn_PF pour la forme chanfrein (grit 150)

Analyse de la variance pour Chanfrein Cn_PF ($R^2=38\%$)				
Source	Somme des carrés	DDL	Rapport F	Proba.
B:N [rpm]	214262	1	0.01	0.9320
C:Vf [mm/min]	3.0625 E6	1	0.11	0.7473
D:Qw [ml/min]	6.57923 E8	1	22.78	0.0001
BB	2.01257 E6	1	0.07	0.7939
BC	5.04167 E6	1	0.17	0.6795
BD	2.75204 E7	1	0.95	0.3379
CC	380165	1	0.01	0.9095
CD	6666.67	1	0.00	0.9880
DD	4.64017 E6	1	0.16	0.6918
Test de manque d’adéquation	4.1404 E8	17	0.84	0.6361
Erreur pure	7.5077 E8	26		
Total (corr.)	1.86585 E9	52		

Tableau 3.2 Table ANOVA de Cn_PF pour la forme concave (grit 150)

Analyse de la variance pour Concave Cn PF (R²=83%)				
<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>DDL</i>	<i>Rapport F</i>	<i>Proba.</i>
B:N [rpm]	2.7 E8	1	11.36	0.0024
C:Vf [mm/min]	2.04 E8	1	8.58	0.0070
D:Qw [ml/min]	1.71 E10	1	718.47	0.0000
BB	2.38 E6	1	0.10	0.7538
BC	1.27 E8	1	5.33	0.0292
BD	7.65 E8	1	32.23	0.0000
CC	6.96 E8	1	29.33	0.0000
CD	7.21 E7	1	3.04	0.0931
DD	1.98 E10	1	835.70	0.0000
Test de manque d'adéquation	6.94 E9	17	17.21	0.0000
Erreur pure	6.17 E8	26		
Total (corr.)	4.67 E10	52		

Les résultats de ces tableaux ANOVA montrent que le coefficient de détermination du modèle représentant les données variait selon le type de l'arrête réalisée. La valeur de R² correspondante à la forme chanfrein était faible par rapport à celle de la forme concave. Cela était prévu puisque le seul facteur significatif était le débit de lubrification Qw en utilisant la forme chanfrein, alors que tous les autres facteurs avaient un effet significatif sur la génération des PF en concentration en nombre avec l'outil concave.

Dans la Figure 3.10, les interactions dans l'analyse de la variance de la forme concave sur la concentration totale en nombre des PF sont représentées. Dans ces diagrammes, plus les courbes sont parallèles, plus l'interaction n'est pas significative. Par conséquent, les interactions N et Vf ainsi que N et Qw sont significatives, comme c'est déjà mentionné dans la table ANOVA du Tableau 3.2.

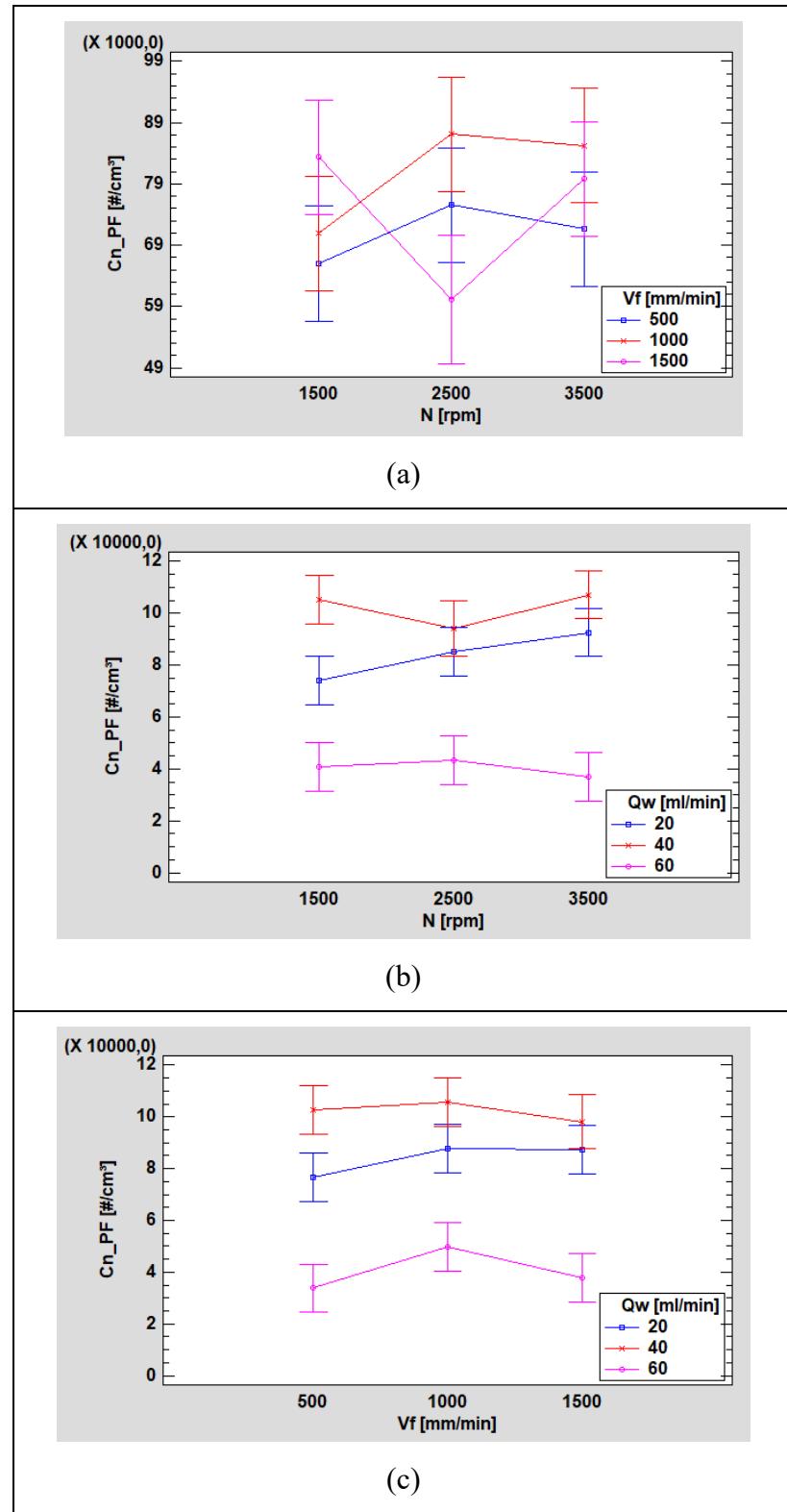


Figure 3.10 Diagrammes d'interaction de ;
 (a) N et Vf, (b) N et Qw, (c) Vf et Qw

3.4.1.3 Les modèles de prédiction proposés

Dans la présente étude, la forme générale du modèle qui exprime la réponse étudiée tiendra compte de l'effet de chaque paramètre en forme linéaire et quadratique, ainsi de leurs interactions, comme indiqué sur l'Équation (3.2).

$$\hat{Y}_i = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i X_i + \sum_{i=1}^4 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

Avec :

- Y_i = Réponse
- X_i, X_j = Facteurs
- a_0 = Moyenne arithmétique des données
- a_i = Effet du facteur linéaire i
- a_{ii} = Effet du facteur quadratique i
- a_{ij} = Effet des interactions entre les facteurs
- ε = Erreur

L'Équation (3.3) représente le modèle de prédiction de la concentration totale en nombre des PF en utilisant la forme concave.

$$\ln(\widehat{Cn_{PF}})_{concave} = 8.5 + 3.2 * 10^{-4}N + 1.5 * 10^{-3}V_f - 5.77 * 10^{-7}V_f^2 + 0.11Q_w - 1.5 * 10^{-3}Q_w^2 - 1.14 * 10^{-7}N * V_f - 4.3 * 10^{-6}N * Q_w \quad (3.3)$$

La qualité du modèle a été évalué principalement selon son coefficient de corrélation R^2 . Ce test statistique est capable de mesurer la proximité des données par rapport à la ligne de régression ajustée. Plus le R^2 se rapproche de 1 (100 %), meilleur est l'ajustement. Le modèle de la concentration totale des PF en nombre avec la forme chanfrein a été rejeté puisque son coefficient de corrélation était trop petit ($R^2 = 36\%$)

En plus du coefficient de corrélation, la valeur de Durbin-Watson et les erreurs du modèle ont aussi été calculés comme figuré dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Indices de performance du modèle de $\ln(Cn_PF)$ pour la forme concave (Grit 150)

Indice de performance	Valeur calculée	Valeur idéale
Coefficient R^2	86.4 %	> 85 %
Coefficient R^2_{aj}	84.3 %	
Valeur de Durbin-Watson	1.11	~ 2
NRMS	3.75	<10 %
MAPE	3.49	

Rappelons que :

- La statistique de Durbin-Watson est un test d'autocorrélation des résidus du modèle statistique qui a toujours une valeur comprise entre 0 et 4. Idéalement, la valeur 2 n'indique aucune autocorrélation dans l'échantillon. Les valeurs comprises entre 0 et 2 indiquent une autocorrélation positive, tandis que ceux de 2 à 4 indiquent une autocorrélation négative.
- NRMS (Normalized Root Mean Square) se calcule de la manière suivante :

$$NRMS = \frac{RMS}{y_{ref}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}}{y_{max}} \quad (3.4)$$

- MAPE (Mean Absolute Percentage Error) se calcule de la manière suivante :

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{x_i} \right| \cdot 100 \% \quad (3.5)$$

Avec $e_i = y_i - x_i$, en considérant que y_i est la prédiction du modèle et x_i est la mesure expérimentale et y_{ref} a été choisie la valeur maximale (peut être aussi la moyenne ou la valeur minimale, mais le choix de la valeur maximale avait comme objectif de minimiser l'erreur au maximum).

D'après ces indices de performance, on peut dire que ce modèle représente bien les données expérimentales. En plus des valeurs de p des coefficients des facteurs qui sont toutes inférieures à notre critère α de 5 % et nous indiquent alors que tous les termes étaient pertinents, le terme R^2_{aj} se rapproche trop de la valeur de 85 % ce qui montre une corrélation forte entre le modèle et les données. Les erreurs normalisées quadratique et absolue étaient inférieures à 10 %, indiquant que l'erreur occupe une place relativement faible dans le modèle. La valeur de Durbin-Watson quant à elle se situe entre 0 et 2, ce qui sous-entend qu'il y a une autocorrélation positive dans le modèle qu'on peut le voir dans la Figure 3.11. Cependant, une conclusion définitive ne pourra pas être tirée avant de regarder l'allure des diagrammes des résidus. La Figure 3.12 a été réalisée à cet effet.

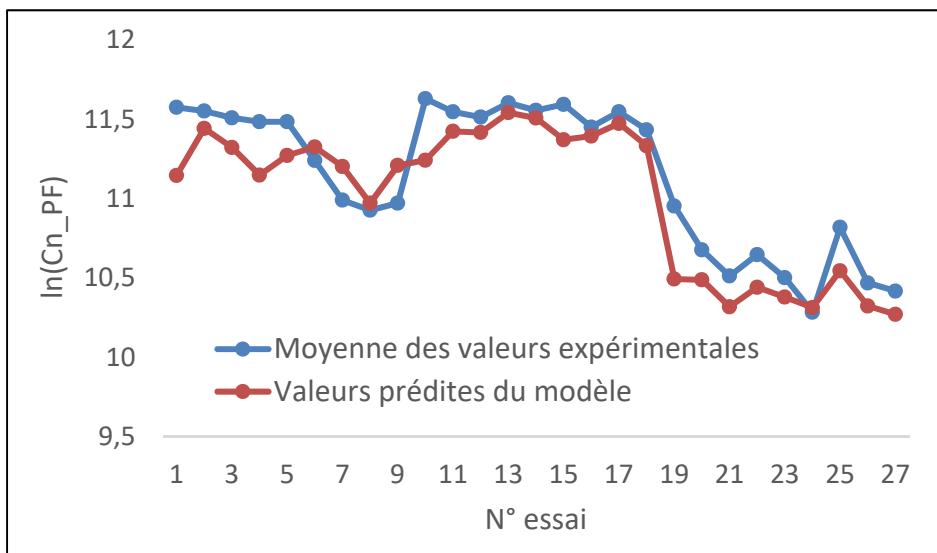


Figure 3.11 Courbe de $\ln(Cn_PF)$ pour les valeurs expérimentales et les valeurs prédites du modèle (Forme concave-Grit 150)

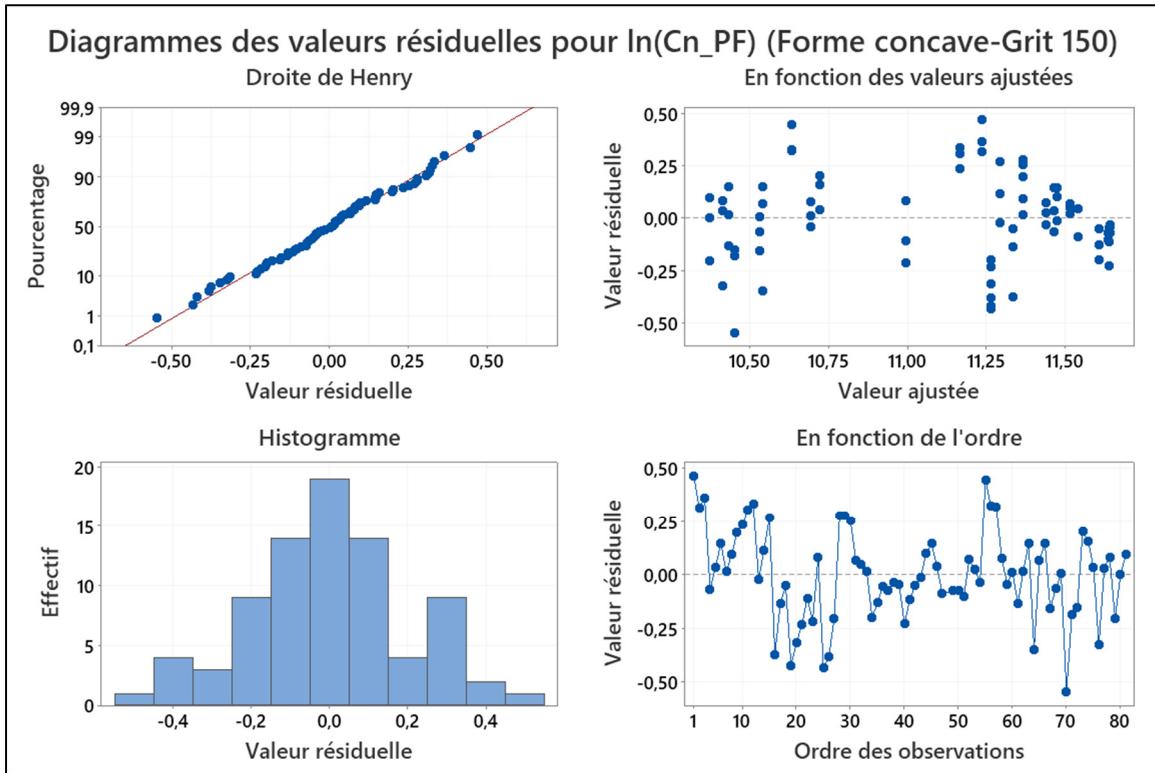


Figure 3.12 Diagramme des valeurs résiduelles pour $\ln(Cn_PF)$ (Forme concave-Grit 150)

On peut voir que les résidus semblent bien suivre un profil diagonal sur la droite d'Henry. Le panneau supérieur droit représente les valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles. Ce graphique montre que le modèle n'est pas capable de saisir toute la subtilité des données, mais cela reste toujours acceptable considérant la performance générale de celui-ci. Autrement, le panneau inférieur gauche de la Figure 3.12 représente l'erreur qui semble suivre un comportement normal autour de zéro indiquant que l'erreur n'est qu'un bruit aléatoire, ce qui prouve qu'il s'agit d'un bon modèle. On ne constate rien d'anormal dans l'ordre des observations.

3.4.1.4 Analyse des surfaces de réponse

Les surfaces de réponse sont des représentations graphiques qui matérialisent les variations d'une variable de réponse en fonction de deux paramètres. La mise en forme graphique de l'équation du modèle permet d'observer les variations de la réponse et par conséquent d'identifier les plages de données expérimentales dans laquelle la réponse est minimale ou maximale.

La Figure 3.13 représente les variations des concentrations totales en nombre des PF avec les outils de forme chanfrein et concave. Ces graphiques ont été représentés en utilisant le grit 150, en fixant à chaque fois la vitesse d'avance V_f à 500 (a₁ et b₁), 1000 (a₂ et b₂) et 1500 mm/min (a₃ et b₃) et en faisant varier la vitesse de rotation N et le débit de lubrification Q_w .

On peut tirer de ces courbes que l'effet du débit de lubrification était plus important que celui de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance. De manière générale, l'émission minimale des PF en concentration en nombre peut être obtenir avec un débit de lubrification élevé (60 ml/min) et une vitesse de rotation basse (1500 rpm) et cela s'applique pour les deux formes d'arêtes.

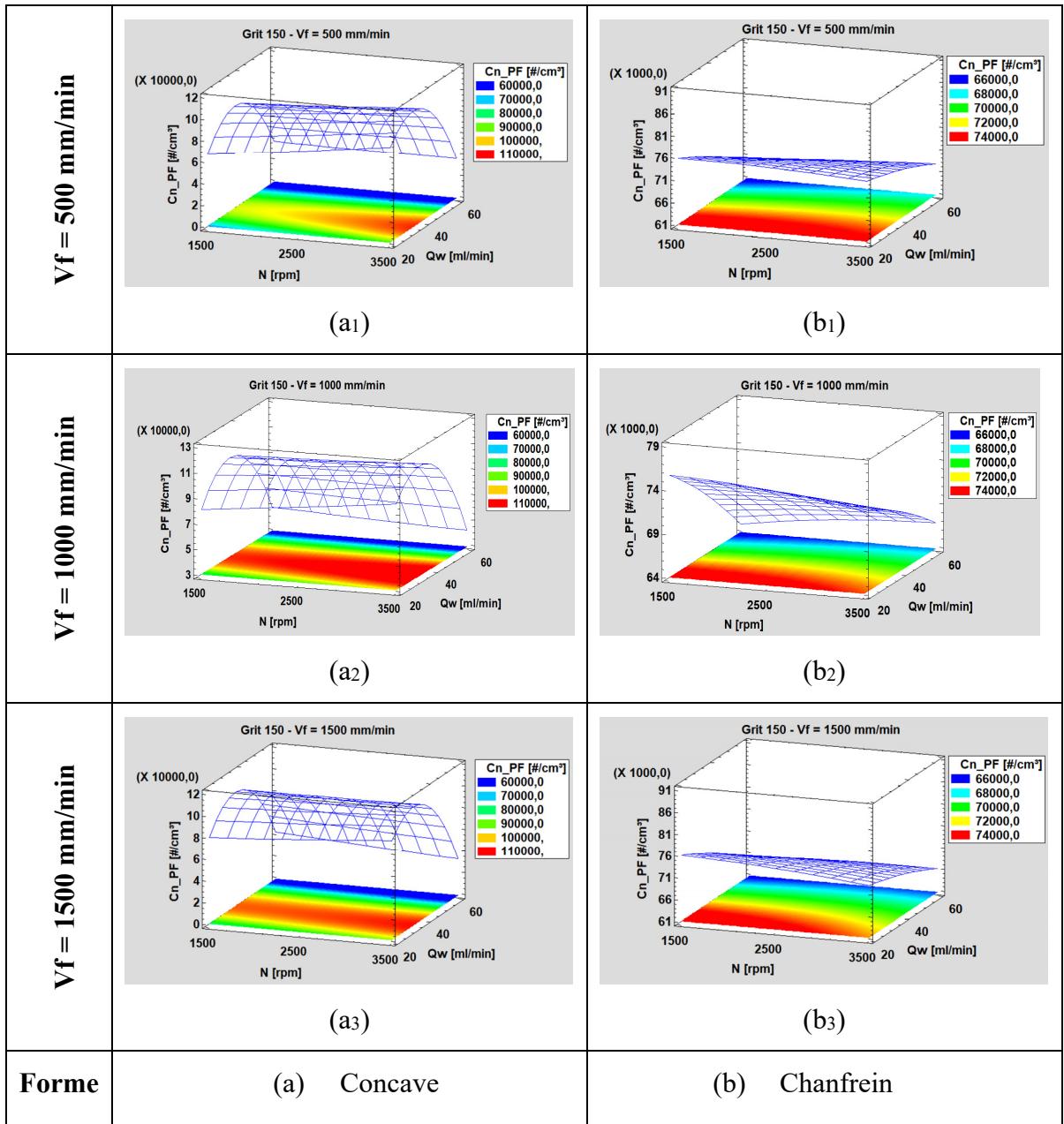


Figure 3.13 Surface de réponse 3D montrant l'effet de C_n_{PF} en utilisant l'outil de forme concave et chanfrein en phase d'ébauche pour différentes vitesses d'avance

3.4.2 Phase de finition (grit 600)

3.4.2.1 Diagramme Pareto

La Figure 3.14 illustre le diagramme Pareto de la concentration totale en nombre des PF en utilisant la forme chanfrein et concave. Au même niveau d'IC de 95 %, on retrouve que tous les paramètres avaient un effet significatif ($p < 0.05$) sur la réponse de Cn_PF soit sous forme linéaire ou en interaction avec un autre paramètre en utilisant l'outil concave. Cependant, l'effet du débit de lubrification reste le plus dominant en forme quadratique, linéaire ainsi qu'en interaction avec le facteur V_f en polissant avec la forme chanfrein.

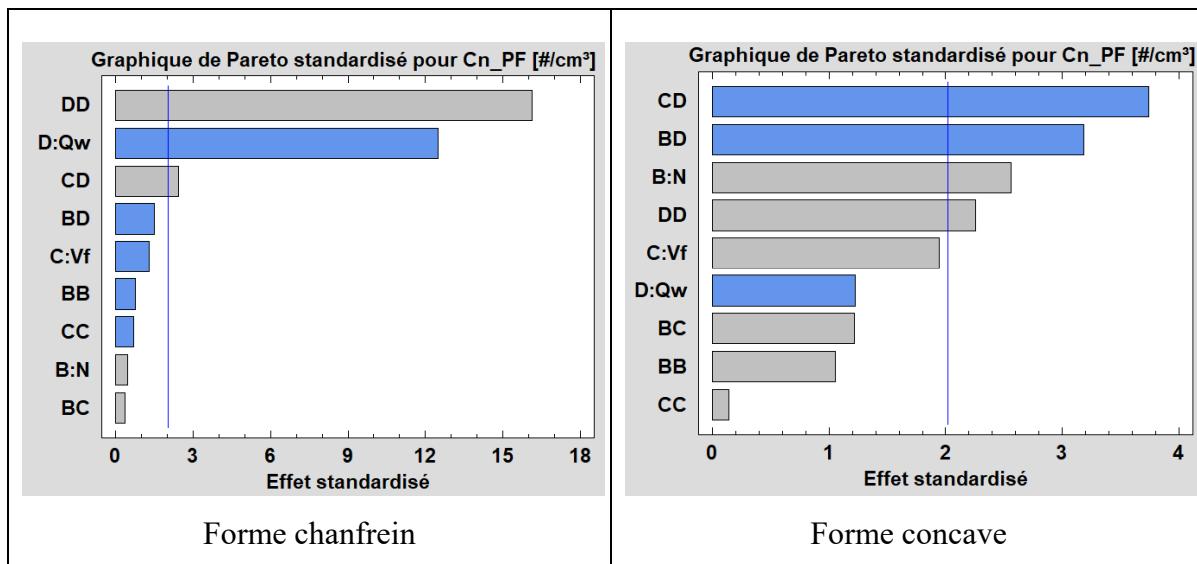


Figure 3.14 Diagramme Pareto de Cn_PF en utilisant les outils de forme chanfrein et concave en phase de finition

3.4.2.2 Analyse ANOVA

Avant de procurer à l'analyse ANOVA, le test de Levene a été utilisé pour étudier l'homogénéité de la variance des données. Ce test statistique évalue l'égalité de variance d'une variable mesurée pour deux groupes ou plus. Le résultat de ce test a donné une valeur de p supérieure au seuil de signification de 5 % ce qui mène à ne pas rejeter l'hypothèse nulle, et par la suite confirmer l'homogénéité des variances.

Tableau 3.4 Table ANOVA de Cn_PF pour la forme chanfrein (phase de finition grit 600)

Analyse de la variance pour Chanfrein Cn PF (R²=91%)				
<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>DDL</i>	<i>Rapport F</i>	<i>Proba.</i>
B:N [rpm]	7.0225 E6	1	0.20	0.6534
C:Vf [mm/min]	5.87778 E7	1	1.71	0.1976
D:Qw [ml/min]	5.35824 E9	1	156.02	0.0000
BB	1.90008 E7	1	0.55	0.4609
BC	4.68167 E6	1	0.14	0.7137
BD	7.66838 E7	1	2.23	0.1422
CC	1.63333 E7	1	0.48	0.4940
CD	2.05335 E8	1	5.98	0.0186
DD	8.94348 E9	1	260.41	0.0000
Erreur totale	1.5111 E9	44		
Total (corr.)	1.62007 E10	53		

Tableau 3.5 Table ANOVA de Cn_PF pour la forme concave (phase de finition grit 600)

Analyse de la variance pour Concave Cn PF (R²=50%)				
<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>DDL</i>	<i>Rapport F</i>	<i>Proba.</i>
B:N [rpm]	5.08503 E8	1	6.55	0.0140
C:Vf [mm/min]	2.9298 E8	1	3.77	0.0585
D:Qw [ml/min]	1.15563 E8	1	1.49	0.2290
BB	8.58675 E7	1	1.11	0.2988
BC	1.14844 E8	1	1.48	0.2305
BD	7.8776 E8	1	10.14	0.0027
CC	1.54083 E6	1	0.02	0.8886
CD	1.08811 E9	1	14.01	0.0005
DD	3.95601 E8	1	5.09	0.0290
Erreur totale	3.4171 E9	44		
Total (corr.)	6.80787 E9	53		

Les résultats figurés dans le Tableau 3.4 et le Tableau 3.5 montrent en plus de la signification statistique des effets, que le coefficient de corrélation R^2 du modèle représentant les valeurs expérimentales varie selon la forme de l'outil utilisée (chanfrein ou concave). Contrairement à la phase d'ébauche, la forme chanfrein semble avoir une valeur de R^2 plus importante que celle de la forme concave. La grande importance du débit de lubrification et son effet sur les

émissions de PF avec la forme chanfrein explique cet écart de coefficient de détermination. Par conséquent, le modèle de prédiction des émissions de PF en utilisant la forme concave va être rejeté vu son faible coefficient de corrélation.

Dans la Figure 3.15, les interactions significatives du débit de lubrification 'Qw' avec la vitesse d'avance 'Vf' (Figure 3.15-a) dans l'analyse de la variance de la forme chanfrein ainsi que les interactions significatives du débit de lubrification 'Qw' avec la vitesse de rotation 'N' (Figure 3.15-b) et avec la vitesse d'avance 'Vf' (Figure 3.15-c) dans l'analyse de la variance de la forme concave sur la concentration totale en nombre des PF sont représentées.

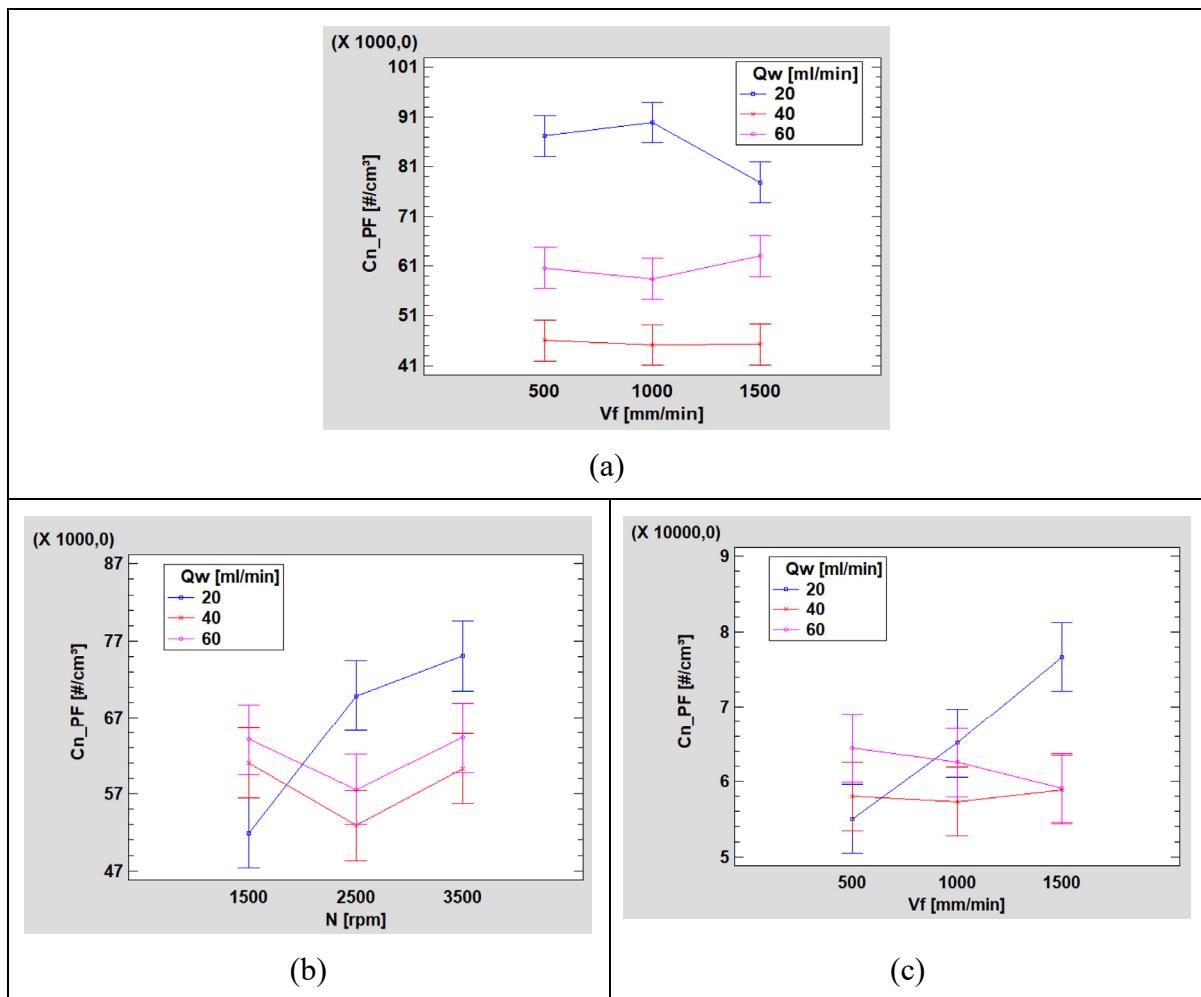


Figure 3.15 Diagrammes d'interaction significative de ;
 (a) V_f et Q_w (forme chanfrein), (b) N et Q_w (forme concave), (c) V_f et Q_w (forme concave)

On peut constater à travers ces diagrammes, qu'en utilisant le débit de 20 ml/min, l'effet de 'N' et celui de 'Vf' était significatif à un certain niveau en utilisant les deux formes d'arête chanfrein et concave. Alors qu'en voyant les courbes des débits 40 et 60 ml/min, aucune conclusion ne peut être tirée sur l'effet de ces paramètres sur la réponse étudiée. Cependant, leurs interactions avec le 'Qw' en voyant les courbes en intersection et qui ne sont pas parallèles en passant d'un niveau à un autre, on peut dire que ces interactions sont significatives et importantes sur la génération des PF en utilisant la forme chanfrein et concave en phase de finition.

3.4.2.3 Les modèles de prédiction proposés

Dans ce paragraphe, la forme générale du modèle a été gardée la même comme dans l'Équation (3.2) tenant compte de l'effet linéaire et quadratique des variables en plus de l'interaction entre eux.

L'Équation (3.6) représente le modèle de la Cn_PF en utilisant la forme chanfrein pendant la phase de finition.

$$\ln(\widehat{Cn_{PF}})_{chanfrein} = 13.02 - 0.1 Q_w + 1.1 * 10^{-3} Q_w^2 + 3.8 * 10^{-6} V_f * Q_w \quad (3.6)$$

Dans le Tableau 3.6, on constate qu'il s'agit d'un modèle qui est somme toute performant. Les valeurs de R^2 et de R^2_{aj} sont tous les deux largement supérieurs à 85 % indiquant la forte corrélation entre le modèle et les données expérimentales. De plus, la valeur de Durbin-Watson se rapproche de 2 ce qui sous-entend qu'il n'y a pas de problème d'autocorrélation dans le modèle, et les erreurs quadratique et absolue sont presque égales à zéro, ce que l'on peut voir clairement dans la Figure 3.16 où l'écart entre la valeur du modèle et la moyenne des résultats expérimentales pour le même essai était relativement faible.

Tableau 3.6 Indices de performance du modèle de $\ln(Cn_PF)$ pour la forme chanfrein en phase de finition (Grit 600)

Indice de performance	Valeur calculée	Valeur idéale
Coefficient R^2	92 %	> 85 %
Coefficient R^2_{aj}	91.5 %	
Valeur de Durbin-Watson	1.42	~ 2
NRMS	0.66	<10 %
MAPE	0.52	

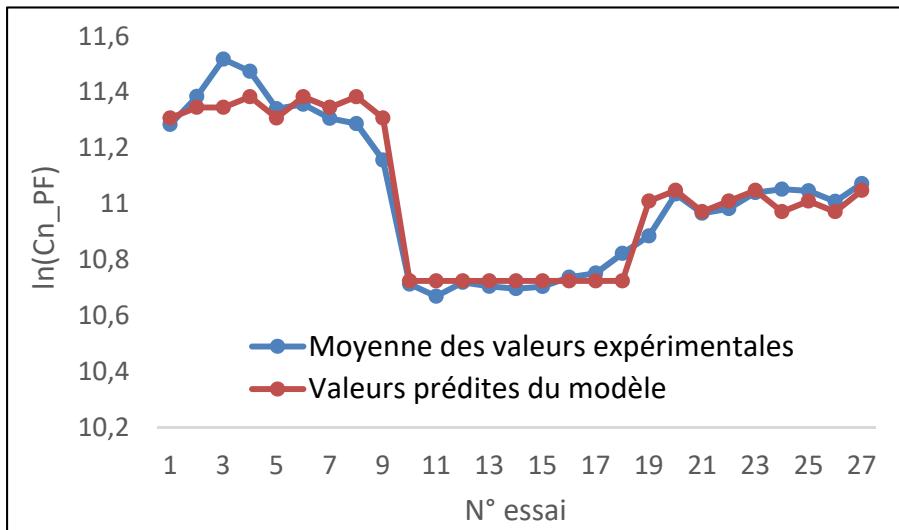


Figure 3.16 Courbe de $\ln(Cn_PF)$ pour les valeurs expérimentales et les valeurs prédites du modèle (Forme chanfrein-Grit 600)

La Figure 3.17 comporte les diagrammes permettant d'analyser l'erreur résiduelle où on remarque que les résidus ont un certain patron sur la droite d'Henry. Concernant les valeurs ajustées, il est possible de constater trois zones distinctes ; cela pourra être dû à la nature du

DOE à trois niveaux et au fait que la réponse modélisée est principalement affectée par un paramètre qui est le débit de lubrification Q_w . Afin de brosser un portrait plus inclusif, il faudrait rajouter des niveaux de tests ou en modifier les limites afin d'éviter des sauts abrupts dans les valeurs de $\ln(Cn_PF)$. L'histogramme quant à lui, représente bien une allure normale autour du zéro et il ne semble pas avoir un patron dans l'ordre des observations.

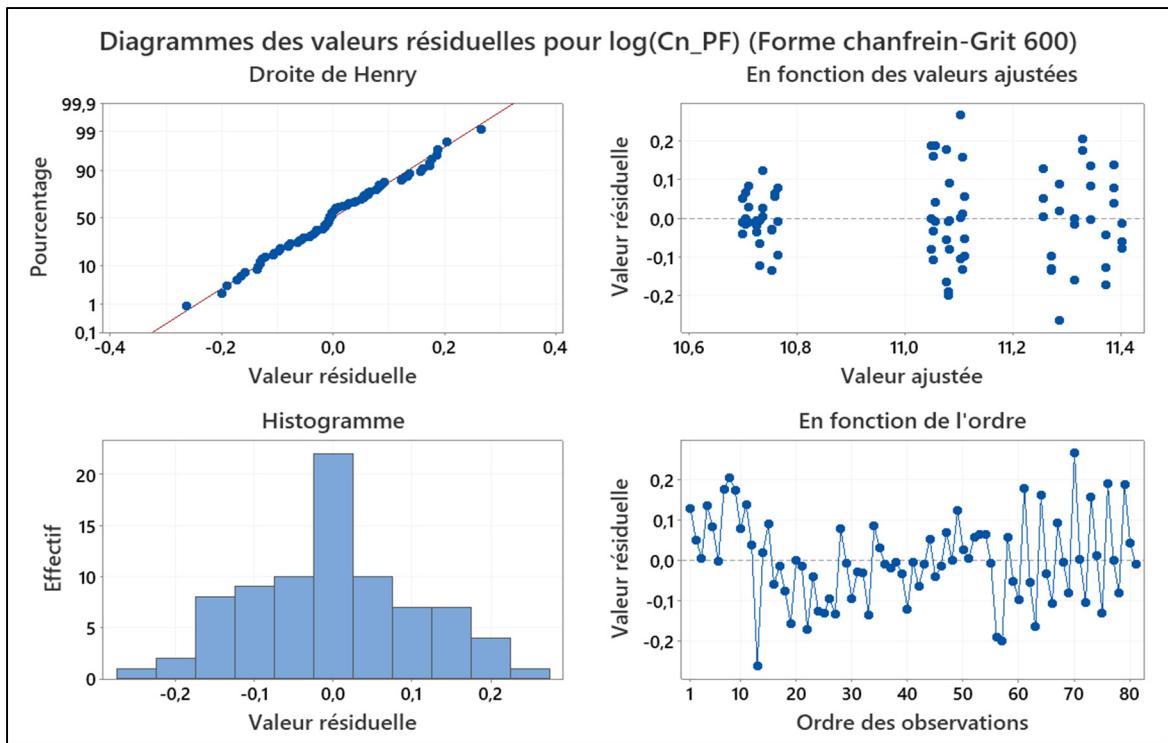


Figure 3.17 Graphiques des valeurs résiduelles pour $\ln(Cn_PF)$ (Forme chanfrein-Grit 600)

3.4.2.4 Analyse des surfaces de réponse

Dans la Figure 3.18 est représenté la variation de la concentration totale en nombre des PF pour les formes chanfrein et concave dans un graphique 3D qui met en évidence l'effet de 2 paramètres simultanément sur la réponse étudiée. Les graphiques (a₁) et (b₁) ont été représentés à une vitesse d'avance égale à 1000 mm/min, alors que les graphiques (a₂) et (b₂) ont été représentés à un débit de lubrification de 20 ml/min.

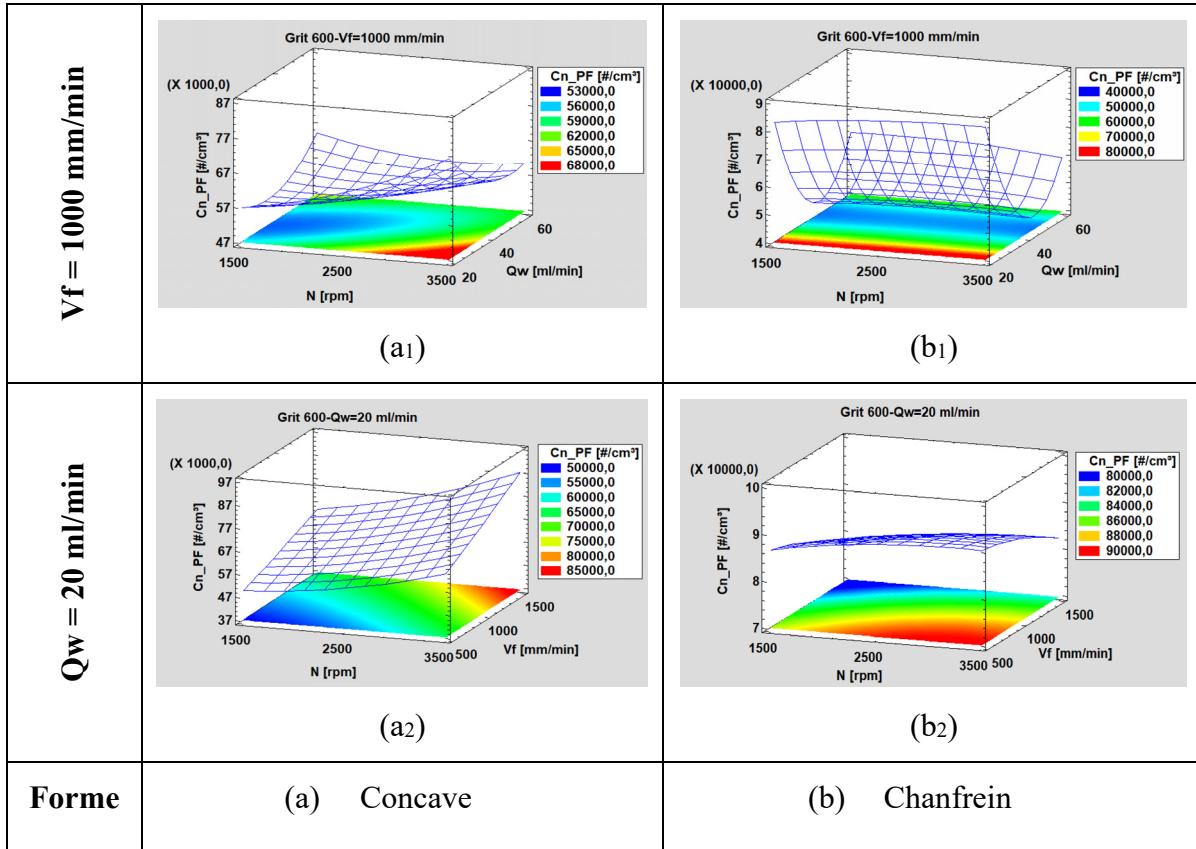


Figure 3.18 Surface de réponse 3D montrant l'effet de Cn_PF en utilisant l'outil de forme concave et chanfrein en phase de finition (grit 600) à $Vf = 1000$ mm/min ((a₁) et (b₁)) et à $Qw = 20$ ml/min ((a₂) et (b₂))

Le débit de lubrification garde toujours une importance assez élevée sur la génération des PF en concentration totale en nombre. Un faible débit de lubrification dégage plus de PF en concentration en nombre. Concernant la vitesse de rotation de la broche, on peut constater que, comme cela était révélé dans la phase d'ébauche, les petites vitesses ont permis d'avoir moins de PF en concentration en nombre. Quant à la vitesse d'avance, son effet est dépendant de la forme réalisée. Le polissage avec l'outil chanfrein, à faible vitesses d'avance, permet d'avoir une grande émission de concentration en nombre des PF. Tandis qu'en utilisant l'outil de forme concave, le maximum d'émission a été observé avec les grandes vitesses d'avance. Ces constatations nous permettent de conclure que l'effet de chaque paramètre est dépendant de la forme de l'arête désirée.

3.5 Conclusion

Dans la littérature, plusieurs études ont démontré que les conditions de coupe ont un effet sur la génération des particules lors des procédés d'usinage et de polissage. Certains résultats obtenus dans ce chapitre ne vont toujours pas avec ce qui a été trouvé auparavant vu les conditions d'expérimentation différentes.

Globalement, les tailles de grit et le débit de lubrification influencent significativement les émissions de particules fines et ultrafines quel que soit les autres paramètres de coupe utilisés. En phase d'ébauche, les outils de petites tailles de grit dégagent des quantités importantes de PF et des faibles quantités de PUF. L'augmentation de la taille de grit jusqu'à la phase de finition fait diminuer les émissions de PF, mais elle permet une émission plus grande de PUF. Toutefois, il ne faut jamais oublier que la pratique industrielle exige l'utilisation de tous les outils sans aucune exception, dans le but d'obtenir à la fin la qualité de surface demandé par les clients.

Pour le débit de lubrification, l'utilisation de débits élevés est recommandée puisqu'elle diminue la génération des PF et des PUF lors du polissage avec les deux formes d'arête chanfrein et concave.

Selon la forme de l'arête désirée et la phase de polissage considérée, l'effet des autres paramètres de coupe tels que la vitesse de rotation et la vitesse d'avance diffère, bien que l'utilisation de la forme chanfrein est favorisée puisqu'elle dégage plus de PF mais moins de PUF, qui sont considérés plus nocifs, comparé à la forme concave.

Étant donné que l'étude des émissions de poussière est faite dans cette section, l'étude des états de surface lors de la finition de l'arête va être élaboré dans le chapitre suivant afin de répondre aux objectifs principaux de ce projet.

CHAPITRE 4

FINIS DE SURFACE

4.1 Introduction

Dans cette partie du travail, on s'intéressera à l'étude des finis de surface des arêtes des pièces de granit blanc. Tout d'abord, une analyse des effets principaux de tous les paramètres étudiés nous permettra de dégager les facteurs qui ont le plus d'effet sur les variables de sortie. Par la suite, on visualisera quelques profils de surface obtenus lors des expériences, et on procédera par une analyse statistique des variables de sorties telles que la rugosité moyenne arithmétique R_a et la hauteur totale du profil R_t afin de pouvoir sortir des conclusions plus pertinentes.

4.2 Analyse des effets directs sur la rugosité

Les diagrammes des effets principaux de la rugosité arithmétique R_a et de la hauteur totale du profil de surface balayé R_t sont représentés à la Figure 4.1. Ces graphiques donnent une idée générale du comportement de la réponse étudiée envers la variation des paramètres du plan d'expérience tels que la forme de l'arête, la taille de grit, la vitesse de rotation de la broche, la vitesse d'avance et le débit de lubrification.

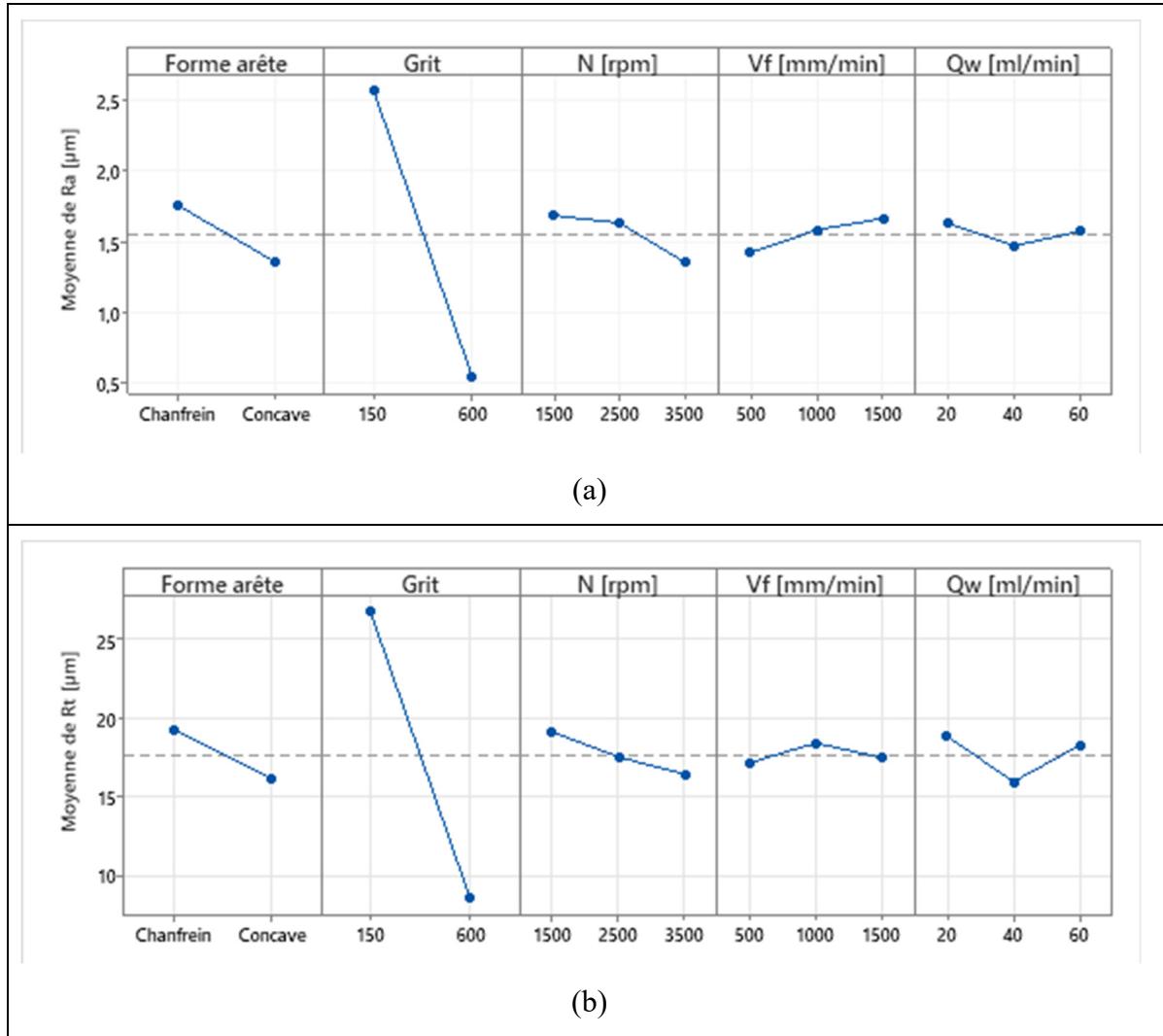


Figure 4.1 Diagramme des effets principaux de ; (a) Ra, (b) Rt

On peut constater rapidement que l'allure des courbes de tous les facteurs est la même pour les deux réponses Ra et Rt. La taille de grit avait l'effet significatif le plus important parmi tous les autres paramètres de polissage. Il est évident que le passage de la phase d'ébauche vers la phase de finition améliore davantage le fini de surface peu importe les conditions de coupe utilisées. En ce qui concerne la forme de l'arête, un outil de forme concave semble donner un meilleur état de surface, ainsi une rugosité Ra et Rt plus faible que la forme chanfrein. Les vitesses de rotation et d'avance ont peut-être un effet significatif sur la rugosité mais cela reste

encore à étudier dans une analyse statistique plus approfondie. Cependant, le débit de lubrification n'avait pas d'effet remarquable sur le fini de surface en examinant toutes les données à la fois. Cela pourrait être différent dans chaque phase de polissage étudiée seule.

4.2.1 Effet de la forme de l'arête réalisée

La variation des valeurs de rugosité R_a et R_t en fonction de la taille de grit pour les deux formes d'arête réalisées a été représentée respectivement dans la Figure 4.2 et la Figure 4.3. D'après ces graphiques, à une configuration de $N = 3500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min et $Q_w = 20$ ml/min, on peut voir que le fini de surface de la forme concave était légèrement meilleur que celui de la forme chanfrein tout au long du processus de finition de l'arête. Cette différence est probablement due à la répartition des diamants dans chaque outil de forme différente. Il se peut que la ligne qui fait un angle de 45° à l'arête chanfreinée contribue à un manque de grains de diamants aux alentours de l'arête lors de la fabrication de l'outil, alors que dans l'outil de forme concave, il n'y a pas de discontinuité de matière autour de l'arête, et les grains de diamants y sont uniformément répartis. Mentionnons que plus la quantité de diamants sur une surface de l'outil, meilleure est la rugosité de la pièce polie avec cette surface. Cette explication pourrait être une des raisons pour laquelle la forme concave générera un meilleur état de surface que la forme chanfrein, mais cette interprétation nécessite plus d'études approfondies pour la valider.

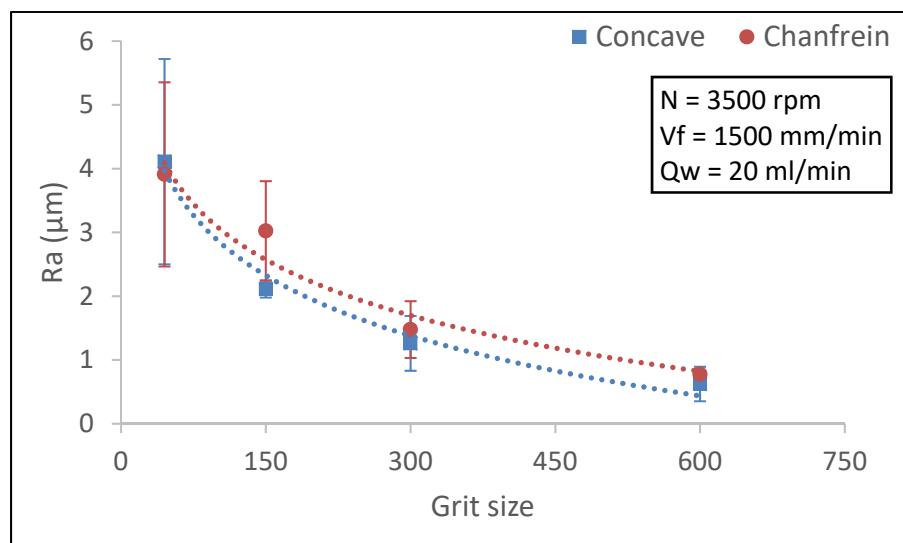


Figure 4.2 Courbe de R_a en fonction de la taille de grit pour l'outil de forme chanfrein et concave

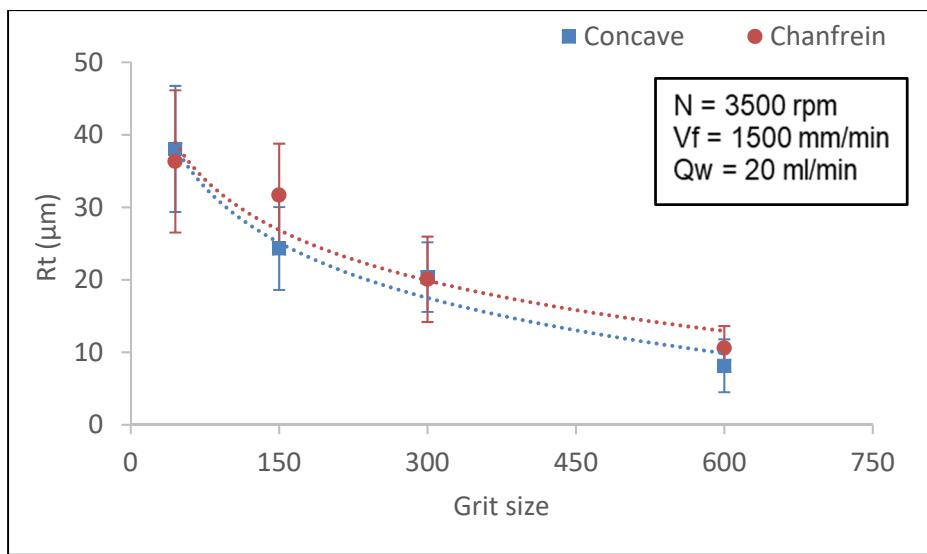


Figure 4.3 Courbe de Rt en fonction de la taille de grit pour l'outil de forme chanfrein et concave

Les équations des courbes de tendances représentant les paramètres de rugosité Ra et Rt en fonction de la taille de grit pour chaque forme d'arête sont mentionnées dans le Tableau 4.1. Ces équations modélisant la variable de sortie avaient des coefficients de corrélation très importants (> 90 %) ce qui permettra de prédire, selon l'outil utilisé (forme et taille de grit), les valeurs de rugosité Ra et Rt qu'on pourra avoir.

Tableau 4.1 Équations de tendance de Ra et Rt en fonction de grit en utilisant les outils de forme chanfrein et concave

Forme d'arête réalisée	Équation de tendance (N = 3500 rpm ; Vf = 1500 mm/min ; Qw = 20 ml/min)	R ²
Chanfrein	$Ra = -1.26 \ln(G) + 8.9$	95 %
	$Rt = -10.05 \ln(G) + 77.2$	91 %
Concave	$Ra = -1.36 \ln(G) + 9.15$	98 %
	$Rt = -11.01 \ln(G) + 80.3$	97 %

4.2.2 Effet de la taille de grit

Dans cette partie, l'étude de l'effet de la taille de grit se fera à travers l'exploitation des profils de surface des arêtes réalisés avec les différents outils de forme chanfrein et concave. Les conditions de polissage étaient fixées à une vitesse de rotation $N = 2500$ tr/min, une vitesse d'avance $V_f = 1000$ mm/min et un débit de lubrification $Q_w = 60$ ml/min. La comparaison entre les différentes rugosités de surface des arêtes est faite avec l'écart moyen arithmétique Ra en plus de l'observation du profil de surface. Le Tableau 4.2 a été réalisé pour cet effet.

On peut constater dans toutes les observations la présence de plusieurs creux et pics dans la surface définis par des grosses amplitudes négatives et positives ainsi que des amplitudes non-périodique tout en balayant la surface de l'arête. Cela s'explique par l'hétérogénéité du matériau granit, qui est composé de plusieurs cristaux collés les uns aux autres. Pour cette raison, le choix du critère de comparaison entre les rugosités de surface était fait pour une moyenne arithmétique donnée par l'écart moyen Ra .

A une même échelle, les amplitudes tendent à diminuer significativement en passant d'une taille de grit à la suivante avec les deux formes d'arête chanfrein et concave. Cela explique l'effet de l'augmentation de la quantité de diamants présente dans les outils avec les grandes tailles de grit, qui est capable de minimiser les irrégularités et les stries présentes dans le matériau et améliorer sa qualité de surface. La Figure 4.4 montre l'exemple de la surface polie avec les différentes tailles de grit de l'outil de forme concave à $N = 2500$ tr/min, $V_f = 1000$ mm/min et $Q_w = 60$ ml/min.

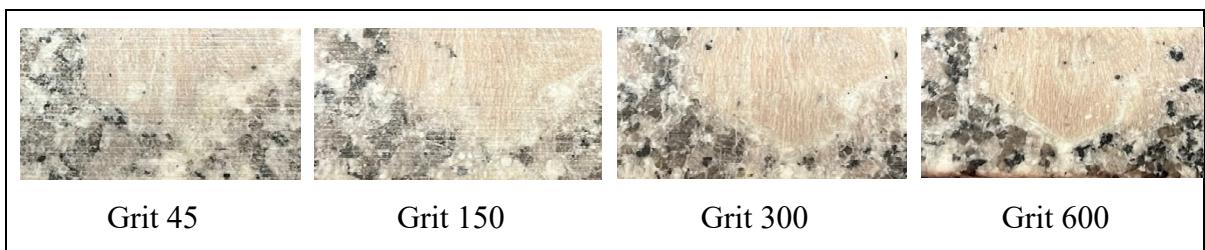
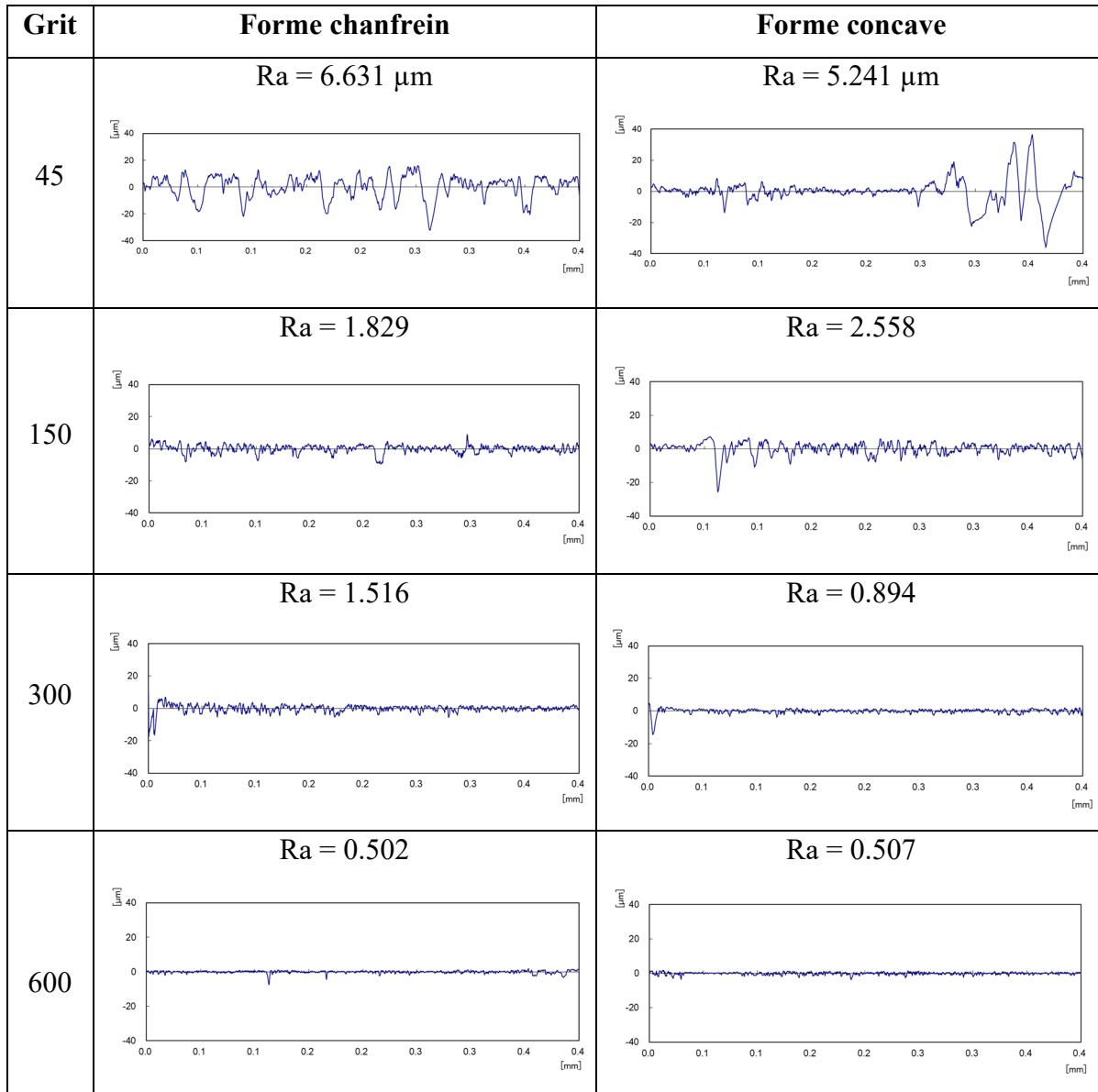


Figure 4.4 Effet de la taille de grit de l'outil sur la surface de l'arête concave du granit blanc

Tableau 4.2 Évolution des profils de surface et de rugosité Ra de l'arête de granit blanc en forme chanfrein et concave en fonction des tailles de grit



4.3 Analyse statistique

Rappelons que la succession des outils de polissage en augmentant la taille de grit est primordiale durant le processus de finition des arêtes de granit. Pour aboutir à une surface finie, bien polie et brillante qui est prête à la livraison au client, il faut absolument passer par tous

les outils sans sauter aucune des tailles de grit au cours du processus de polissage. Comme la principale importance dans la finition des arêtes est donnée à la surface que l'outil de finition donne, l'étude statistique portera seulement sur les paramètres de coupe utilisés dans cette phase de polissage (N, Vf et Qw).

Lors de l'analyse des données de rugosité issues des expériences en phase de finition, il s'est avéré que la meilleure réponse à étudier pour le fini des surfaces était la rugosité arithmétique moyenne Ra. Comme on l'avait déjà démontré que ce matériau est caractérisé par une hétérogénéité bien remarquable, les résultats de la rugosité Rt (hauteur totale du profil de surface balayé) étaient caractérisés par une grande dispersion, ce qui n'a pas permis l'identification des paramètres qui affectent cette réponse lors du polissage de l'arête en phase de finition, et par la suite la difficulté de construction d'un modèle prédictif d'ajustement. Le diagramme de Pareto ainsi que les graphs de l'influence des paramètres sur la réponse Rt sont représentés dans l'Annexe V.

4.3.1 Diagramme Pareto

D'après la Figure 4.5, on constate que les effets statistiquement significatifs sur la réponse Ra étaient les mêmes en utilisant les deux formes d'arête. Cependant, l'ordre d'importance diffère d'une forme à l'autre. Le débit de lubrification Q_w apparaît comme le plus dominant avec la forme chanfrein, mais il est à peine significatif avec la forme concave. Alors que la vitesse d'avance V_f était le facteur le plus important en utilisant l'outil concave, contre une importance minimale avec la forme chanfrein.

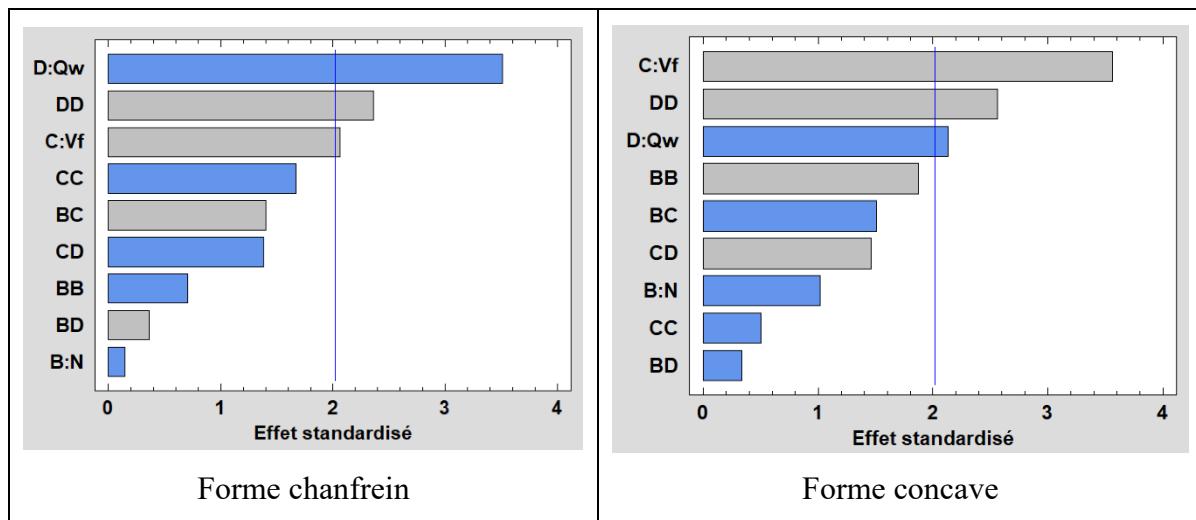


Figure 4.5 Diagramme Pareto de Ra pour l'outil de forme chanfrein et concave

4.3.2 Analyse ANOVA

L'analyse de variance ANOVA étudie les effets des paramètres indépendants et de leurs interactions dans le but de savoir à quel point ces paramètres auront un effet sur la réponse dépendante. Par la suite, une régression multiple va permettre, en fonction des paramètres significatifs (principaux ou en interaction), de ressortir un modèle empirique caractérisé par son coefficient de Pearson R^2 . Les tableaux ci-dessous représentent les tableaux de l'ANOVA de la variable de réponse Ra lors du polissage de l'arête du granit blanc avec l'outil grit 600 en utilisant la forme chanfrein (Tableau 4.3) et la forme concave (Tableau 4.4). Les probabilités P obtenus pour chaque facteur nous permettent de comparer le seuil de signification à un intervalle de confiance de 95 %. Les facteurs ayant une valeur de p inférieure à 0.05 sont considérés comme statistiquement significatifs. Quant à la valeur du coefficient de corrélation du modèle représentant les données avec tous les facteurs étudiés et leurs interactions, on constate qu'avec les deux formes d'arête, la valeur du R^2 n'était pas proche de 80 % pour dire que le modèle est puissant et représente bien les valeurs expérimentales. Le modèle issu des données de la forme chanfrein en fonction des variables N, Vf et Qw et leurs interactions avait un R^2 égal à 40 % et celui de la forme concave était égal à 43 %. Ce résultat était prévu puisqu'on savait à l'avance que le principal facteur qui agit le plus sur la rugosité Ra est la

taille de grit de l'outil. L'absence de ce facteur dans le modèle ne lui donnera pas la pertinence nécessaire pour bien représenter les données expérimentales.

Tableau 4.3 Table ANOVA de Ra pour la forme chanfrein (grit 600)

Analyse de la variance de Ra pour Chanfrein et grit 600 (R²=40%)				
<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>DDL</i>	<i>Rapport F</i>	<i>Proba.</i>
B:N [rpm]	0.00115423	1	0.02	0.8764
C:Vf [mm/min]	0.237757	1	5.08	0.0332
D:Qw [ml/min]	0.689026	1	14.73	0.0007
BB	0.0277045	1	0.59	0.4487
BC	0.109037	1	2.33	0.1393
BD	0.00729349	1	0.16	0.6963
CC	0.155752	1	3.33	0.0800
CD	0.106499	1	2.28	0.1438
DD	0.311487	1	6.66	0.0161
Test de manque d'adéquation	1.17242	17	1.47	0.1842
Erreur pure	1.1692	25		
Total (corr.)	3.93034	51		

Tableau 4.4 Table ANOVA de Ra pour la forme concave (grit 600)

Analyse de la variance de Ra pour Concave et grit 600 (R²=43%)				
<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>DDL</i>	<i>Rapport F</i>	<i>Proba.</i>
B:N [rpm]	0.0173361	1	1.18	0.2861
C:Vf [mm/min]	0.214678	1	14.66	0.0007
D:Qw [ml/min]	0.0765444	1	5.23	0.0303
BB	0.0592676	1	4.05	0.0543
BC	0.0384	1	2.62	0.1170
BD	0.0018375	1	0.13	0.7259
CC	0.00428148	1	0.29	0.5931
CD	0.0360375	1	2.46	0.1283
DD	0.110848	1	7.57	0.0105
Test de manque d'adéquation	0.348773	17	1.40	0.2110
Erreur pure	0.3953	27		
Total (corr.)	1.3033	53		

Les graphiques des moyennes illustrés ci-dessous montrent l'influence de chaque paramètre sur le fini de surface Ra pour la forme chanfrein (Figure 4.6) et pour la forme concave (Figure

4.7). La vitesse de rotation N n'avait pas d'effet significatif sur la rugosité Ra puisque les intervalles de confiance se chevauchent, ce qui confirme les travaux de (Kouamou Njouokep, 2020) faits sur le polissage surfacique à sec du granit blanc. Quant aux deux paramètres significatifs Vf et Qw, il semble que la diminution de l'avance ainsi que les gros débits de lubrification permettent d'avoir le meilleur fini de surface. Les mêmes constatations s'appliquent pour les deux formes d'outils.

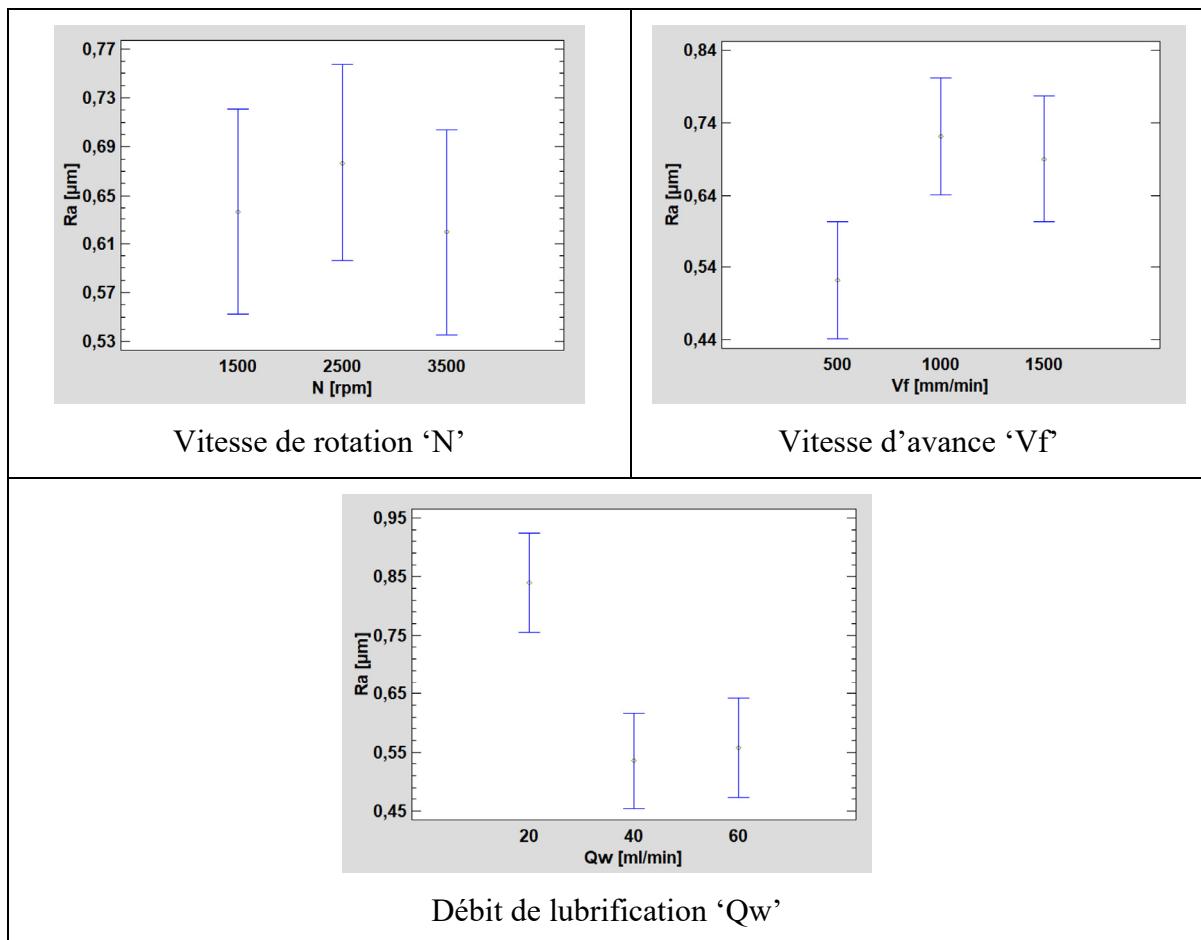


Figure 4.6 Graphiques des moyennes de Ra en utilisant l'outil de forme chanfrein

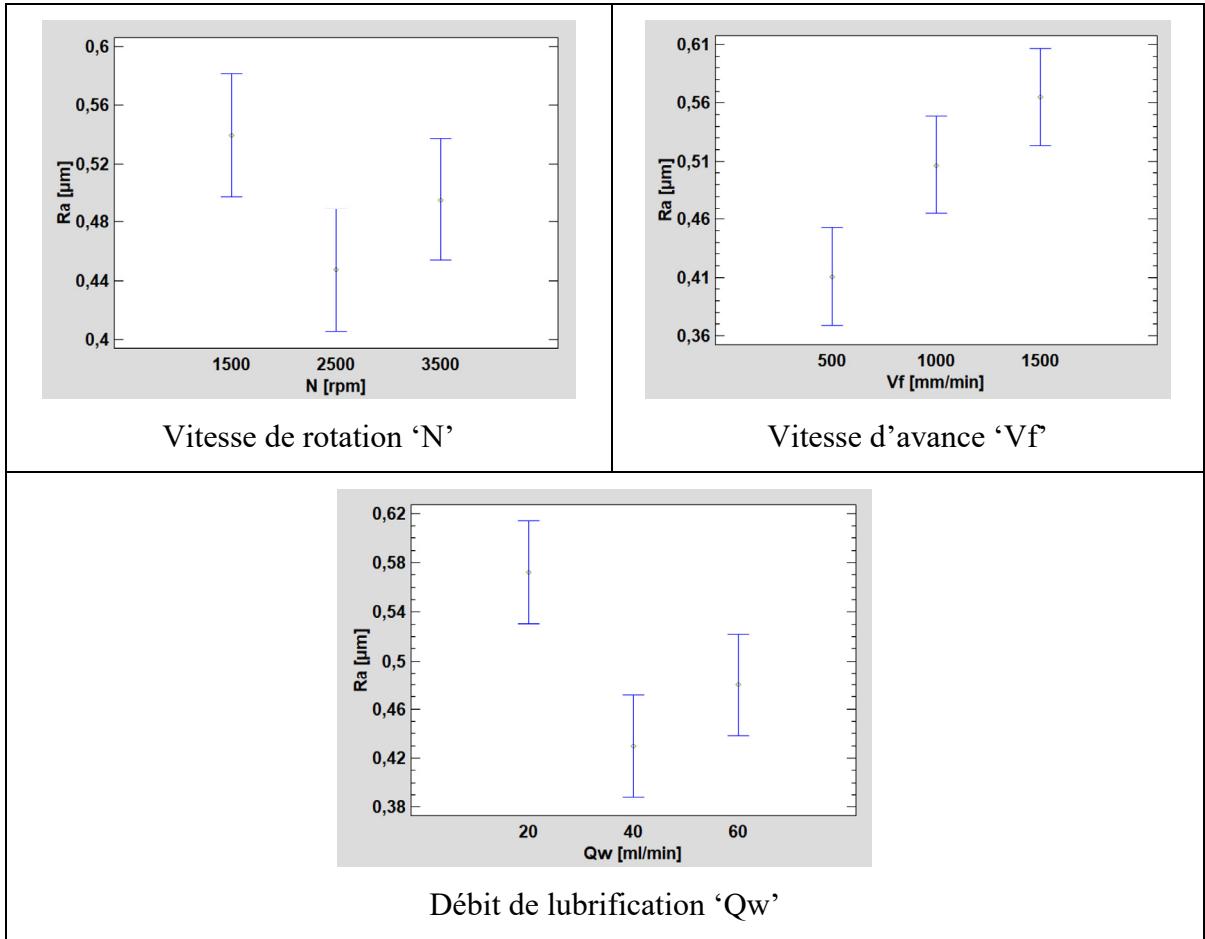


Figure 4.7 Graphiques des moyennes de Ra en utilisant l'outil de forme concave

4.3.3 Les modèles proposés

Rappelons que les modèles retrouvés dans cette partie de l'étude ont été élaborés seulement pour la phase de finition en utilisant l'outil de grit 600. Malheureusement, ils avaient des faibles coefficients de Pearson R^2 qui sont inférieurs à 50 %. Les équations des modèles correspondants à la rugosité Ra pour la forme chanfrein et la forme concave sont représentées dans l'Équation (4.1) et l'Équation (4.2) ci-dessous. Pour la variable Rt, les modèles ont été rejettés pour leurs faibles valeurs de R^2 qui étaient proches du zéro.

$$\widehat{Ra}_{chanfrein} = 1,329 + 1,33 * 10^{-4} V_f - 0.04 Q_w + 4,57 * 10^{-4} Q_w^2 \quad (4.1)$$

$$\widehat{Ra}_{concave} = 0,737 + 1,68 * 10^{-4} V_f - 0,02 Q_w + 2,12 * 10^{-4} Q_w^2 \quad (4.2)$$

Le Tableau 4.5 regroupe les indices de performance pour ces modèles. On peut clairement voir que les valeurs retrouvées ne sont pas des indicateurs d'un bon modèle. Les coefficients de détermination sont assez faibles malgré que, selon les tableaux de l'ANOVA, les manques d'ajustement 'Lack of fit' ne sont pas significatifs. En plus, l'erreur occupe une place importante dans ces modèles, avec des valeurs de NRMS et MAPE supérieurs à 20 %. En effet, on recherche idéalement des erreurs inférieures à 10 %, même si ces valeurs restent toujours inférieures à 30 % on peut considérer que le modèle est adéquat surtout quand les coefficients de corrélation sont supérieurs à 85 %. Mais dans notre cas, avec des valeurs de R^2 et R^2_{aj} relativement faibles, on est obligé de rejeter ces modèles. Pour cette raison, l'étude des valeurs résiduelles ne sera pas faite.

Tableau 4.5 Indices de performance du modèle de Ra en utilisant l'outil de forme chanfrein et concave en phase de finition (Grit 600)

Indice de performance	Valeurs calculées		Valeurs idéales
	Forme chanfrein	Forme concave	
Coefficient R^2	40.4 %	43 %	> 85 %
Coefficient R^2_{aj}	27.6 %	31.2 %	
Valeur de Durbin-Watson	2.1	2.2	~ 2
NRMS	26.84	19.43 %	<10 %
MAPE	27.64	22.67 %	

4.3.4 Analyse des surfaces de réponse

Les surfaces de réponse à la Figure 4.8 matérialisent la variation de la rugosité Ra en fonction des deux paramètres vitesse d'avance 'Vf' et débit de lubrification 'Qw' à des vitesses de coupe N = 1500 (a₁ et b₁), 2500 (a₂ et b₂) et 3500 rpm (a₃ et b₃).

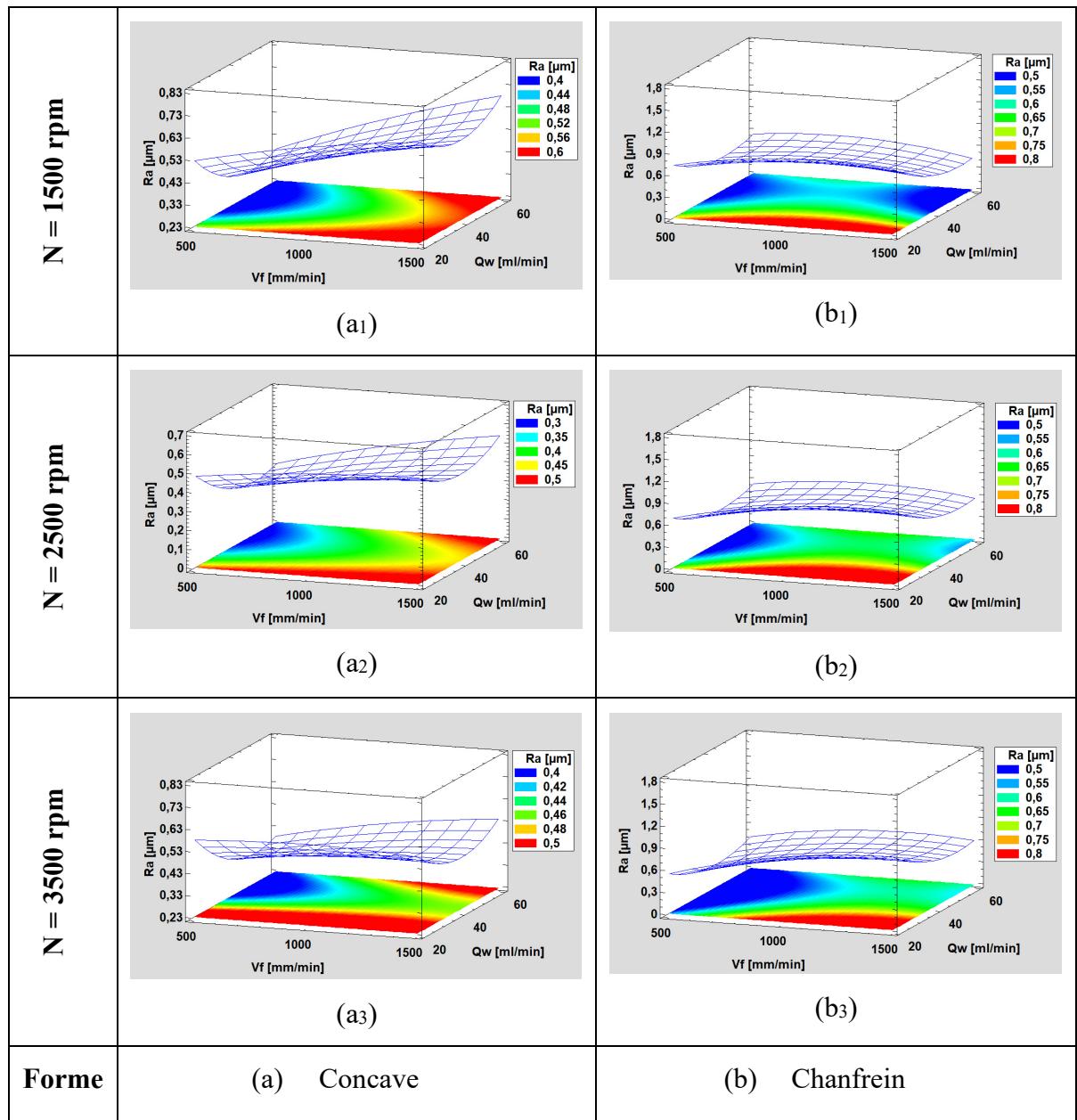


Figure 4.8 Surfaces de réponse de Ra en utilisant l'outil de forme ; (a) concave, (b) chanfrein (Grit 600 ; N = 1500, 2500 et 3500 rpm)

Les zones dans lesquels la rugosité Ra était minimale sont identifiés dans la projection des graphiques 3D par la couleur bleue, tandis que les grandes valeurs de rugosité sont déterminées par la couleur rouge. Par conséquent, on peut dire que les faibles valeurs de rugosité Ra, signe d'un bon fini de surface, ont été mesurées surtout avec des faibles vitesses d'avance et des grands débits de lubrification. Cette constatation s'applique pour les deux formes d'arête réalisées. En effet, une combinaison d'une faible vitesse d'avance avec un débit de lubrification assez important permet à l'outil de polir la surface de l'arête dans des bons conditions qui évitent son usure et son réchauffement. Mentionnons que les conditions sévères à l'outil sont révélatrices d'un mauvais fini de surface dans tous les processus d'usinage et de polissage. La variation de la vitesse de rotation N à travers ces courbes valide que ce paramètre n'avait pas d'effet important sur la réponse Ra

4.4 Conclusion

Durant ce chapitre, une étude des paramètres influençant la qualité de surface de l'arête polie a été réalisée. Bien évidemment, la taille de grit reste toujours le facteur le plus important qui agit sur toutes les réponses de rugosité. Mais, comme l'utilisation de tous les outils de différentes tailles de grit est obligatoire dans le processus de finition de l'arête, l'étude des autres paramètres n'a été réalisé que lors de la phase de finition (grit 600). L'étude statistique a déterminé que la vitesse de coupe n'était pas significative et que la vitesse d'avance et le débit de lubrification avaient un impact sur la rugosité arithmétique Ra. Mais, les modèles de prédiction de la réponse Ra pour les deux formes d'arête réalisés avaient des faibles coefficients de corrélation. Les surfaces de réponses élaborées ont permis par la suite de dire que les meilleurs états de surface ont été obtenus en utilisant des faibles vitesses d'avance et des débits de lubrification assez élevés. Dans la suite, le Chapitre V sera consacré à la discussion des résultats des émissions de poussière ainsi que des finis de surface combinés, dans le but d'optimiser le processus de finition des arêtes de granit, qui est l'objectif principal de cette étude.

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Pendant la phase de polissage de l’arête du granit, plusieurs facteurs interviennent à l’émission des particules ainsi qu’à la rugosité de surface. Parmi ces facteurs, il y en a ceux qu’on n’est pas capable d’agir sur leurs niveaux, comme la taille de grit et parfois même la forme de l’arête. Mais on y retrouve des facteurs qu’ils sont faciles à régler sur la machine et qu’ils ont parfois un effet très important sur la génération des particules ainsi que sur le fini de surface. Dans ce chapitre, une analyse des essais de validation réalisés suivie par une discussion des différents résultats analysés auparavant va être faite, dans le but de sortir par une optimisation des paramètres de polissage. Ces paramètres choisis doivent satisfaire au compromis d’avoir un meilleur état de surface qui est le principal objectif de l’industriel, et d’assurer le minimum de la sécurité des travailleurs exposés aux poussières dangereuses lors du polissage des arêtes de granit blanc.

5.2 Essais de validation

Afin de mieux appuyer les résultats trouvés dans les chapitres précédents, une série d’essais de validation a été réalisée sur d’autres échantillons de granit blanc. Ces essais vont permettre de valider les modèles choisis pour représenter les concentrations en nombre des PF ainsi que la rugosité des surfaces en utilisant les outils de forme chanfrein et concave et durant les deux phases de polissage. Trois échantillons de granit blanc ont été utilisés dans le but d’étudier les conditions extrêmes de lubrification (MQL, à sec, lubrification abondante). Le tableau illustrant les paramètres utilisés lors de la réalisation de ces essais est dans l’Annexe II.

De nouvelles valeurs des paramètres ont été essayés durant les essais afin d’étudier la robustesse du modèle tels que $N = 1000, 2000, 3000$ tr/min et $V_f = 750, 1250$ mm/min. Dans les figures ci-dessous, les courbes des valeurs de concentration des PF en nombre ainsi que des valeurs de rugosité R_a qui ont été relevés durant les essais de validation, versus les courbes des

valeurs correspondant aux mêmes paramètres dans les différents modèles élaborés ont été représentées. Rappelons que seulement les modèles qui ont été construits dans les chapitres précédents, ont été validés à travers les courbes tracées ci-dessous.

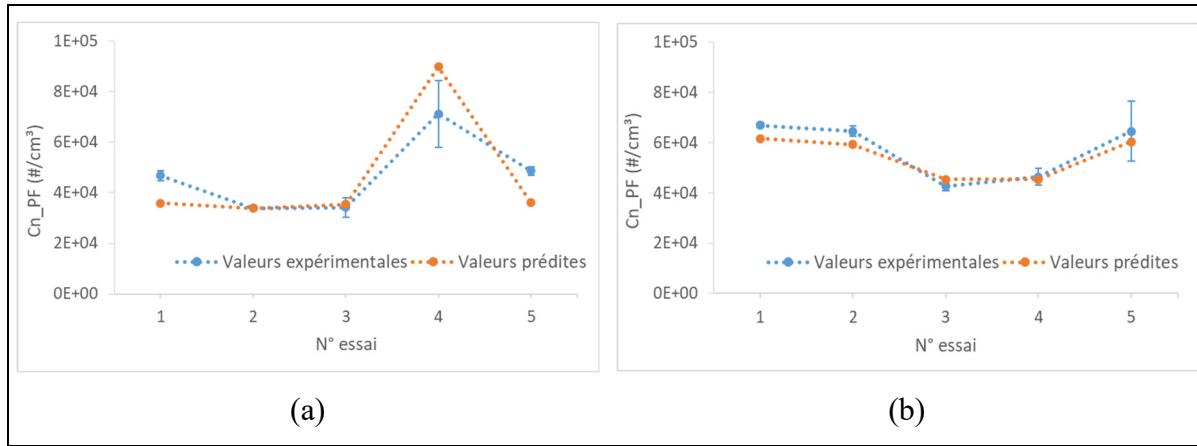


Figure 5.1 Courbes de validation des modèles de Cn_PF pour ; (a) Concave G150, (b) Chanfrein G600

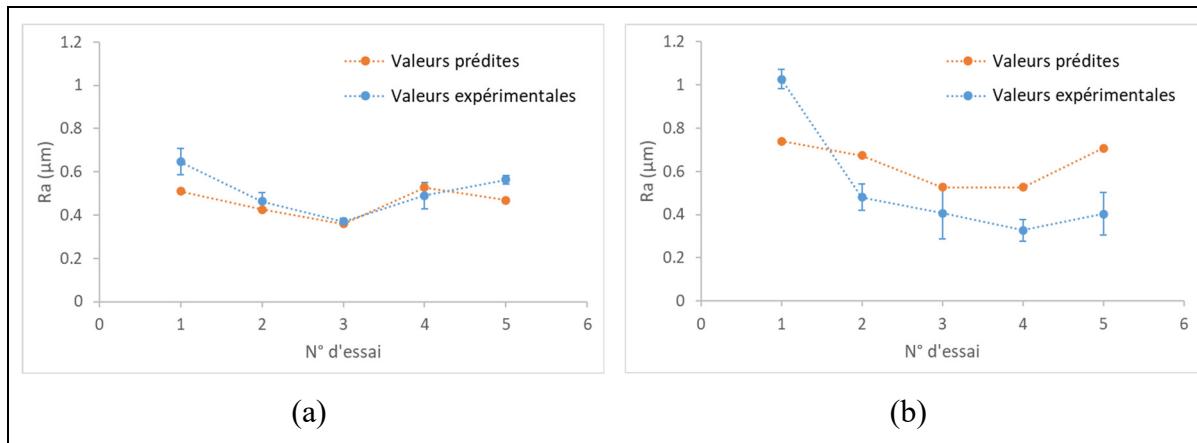


Figure 5.2 Courbes de validation des modèles de Ra pour ; (a) Concave G600, (b) Chanfrein G600

Il est clair de voir à travers ces courbes que les modèles du Cn_PF étaient performants et les valeurs expérimentales s'approchent bien des valeurs prédites. Ces modèles construits auparavant avaient de bonnes qualités, et leurs coefficients de corrélation dépassaient 80 % avec des erreurs relativement petites (entre 10 et 30 % pour Concave G150, et moins de 10%

pour Chanfrein G600). Cependant, les modèles de Ra n'avaient pas les caractéristiques d'un bon modèle robuste, mais il s'est avéré que pour certains essais, les prédictions du modèle étaient proches de ce que les essais de polissage ont donné (surtout pour Concave 600 où les erreurs étaient entre 10 et 30 %). Le Tableau 5.1 résume les erreurs relatives aux modèles de Cn_PF et de Ra validés par les essais expérimentaux.

Tableau 5.1 Valeurs des erreurs relatives à la validation des modèles de Cn_PF et de Ra

Réponse du modèle étudiée	NRMS	MAPE	Valeur idéale
Cn_PF pour Concave G150	12.43 %	15.83 %	<10 %
Cn_PF pour Chanfrein G600	6.54 %	6.18 %	
Ra pour Concave G600	14.81 %	11.28 %	
Ra pour Chanfrein G600	31.16 %	46.87 %	

5.3 Émissions des particules

Dans cette étude munie sur la finition des arêtes de granit blanc, l'effet des conditions de polissage a été principalement investigué afin de pouvoir distinguer les paramètres qui favorisent l'émission des particules parmi ceux qui ne le font pas. Rappelons que les émissions de PUF n'ont pas été analysés statistiquement à cause du manque de données d'acquisition, mais d'après quelques observations faites, on a remarqué que la forme chanfrein a dégagé moins de PUF contrairement aux PF et l'augmentation du débit de lubrification a diminué les émissions de PF ainsi que de PUF.

5.3.1 Effet des paramètres de polissage sur la génération des PF

Parmi les conclusions faites sur la génération de PF, l'effet des paramètres de polissage dépendent en premier lieu de la forme de l'arête à réaliser et de la phase de polissage (taille de

grit de l'outil utilisé). Selon ces deux conditions, une analyse du plan d'expérience a été faite dans le Chapitre III qui a permis d'étudier statistiquement les données des émissions des PF.

Le paramètre qui avait l'effet le plus important sur la diminution de la génération des PF était la taille de grit des outils. Le passage de la phase d'ébauche (grit 150) vers la phase de finition (grit 600) diminue significativement les concentrations totales des PF en nombre, en surface spécifique et en masse (Figure 3.1), ce qui valide les travaux de (Bahri et al., 2021 ; Kouamou Njouokep, 2020 ; Saidi et al., 2015). Mais, il faut noter que le passage par les différents outils avec leurs différentes tailles de grit est nécessaire à la réalisation de l'arête finie. Donc, il est important de savoir que ce paramètre est le plus influent sur la génération de PF, même si l'opérateur ne peut pas agir sur ses modalités, mais il sera capable d'éviter par exemple la réalisation de plusieurs passes d'ébauche qui dégagent beaucoup plus de PF comparant aux passes de finition. Par conséquent, il est intéressant d'étudier l'effet du nombre de passe réalisé sur l'arête pour enlever la même quantité de matière sur la quantité de poussière dégagée et la taille des particules émises tout au long du processus (ébauche en une seule passe ou en plusieurs passes).

Concernant la forme de l'arête à réaliser, on peut admettre que la différence n'est pas significative sur la génération des particules, ni sur la rugosité des surfaces, si on choisit une forme ou l'autre. Cependant, on peut dire qu'on encourage l'utilisation de la forme chanfrein, vu qu'elle émet moins de PUF par rapport à la forme concave. Même si le polissage avec l'outil de forme concave générera moins de PF en concentration en nombre et nous permet d'obtenir légèrement un meilleur fini de surface tout au long du processus comparé à la forme chanfrein, il faut tenir en compte qu'il génère une quantité plus importante de PUF qui est considérée très dangereuse à la sécurité et la santé des travailleurs.

L'étude statistique et la modélisation des émissions de PF a été élaborée sur la réponse de la concentration totale en nombre puisqu'il s'est avéré que les maximums de concentration en nombre correspondaient à des particules de diamètres trop petits (inférieurs à 1 μm) et ces tailles de particules sont considérées menaçantes à la santé et la sécurité des travailleurs. Les retombés de cette analyse étaient principalement que le débit de lubrification avait un effet important sur la génération de PF. Moins le débit de lubrification durant la passe de polissage,

plus est la génération de PF. Selon la forme de l'arête désirée et dans quelle phase de polissage l'opérateur est, l'influence des paramètres de coupe diffère (N, Vf et Qw). Cependant, le débit de lubrification était en deuxième lieu, après la taille de grit, avec une importance prépondérante sur l'émission de PF. Durant les essais de validation, les conditions extrêmes de lubrification tels que le polissage à sec et à lubrification abondante ont été étudiés. La Figure 5.3 illustre la concentration en nombre des PF en utilisant les débits MQL ainsi que la lubrification abondante et le polissage à sec de l'arête avec un outil chanfrein de grit 150. Rappelons que l'acquisition des données de concentration des particules a été faite sans sécher les particules humides provenant du lubrifiant durant les essais à débit MQL et les essais à lubrification abondante. Ces courbes montrent que l'utilisation de la lubrification abondante semble être la meilleure solution diminuant les émissions des PF avec un pic de concentration égal à 703#/cm^3 pour les particules de diamètre $0.583 \mu\text{m}$, suivi par le polissage à sec avec un pic de 1230#/cm^3 correspondant aux diamètres de $0.67 \mu\text{m}$. Quant à l'utilisation du MQL, les pics de concentration étaient relativement plus grands. Les valeurs maximales étaient égales à 4000 , 4840 et 6580#/cm^3 pour les débits 60 , 40 et 20 ml/min respectivement. Ces mesures ont été faits sur des aérosols liquides issus des buses du système de lubrification MQL en plus des aérosols solides des particules du matériau poli. Comme déjà expliqué, la configuration du débit de lubrification a été réalisée à travers un réglage de faible débit de lubrifiant avec la présence d'une grande pression d'air. Cela a favorisé la dispersion des particules solides ainsi que les aérosols liquides dans l'espace du travail, ce qui explique les grandes valeurs de concentration des PF en nombre. Par conséquent, le polissage par lubrification abondante permet de réduire le maximum de concentration des PF en nombre correspondant aux particules de diamètre $0.583 \mu\text{m}$ d'environ 91% par rapport à l'utilisation d'un faible débit de 20 ml/min , et de réduire la concentration totale en nombre de 83% ($72\,500 \text{#/cm}^3$ pour le polissage à 20 ml/min , contre $12\,105 \text{#/cm}^3$ pour le polissage lubrifié).

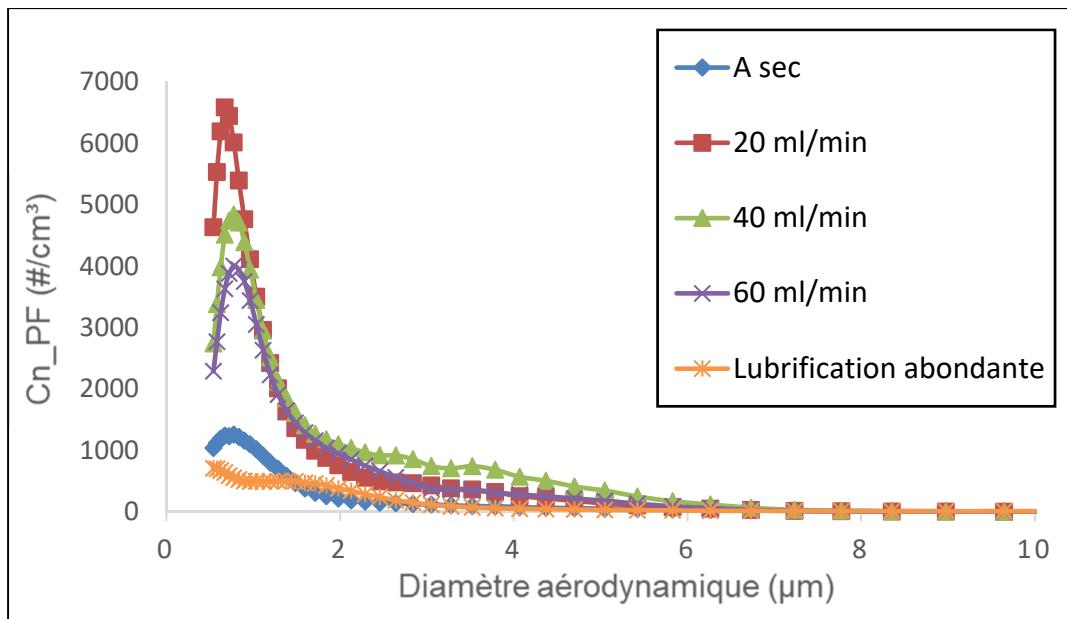


Figure 5.3 Distribution granulométrique des PF en nombre avec différents modes de lubrification (Forme chanfrein, Grit 150, N= 2500 tr/min, Vf = 1000 mm/min)

5.3.2 La génération des PF en rapport avec la PEL

Au Québec, la limite d'exposition permissible (Permissible Exposure Limit) est établie à 0.1 mg/m³ pour le quartz comme une valeur d'exposition moyenne en une journée de travail de 8 heures et durant 40 heures par semaine (LégisQuébec, 2021).

Afin de voir notre position par rapport à cette valeur de PEL lors du polissage d'une arête de granit blanc, on prendra un exemple de la réalisation d'une arête concave (qui dégage moins de PF) en passant par toutes les tailles de grit de l'ébauche à la finition. Supposons que le processus de la finition de cette arête consiste à faire 2 passes avec chaque outils (Grit 45, 150, 300, 600, 1500 et 3000). On admettra que la profondeur de passe utilisée pour les outils métalliques (ébauche et demi-finition jusqu'à grit 600) est égale à 0.1 mm, alors que pour les outils de finition (grit 1500 et 3000) la profondeur est 0.05 mm, donnant au total un volume de matière enlevée égal à 6540 mm³ (voir Tableau 1.2). En considérant la roche de granit blanc utilisée de masse volumique ρ_{granit} égale à 2667 kg/m³ et comportant un taux de silice

cristalline τ_{SiO_2} de 41.38 %, on calcule la quantité totale de poussière dégagée Q_{total} et la quantité de silice cristalline Q_{SiO_2} se trouvant dans cette poussière comme suit :

$$Q_{total} = \rho_{granit} * V_E = 2667 * 10^{-6} * 6540 = 17.4 \text{ g} \quad (5.1)$$

$$Q_{SiO_2} = Q_{total} * \tau_{SiO_2} = 17.4 * 0.4138 = 7.2 \text{ g} \quad (5.2)$$

Étant donné la valeur limite de 0.05 mg/m³ du OSHA appliqué aux États-Unis, le travailleur est permis d'inhaler 0.05 mg de silice cristalline par un mètre cube d'air. Selon Guth (2017a), un homme travaillant à un rythme modéré respire en moyenne $V_{air_respiré} = 16.8 \text{ m}^3$ d'air au cours d'une journée de travail de 8 heures. A raison de 0.05 mg/m³, on calcule dans l'Équation (5.3) la quantité autorisée $Q_{permise}$ qu'un travailleur peut respirer par jour conformément à la norme du PEL actuelle :

$$Q_{permise} = V_{air_respiré} * PEL = 16.8 * 0.05 = 0.84 \text{ mg} \quad (5.3)$$

Donc, cette quantité de 0.84 mg ne doit pas être dépassée par journée, si le travailleur le fait en une journée de 8 heure ou en quelques minutes de travail. Néanmoins, le polissage d'une arête d'une pièce de granit de longueur 200 mm en forme concave dégage une quantité de silice cristalline égale à 7.2 g qui est extrêmement supérieure à la valeur maximale journalière. Mais, cette quantité ne va certainement pas être inhalée entièrement par le travailleur. Donc, premièrement il n'est pas question de travailler sans utiliser aucun des moyens de protection des travailleurs. Deuxièmement, il est intéressant de savoir jusqu'à combien de temps le travailleur peut faire le polissage pour rester en dessous de la limite PEL. Pour faire cela, il faut mesurer la quantité de silice respirée par un individu avec un dispositif approprié (air quality monitoring) qui est installé souvent sur le cou du travailleur et mesure les expositions de silice (en utilisant des cassettes mesurant seulement les quantités de silice) durant un quart de travail complet. Selon les résultats indiquant son niveau d'exposition, le temps de polissage pourra être déterminé à travers le Tableau 5.2 où les cases rouges excéderont la valeur limite

PEL. Par exemple, si le résultat indiqué par le dispositif du air monitoring indique une exposition du travailleur à 0.2 mg/m^3 , alors il ne doit pas dépasser un temps de travail de 2h par journée, alors que s'il indique 0.4 mg/m^3 , une (1) heure par jour est suffisante pour atteindre la valeur limite journalière du PEL. Rappelons que les résultats trouvés dans nos essais ne s'appliquent pas à la même situation, puisque l'acquisition des données a été faite dans un espace fermé du plan de travail à une distance très petite ($L = 120 \text{ mm}$, $H = 0 \text{ mm}$) du contact outil/pièce et avec un débit d'aspiration des particules qui ne ressemble pas à celui de la respiration humaine.

Tableau 5.2 Nombre d'heures permises pour un travailleur selon son niveau d'exposition aux poussières de silice.

Adapté de Guth (2017b)

Nombre d'heures d'exposition (heure)	Niveaux d'exposition (mg/m^3)			
	0.05	0.1	0.2	0.4
1	0.105 g	0.21 g	0.42 g	0.84 g
2	0.21 g	0.42 g	0.84 g	1.68 g
3	0.315 g	0.63 g	1.26 g	2.52 g
4	0.42 g	0.84 g	1.68 g	3.36 g
5	0.525 g	1.05 g	2.1 g	4.2 g
6	0.63 g	1.26 g	2.52 g	5.04 g
7	0.735 g	1.47 g	2.94 g	5.88 g
8	0.84 g	1.68 g	3.36 g	6.72 g

5.4 État de surface

L'étude de la rugosité de la surface de l'arête vise à savoir quels sont les paramètres qui influent le fini de surface lors du polissage de l'arête de granit blanc. L'analyse faite dans le Chapitre IV montre que le premier facteur qui a la plus grande importance sur le fini de surface durant tout le processus est la taille de grit de l'outil utilisé. Il est évident que l'augmentation de taille

de grit durant le processus du polissage va engendrer un meilleur état de surface, et c'est pour cela qu'on s'est limité, dans cette étude, qu'à la phase de finition, qui est la dernière phase avant la livraison du produit au client. Il s'est avéré alors que la forme concave générerait légèrement une meilleure rugosité de surface par rapport à la forme chanfrein tout au long du processus de polissage de l'arête (de grit 45 à grit 600). Cela a été expliqué par la possibilité qu'il y a une différence de répartition des grains de diamants dans les 2 outils, mais cela reste toujours une supposition qui nécessite plus d'études approfondies. La variation de la vitesse de rotation de la broche n'a pas contribué à obtenir des meilleurs finis de surface en phase de finition (grit 600), mais en phase d'ébauche (grit 150), son augmentation a permis d'avoir une diminution de la rugosité (Figure 5.4). Cette interprétation valide ce qui a déjà été publié dans les travaux de Bahri et al. (2021) qui ont donné plus d'importance de l'effet de la vitesse de rotation en phase d'ébauche à la génération des particules, puisqu'au final, la rugosité désirée du client va être atteinte au fur et à mesure en arrivant aux outils de finition.

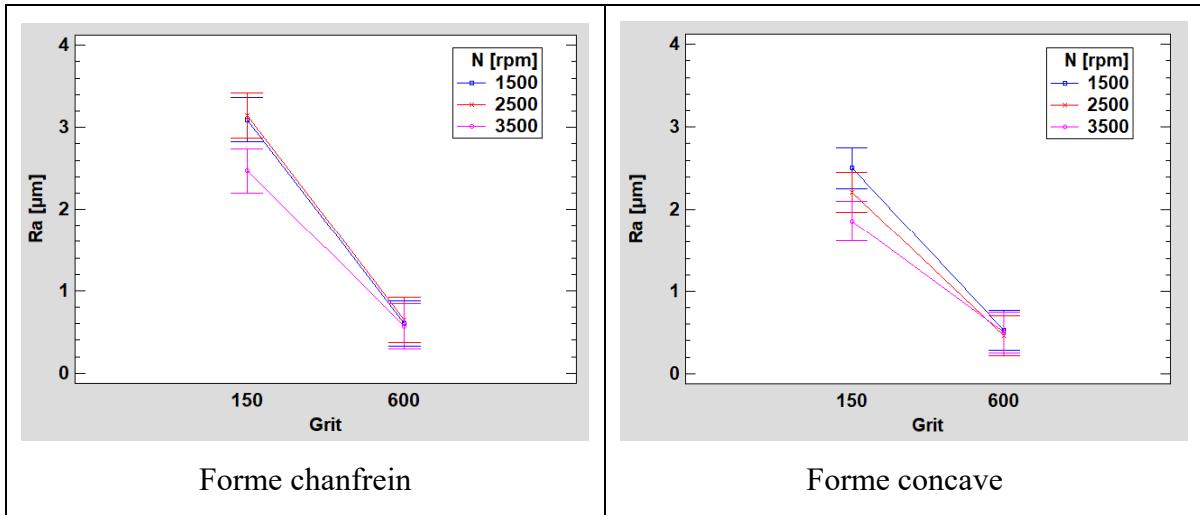


Figure 5.4 Variation de la rugosité Ra en fonction de la taille de grit pour différentes vitesses de rotation

Quant au débit du MQL, sa variation n'a pas permis d'avoir une différence remarquable en phase d'ébauche, puisque dans cette phase, l'objectif principal est de donner la forme à l'arête et donc la rugosité est relativement importante et sa plage de variation en utilisant les différents débits de lubrifications restent toujours grande. Mais, en phase de finition, on retrouve le débit

du MQL ainsi que la vitesse d'avance comme les paramètres les plus influents sur le fini de surface (Figure 4.5). Le débit de lubrification avait un effet négatif alors que la vitesse d'avance avait un effet positif sur la rugosité Ra durant la phase de finition avec les deux formes d'arêtes chanfrein et concave. Mais, les modèles de régression retrouvés ne représentent que 40 % des données de rugosité Ra pour la forme chanfrein et 43 % pour ceux de la forme concave.

Cependant, la différence entre un polissage à sec et un polissage lubrifié se voit clairement à travers la Figure 5.5 où la surface polie à sec présente des tâches noires résultant des brûlures causées par les étincelles durant le passage de l'outil sans la présence de lubrification ainsi qu'une valeur de rugosité Ra presque 10 fois plus grande que celle obtenue en présence de lubrifiant, en MQL à débit 60 ml/min, ou en lubrification abondante. Ce résultat va bien avec ce qui a été démontré dans les travaux de Bahri et al. (2021).

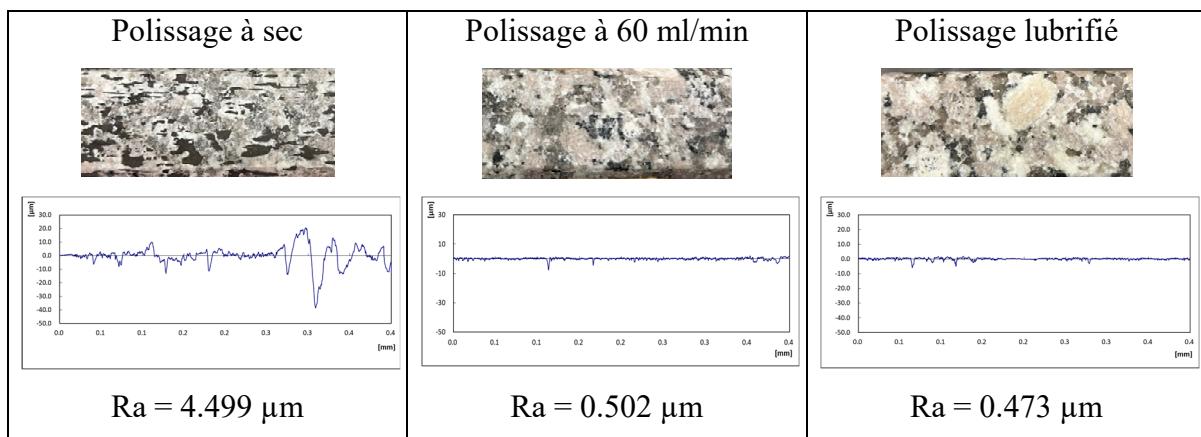


Figure 5.5 Rugosité de surface polie à sec, MQL et lubrifié (Forme chanfrein, Grit 600, N = 2500 tr/min, Vf = 1000 mm/min)

5.5 Optimisation des paramètres de polissage

Les fonctions de désirabilités sont capables de transformer une attente ou un requis d'un client en fonctions mathématiques. Ainsi, elles nous permettront de faire l'optimisation des paramètres de polissage en fonction des contraintes qu'on va imposer.

Notre objectif, et celui des industriels bien évidemment, est d'avoir toujours le meilleur fini de surface donc avoir une rugosité faible, mais il faut toujours garder en tête qu'il est nécessaire en même temps de minimiser le plus possible les émissions des particules. En désirabilité, cette fonction s'appelle 'Minimum is better' et s'exprime de la manière suivante :

$$d = \begin{cases} 1 & \text{si } y < y_{min} \\ \left(\frac{y - y_{max}}{y_{min} - y_{max}} \right)^s & \text{si } y_{min} \leq y \leq y_{max} \\ 0 & \text{si } y > y_{max} \end{cases} \quad (5.4)$$

Dans le cas où il y a une condition de limite dite « dure » imposée, y_{max} prendra cette valeur. Par exemple, si un client impose une rugosité à ne pas dépasser, c'est-à-dire que toutes les pièces avec $Ra > Ra_{max}$ seront automatiquement rejetées, et donc la désirabilité de la pièce prendra la valeur nulle.

Pour la valeur de y_{min} , elle est généralement fixée de manière à éviter une sur-qualité qui entraîne un coût parfois très élevé et même pas nécessaire.

En ce qui concerne le paramètre de pondération 's', il met en évidence à quel point la décroissance de la courbe de la valeur 1 à 0 est importante. Si 's' prend la valeur 1, alors la courbe décroît linéairement. Sinon, si le résultat recherché est proche de la valeur minimale on choisit 's' élevé, et si la réponse peut prendre n'importe quelle valeur, on choisit 's' faible.

Dans notre étude, on a utilisé le logiciel Minitab pour faire l'optimisation des paramètres, qui est capable de proposer ces valeurs en se basant sur les intervalles de variation des données des réponses. Cette optimisation prendra en compte la concentration totale en nombre des PF 'Cn_PF', comme étant le paramètre le plus sensible déjà analysé dans le Chapitre III, et la rugosité arithmétique 'Ra', puisqu'elle est la plus utilisée dans la littérature et dans l'industrie de transformation de granit.

Afin de trouver le meilleur compromis entre un bon état de surface et moins d'émission de particules, il faut tout d'abord aborder les situations cas par cas, à savoir la forme de l'arête et la phase de polissage :

5.5.1 Phase d'ébauche

Dans la phase d'ébauche, le fini de surface n'a aucune importance devant l'émission des PF, surtout que dans cette phase, la génération de PF est importante comparant à la phase de finition. Quant à la qualité de surface, on est certain qu'elle va s'améliorer au fur et à mesure qu'on augmente la taille de grit de l'outil jusqu'à arriver à l'outil de finition. Par conséquent, l'optimisation dans la phase d'ébauche ne sera faite que sur l'émission des PF en concentration en nombre.

Ainsi, le logiciel dispose déjà de l'équation de prédiction de l'extrant à optimiser et la valeur de pondération va être prise à 2 ($s = 2$) afin d'avoir une diminution rapide vers la valeur minimale de Cn_PF dans la courbe de désirabilité. L'importance est maintenue à 1 puisqu'il ne s'agit que de l'optimisation d'une seule réponse qui est la Cn_PF . Le Tableau 5.3 résume les paramètres de la fonction de désirabilité utilisée pour l'optimisation des conditions de coupe (N , Vf et Qw) en phase d'ébauche lors du polissage de l'arête de granit blanc avec les deux formes d'arêtes.

Tableau 5.3 Résumé des paramètres de la fonction de désirabilité en utilisant l'outil de forme chanfrein et concave en phase d'ébauche

Forme d'arête	Réponse	Objectif	Cible	Limite inférieure	Limite supérieure	Pondération 's'	Importance
Chanfrein	Cn_PF	Minimiser	61100	61100	94600	2	1
Concave			20000	20000	121000		

Le résultat de l'optimisation de la réponse Cn_PF en phase d'ébauche en utilisant la forme d'arête chanfrein et concave est illustré à la Figure 5.6. Ainsi, on constate que les paramètres de polissage optimaux varient d'une forme d'arête à l'autre. On est d'accord que la lubrification est le facteur majeur qui agit sur cette réponse, et son augmentation permet d'avoir moins d'émission, donc le débit 60 ml/min est le meilleur choix pour les 2 formes en phase

d'ébauche. Pour la vitesse d'avance, il n'y a pas une différence remarquable entre les niveaux, mais le choix a été fait sur l'avance 1500 mm/min dans les 2 formes, afin d'assurer la rapidité de la réalisation de l'arête en cette phase et du coup l'augmentation de la productivité. Quant à la vitesse de rotation, selon l'effet de ce facteur sur la forme, la vitesse de 3500 tr/min a été choisie pour la forme concave et 1500 tr/min pour la forme chanfrein.

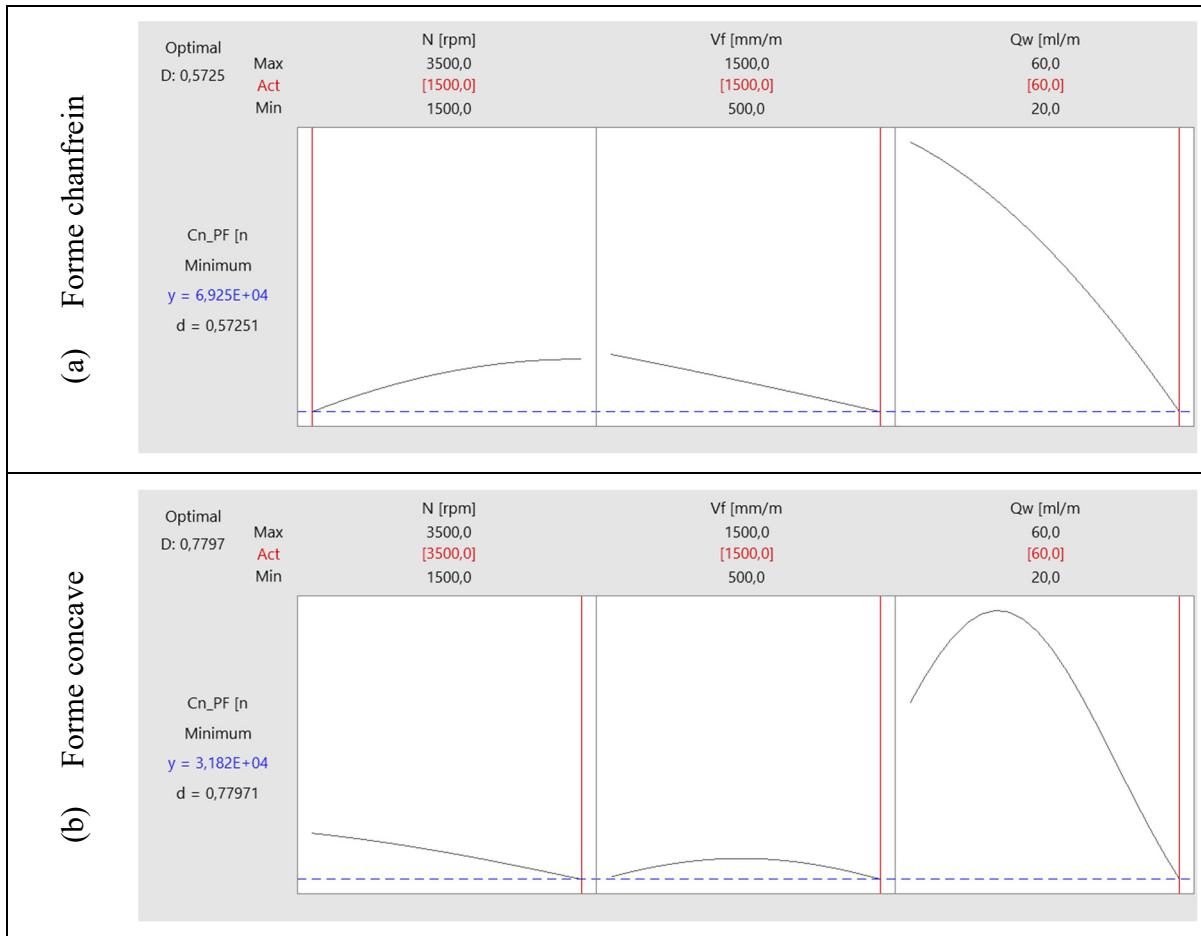


Figure 5.6 Diagramme d'optimisation de la réponse C_n_{PF} en phase d'ébauche pour : (a) forme chanfrein, (b) forme concave

5.5.2 Phase de finition

Dans la phase de finition, la rugosité de surface prend une importance majeure en plus de la génération des PF. Dans ce cas, il s'agit de l'optimisation multicritère où il existe plus qu'une variable de réponse à optimiser en même temps. Pour cela, une fonction de désirabilité globale

D peut être définie tenant compte de l'évaluation complète du processus avec ses 2 variables à optimiser, qui va convertir l'ensemble de réponses en un scalaire et trouver la meilleure combinaison des paramètres qui maximisent la désirabilité globale D. Cette fonction peut se calculer comme la moyenne géométrique globale de toutes les fonctions d_i (Équation (5.5)), mais cette forme a un inconvénient majeur que si une des désirabilités est nulle, alors la désirabilité globale D sera aussi nulle. Cela impose l'exclusion totale de toutes les solutions, et restreint l'espace de recherche des solutions dans la zone étudiée (Tahan, 2012).

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.5)$$

Avec :

- d_i : fonction de désirabilité pour une réponse i
- n : le nombre de réponse dans le processus

Selon Kros et al. (2004), la fonction de désirabilité globale peut être une fonction additive pondérée, comme dans l'Équation (5.6).

$$D = \sum_{i=1}^n w_i d_i \quad (5.6)$$

Avec :

- d_i : fonction de désirabilité pour une réponse i
- n : le nombre de réponse dans le processus
- w_i : poids associé à l'importance de la variable y_i sur le comportement global du procédé. ($\sum w_i = 1$)

Dans notre cas, il sera judicieux d'utiliser cette forme en donnant une importance plus particulière à une variable devant l'autre. La rugosité de surface Ra, comme étant le paramètre le plus important pour l'industriel prendra une valeur d'importance de 60 % contre une valeur

d'importance de 40 % pour la concentration totale des PF en nombre. Ainsi, l'équation de désirabilité globale devient comme suit :

$$D = 0,6 d_1 + 0,4 d_2 \quad (5.7)$$

Avec :

- d_1 : fonction de désirabilité pour la réponse Ra
- d_2 : fonction de désirabilité pour la réponse Cn_PF

Le résume les paramètres de la fonction de désirabilité globale utilisée pour l'optimisation des conditions de coupe (N, Vf et Qw) en phase de finition lors du polissage de l'arête de granit blanc avec les deux formes d'arêtes.

Tableau 5.4 Résumé des paramètres de la désirabilité globale en utilisant l'outil de forme chanfrein et concave en phase de finition

Forme d'arête	Réponse	Objectif	Cible	Limite inférieure	Limite supérieure	Pondération 's'	Importance
Chanfrein	Cn_PF	Minimiser	40500	40500	102000	1	0.4
	Ra		0.3	0.3	2	1	0.6
Concave	Cn_PF	Minimiser	37100	37100	90200	1	0.4
	Ra		0.2	0.2	1	1	0.6

Nous pouvons voir les résultats de cette optimisation à la Figure 5.7 et la Figure 5.7, où les paramètres de coupe varient selon la forme de l'outil utilisée. Seulement la vitesse d'avance avait une valeur optimisée égale à la limite inférieure de 500 mm/min pour les 2 formes chanfrein et concave. Cela s'explique par le fait que la rugosité cause la fonction de désirabilité la plus sévère (avec une importance majeure de 60 %) et que celle-ci est affectée par l'avance

et le débit de lubrification (démontré dans la Section 4.3). Concernant le débit de lubrification, la valeur optimisée avec la forme chanfrein est 44 ml/min et celle de la forme concave est 37.4 ml/min. On peut constater que ces deux valeurs tendent plus vers la valeur 40 ml/min. En utilisant ce débit de lubrification, on est sûr d'avoir des valeurs qui s'approchent des minimums en rugosité et en C_n _PF avec la forme chanfrein. Mais, en utilisant l'outil concave, le débit de lubrification 40 ml/min assure un bon état de surface, mais une génération de PF relativement élevée. Pour la vitesse de rotation, comme elle n'avait pas d'effet significatif sur C_n _PF avec la forme chanfrein, la priorité est donnée à la rugosité qui diminue avec l'augmentation des vitesses, donc la valeur optimale pour la forme chanfrein est 3500 tr/min. Alors qu'en utilisant la forme concave, où la vitesse devient importante sur l'émission des PF en concentration totale en nombre, il s'est avéré que la valeur optimale est égale à 2328 tr/min afin d'obtenir un meilleur compromis de rugosité et génération de PF.

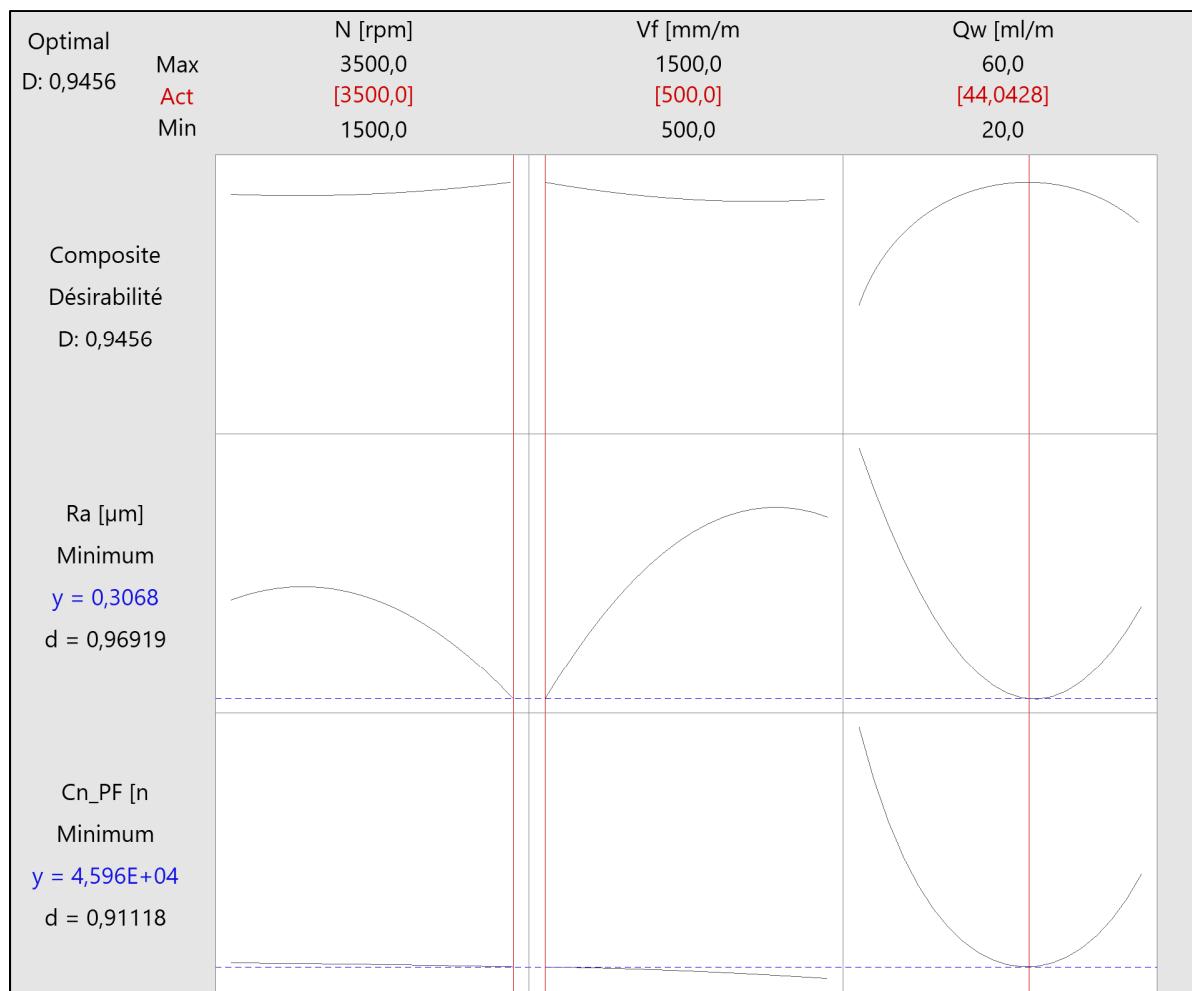


Figure 5.7 Diagramme d'optimisation des réponses Cn_PF et Ra en phase de finition en utilisant l'outil de forme chanfrein

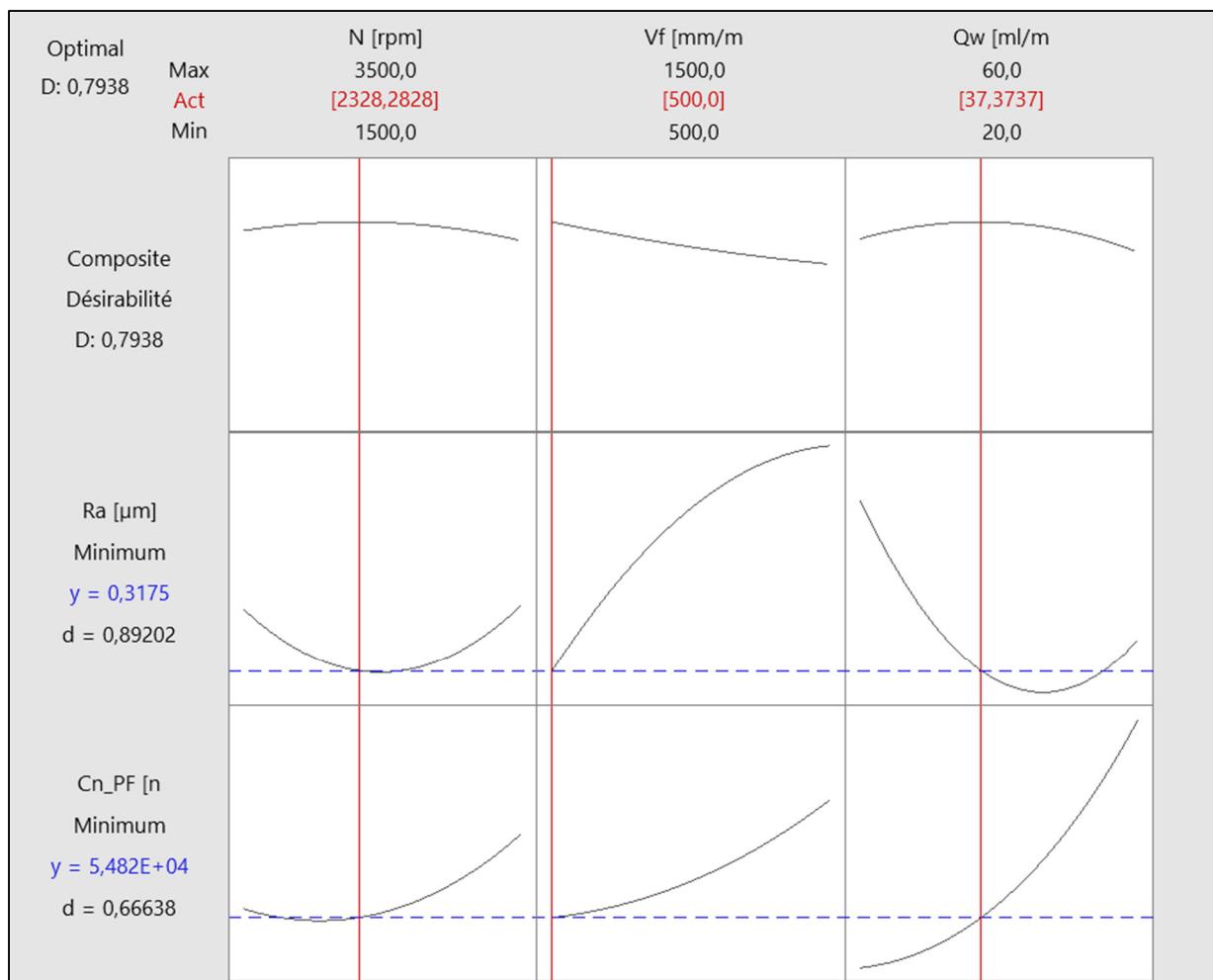


Figure 5.8 Diagramme d'optimisation des réponses Cn_PF et Ra en phase de finition en utilisant l'outil de forme concave

Le Tableau 5.5 résume les valeurs optimales à utiliser comparant aux valeurs recommandées du constructeur lors du polissage de l'arête de granit blanc en phase d'ébauche et de finition en utilisant l'outil de forme chanfrein et de forme concave. On peut constater rapidement que le constructeur exige toujours l'utilisation du lubrifiant en grande quantité (lubrification abondante) durant tout le processus et en utilisant tous les outils. Cela justifie que les vitesses de coupe et d'avance proposées sont assez grandes devant les valeurs optimisées. En effet, le fabricant s'intéresse essentiellement sur deux aspects qui sont la qualité de surface de l'arête obtenue, et la durée de vie des outils. La réduction des émissions de particules n'était pas dans

sa liste de priorité, puisqu'on voit qu'il recommande des grandes vitesses de rotation 'N' favorisant les émissions de PF et de PUF.

Tableau 5.5 Récapitulatif des valeurs optimales versus les paramètres recommandés du constructeur lors du polissage de l'arête de granit blanc

Forme	Valeur optimisée / Valeur recommandée	Phase d'ébauche (Grit 150)			Phase de finition (Grit 600)		
		N [rpm]	Vf [mm/min]	Qw [ml/min]	N [rpm]	Vf [mm/min]	Qw [ml/min]
Chanfrein	Optimisée	1500	1500	60	3500	500	40
	Recommandée	6500	1000	Abondante	6000	1000	Abondante
Concave	Optimisée	3500	1500	60	2328	500	40
	Recommandée	5500	4000	Abondante	5000	1250	Abondante

5.6 Conclusion

Les paramètres de polissage étudiés dans ce projet ont un effet sur les réponses tels que la concentration des PF et la rugosité de surface. L'émission des particules lors du polissage d'un matériau aussi poussiéreux que le granit reste toujours un phénomène aléatoire et difficile à prédire puisqu'il s'agit d'une quantité énorme de particules dégagée de tailles trop petites et de poids négligeable, ce qui rend la tâche de captation de ces particules avec précision et sans avoir de pertes, plus compliquée et nécessite beaucoup d'investissements (matériels, conditions expérimentales, etc..). Quant à la qualité de surface, le matériau granit est composé de plusieurs cristaux créés par la nature dans la profondeur de la terre. Cela lui donne une bonne qualité esthétique d'avoir un bel aspect visuel et brillant, mais au niveau de la mesure de la rugosité, on a trouvé parfois des dispersions de valeurs causées par la discontinuité du cristal et l'hétérogénéité du matériau de façon générale. Les modèles retrouvés dans cette étude ont été validés avec des erreurs acceptables (entre 10 et 30 %). Un bon choix de paramètres de

polissage, selon la forme de l'outil utilisée et sa taille de grit, pourrait minimiser la quantité de particules dégagée ainsi qu'améliorer le fini de surface de l'arête polie. L'optimisation réalisée dans ce chapitre a permis de dégager ces paramètres, qui ne forment pas forcément une combinaison idéale, mais qui répondent certainement aux objectifs de cette étude.

CONCLUSION

Considérant qu'il s'agit de la phase finale précédant la livraison aux clients et durant laquelle il y a un dégagement d'une quantité importante de poussière de PF et de PUF contenant des taux variés de silice cristalline, le procédé de polissage est considéré d'une importance majeure dans l'industrie de transformation du granit. Ces particules de quartz, une fois inhalées par les travailleurs qui y sont exposés pour des périodes prolongées, peuvent menacer leur santé et provoquent des maladies respiratoires graves. A cet égard, plusieurs personnes se sont penchées sur cette problématique afin de trouver des moyens qui permettent de réduire ces émissions de particules dangereuses à la santé et en même temps, garder un état de surface du produit fini qui satisfait aux exigences des clients. Ces études ont porté majoritairement sur le polissage surfacique des pièces de granit, alors que la présente recherche concerne la finition des arêtes.

Dans un premier temps, la revue de littérature a permis de mieux comprendre le matériau utilisé, ses caractéristiques et les risques liés aux procédés de son transformation envers les travailleurs respirant l'air contaminé par les particules de quartz tout au long de leurs quarts de travail. De même, les anciennes études ont dégagé les paramètres les plus pertinents qui influencent la génération des particules ainsi que le fini de surface, et ont encouragé l'utilisation des moyens d'amélioration de l'environnement du travail comme l'utilisation de l'eau et de la ventilation locale qui réduisent significativement l'exposition aux poussières générées mais pas suffisamment pour ne pas dépasser les valeurs limites des normes réglementaires.

L'expérimentation faite sur les échantillons de granit dans cette étude mène à ressortir les conclusions suivantes :

- Pendant les deux phases de polissage, la concentration maximale de PF en nombre correspondait à des diamètres aérodynamiques de particules inférieurs à 1 μm . Ces pics

de concentration varient selon la phase de polissage. En ébauche, la concentration de PF est plus grande comparant à la phase de finition.

- La finition de l'arête avec la forme concave s'avère mieux que la forme chanfrein puisque non seulement la génération de PF est moins importante en utilisant la forme concave, mais aussi le fini de surface était meilleur durant tout le processus de polissage de l'arête.
- L'utilisation de lubrifiant s'est avérée primordial lors du polissage de l'arête de granit. En absence de lubrification, une grande quantité de poussière de taille inférieur à 1 μm est générée en plus d'un mauvais état de surface caractérisé par des tâches de brûlures noires. Ces tâches sont causées par les étincelles lors de l'utilisation de l'outil grit 600 donnant une rugosité 10 fois plus grande que celle obtenue avec la lubrification abondante ou avec un débit MQL de 60 ml/min. Cependant, une utilisation de faible débit MQL va engendrer l'émission de quantités importantes d'aérosols liquides et solides. Par conséquent, l'augmentation du débit de lubrification diminue les émissions de PF et donne de meilleurs états de surface. D'où, la lubrification abondante est recommandée.
- L'effet des paramètres d'usinage sur la génération de PF ainsi que sur le fini de surface dépendent de la phase de polissage et de l'outil utilisé. Afin d'assurer un meilleur état de surface ainsi qu'une réduction des émissions des PF, une optimisation réalisée a fait sortir qu'en phase d'ébauche, la vitesse de rotation recommandée est de 1500 tr/min avec l'outil chanfrein, et 3500 tr/min avec l'outil concave, pour la vitesse d'avance et le débit de lubrification c'est respectivement 1500 mm/min et 60 ml/min pour les deux formes d'outil. Tandis qu'en phase de finition, afin d'optimiser le processus, il est conseillé d'utiliser la vitesse de coupe de 3500 tr/min avec l'outil chanfrein et 2328 tr/min avec l'outil concave accompagnée d'une vitesse d'avance de 500 mm/min et un débit MQL de 40 ml/min pour les deux formes d'outils.

RECOMMANDATIONS

Le présent travail focalise sur un cas particulier du procédé de polissage du granit. La réduction des émissions de particules à travers des techniques d’usinage appropriés et le maintien d’un bon fini de surface en étaient les principaux objectifs. Les résultats trouvés conduisent à des nouvelles pistes de recherche et nous permettent d’élaborer certaines recommandations telles que :

1. Le système de lubrification MQL utilisé était capable de fournir des débits de lubrification entre 10 et 60 ml/min avec un manque de précision supposé négligeable dans cette étude. Cela nous a limité aux choix rapprochés des niveaux (20, 40 et 60 ml/min) qui entraîne parfois la non-significativité de ce paramètre. Par conséquent, l’élargissement de l’espace expérimental à travers l’utilisation d’un autre système MQL différent qui donne une marge plus grande de débit avec une plus grande précision, sera un bon choix à faire pour éviter ce problème.
2. L’étude de l’effet du débit de lubrification sur les émissions des particules a été réalisée sans tenir compte des aérosols humides générés lors du contact des particules solides issues du matériau avec les particules liquides issues de la sortie sous pression du lubrifiant. Il serait judicieux d’installer un dispositif capable de sécher les aérosols avant qu’ils n’entrent dans le système d’acquisition des données, afin d’identifier seulement les particules solides qui menacent la santé et la sécurité du travailleur.
3. Les données de concentration de particules analysées concernent tous les types de cristaux présents dans les échantillons de poussière. Les particules de silice cristalline (quartz) qui se trouvent dans un échantillon n’ont pas été analysées. Dans les textes réglementaires, c’est toujours la concentration en silice cristalline qui est plus importante et plus sévère. Ainsi, une observation microscopique des échantillons récoltés en plus d’une spectroscopie de rayons X à dispersion d’énergie (EDX) est recommandée. Cela permet de déterminer la composition chimique des échantillons de

poussière dans le but de savoir essentiellement le pourcentage de silice cristalline présent, et aussi observer la forme des particules et leurs densités.

4. À la suite de la défaillance du CPC durant plusieurs essais, la collecte des données de PUF n'a pas été suffisante pour réaliser une étude statistique et réduire les émissions de ces particules considérées plus dangereuses que les PF. Il est intéressant d'introduire les PUF dans l'étude et l'optimisation du processus, en plus des PF et de la rugosité des surfaces.

ANNEXE I

ARTICLE: CNC EDGE FINISHING OF GRANITE: EFFECT OF MACHINING CONDITIONS ON PART QUALITY, CUTTING FORCES, AND PARTICLE EMISSIONS

Haithem Bahri, Victor Songmene, Jules Kouam, Agnes Marie Samuel and Fawzy-Hosny Samuel

Article publié dans « MDPI Materials », Octobre 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14216496>

Abstract:

Edge finishing is a shaping process that is extremely important in the granite and marble processing industries. It does not only shape the edge but also makes it shiny and durable. However, this process generates dust (fine and ultrafine particles) that can have a significant impact on air quality in the workshop and can put workers' health at risk. While environmental requirements and occupational health and safety regulations are becoming increasingly stringent, at the same time, industries must continue to produce quality parts at competitive prices. The purpose of this study was to examine the surface quality, the cutting forces, and the emission of fine (FP) and ultrafine (UFP) particles during wet and dry edge finishing of granite edges as a function of the machining parameters and abrasive grit sizes. Three machining operations were investigated: roughing, semi-finishing, and finishing, using diamond abrasives (with grit sizes 45, 150, 300, 600, 1500, and 3000). The experiments were carried out on two granites, one being black and the other white. The tested spindle speeds ranged from 1500 rpm to 3500 rpm and the feed rates from 500–1500 mm/min. It was found that roughing operations produce more fine particles while finishing operations produce more ultrafine particles. These particle emissions, as well as the part quality and the cutting forces are strongly dependent on cutting speed and on the grit size of the abrasive used.

Keywords: granite; edge finishing; part quality; particle emission; cutting forces; surface finish

ANNEXE II

TABLEAUX DES RÉSULTATS DES ESSAIS RÉALISÉS

- Résultats des essais des plans d'expérience

Tableau A-II.1 Résultats des essais du plan d'expérience Concave / G150

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Qw [ml/min]	Cn_PF [#/cm ³]	Ra [µm]
1	1500	1500	20	111333±8500	2.84±1.21
2	3500	1000	20	99133±10500	1.74±0.79
3	2500	1000	20	95733±8700	2.55±1.05
4	2500	500	20	94566±4650	3.38±0.76
5	3500	1500	20	91133±13300	2.11±0.14
6	3500	500	20	70000±11000	1.54±0.38
7	1500	1000	20	56633±5300	3.03±1.08
8	1500	500	20	55300±8250	2.17±0.16
9	2500	1500	20	55833±6550	2.53±0.63
10	1500	500	40	113000±1500	2.44±0.23
11	3500	500	40	104666±2500	1.08±0.11
12	1500	1500	40	96800±7000	2.83±0.67
13	3500	1000	40	108333±2000	2.33±1.35
14	2500	1000	40	99766±8850	1.93±0.68
15	3500	1500	40	103933±8100	2.67±0.45
16	2500	1500	40	100500±6500	1.88±0.55
17	1500	1000	40	104000±1500	2.36±0.52
18	2500	500	40	94966±5100	1.46±0.22
19	2500	1000	60	59633±3800	2.71±0.47
20	1500	1500	60	44766±2700	2.04±0.28
21	2500	500	60	34466±4800	1.62±0.72
22	3500	1000	60	36966±8550	1.76±0.1
23	2500	1500	60	34933±2850	2.28±0.95
24	1500	500	60	26166±4850	2.3±0.98
25	1500	1000	60	51866±4250	2.51±0.83
26	3500	500	60	31466±6050	1.5±0.21
27	3500	1500	60	30966±4500	2±0.54

Tableau A-II.2 Résultats des essais du plan d'expérience Concave / G600

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Qw [ml/min]	Cn_PF [#/cm ³]	Ra [µm]
1	1500	1500	20	68466±7950	0.67±0.11
2	3500	1000	20	79600±5300	0.79±0.19
3	2500	1000	20	68666±7650	0.57±0.04
4	2500	500	20	73366±6950	0.39±0.09
5	3500	1500	20	89100±1050	0.62±0.27
6	3500	500	20	51866±4650	0.55±0.13
7	1500	1000	20	40700±3850	0.58±0.02
8	1500	500	20	42333±4650	0.48±0.1
9	2500	1500	20	65400±4550	0.63±0.09
10	1500	500	40	70700±4600	0.3±0.07
11	3500	500	40	62766±3350	0.34±0.04
12	1500	1500	40	62900±5050	0.45±0.06
13	3500	1000	40	60800±3700	0.42±0.17
14	2500	1000	40	59633±3100	0.53±0.16
15	3500	1500	40	63500±5550	0.53±0.02
16	2500	1500	40	57600±3400	0.47±0.18
17	1500	1000	40	57233±4900	0.62±0.16
18	2500	500	40	45933±3400	0.27±0.03
19	2500	1000	60	63333±700	0.29±0.06
20	1500	1500	60	57066±6350	0.59±0.17
21	2500	500	60	55600±3400	0.37±0.08
22	3500	1000	60	55966±3000	0.36±0.05
23	2500	1500	60	58433±6900	0.62±0.16
24	1500	500	60	71966±5050	0.49±0.16
25	1500	1000	60	71066±1550	0.51±0.12
26	3500	500	60	69966±1600	0.38±0.18
27	3500	1500	60	70766±2400	0.5±0.21

Tableau A-II.3 Résultats des essais du plan d'expérience Chanfrein / G150

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Qw [ml/min]	Cn PF [#/cm ³]	Ra [µm]
1	1500	1500	20	80533±6400	2.92±0.58
2	3500	1000	20	83600±8450	2.16±0.61
3	2500	1000	20	79433±7300	2.46±0.34
4	2500	500	20	81867±11650	2.76±0.41
5	3500	1500	20	71500±4400	3.02±1.18
6	3500	500	20	77833±14100	2.19±0.41
7	1500	1000	20	75900±9400	3.26±0.37
8	1500	500	20	830009300	2.21±0.49
9	2500	1500	20	79133±13050	3.19±0.96
10	1500	500	40	71933±9450	3.52±1
11	3500	500	40	73133±2750	2.34±0.28
12	1500	1500	40	79433±9850	3.93±0.99
13	3500	1000	40	82000±12600	1.63±0.32
14	2500	1000	40	77933±10450	2.52±0.78
15	3500	1500	40	78167±10300	2.52±0.92
16	2500	1500	40	77100±10050	3.33±0.48
17	1500	1000	40	75167±6850	2.83±0.11
18	2500	500	40	79167±11100	2.88±1.13
19	2500	1000	60	67300±9000	4.08±0.41
20	1500	1500	60	67033±6250	3.36±0.62
21	2500	500	60	74900±12400	3.65±0.63
22	3500	1000	60	73200±11100	2.77±0.52
23	2500	1500	60	71800±6300	3.43±0.64
24	1500	500	60	75767±14500	2.28±0.4
25	1500	1000	60	72733±10350	3.54±0.69
26	3500	500	60	76433±13450	3.56±1.3
27	3500	1500	60	71400±8950	2.03±0.64

Tableau A-II.4 Résultats des essais du plan d'expérience Chanfrein / G600

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Qw [ml/min]	Cn_PF [#/cm ³]	Ra [µm]
1	1500	1500	20	82267±5050	0.61±0.03
2	3500	1000	20	90833±6200	0.66±0.1
3	2500	1000	20	99967±1550	0.88±0.24
4	2500	500	20	95933±4750	0.91±0.41
5	3500	1500	20	76533±12900	0.78±0.01
6	3500	500	20	85067±2700	0.54±0.28
7	1500	1000	20	77467±5950	0.92±0.37
8	1500	500	20	77567±5050	0.55±0.06
9	2500	1500	20	69633±1300	1.23±0.49
10	1500	500	40	47000±4050	0.46±0.24
11	3500	500	40	43833±2300	0.31±0.04
12	1500	1500	40	46367±2200	0.54±0.12
13	3500	1000	40	44567±650	0.6±0.16
14	2500	1000	40	42967±2500	0.61±0.31
15	3500	1500	40	44300±2050	0.49±0.22
16	2500	1500	40	45300±1900	0.41±0.03
17	1500	1000	40	48000±2900	0.53±0.05
18	2500	500	40	49967±200	0.65±0.11
19	2500	1000	60	57000±5600	0.41±0.18
20	1500	1500	60	64900±5050	0.57±0.08
21	2500	500	60	64367±11200	0.39±0.07
22	3500	1000	60	63933±8700	0.57±0.27
23	2500	1500	60	65333±5650	0.39±0.07
24	1500	500	60	70967±13400	0.57±0.27
25	1500	1000	60	67867±9750	0.6±0.1
26	3500	500	60	65567±8950	0.47±0.1
27	3500	1500	60	68333±6800	0.71±0.18

- Résultats des essais de validation

Tableau A-II.5 Résultats des essais avec lubrification en MQL

N° d'essai	Forme d'arête	Taille de grit	N [rpm]	Vf [mm/min]	Qw [ml/min]	Cn_PF [#/cm³]	Ra [µm]
1	Concave	150	1500	1500	60	46767±2000	3.62±0.12
2			3000	1250	60	33833±800	3.1±0.03
3			1000	750	60	34233±3800	3.62±0.03
4			2000	1500	40	71200±13200	3.1±0.15
5			2500	1000	60	48600±1700	3.03±0.12
1	Chanfrein	600	3000	1250	60	66933±1000	1.03±0.05
2			1000	750	60	64567±2150	0.48±0.06
3			2500	500	40	42767±1950	0.4±0.12
4			2000	1500	40	46433±3450	0.32±0.05
5			2500	1000	60	64567±12000	0.4±0.1

Tableau A-II.6 Paramètres des essais avec lubrification abondante

Forme d'arête	Taille de grit	N [rpm]	Vf [mm/min]
Concave	45,150,300,600,1500		
Chanfrein	45,150,300,600,1500	2500	1000

Tableau A-II.7 Paramètres des essais à sec

Forme d'arête	Taille de grit	N [rpm]	Vf [mm/min]
Concave	45,150,300,600		
Chanfrein	45,150,300,600	2500	1000

ANNEXE III

ANALYSE DES CONCENTRATIONS TOTALES EN SURFACE SPÉCIFIQUE

- Particules fines

Forme chanfrein / Grit 150 ébauche :

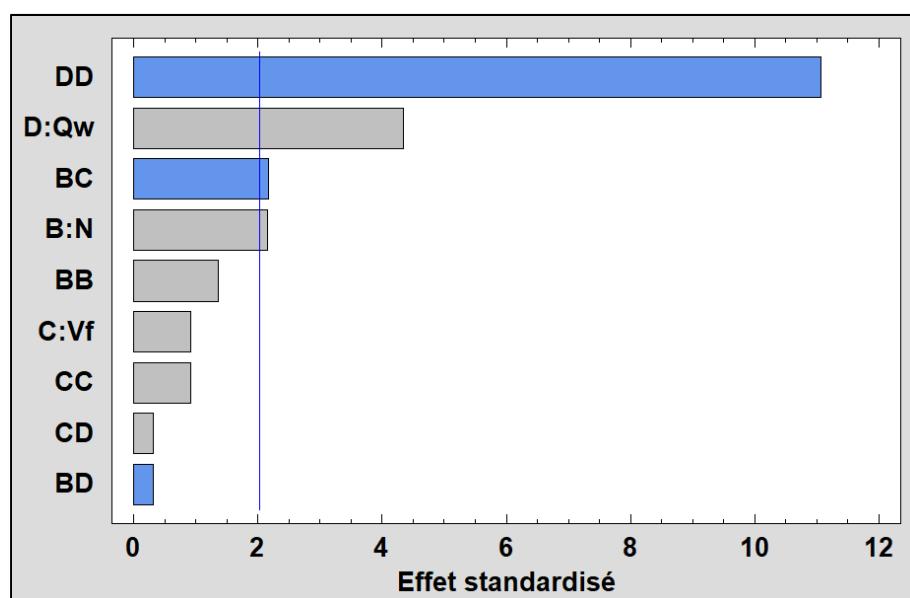


Figure A-III.1 Diagramme Pareto de Cs_PF (forme chanfrein / grit 150)

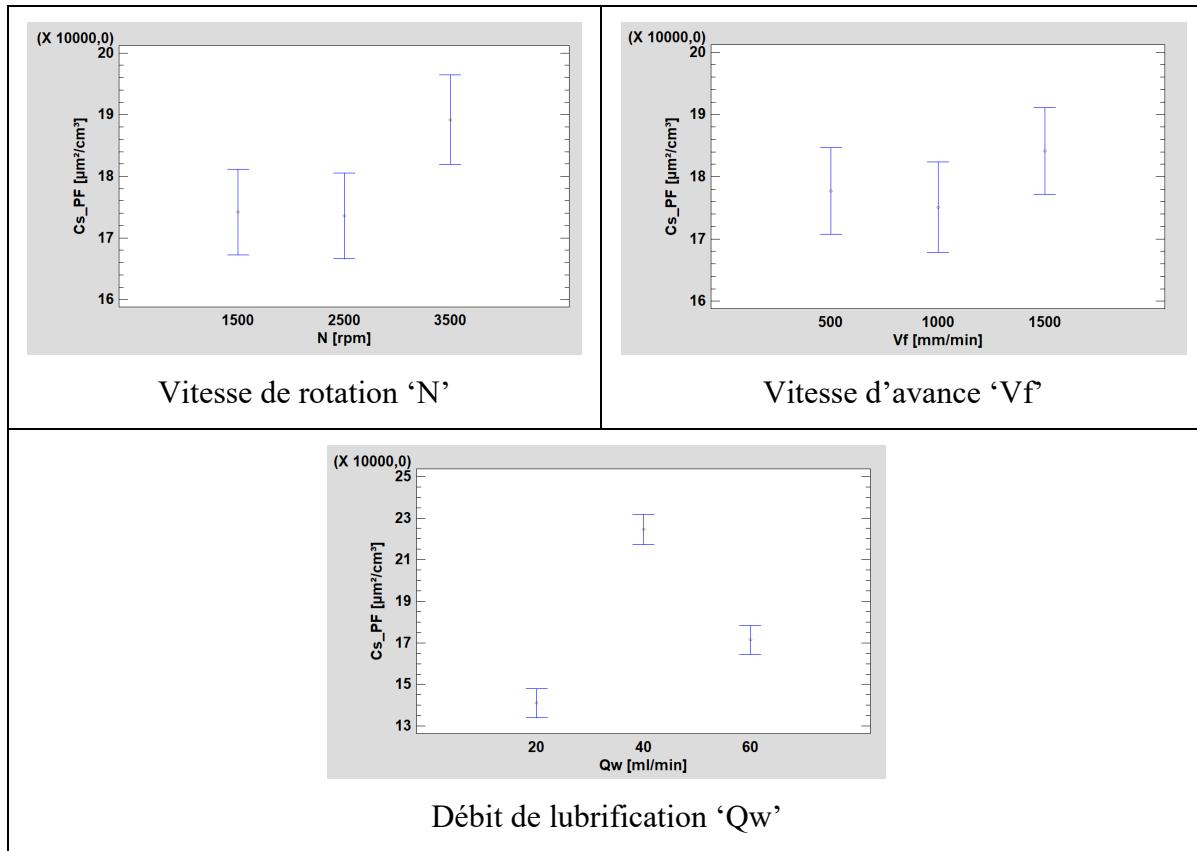


Figure A-III.2 Effet des facteurs principaux sur Cs_PF (forme chanfrein / grit 150)

Forme concave / Grit 150 ébauche :

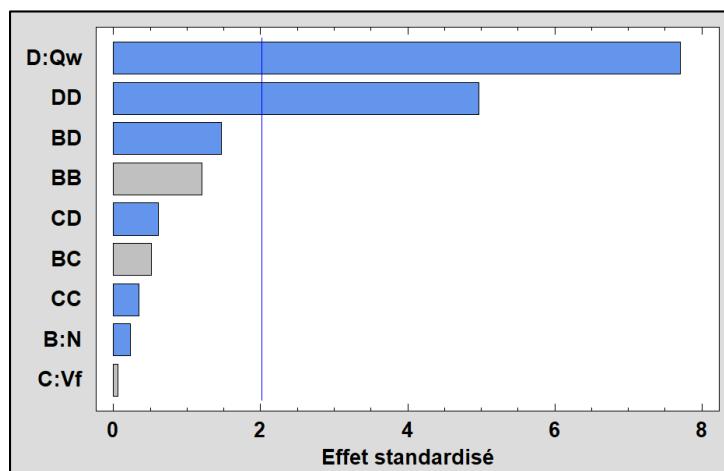


Figure A-III.3 Diagramme Pareto de Cs_PF (forme concave / grit 150)

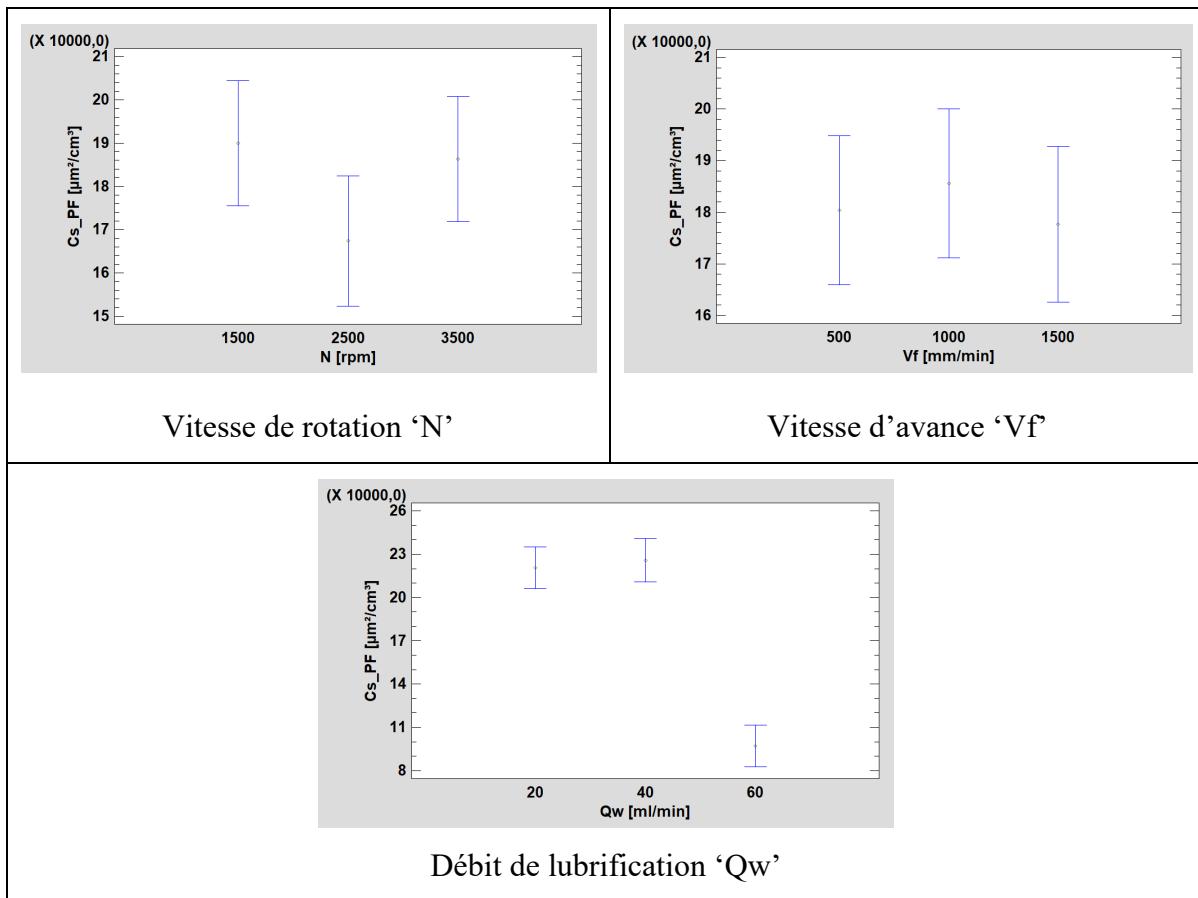


Figure A-III.4 Effet des facteurs principaux sur Cs_PF (forme concave / grit 150)

Forme chanfrein / Grit 600 finition :

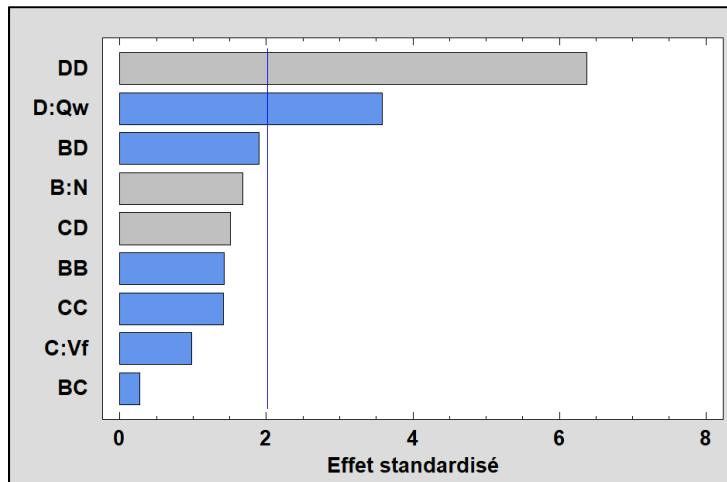


Figure A-III.5 Diagramme Pareto de Cs_PF
(forme chanfrein / grit 600)

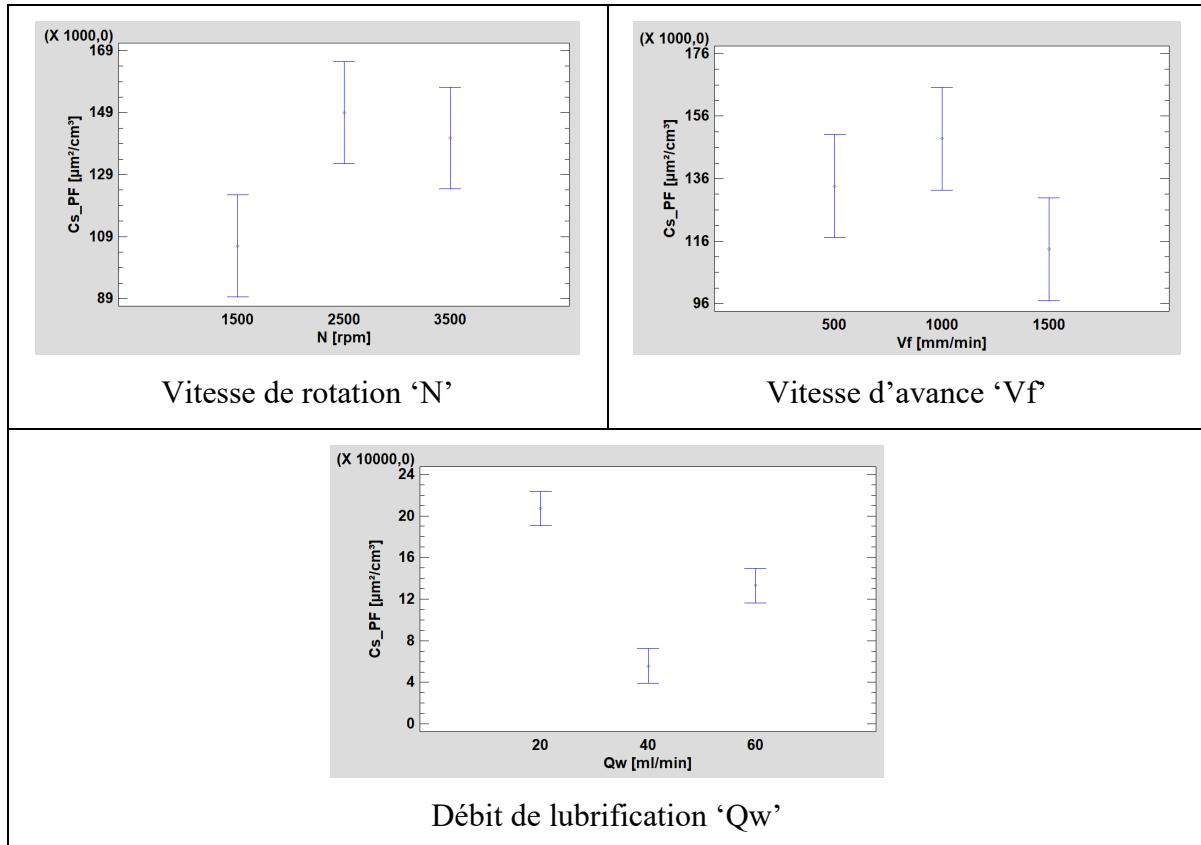


Figure A-III.6 Effet des facteurs principaux sur Cs_PUF (forme chanfrein / grit 600)

Forme concave / Grit 600 finition :

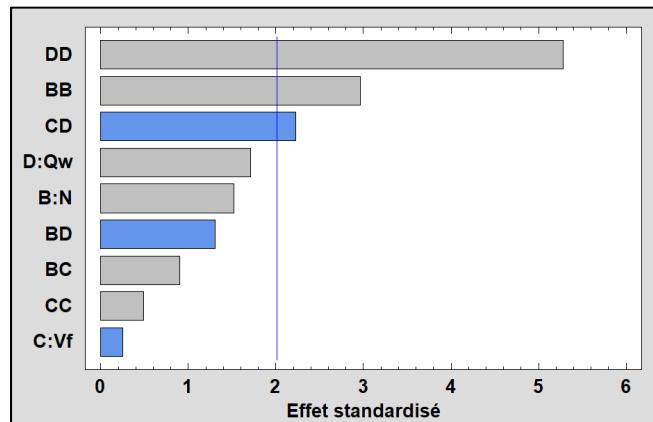


Figure A-III.7 Diagramme Pareto de Cs_PF
(forme concave / grit 600)

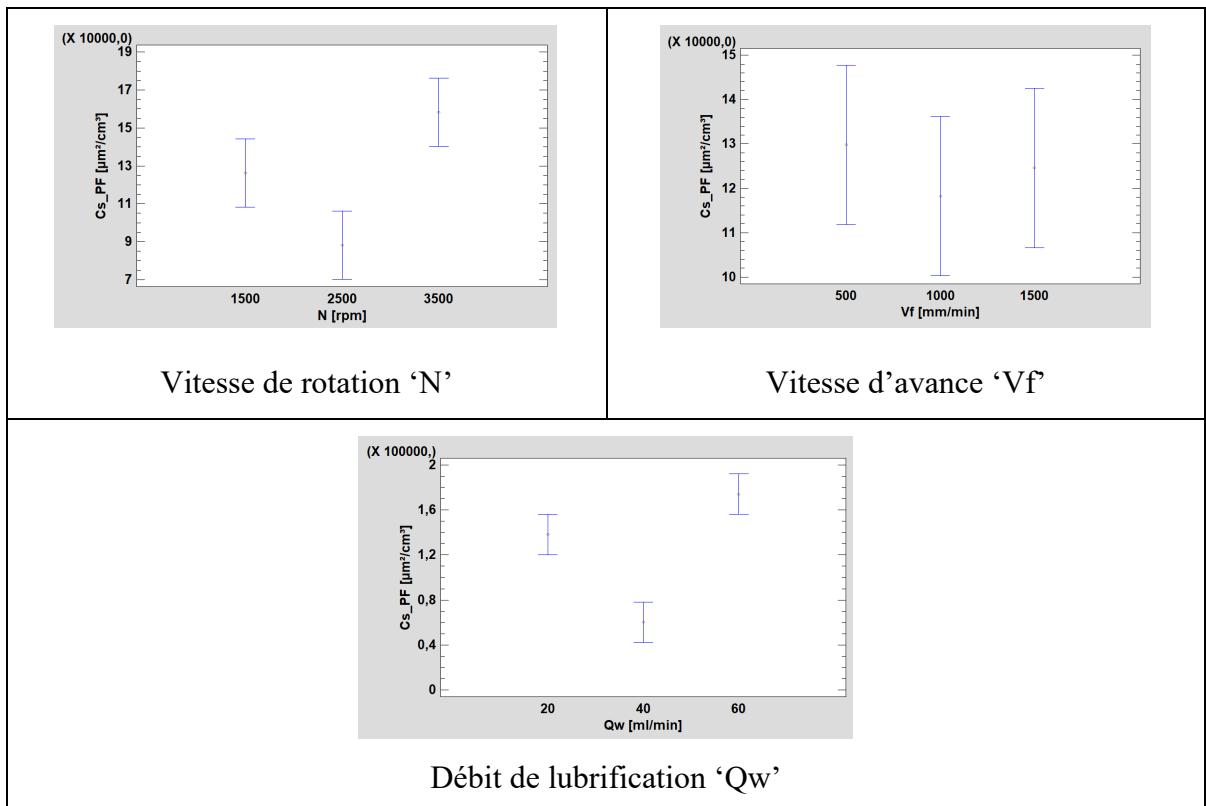


Figure A-III.8 Effet des facteurs principaux sur Cs_PUF (forme concave / grit 600)

- Particules ultrafines

Forme chanfrein / Grit 150 ébauche :

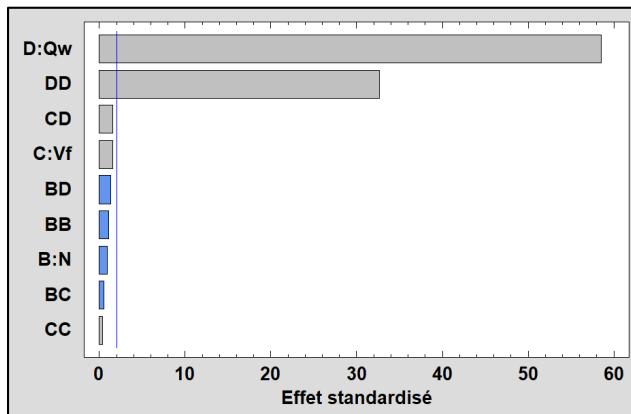


Figure A-III.9 Diagramme Pareto de Cs_PUF
(forme chanfrein / grit 150)

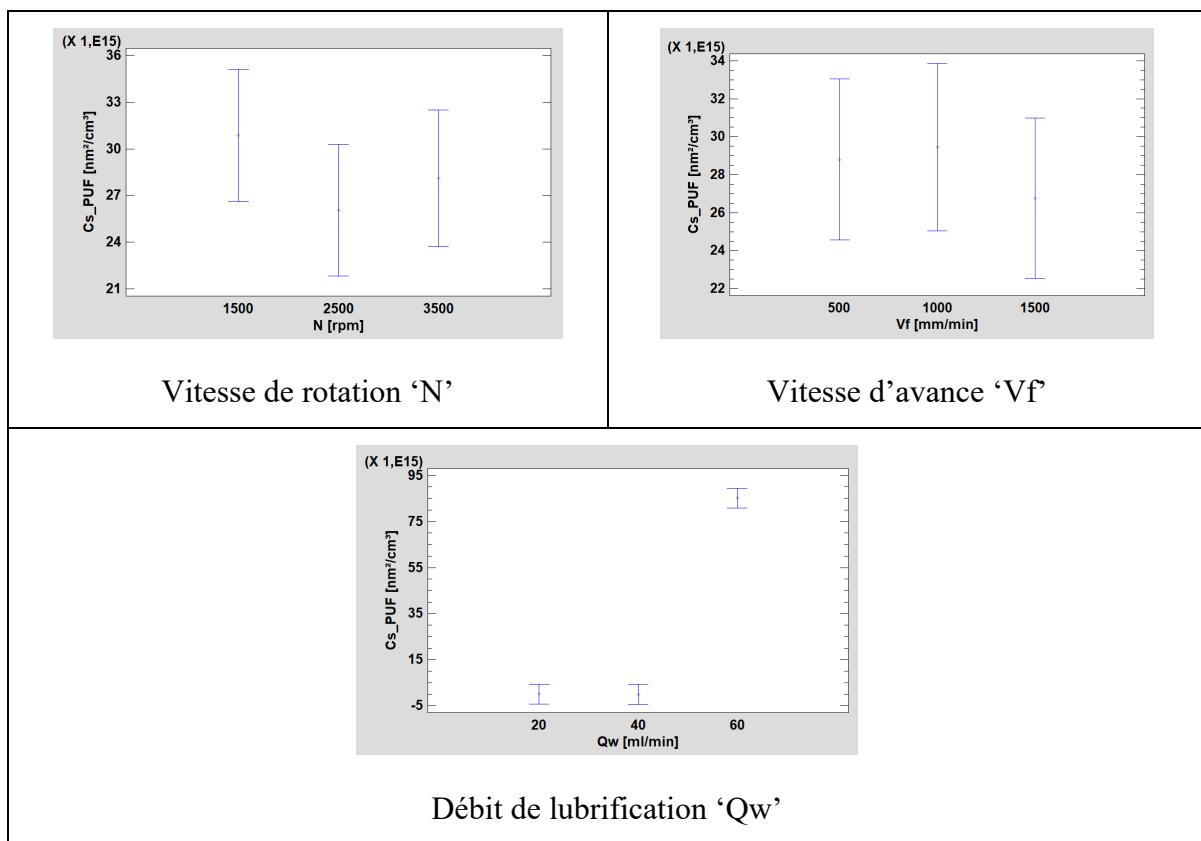


Figure A-III.10 Effet des facteurs principaux sur Cs_PUF (forme chanfrein / grit 150)

Forme concave / Grit 150 ébauche :

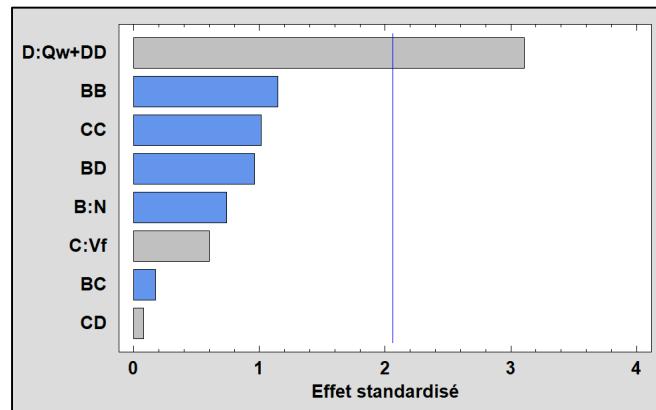


Figure A-III.11 Diagramme Pareto de Cs_PUF
(forme concave / grit 150)

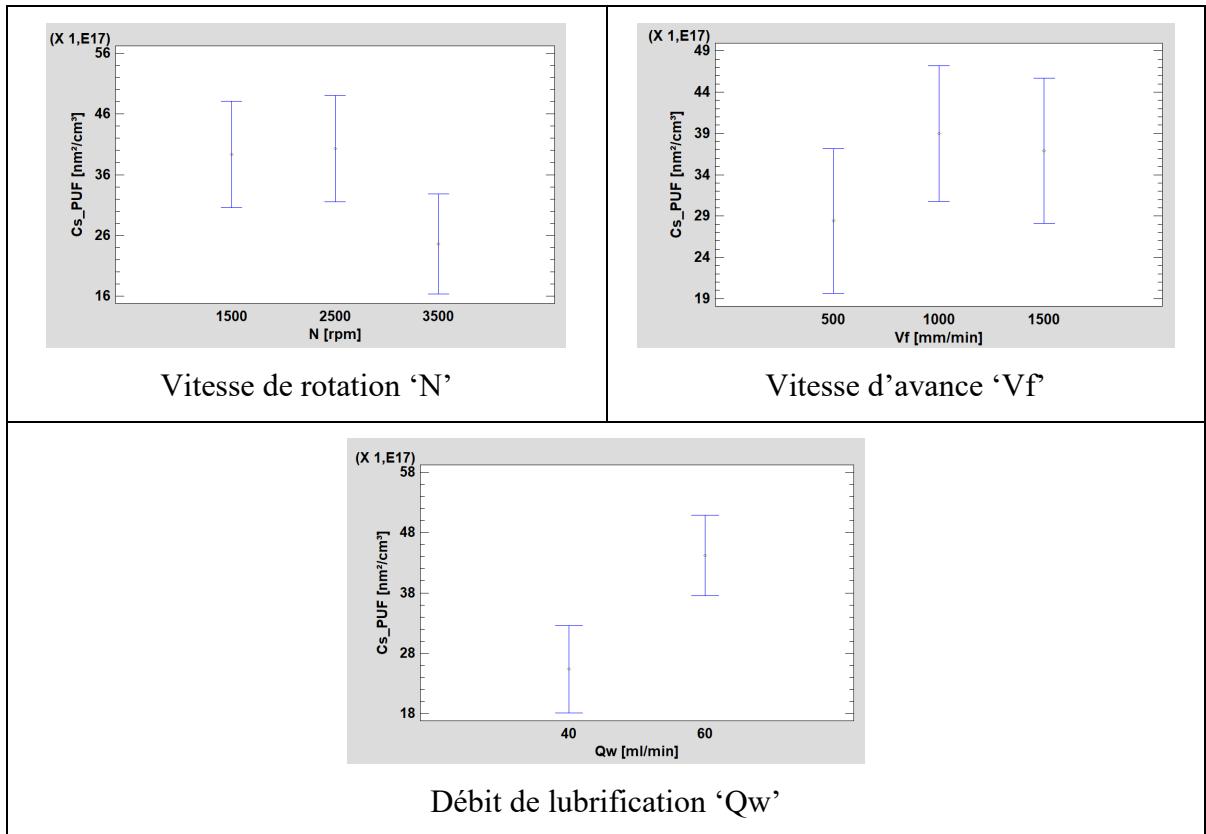


Figure A-III.12 Effet des facteurs principaux sur Cs_PUF (forme concave / grit 150)

Forme chanfrein / Grit 600 finition :

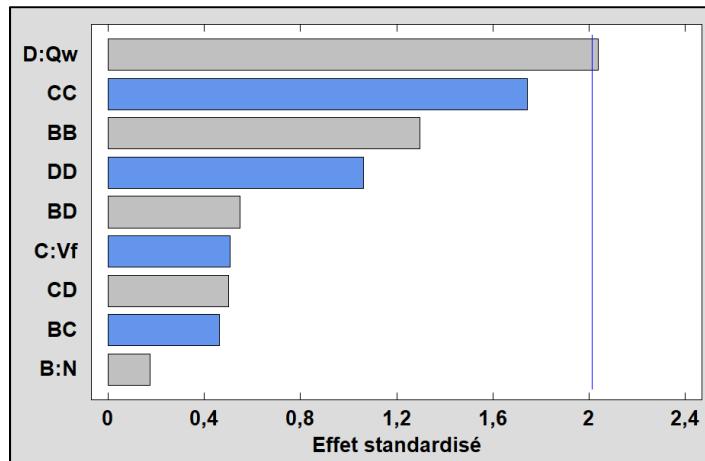


Figure A-III.13 Diagramme Pareto de Cs_PUF
(forme chanfrein / grit 600)

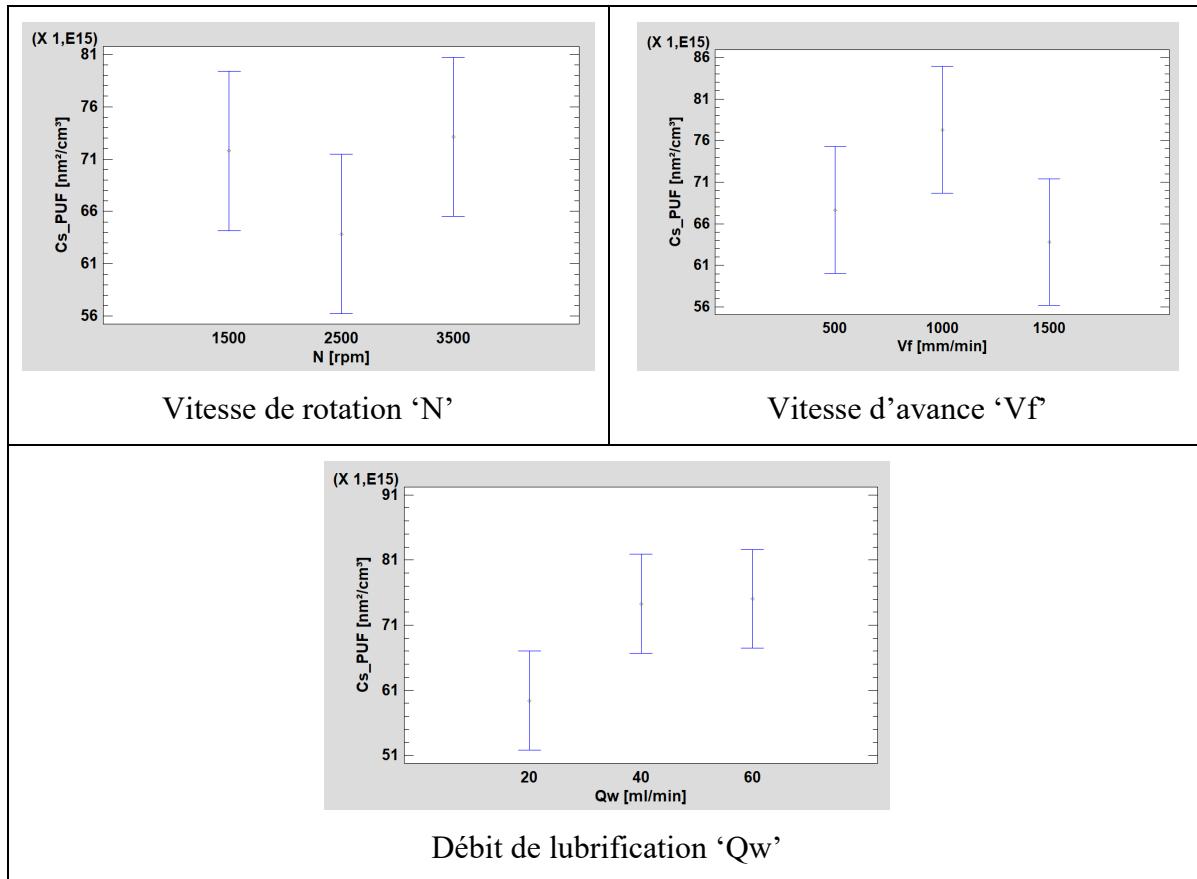


Figure A-III.14 Effet des facteurs principaux sur Cs_PUF (forme chanfrein / grit 600)

Forme concave / Grit 600 finition :

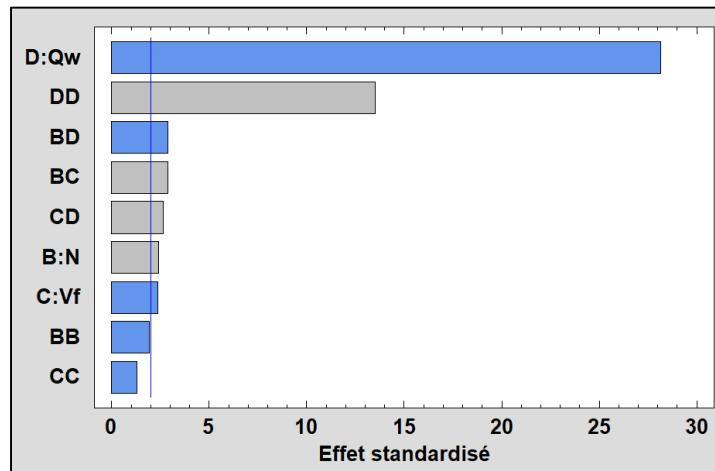


Figure A-III.15 Diagramme Pareto de Cs_PUF
(forme concave / grit 600)

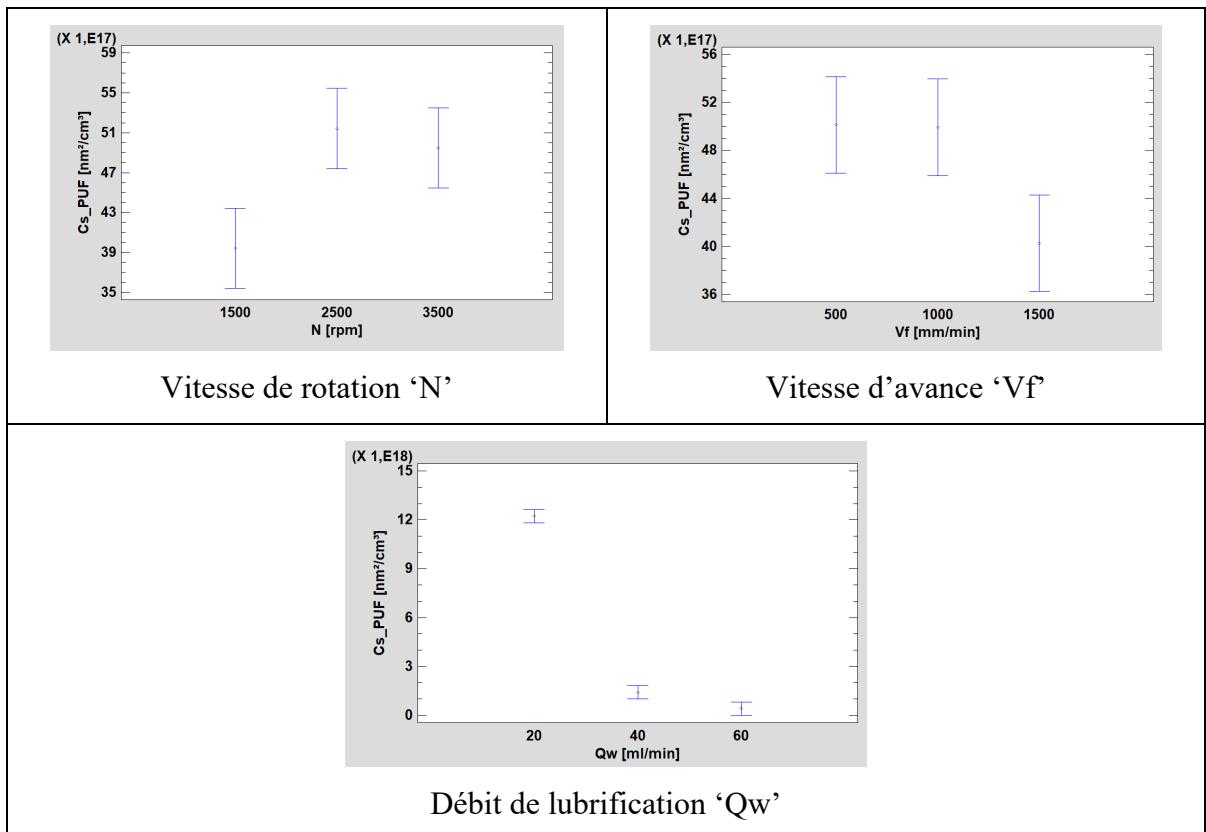


Figure A-III.16 Effet des facteurs principaux sur Cs_PUF (forme concave / grit 600)

ANNEXE IV

ANALYSE DES CONCENTRATIONS TOTALES EN MASSE

- Particules fines

Forme chanfrein / Grit 150 ébauche :

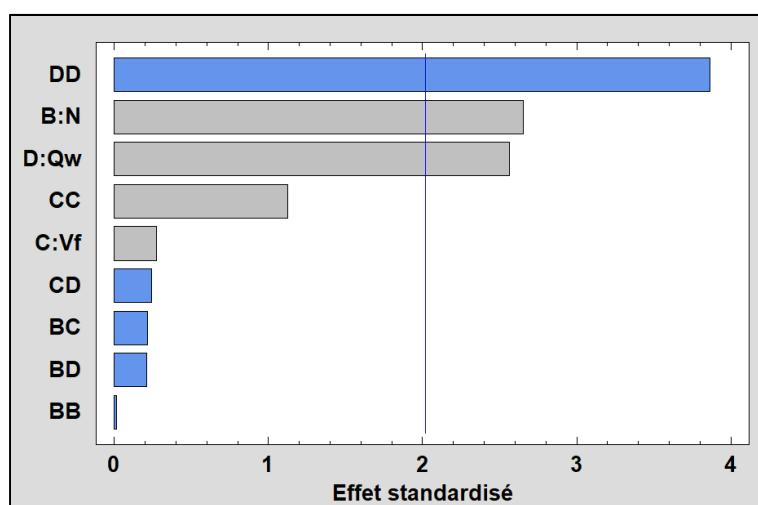


Figure A-IV.1 Diagramme Pareto de Cm_PF
(forme chanfrein / grit 150)

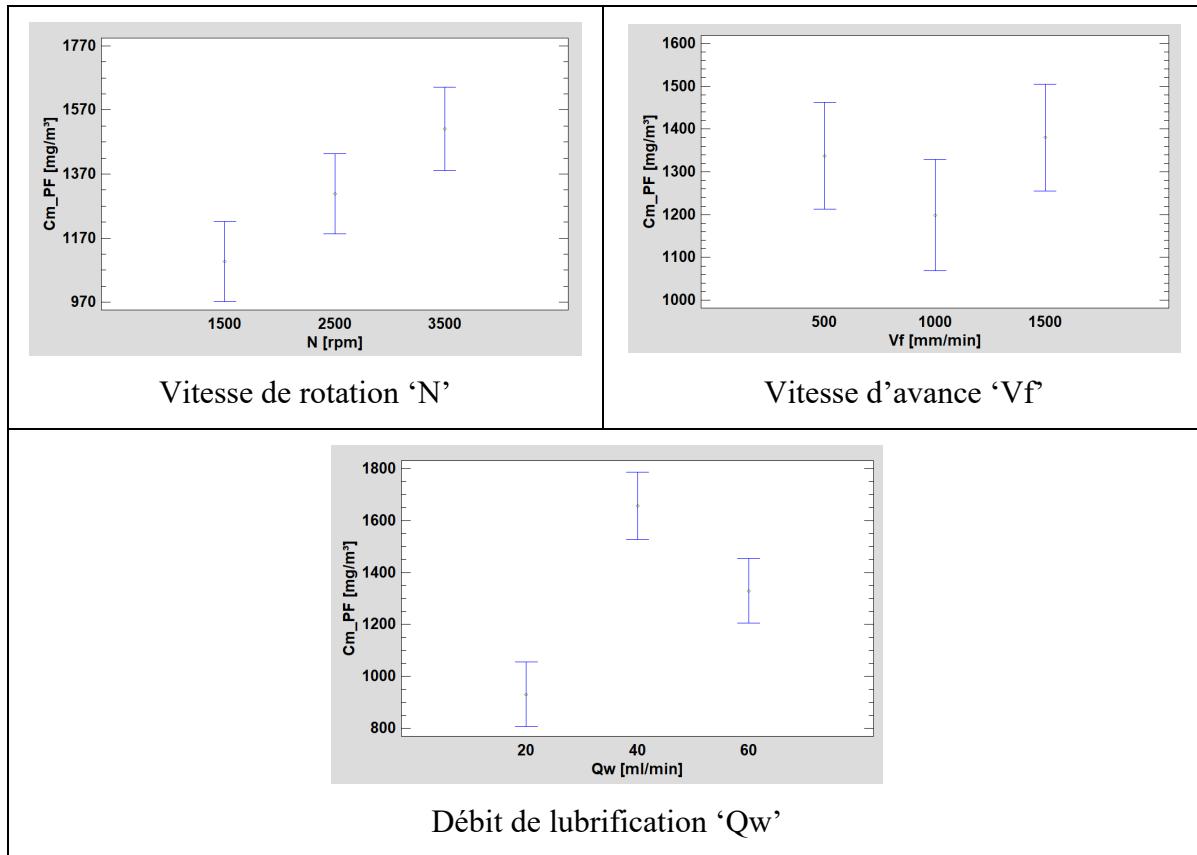


Figure A-IV.2 Effet des facteurs principaux sur Cm_PF (forme chanfrein / grit 150)

Forme concave / Grit 150 ébauche :

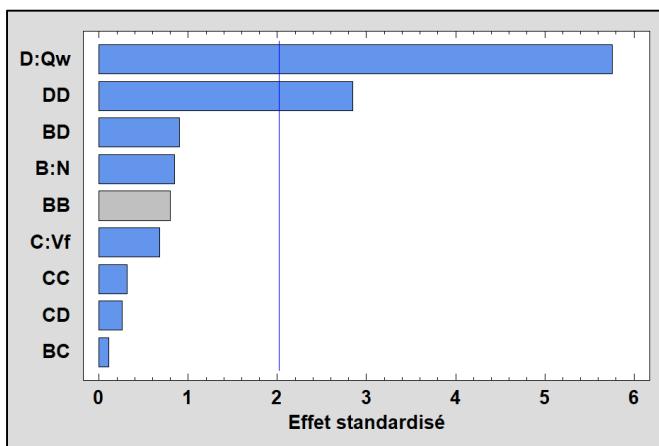


Figure A-IV.3 Diagramme Pareto de Cm_PF
(forme concave / grit 150)

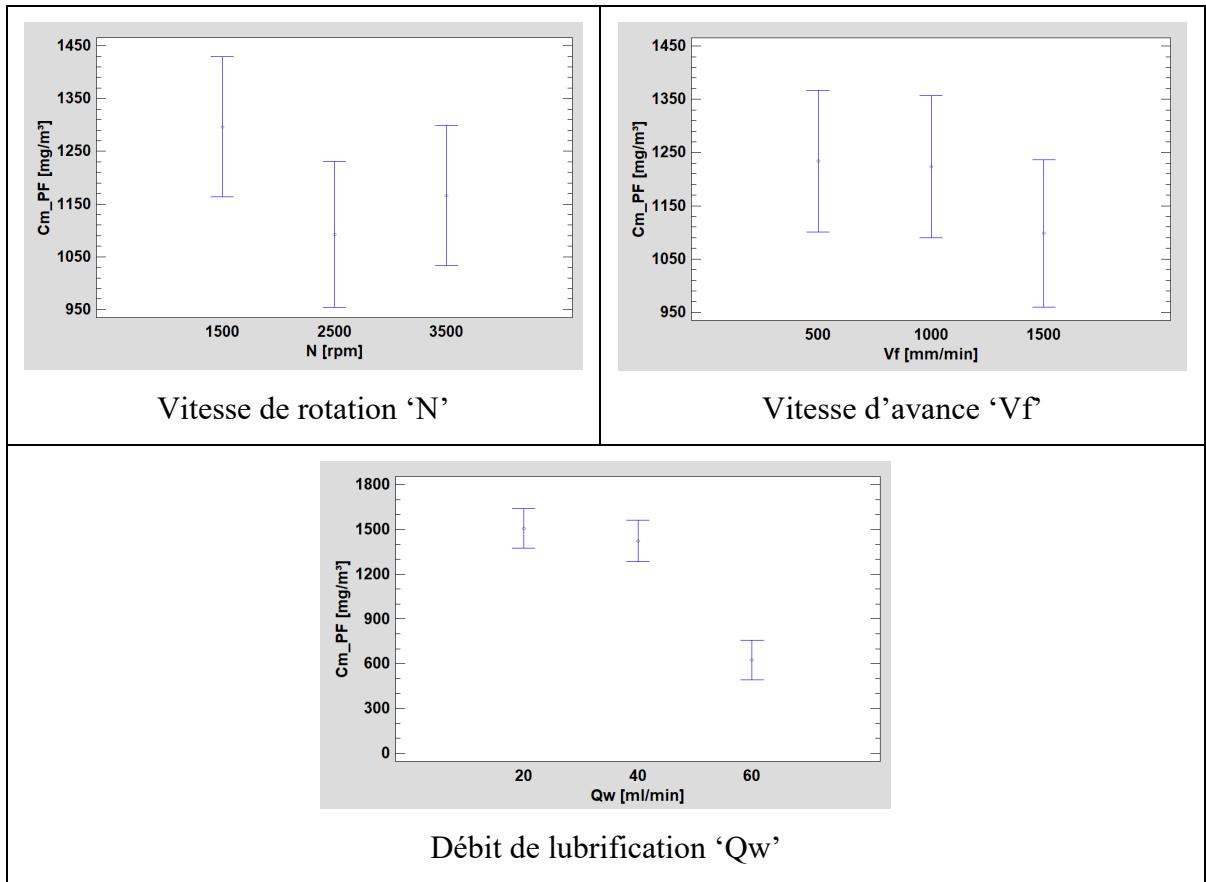


Figure A-IV.4 Effet des facteurs principaux sur Cm_PF (forme concave / grit 150)

Forme chanfrein / Grit 600 finition :

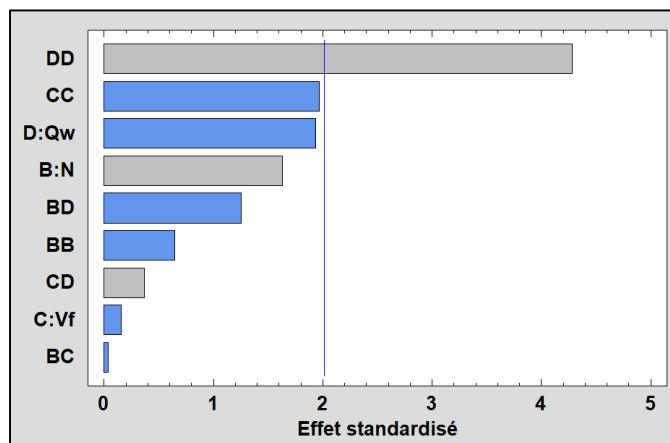


Figure A-IV.5 Diagramme Pareto de Cm_PF (forme chanfrein / grit 600)

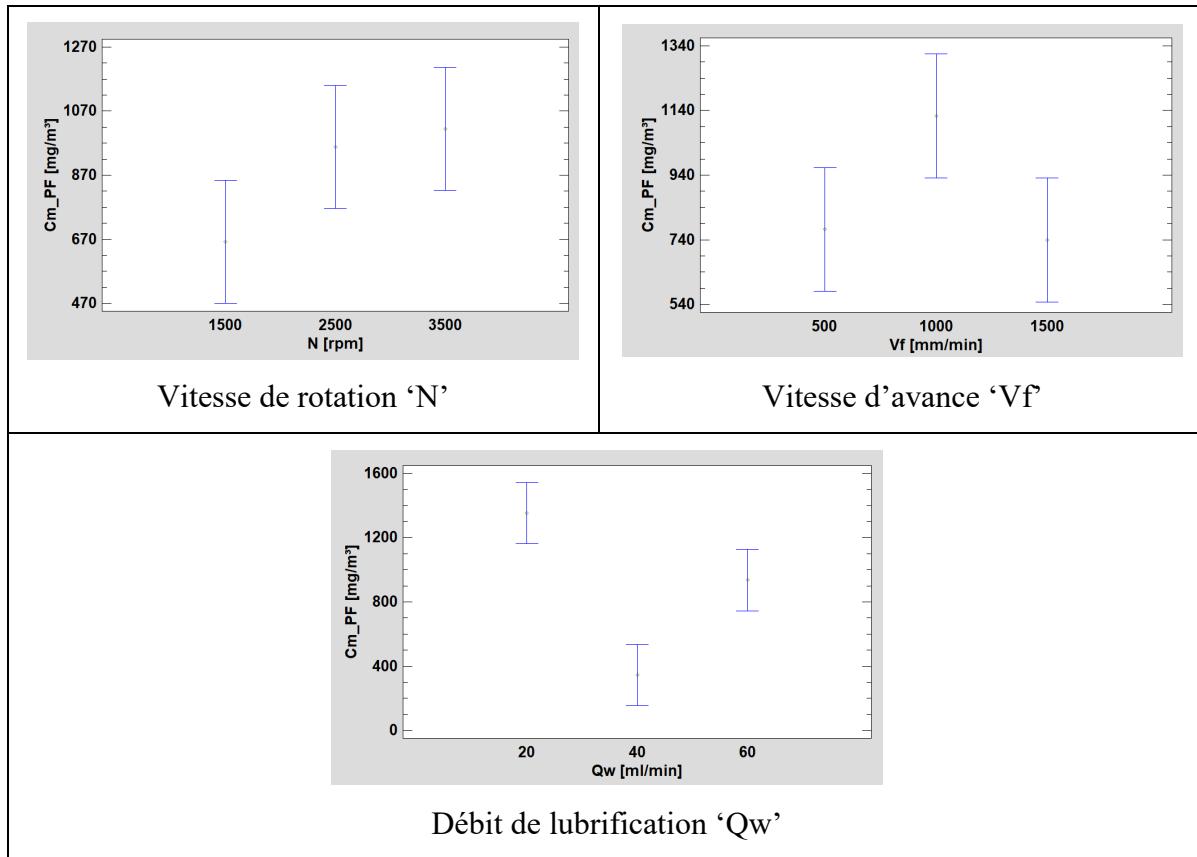


Figure A-IV.6 Effet des facteurs principaux sur Cm_PF (forme chanfrein / grit 600)

Forme concave / Grit 600 finition :

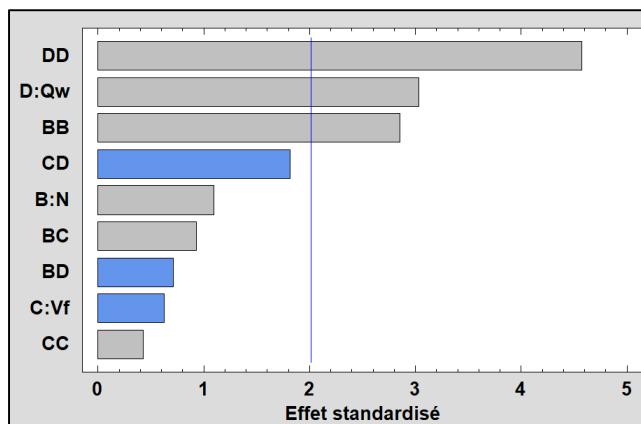


Figure A-IV.7 Diagramme Pareto de Cm_PF
(forme concave / grit 600)

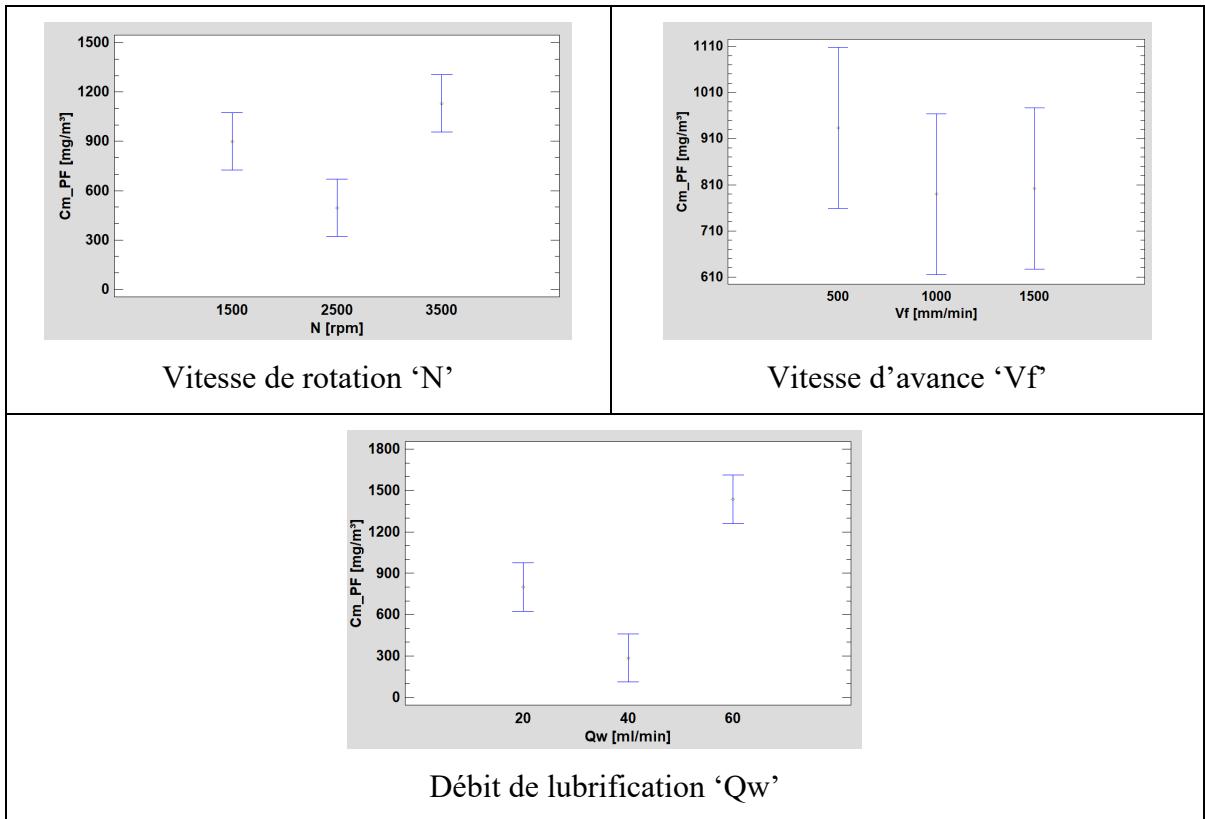


Figure A-IV.8 Effet des facteurs principaux sur Cm_PF (forme concave / grit 600)

- Particules ultrafines

Forme chanfrein / Grit 150 ébauche :

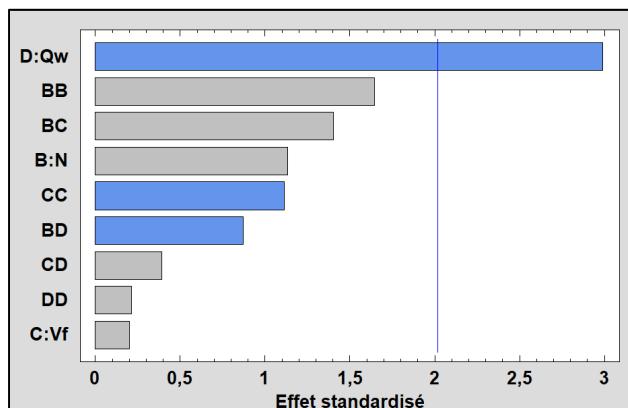


Figure A-IV.9 Diagramme Pareto de Cm_PUF (forme chanfrein / grit 150)

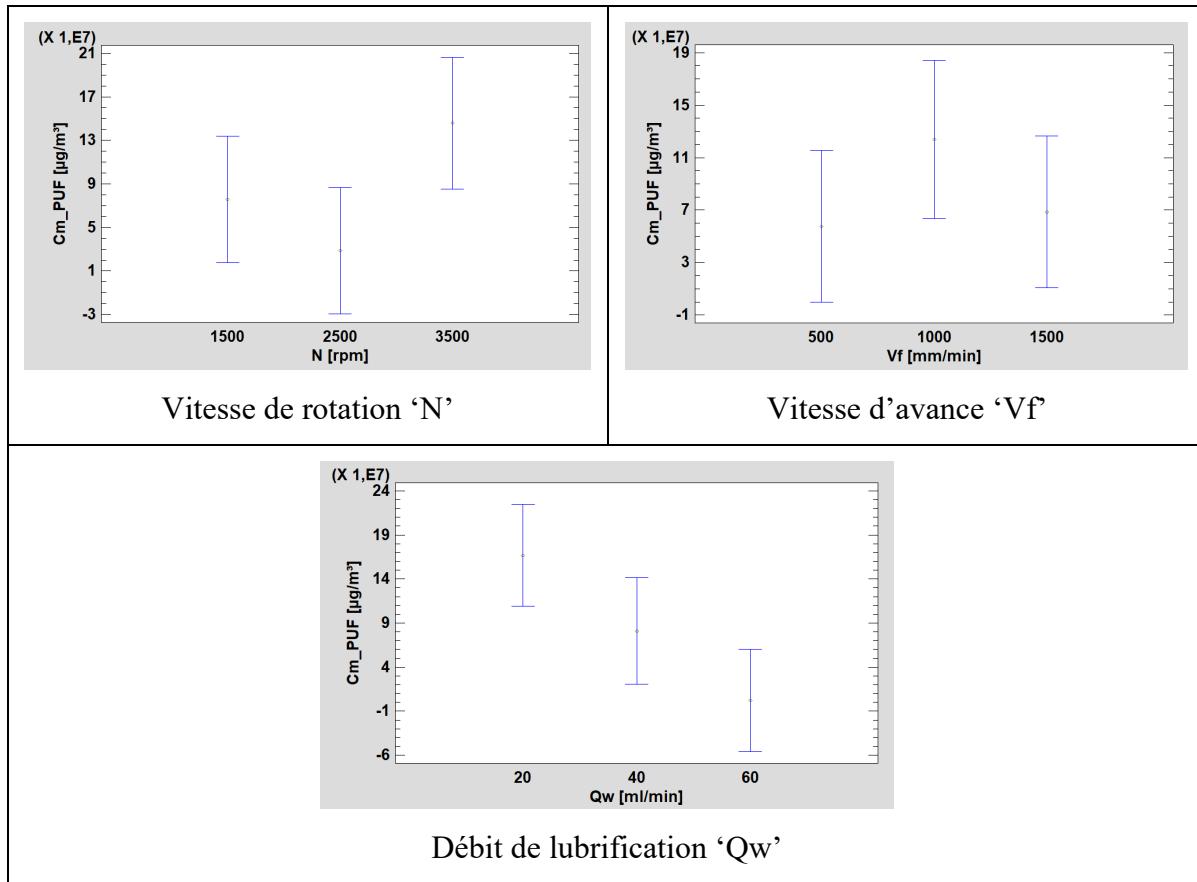


Figure A-IV.10 Effet des facteurs principaux sur Cm_PUF (forme chanfrein / grit 150)

Forme concave / Grit 150 ébauche :

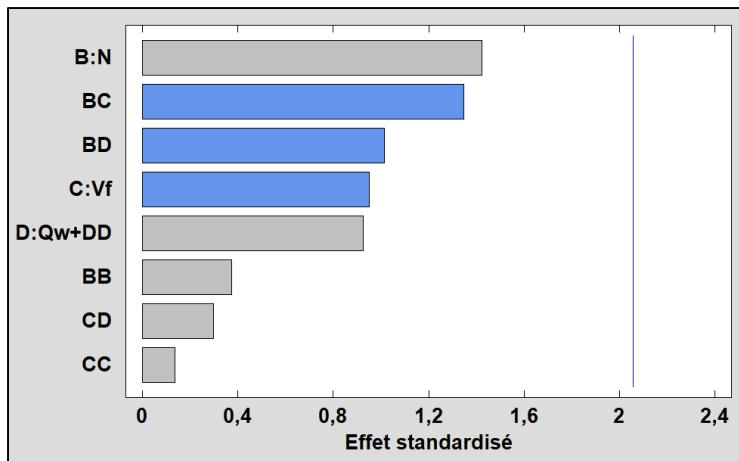


Figure A-IV.11 Diagramme Pareto de Cm_PUF
(forme concave / grit 150)

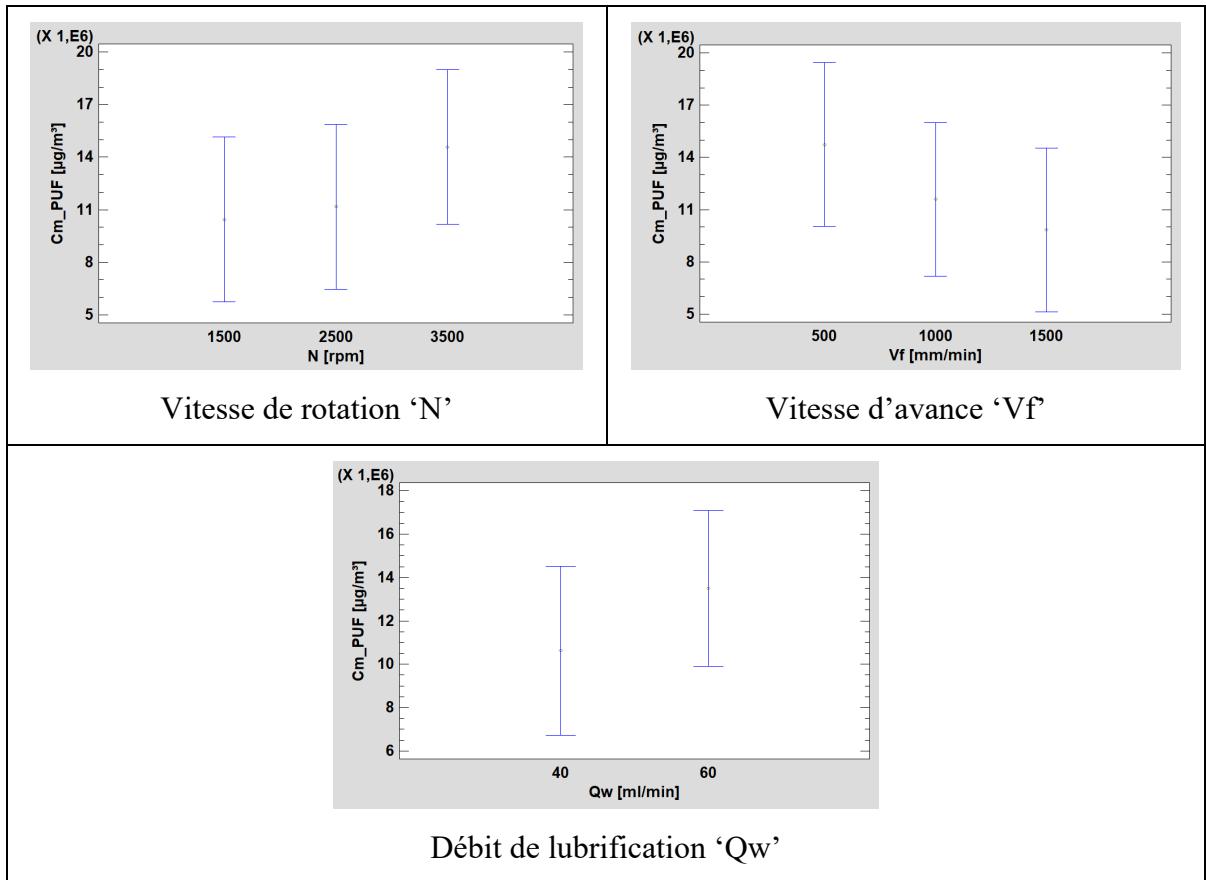


Figure A-IV.12 Effet des facteurs principaux sur Cm_PUF (forme concave / grit 150)

Forme chanfrein / Grit 600 finition :

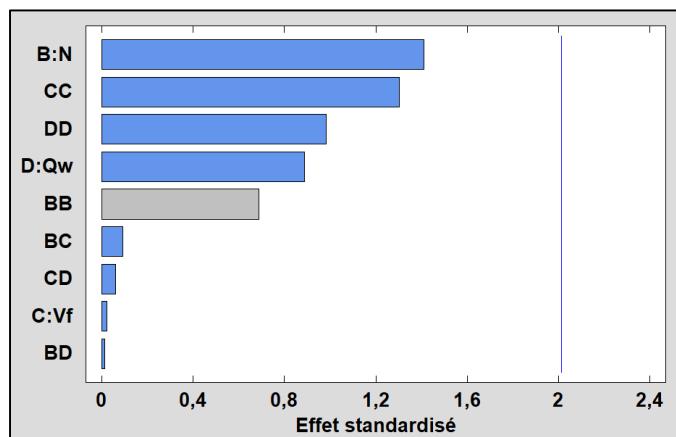


Figure A-IV.13 Diagramme Pareto de Cm_PUF (forme chanfrein / grit 600)

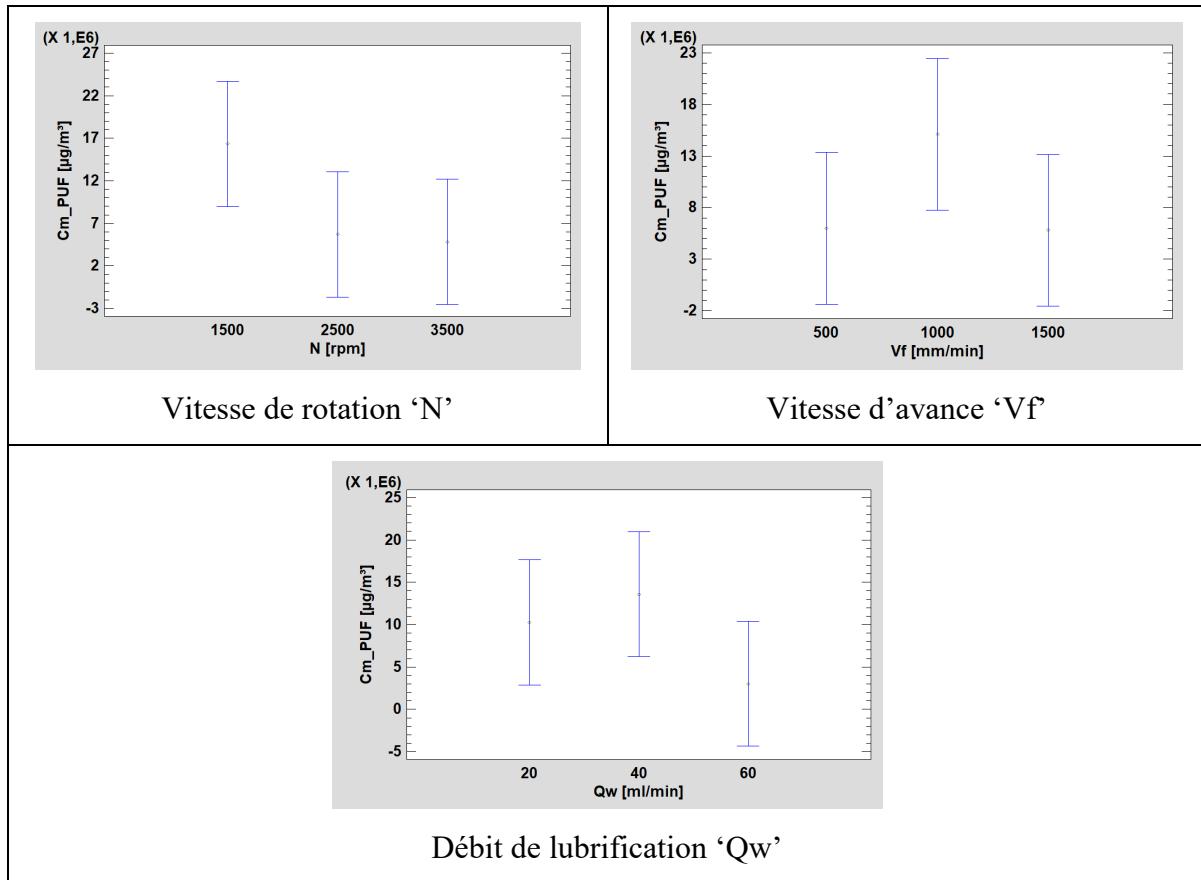


Figure A-IV.14 Effet des facteurs principaux sur Cm_PUF (forme chanfrein / grit 600)

Forme concave / Grit 600 finition :

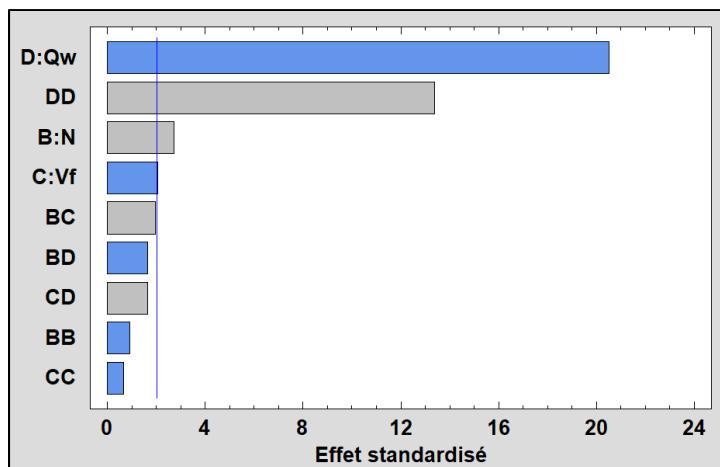


Figure A-IV.15 Diagramme Pareto de Cm_PUF (forme concave / grit 600)

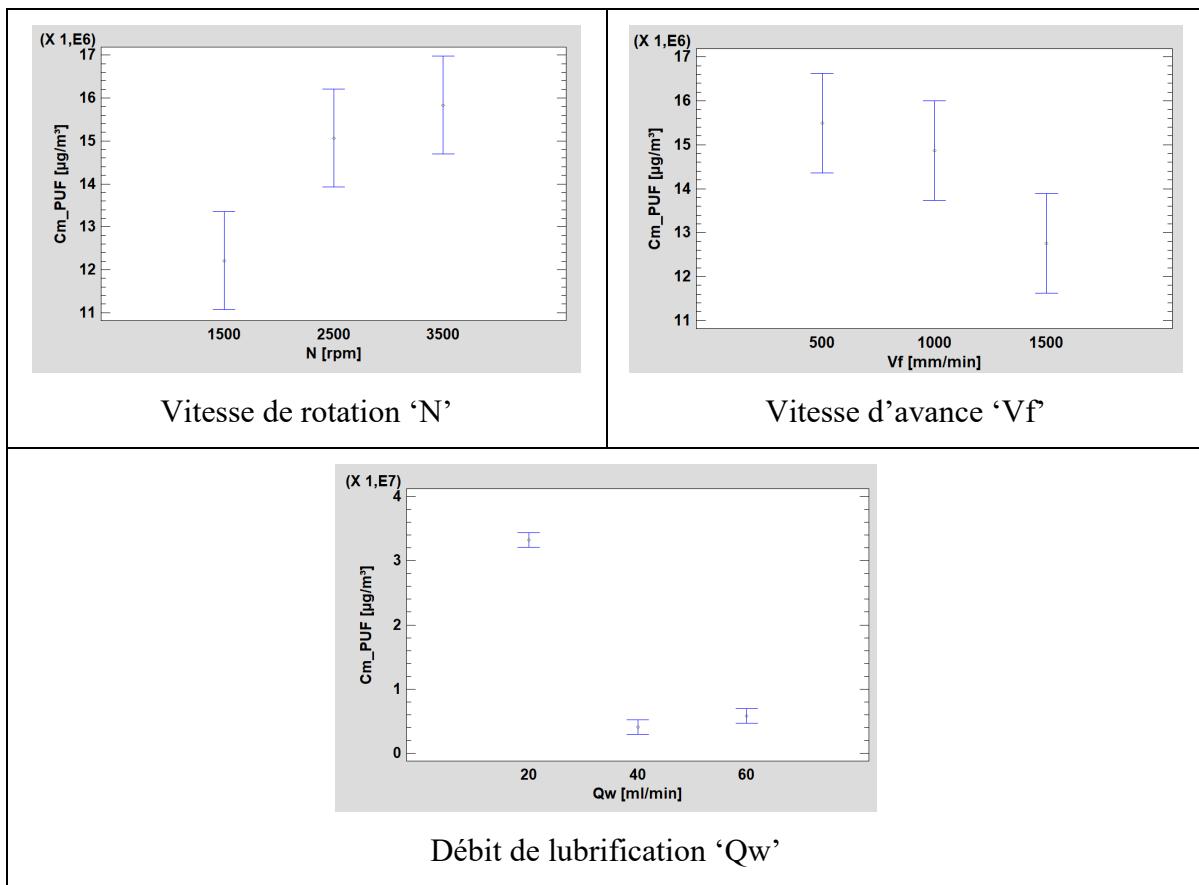


Figure A-IV.16 Effet des facteurs principaux sur Cm_PUF (forme concave / grit 600)

ANNEXE V

ANALYSE DE LA RUGOSITÉ R_t

- Forme chanfrein

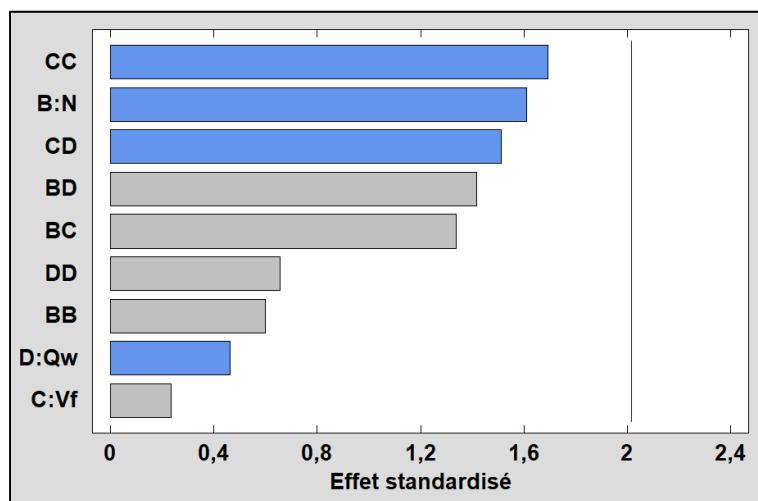


Figure A-V.1 Diagramme Pareto de R_t
(forme chanfrein / grit 600)

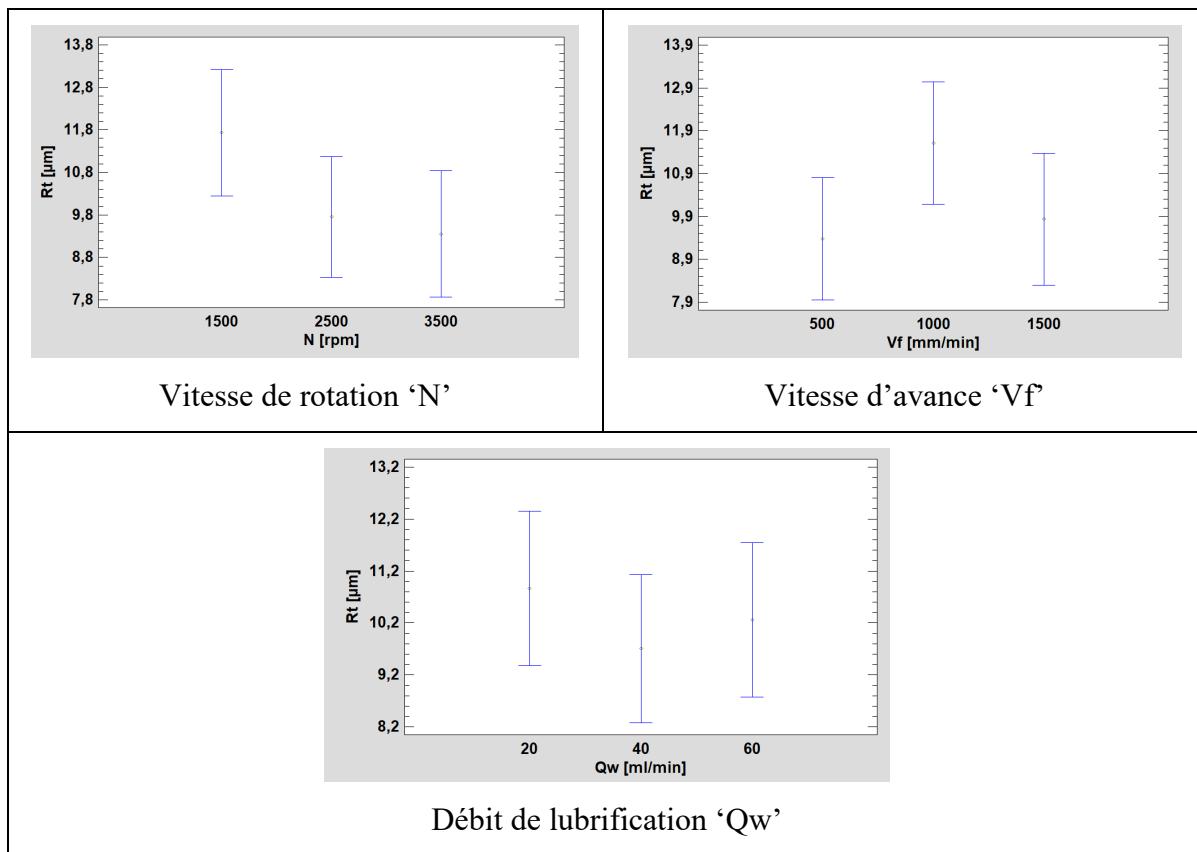


Figure A-V.2 Effet des facteurs principaux sur Rt (forme chanfrein / grit 600)

- Forme concave

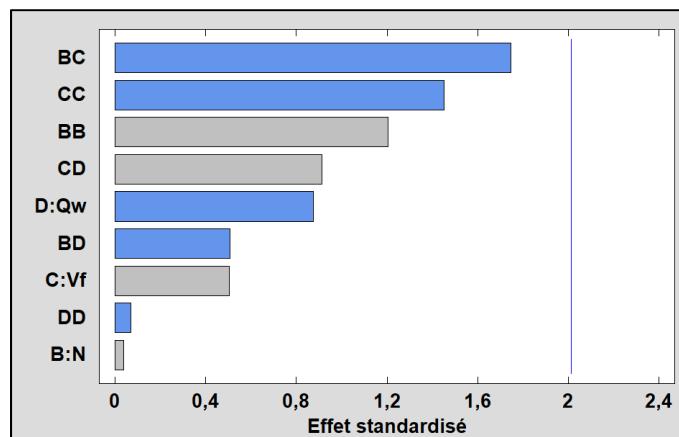


Figure A-V.3 Diagramme Pareto de Rt
(forme concave / grit 600)

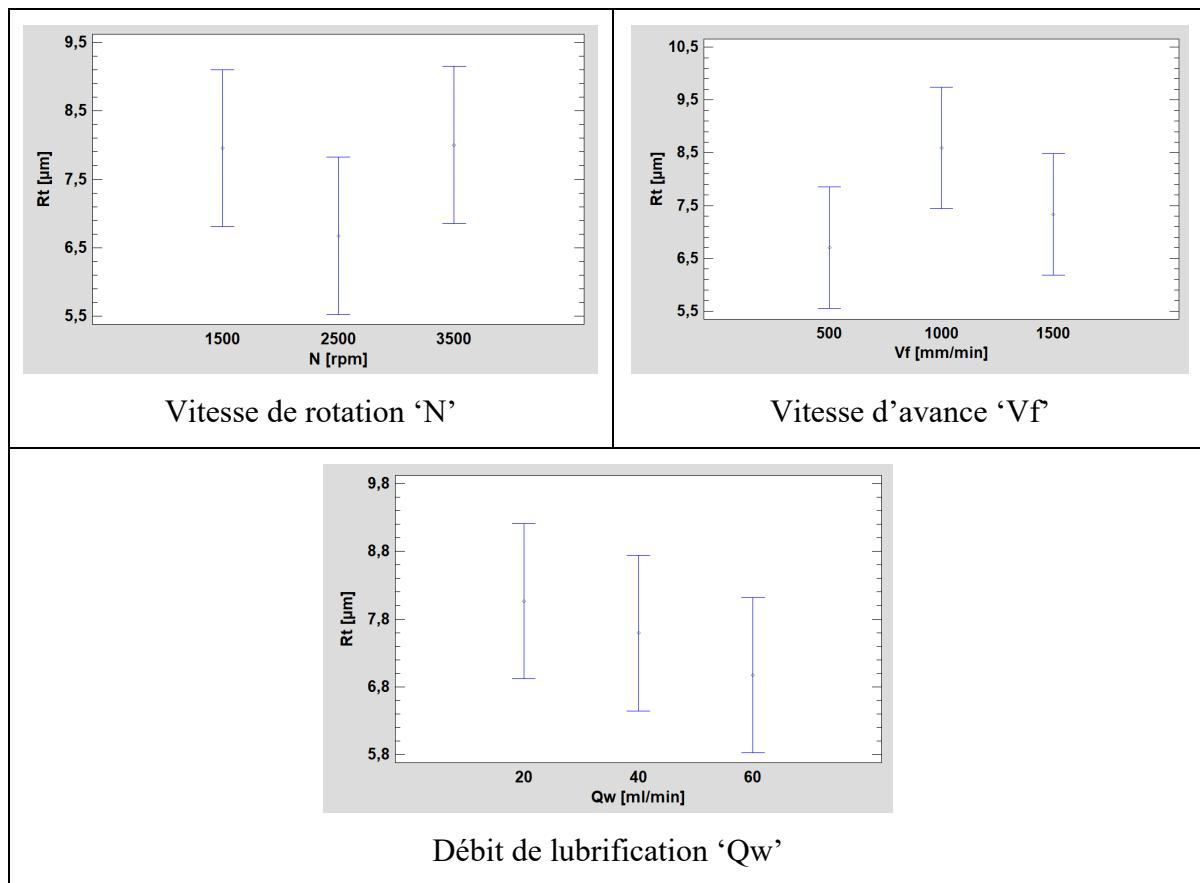


Figure A-V.4 Effet des facteurs principaux sur Rt (forme concave / grit 600)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmad, I., Khan, M. I., & Patil, G. (2011). Nanotoxicity of Occupational Dust Generated in Granite Stone Saw Mill. Dans *2011 International Conference on Nanoscience, Technology and Societal Implications* (pp. 1-6). Bhubaneswar, India : IEEE. <https://doi.org/10.1109/NSTSI.2011.6111990>
- Antão, V. C. dos S., Pinheiro, G. A., Kavakama, J., & Terra-Filho, M. (2004). High prevalence of silicosis among stone carvers in Brazil. *American Journal of Industrial Medicine*, 45(2), 194-201. <https://doi.org/10.1002/ajim.10331>
- Ashley, K., & Fey O'Connor, P. (2017). *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 5th Edition* (5^e éd.). (S.l.) : (s.n.). Repéré à https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdfs/NMAM_5thEd_EBook.pdf
- Bahloul, A., Vanterpool Jorge, R. F., Djebbara, A., Songmene, V., Saidi, M. N., Kouam, J., ... Villalpando, F. (2019). Transformation du granit — Caractérisation et contrôle de la poussière de la silice émise par le polissage, Rapport scientifique (R-1054), IRSST, Montréal, 115 pages.
- Bahri, H., Songmene, V., Kouam, J., Samuel, A. M., & Samuel, F.-H. (2021). CNC Edge Finishing of Granite: Effect of Machining Conditions on Part Quality, Cutting Forces, and Particle Emissions. *Materials*, 14(21), 6496. <https://doi.org/10.3390/ma14216496>
- Ben Mhenni, A. A. (2007). *Influence de l'état de surface et du serrage sur les outils assemblés par frettage* (Thèse de doctorat). École polytechnique (Montréal, Québec), Département de génie mécanique.
- Cooper, J. H., Johnson, D. L., & Phillips, M. L. (2014). Respirable Silica Dust Suppression During Artificial Stone Countertop Cutting. *The Annals of Occupational Hygiene*, 59(1), 122-126. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu083>
- Côté, M., Djebbour, H., & Lafontaine, K. (2017). L'exposition aux poussières de silice cristalline (quartz). ASP Construction. Repéré à <https://www.asp-construction.org/publications/publication/dl/l-exposition-aux-poussieres-de-silice-cristalline-quartz-2017-9-p>
- Da Silva, L., & Santugini, M. (2009). Qu'est-ce que la productivité? Centre sur la productivité et la prospérité, HEC Montréal. Repéré à http://cpp.hec.ca/cms/assets/documents/recherches/quest-ce-que-la-productivite_dec-2009_fra.pdf
- Djebbara, A. (2012). *Métrologie des particules ultrafines d'usinage : Optimisation de la caractérisation et de la mesure* (Thèse de doctorat). Ecole de Technologie Supérieure.

GeologyIn. (2015). What Is Granite And How Is It Formed? Repéré à <https://www.geologyin.com/2015/11/what-is-granite-and-how-is-it-formed.html>. Consulté le 04/05/2021.

Gillespie, L. K. (1999). *Deburring and edge finishing handbook*. Dearborn, Mich. : New York : Society of Manufacturing Engineers ; American Society of Mechanical Engineers.

Gillespie, L. K. (2007). *Mass finishing handbook* (1st ed). New York : Industrial Press.

Gillespie, Laroux K. (2009). *The Economics of Burrs and Deburring*. (S.l.) : Deburring Technology International, Incorporated.

Goyer, N., Bahloul, A., & Veillette, C. (2010). *Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice*. (S.l.) : IRSST & CSST.

GranQuartz Canada Inc. (2020). Stone Fab Catalog 2020-V1. Repéré à <https://www.granquartz.ca/wp-content/uploads/2020/08/2020V1-Catalog-General.pdf>. Consulté le 29/12/2020.

Grégory, B., & Ravalléc, C. (2012). Silice cristalline : de la poussière à la maladie, il n'y a qu'un pas. *Travail & Sécurité*, (10), 18-34.

Gunes Yilmaz, N. (2016). Size analysis of the chips generated during abrasive machining of granite in relation to productivity and efficiency parameters. *Particulate Science and Technology*, 34(5), 593-601. <https://doi.org/10.1080/02726351.2015.1096872>

Guo, J., Shi, T., Cui, X., Rong, Y., Zhou, T., Zhang, Z., ... Chen, W. (2016). Effects of silica exposure on the cardiac and renal inflammatory and fibrotic response and the antagonistic role of interleukin-1 beta in C57BL/6 mice. *Archives of Toxicology*, 90(2), 247-258. <https://doi.org/10.1007/s00204-014-1405-5>

Guth, J. (2017a). Silica Part III: How Much Dust is Too Much? – iQ Power Tools. Repéré à <https://iqpowertools.com/how-much-silica-dust-is-too-much/>. Consulté le 24/02/2021.

Guth, J. (2017b). Silica Part IV: Time – iQ Power Tools. Repéré à <https://iqpowertools.com/silica-part-iv-time/>. Consulté le 24/11/2021.

Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. (S.l.) : John Wiley & Sons. (Google-Books-ID: 4fJqDwAAQBAJ).

INRS France. (1998). *Contrôle de la concentration en silice cristalline dans l'atmosphère des lieux de travail*. Paris : INRS.

ISO. (2007). International Organization for Standardization ISO/TR 27628:2007. Repéré à <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/04/42/44243.html>. Consulté le 05/05/2021.

- Kenda, J., & Kopa, J. (2009). Diamond Tools for Machining of Granite and Their Wear. *Journal of Mechanical Engineering*, 6.
- Khettabi, R. (2009). *Modélisation des émissions de particules microniques et nanométriques en usinage*. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure, Montréal. Repéré à <http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/59>
- Kouam, J., Songmene, V., & Bahloul, A. (2013). Experimental investigation on PM2.5 particle emission during polishing of granite. *Health*, 05(10), 29-35. <https://doi.org/10.4236/health.2013.510A2004>
- Kouam, J., Songmene, V., Bahloul, A., & Samuel, A. M. (2022). Characterization of Si and SiO₂ in Dust Emitted during Granite Polishing as a Function of Cutting Conditions. *Materials*, 15(11), 3965. <https://doi.org/10.3390/ma15113965>
- Kouamou Njouokep, F. B. (2020). *Étude du polissage automatique des granits* (Mémoire de maîtrise). École de technologie supérieure, Montréal.
- Kros, J. F., & Mastrangelo, C. M. (2004). Comparing Multi-response Design Methods with Mixed Responses. *Quality and Reliability Engineering International*, 20(5), 527-539. <https://doi.org/10.1002/qre.664>
- Krupoves, A., Adib, G., & Sassine, M.-P. (2019). *Portrait des cas de silicose d'origine professionnelle à partir du système de déclaration des maladies obligatoire, Québec, 2006-2017*. (S.1.) : (s.n.). Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/4010660>
- Kusaka, T., Nakayama, M., Nakamura, K., Ishimiya, M., Furusawa, E., & Ogasawara, K. (2014). Effect of Silica Particle Size on Macrophage Inflammatory Responses. *PLOS ONE*, 9(3), e92634. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092634>
- LégisQuébec. (2021). Regulation respecting occupational health and safety. Repéré à <http://www.legisquebec.gouv.qc.ca/en/document/cr/S-2.1,%20r.%202013>. Consulté le 24/01/2022.
- Li, C. Z., Zhao, Y., & Xu, X. (2019). Investigation of dust exposure and control practices in the construction industry: Implications for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 227, 810-824. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.174>
- Liu, Y., Steenland, K., Rong, Y., Hnizdo, E., Huang, X., Zhang, H., ... Chen, W. (2013). Exposure-Response Analysis and Risk Assessment for Lung Cancer in Relationship to Silica Exposure: A 44-Year Cohort Study of 34,018 Workers. *American Journal of Epidemiology*, 178(9), 1424-1433. <https://doi.org/10.1093/aje/kwt139>
- Malkin, S., & Guo, C. (2008). *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives* (2nd ed.). New York : Industrial Press.

Mayer, P., Gerber, N., McDermott, R., Volkamer, M., & Vogt, J. (2017). Productivity vs security: mitigating conflicting goals in organizations. *Information & Computer Security*, 25(2), 137-151. <https://doi.org/10.1108/ICS-03-2017-0014>

Media Blast & Abrasive. (2015). Sandblasting Grit Size Conversion Chart | Media Blast & Abrasive. Repéré à <https://www.mediablast.com/sandblasting-grit-size-conversion-chart>. Consulté le 29/12/2020.

MERN. (2019). Granit. Repéré à
<https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/architecturale/architecturale-exploitation-substances-granite.jsp>. Consulté le 02/02/2022.

MIGAN, E. (2015). *Étude du polissage des granits: pratiques industrielles, fini de surface et émission de poussières* (Mémoire de maîtrise). École de technologie supérieure.

Mitutoyo Corporation. (2004). Manual User : Surface measurement Surftest SJ-201 / SJ-301; Portable Surface Testers. Repéré à https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/mitutoyo-sj-201p_manual.pdf

Natural Stone Institute. (2016). *Silicosis – An Industry Guide to Awareness and Prevention*. Natural Stone Institute. Repéré à
https://associationdatabase.com/aws/MIA/asset_manager/get_file/505003. Consulté le 20/02/2021.

Niknam, S. A., Davoodi, B., Davim, J. P., & Songmene, V. (2018). Mechanical deburring and edge-finishing processes for aluminum parts—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 1101-1125. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1288-8>

NIOSH. (2002). Health effects of occupational exposure to respirable crystalline silica. <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2002129>. Consulté le 04/02/2022.

OSHA, & NIOSH. (2015). *Hazard Alert : Worker Exposure to Silica during Countertop Manufacturing, Finishing and Installation* (Rapport No. 2015-106). Repéré à <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2015-106/pdfs/2015-106.pdf>. Consulté le 19/02/2021

Phillips, M. L., & Johnson, A. C. (2012). Prevalence of Dry Methods in Granite Countertop Fabrication in Oklahoma. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9(7), 437-442. <https://doi.org/10.1080/15459624.2012.684549>

Pozzi, R., De Berardis, B., Paoletti, L., & Guastadisegni, C. (2003). Inflammatory mediators induced by coarse (PM_{2.5-10}) and fine (PM_{2.5}) urban air particles in RAW 264.7 cells. *Toxicology*, 183(1-3), 243-254. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(02\)00545-0](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00545-0)

Ricaud, M., & Witschger, O. (2012). Les nanomatériaux. Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention, 52.

- Rushton, L. (2007). Chronic Obstructive Pulmonary Disease and Occupational Exposure to Silica. *Reviews on Environmental Health*, 22(4).
<https://doi.org/10.1515/REVEH.2007.22.4.255>
- Saïdi, M. N. (2018). *Polissage du granit : qualité, émission et dispersion des poussières et moyens de contrôle à la source* (Thèse de doctorat). École de technologie supérieure.
- Saïdi, M. N., Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2015). Experimental investigation on fine particle emission during granite polishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 2109-2121.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7303-z>
- Saïdi, M. N., Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2018). Rotational and translation-free polishing of granite: surface quality and dust particles emission and dispersion. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1-4), 289-303.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2247-8>
- Saïdi, M. N., Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2019). Study of surface quality and dust particles emission and dispersion during dry polishing of granite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9-12), 4675-4684.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04166-3>
- Simcox, N. J., Lofgren, D., Leons, J., & Camp, J. (1999). Silica Exposure During Granite Countertop Fabrication. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 14(9), 577-582. <https://doi.org/10.1080/104732299302350>
- Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2018). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on fine and ultrafine particle emission and distribution during polishing of granite. *Measurement*, 114, 398-408.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.012>
- Songmene, Victor, Miazza, A., Hechmi, M. A., Olufayo, O. A., & Kouam, J. (2018). Granite polishing: Effects of polishing parameters and tool paths on part quality and dust emission. *Procedia CIRP*, 77, 139-142. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.254>
- Steenland, K., & Ward, E. (2014). Silica: A lung carcinogen. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 64(1), 63-69. <https://doi.org/10.3322/caac.21214>
- Tahan, A. (2012). Les plans d'expériences. Notes de cours SYS814.
- Tahan, A. (2016). Modélisation spatiale - ANOVA. Notes de cours SYS814.
- Tejado, J. J., Guillén, J., & Baeza, A. (2016). Assessment of occupational exposure in a granite quarry and processing factory. *Journal of Radiological Protection*, 36(3), 641-652.
<https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/3/641>

TSI. (2006). Aerosol Instrument Manager Software or Aerodynamic Particle Sizer (APS) Spectrometers.

US EPA, O. (2016). Particulate Matter (PM) Basics. *US EPA*. [Overviews and Factsheets]. Repéré à <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>. Consulté le 02/01/2021.

Vacek, P. M., Verma, D. K., Graham, W. G., Callas, P. W., & Gibbs, G. W. (2011). Mortality in Vermont granite workers and its association with silica exposure. *Occupational and Environmental Medicine*, 68(5), 312-318. <https://doi.org/10.1136/oem.2009.054452>

Winter, J. D. (2001). *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall.

Xu, X. P., Huang, H., & Li, Y. (2003). Material Removal Mechanisms in Diamond Grinding of Granite, Part 1: The Morphological Changes of Granite from Sawing to Grinding. *Key Engineering Materials*, 250, 215-221. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.250.215>