

Étude de la finition humide sur machine-outil des arêtes des pièces en granites en utilisant différents outils de forme

par

Wael MATEUR

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 10 NOVEMBRE 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Wael Mateur, 2025



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 de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. Ali Bahloul, examinateur externe
Département de prévention des risques chimiques et biologiques à l'institut de recherche
Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, IRSST

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

LE 15 OCTOBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M. Victor SONGMENE, professeur au Département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure (ÉTS), pour sa disponibilité, ses conseils avisés, la confiance qu'il m'a accordée et pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce mémoire au sein du Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes (LIPPS).

Mes sincères remerciements s'adressent également à M. Jules KOUAM, chercheur à l'ÉTS, dont le leadership, l'accompagnement attentif et les encouragements constants ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.

J'exprime ma reconnaissance au Président du jury et aux membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce mémoire avec rigueur et bienveillance.

Je remercie chaleureusement Mitacs pour son soutien à travers le programme Mitacs Fellowship, ainsi que l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) pour son appui informationnel et matériel. Leur contribution conjointe a largement favorisé la réalisation et l'avancement de mes travaux de recherche.

Je souhaite également remercier les techniciens du laboratoire LIPPS de l'ÉTS, dont la disponibilité et le savoir-faire ont grandement facilité la conduite des expérimentations.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements les plus profonds à ma famille, pour son soutien indéfectible, sa patience et ses encouragements constants, qui ont constitué une source inépuisable de motivation tout au long de ce parcours. J'exprime également ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur aide, leur appui moral ou matériel.

ÉTUDE DE LA FINITION HUMIDE SUR MACHINE-OUTIL DES ARÊTES DES PIÈCES EN GRANITES EN UTILISANT DIFFÉRENTS OUTILS DE FORME

Wael MATEUR

RÉSUMÉ

L'industrie de la transformation des pierres naturelles et artificielles repose sur des procédés de polissage où la maîtrise de la qualité de surface et la limitation des émissions de particules constituent des enjeux techniques et sanitaires majeurs. Ce mémoire propose une étude expérimentale systématique sur machine-outil CNC visant à analyser l'influence croisée de la géométrie de l'outil, de la granulométrie abrasive et des paramètres de coupe sur la génération de particules fines (FP), ultrafines (UFP), les forces de coupe et la rugosité lors du polissage humide de granites noir et blanc.

L'expérimentation a mobilisé quatre géométries d'outils (Eased Concave, Eased Chamfered, Half Beveled, Ogee), quatre tailles de grain (G45 à G600) et trois niveaux de vitesses de broche et d'avance. Les opérations ont été conduites sous lubrification abondante par émulsion eau/huile minérale soluble (Novamet 875 produit par Oemeta) dosée à 5 % de lubrifiant (95 % d'eau), avec un débit de 30 L/min sous 3 bar. Les émissions de particules ont été mesurées en temps réel via APS et SMPS, couplées à l'analyse granulométrique, tandis que les forces et la rugosité ont été caractérisées via dynamométrie et profilométrie. L'analyse statistique a utilisé des ANOVA et des modèles quadratiques et linéaires simplifiés.

Les résultats montrent que la vitesse de broche est le facteur prédominant sur les FP/UFP, tandis que l'outil Half Beveled combiné au grain G600 et au granite noir constitue la configuration la plus performante pour concilier réduction d'émissions et qualité de surface. La corrélation entre charges mécaniques, rugosité et émissions confirme que la micro-fracturation localisée est le principal mécanisme de génération de particules. La méthodologie proposée fournit ainsi un cadre expérimental et analytique permettant d'optimiser simultanément performance, qualité et sécurité sanitaire pour le polissage humide des pierres.

Mots-clés : polissage humide, granite, finition des arêtes, particules fines (FP), particules ultrafines (UFP), rugosité de surface, forces de coupe

STUDY OF WET EDGE FINISHING ON THE EDGES OF GRANITE WORKPIECES USING DIFFERENT TOOL GEOMETRIES

Wael MATEUR

ABSTRACT

The natural and engineered stone processing industry relies heavily on polishing operations, where achieving high surface quality while minimizing dust emissions is a key technical and health challenge. This work presents a systematic CNC-based experimental study to investigate the combined effects of tool geometry, abrasive grit size, and cutting parameters on fine (FP) and ultrafine particle (UFP) generation, cutting forces, and surface roughness during wet edge polishing of black and white granite.

Four tool profiles (Eased Concave, Eased Chamfered, Half Beveled, Ogee), four abrasive grits (G45 to G600), and three levels of spindle speed and feed rate were tested using abundant wet lubrication using a water-soluble mineral-oil emulsion (Novamet 875 manufactured by Oemeta), in proportions 5% oil, 95% water, delivered at 30 L/min and 3 bar. Particle emissions were monitored in real-time using APS and SMPS, coupled with size distribution analysis, while cutting forces and roughness were characterized via dynamometry and profilometry. Statistical modeling included ANOVA, quadratic regressions, and simplified linear models.

Results highlight spindle speed as the dominant factor influencing FP/UFP emissions, while the Half Beveled tool combined with G600 grit and black granite emerges as the optimal configuration balancing emission control and surface finish quality. The correlation between mechanical loads, roughness, and particle generation confirms localized micro-fracturing as the main emission mechanism. The proposed methodology establishes an integrated experimental and analytical framework to simultaneously optimize performance, quality, and occupational health in wet stone polishing processes.

.

Keywords: wet polishing, granite, edge finishing, fine particles, ultrafine particles , surface roughness, cutting forces

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Matériaux	5
1.2.1 Granite.....	5
1.2.2 Marbre.....	7
1.2.3 Pierre artificielle.....	8
1.3 Processus de polissage à la machine-outil	9
1.4 Polissage des bords des matériaux en pierre.....	9
1.5 Effluents de polissage	11
1.5.1 Poussière de silice.....	11
1.5.2 Aérosols	12
1.6 Qualité des pièces lors de l'usinage par humide	14
1.7 Effet du processus humide sur les émissions et la dispersion de PF, PUF et aérosols	15
1.7.1 Lubrification par quantité minimale (MQL).....	15
1.7.2 Lubrification complète.....	17
1.8 Stratégies de contrôles	21
1.9 Exposition au risque sanitaire	26
1.9.1 Dépôt de particules d'aérosol dans les voies respiratoires humaines	26
1.9.2 Risque pour la santé au travail	28
1.10 Réglementation en matière de santé et de sécurité au travail	31
1.11 Conclusion	32
CHAPITRE 2 ÉTUDE EXPÉIMENTALE	33
2.1 Introduction.....	33
2.2 Plan d'expérience et paramètres expérimentaux.....	33
2.3 Cadre expérimental et équipements utilisés.....	36
2.3.1 Échantillons de granite utilisés	36
2.3.2 Machine-outil utilisée pour le polissage	37
2.3.3 Outils de polissage utilisés.....	38
2.3.4 Équipements de captation et de quantification des particules émises.....	42
2.3.5 Équipements de mesure de la rugosité de surface	46
2.3.6 Table dynamométrique pour l'acquisition des forces de coupe.....	47
2.4 Méthodologie expérimentale	48
2.5 Limites de la recherche et difficultés rencontrées.....	51
2.6 Conclusion	52
CHAPITRE 3 ÉMISSIONS DE PARTICULES	55
3.1 Introduction.....	55
3.2 Analyse statistique des émissions	55

3.2.1	Modèles quadratiques	56
3.2.2	Modélisation et équations de régression (modèles linéaires simplifiés) ...	59
3.3	Analyse des surfaces de réponse 3D des émissions.....	64
3.3.1	Émissions de particules fines (Cn_FP)	64
3.3.2	Émissions de particules ultrafines (Cn_UFP)	66
3.4	Influence de la géométrie de l'outil sur les émissions	67
3.4.1	Influence de la géométrie de l'outil sur les particules fines (FP)	67
3.4.2	Influence de la géométrie de l'outil sur les particules ultrafines (UFP) ...	69
3.5	Influence du type de granite sur les émissions.....	70
3.6	Conclusion	71
CHAPITRE 4 ANALYSE DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE ET DES FORCES DE COUPE		74
4.1	Introduction.....	74
4.2	Forces de coupe.....	74
4.2.1	Statistiques par configuration	74
4.2.2	Résultats de l'analyse de variance (ANOVA)	77
4.2.3	Analyse des efforts de coupe Fz selon les facteurs d'usinage	82
4.2.3.1	Influence du matériau	82
4.2.3.2	Influence de la forme de l'outil	84
4.2.3.3	Influence des paramètres de coupe	87
4.3	Rugosité de surface	90
4.3.1	Influence du matériau et de la taille de grain abrasif	90
4.3.2	Influence de la forme de l'outil.....	92
4.3.3	Influence des paramètres de coupe (N et Vf).....	94
4.4	Conclusion	100
CHAPITRE 5 DISCUSSION DES RÉSULTATS		103
5.1	Introduction.....	103
5.2	Discussion sur les émissions de particules.....	103
5.3	Discussion sur la rugosité de surface	111
5.4	Discussion sur les forces de coupe.....	115
5.5	Corrélation émissions, rugosité et forces	118
5.6	Conclusion	119
CONCLUSION		121
RECOMMANDATIONS		123
ANNEXE I	CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES	126
ANNEXE II	TABLEAUX RÉCAPITULATIFS DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	127
ANNEXE III	RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DES ÉMISSIONS ...	133

ANNEXE IV	RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DE RUGOSITÉ	145
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	149	

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Formes des particules solides des aérosols 13
Tableau 2.1	Paramètres d'entrée et niveaux étudiés 34
Tableau 2.2	Réponses de sortie étudiées 34
Tableau 2.3	Caractéristiques minéralogiques des matériaux testés 37
Tableau 2.4	Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Eased concave edge 39
Tableau 2.5	Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Eased chamfred edge 40
Tableau 2.6	Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Ogee edge ... 41
Tableau 2.7	Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Half beveled 42
Tableau 3.1	Équations de régression et qualité d'ajustement des modèles quadratiques et les interactions selon l'outil, le grain et le type de granite 57
Tableau 3.2	Résultats ANOVA des modèles quadratiques et les interactions et contributions dominantes selon l'outil, le grain et le granite 58
Tableau 3.3	Équations de régression et qualité d'ajustement des modèles linéaires simplifiés selon l'outil, le grain et le type de granite 59
Tableau 3.4	Résultats ANOVA des modèles linéaires simplifiés et contributions dominantes selon l'outil, le grain et le granite 60
Tableau 3.5	Résultats ANOVA pour Cs_FP_1 selon l'outil (G150 – granite blanc) 68
Tableau 3.6	Résultats ANOVA pour Cs_UFP selon l'outil (G600 – granite blanc). 69
Tableau 3.7	Résultats des tests de normalité pour la concentration massique des particules fines (Cm_FP) et ultrafines (Cm_UFP) selon le type de granite 70
Tableau 4.1	Statistiques descriptives des composantes d'effort par outil (moyenne, max, σ); (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)..... 75

Tableau 4.2	Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort tangent Fx en fonction des facteurs principaux et de leurs interactions	79
Tableau 4.3	Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort transversal Fy en fonction des facteurs principaux et de leurs interactions	80
Tableau 4.4	Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort vertical Fz en fonction des facteurs principaux et de leurs interactions	81
Tableau 4.5	Résultats de l'ANOVA pour Fz (outil Ogee, grain G150, granite noir).....	87
Tableau 4.6	Résultats de l'ANOVA pour Fz (outil Half Beveled, grain G150, granite noir).....	88
Tableau 4.7	Résultats de l'ANOVA pour Fxy (outil Ogee, grain G600, granite noir).....	89
Tableau 4.8	Résultats de l'ANOVA pour Fxy (outil Half Beveled, grain G600, granite noir).....	89
Tableau 4.9	Équations de régression et ajustement des modèles ($R_a = f(N, V_f)$, G600)	95
Tableau 4.10	Résumé ANOVA : Influence de N et Vf sur Ra (G600)	96
Tableau 5.1	Comparaison des émissions de particules fines (FP) et ultrafines (UFP) selon les configurations d'outils, de granites et de taille de grains.....	104

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Compositions des échantillons de granite (a) granite blanc (b) granite noir	7
Figure 1.2	Les profils de bord de comptoir en granite les plus populaires	11
Figure 1.3	Mécanismes de dépôt des particules d'aérosol (a) différents mécanismes de dépôt (b) mécanismes de dépôt en fonction du diamètre des particules et de la vitesse d'écoulement de l'aérosol	13
Figure 1.4	Surface de profil d'un granite blanc poli, humide et à sec	14
Figure 1.5	Tracés de surface de réponse 3D de Ra lors de l'utilisation : (a) d'un outil en forme de chanfrein, (b) d'un outil en forme concave	15
Figure 1.6	Effet du débit de lubrification sur l'émission de particules (a) concentration sur le nombre de FP (b) concentration sur le nombre d'UFP	16
Figure 1.7	Effet de la MQL sur l'émission de PF (a) granite blanc (b) granite noir (Granulométrie : G150 ; N = 1500 tr/min ; Vf = 1500 mm/min) ...	17
Figure 1.8	Effet des méthodes de contrôle sur les émissions de poussières (a) concentration moyenne de silice cristalline respirable (b) concentration moyenne de (RSP).....	18
Figure 1.9	Système de mouillage à écoulement en nappe.....	19
Figure 1.10	Distribution granulométrique de la concentration numérique des particules fines (C_n_FP) pour différents modes de lubrification (outil chanfreiné, grain 150, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)	20
Figure 1.11	Concentration numérique totale des particules lors du finition de bords du granite blanc en conditions sèches et lubrifiées (N = 3500 rpm, Vf = 1000 mm/min, grain 600): (a) particules fines FP, (b) particules ultra fines UFP.....	20
Figure 1.12	Cabine ventilée avec flux d'air dans les directions (a) oblique, (b) verticale et (c) horizontale	22
Figure 1.13	Concepts de réduction à la source (a) système d'aspiration par soufflage (b) carter d'aspiration (c) aspiration par disque.....	23

Figure 1.14	Système push-pull (a) ouverture de l'obturateur du système normal ; (b) ouverture du système à flux parallèle.....	25
Figure 1.15	Comparaison de la variation de la concentration de SF6 sur la ligne d'axe (Y = 0 m ; Z = 0,63 m)	26
Figure 1.16	Dépôt théorique total et régional chez l'homme, en fonction du diamètre des particules inhalées (modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique, CIPR)	27
Figure 1.17	Distribution du facteur de dépôt 3D de l'PUF (DEF) dans le modèle numérique des voies aériennes avec Qin = 30 l/min (a) diamètre des particules 10 nm (b) diamètre des particules 100 nm	27
Figure 1.18	Concentrations de masse respirable par matériau	28
Figure 1.19	Cas signalés de silicose due à la pierre artificielle parmi les candidats à une transplantation pulmonaire en Israël	29
Figure 1.20	Premier ouvrier Ct haute résolution montrant des micronodules diffus bilatéraux avec un lobe supérieur et une prédominance postérieure	30
Figure 2.1	Modèle statistique	35
Figure 2.2	Échantillons de granite utilisés dans cette étude (a) granite noir, (b) granite blanc	36
Figure 2.3	Machine de polissage CNC Huron K2X10.....	38
Figure 2.4	Aerodynamic Particle Sizer (APS)	43
Figure 2.5	Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)	44
Figure 2.6	Dispositif de séchage à gel de silice (a) tube vide, (b) gel partiellement saturé (changement de couleur visible), (c) gel neuf et sec (bleu uniforme)	45
Figure 2.7	Effet de l'utilisation du gel de silice sur la concentration d'aérosols ultrafins lors de l'utilisation d'eau en mode MQL : granite noir ; vitesse 1000 tr/min ; grain abrasif 60.....	46
Figure 2.8	Appareils de mesure de la rugosité (a) surftest SJ-410, (b) surftest SJ- 201, (c) dispositif de positionnement du rugosimètre sur la machine de polissage.....	47

Figure 2.9	Système de mesure des efforts de coupe : (a) unité d’acquisition et interface logicielle, (b) table dynamométrique Kistler 9255B installée sur la machine CNC	48
Figure 2.10	Dispositif expérimental, (a) photographies des équipements réels, (b) schéma du montage expérimental.....	49
Figure 2.11	Détails sur la fixation du gabarit de positionnement du rugosimètre	50
Figure 2.12	Courbe de variation de la concentration en nombre total de particules micrométriques du granite noir en fonction du numéro d’essai lors du polissage avec l’outil Eased concave et le grain 600	52
Figure 3.1	Valeurs minimale et maximale des concentrations numériques en particules ultrafines (C_n_{UFP}) et fines (C_n_{FP}) lors du polissage humide du granite, selon la géométrie d’outil et la granulométrie (a) UFP, granite noir ; (b) UFP, granite blanc ; (c) FP, granite noir ; (d) FP, granite blanc	56
Figure 3.2	Répartition des contributions (%) entre N et Vf pour chaque configuration avec G150.....	61
Figure 3.3	Répartition des contributions (%) entre N et Vf pour chaque configuration avec G600.....	62
Figure 3.4	Carte de chaleur des valeurs p associées aux facteurs N, Vf, N^2 , Vf^2 et $N \cdot Vf$ dans les modèles quadratiques et linéaires, pour les concentrations en particules fines (C_n_{FP}) et ultrafines (C_n_{UFP}).....	63
Figure 3.5	Graphiques de surface 3D des émissions de particules fines (C_n_{FP}) lors de la finition humide des bords sur granite noir (grain 150) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee.....	65
Figure 3.6	Graphiques de surface 3D des émissions de particules fines (C_n_{FP}) lors de la finition humide des bords sur granite blanc (grain 150) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee.....	65
Figure 3.7	Graphiques de surface 3D des émissions de particules ultra fines (C_n_{UFP}) lors de la finition humide des bords sur granite noir (grain 600) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee.....	66
Figure 3.8	Graphiques de surface 3D des émissions de particules ultra fines (C_n_{UFP}) lors de la finition humide des bords sur granite blanc (grain 600) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee ...	67

Figure 3.9	Concentration surfacique spécifique des particules fines (Cs_FP) en fonction de la géométrie d'outil (Granite blanc, grain G150, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min).....	68
Figure 3.10	Concentration surfacique spécifique des particules ultrafines (Cs_UFP) en fonction de la géométrie d'outil (Granite blanc, grain G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min).....	69
Figure 3.11	Comparaison des concentrations massiques en particules fines (FP) et ultrafines (UFP) selon le type de granite, (a) concentration massique des particules ultrafines Cm_UFP (outil Half Beveled, grain 600), (b) concentration massique des particules fines Cm_FP (outil Half Beveled, grain 150).....	71
Figure 4.1	Diagramme radar des écarts-types des forces (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min).....	75
Figure 4.2	Histogramme des forces moyennes (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min).....	76
Figure 4.3	Histogramme des forces maximales (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min).....	77
Figure 4.4	Carte de chaleur des p-valeurs des effets principaux et interactions pour Fx, Fy et Fz.....	78
Figure 4.5	Variation de la force normale Fz en fonction de la taille de grain pour le granite noir et le granite blanc (outil = Ogee, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min).....	83
Figure 4.6	Évolution de la force tangente combinée Fxy selon la taille de grain pour le granite noir et le granite blanc (outil = Ogee, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)	84
Figure 4.7	Profils dynamiques de l'effort vertical Fz selon la forme de l'outil (granite noir, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min, grain G600).....	85
Figure 4.8	Profils dynamiques de l'effort tangentiel combiné Fxy selon la forme de l'outil (granite noir, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min, grain G600)	86
Figure 4.9	Surface de réponse Fz (N) en fonction de N et Vf (granite noir, grain G150), (a) outil de forme Ogee, (b) outil de forme Half beveled	88
Figure 4.10	Surface de réponse Fxy(N) en fonction de N et Vf (granite noir, grain G600), (a) outil de forme Ogee, (b) outil de forme Half beveled	90

Figure 4.11	Influence du matériau et de la taille de grain abrasif sur la rugosité: (a) outil Ogee, (b) outil Half Beveled ($N = 2500$ rpm ; $V_f = 1000$ mm/min).....	91
Figure 4.12	Distribution de Ra selon la géométrie pour le granite noir	92
Figure 4.13	Profils de rugosité longitudinaux pour chaque outil (granite noir, G600, $N = 3500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min), (a) outil de forme Ogee, (b), outil de forme Eased concave, (c), outil de forme Half Beveled (d), outil de forme Eased chamfer.....	93
Figure 4.14	Surfaces de réponse 3D et cartes de contours de $R_a = f(N, V_f)$ pour granite noir (a) Ogee, (b) Half Beveled	96
Figure 4.15	Surfaces de réponse 3D et cartes de contours de $R_a = f(N, V_f)$ pour granite blanc (a) Ogee, (b) Half Beveled	97
Figure 4.16	Projection 2D R_a - V_f pour granite noir et blanc, (a) Half Beveled ; granite noir, (b) Half Beveled ; granite blanc, (c) Ogee ; granite noir, (d) Ogee ; granite blanc.....	98
Figure 4.17	Projection 2D R_a - N pour granite noir et blanc, (a) Half Beveled ; granite noir, (b) Half Beveled ; granite blanc, (c) Ogee ; granite noir, (d) Ogee ; granite blanc.....	99
Figure 5.1	Distribution granulométrique des FP en nombre avec changement de paramètres de coupe (Forme Half Beveled, Grain 150, Granite blanc)	105
Figure 5.2	Distribution granulométrique des UFP en nombre avec changement de paramètres de coupe (Forme Ogee, Grain 600, Granite blanc).....	106
Figure 5.3	Classification de la taille des particules (PM) et du tractus respiratoire	107
Figure 5.4	Distribution granulométrique des UFP en nombre avec changement de paramètres de coupe (Forme Ogee, Grain 600, Granite blanc) (a) Vitesse d'avance fixe $V_f = 500$ mm/min; (a) Vitesse d'avance fixe $V_f = 1000$ mm/min	108
Figure 5.5	Distribution de la concentration numérique C_n _FP en fonction du diamètre aérodynamique D_p lors du polissage humide du granite blanc (grain 150) avec les outils Half Beveled et Ogee ($N = 1500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min).....	109
Figure 5.6	Distribution de la concentration numérique des particules C_n _FP en fonction du diamètre aérodynamique D_p pour différents débits MQL Q_w lors de la finition des arêtes du granite blanc (grain G150) : (a)	

outil chanfreiné, (b) outil concave ($N = 1500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min).....	109
Figure 5.7 Distribution granulométrique des UFP en masse avec changement de paramètres de coupe (Forme Ogee, Grain 600, Granite blanc)	110
Figure 5.8 Résultats de finition de bord sur granite noir : (a) Eased concave, (b) Eased chamfered, (c) Half Beveled, (d) Ogee	112
Figure 5.9 Distribution des valeurs de R_5 et R_{5m} pour les outils Half Beveled et Ogee sur granite noir et blanc (a) R_5 , (b) R_{5m}	113
Figure 5.10 Distribution des valeurs de R_5 et R_{5m} pour les quatre géométries d'outils sur granite noir (a) R_5 , (b) R_{5m}	114
Figure 5.11 Comparaison R_5/R_{5m} selon la taille de grain (Half Beveled, Granite noir, $N = 2500$ rpm, $V_f = 1000$ mm/min)	115
Figure 5.12 Illustration des caractéristiques et des formes produites avec chaque outil : (a) Eased chamfer, (b) Eased concave.....	116
Figure 5.13 Comparaison de l'usure des outils : (a) forme Eased concave présente une usure de l'outil réduite, (b) forme Ogee présente une usure de l'outil augmentée	117
Figure 5.14 Schéma de synthèse des corrélations entre émissions de particules (FP/UFP), forces de coupe (F_z/F_x) et rugosité de surface ($R_5/R_{5m}/Ra$).....	118

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ANOVA	Analysis of Variance (Analyse de la variance)
APS	Aerodynamic Particle Sizer
CIPR	Commission Internationale de Protection Radiobiologique
CNC	Computer Numerical Control (Commande numérique)
Cn_FP	Concentration numérique de particules fines
Cn_UFP	Concentration numérique de particules ultrafines
Cm_FP	Concentration massique de particules fines
Cm_UFP	Concentration massique de particules ultrafines
Cs_FP	Concentration surfacique de particules fines
Cs_UFP	Concentration surfacique de particules ultrafines
FP	Fine Particles (Particules fines)
HB	Half Beveled (Outil à profil demi-biseau)
INSPQ	Institut National De Santé Publique Du Québec
IRSST	Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et Sécurité du Travail
LEV	Local Exhaust Ventilation (Ventilation locale par aspiration)
MQL	Minimum Quantity Lubrication (Lubrification en quantité minimale)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OG	Ogee (Outil à profil ogive)
OMS	Organisation mondiale de la Santé
OSHA	Occupational Safety and Health Administration

PM	Particulate Matter (Matière particulaire)
RCS	Respirable Crystalline Silica (Silice cristalline alvéolaire)
RD	Respirable Dust (Poussières respirables)
RSP	Respirable Suspended Particulate
RSST	Règlement sur la Santé et la Sécurité du Travail
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
UFP	Ultrafine Particles (Particules ultrafines)
VEMP	Valeur d'Exposition Moyenne Pondérée

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Cn	Concentration numérique [#/cm ³]
Cm	Concentration massique [mg/m ³] ou [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Cs	Concentration surfacique [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$] ou [nm^2/cm^3]
D _a	Diamètre aérodynamique [μm]
D _p	Diamètre géométrique [μm]
Fz	Force de coupe verticale [N]
Fx, Fy	Forces de coupe latérales [N]
N	Vitesse de broche [rpm]
Vf	Vitesse d'avance [mm/min]
Qin	Débit d'air entrant [L/min]
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [μm]
Rt	Hauteur totale du profil [μm]
R5	Distribution des micro-pics [μm]
R5m	Distribution des micro-creux [μm]
ρ	Densité du matériau [g/cm ³]
ρ_0	Densité de référence [g/cm ³]

INTRODUCTION

L'industrie de la transformation des pierres naturelles et artificielles repose sur des procédés de finition où le polissage joue un rôle déterminant dans la valeur esthétique et la performance fonctionnelle des pièces produites. Parmi les différentes techniques disponibles, le polissage humide est largement privilégié car il améliore la durabilité des surfaces tout en limitant la génération et la dispersion des poussières dans l'environnement de travail (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, 2022 ; Sanmartín, Silva, & Prieto, 2011). Ce procédé est particulièrement important dans la fabrication de plans de travail, revêtements et éléments décoratifs où la qualité de surface conditionne non seulement l'apparence mais également la résistance mécanique et chimique de la pièce finie (Sousa & Gonçalves, 2013 ; López, Pozo-Antonio, Ramil, & Rivas, 2018).

Cependant, même en présence de lubrification abondante, le polissage humide génère des émissions de particules fines (FP) et ultrafines (UFP) contenant de la silice cristalline respirable, identifiée comme agent cancérogène par l'OMS et responsable de maladies graves telles que la silicose et les affections pulmonaires obstructives (Saidi, Songmene, Kouam, & Bahloul, 2015 ; Hall et al., 2022 ; Carrieri, Guzzardo, Farcas, & Cena, 2020). Des études récentes ont montré que les UFP (< 100 nm), en raison de leur capacité à franchir la barrière alvéolaire et à atteindre le système cardiovasculaire, représentent un risque sanitaire encore plus élevé que les poussières classiques (Ordonez, Saavedra, Taboada, & Alejano, 2007 ; Thompson & Qi, 2023). Dans ce contexte, la maîtrise simultanée de la qualité de surface et de la réduction des émissions de particules constitue un enjeu technique et sanitaire majeur pour l'industrie des pierres naturelles et artificielles (Bahri, Songmene, Kouam, Samuel, & Samuel, 2021 ; Bahri, Songmene, & Kouam, 2022 ; Salamon et al., 2021).

Ce travail de recherche vise à analyser de manière systématique l'influence croisée de trois familles de facteurs sur les performances du polissage humide :

- la géométrie de l'outil : quatre profils industriels courants (Eased Concave, Eased Chamfered, Half Beveled et Ogee) utilisés pour les bords de plans et d'éléments décoratifs (USA Granite Tools, 2024 ; Mogastone, 2023);
- la taille de grain abrasif : quatre niveaux (G45 à G600) couvrant les étapes d'ébauche et de finition, en lien avec la microstructure et la topographie finale (Sanmartín et al., 2011 ; López et al., 2018 ; Huang, Li, Shen, Zhu, & Xu, 2002);
- les paramètres de coupe : vitesses de broche et avances variables afin de moduler la cinématique de contact et les mécanismes d'enlèvement de matière (Xu, Huang, & Li, 2003 ; Tanovic, Bojanic, Puzovic, & Milutinovic, 2011).

La méthodologie adoptée combine :

- (i) une approche expérimentale sur machine-outil CNC (Huron K2X10) en conditions contrôlées;
- (ii) la captation en temps réel des particules émises via APS et SMPS pour caractériser la distribution granulométrique (FP/UFP);
- (iii) une analyse statistique basée sur l'ANOVA multifactorielle, des modèles de régression quadratiques et linéaires simplifiés pour identifier les interactions dominantes.

Les matériaux étudiés couvrent un spectre représentatif des pierres utilisées industriellement : granite noir et blanc, marbre et pierre artificielle, offrant une variabilité en termes de composition minéralogique et de comportement à l'usinage travail (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, 2022 ; Sousa & Gonçalves, 2013 ; Mezadre & Bianco, 2014).

Les objectifs spécifiques sont :

1. Quantifier l'effet de chaque facteur (outil, grain, paramètres de coupe) sur les émissions FP/UFP, les forces de coupe (F_z , F_x) et la rugosité de surface (R_a , $R_{5\mu m}$);
2. Établir des corrélations entre état de surface, charges mécaniques et particules générées pour comprendre les mécanismes de micro-fracturation;

3. Identifier des configurations optimales conciliant qualité de finition, performance mécanique et sécurité sanitaire des opérateurs.

La structure de ce mémoire reflète cette démarche :

- chapitre 1 : revue de la littérature sur les matériaux, les procédés de polissage et les impacts sanitaires liés aux émissions de silice;
- chapitre 2 : description détaillée du plan expérimental, des équipements et de la méthodologie d'acquisition des données;
- chapitre 3 : analyse des émissions FP/UFP et modélisation statistique (ANOVA et surfaces de réponse);
- chapitre 4 : étude de la rugosité et des forces de coupe, intégrant les indicateurs fonctionnels R5/R5m et leurs relations avec la qualité de surface;
- chapitre 5 : discussion intégrée des résultats, mise en évidence des corrélations entre émissions, rugosité et forces, et recommandations pour l'industrie.

En plaçant l'accent sur l'interaction entre paramètres d'usinage, géométrie d'outil et nature du matériau, ce travail contribue à l'optimisation du polissage humide en conciliant exigences de performance et réduction de l'exposition à la silice cristalline, rejoignant ainsi les objectifs de production durable et de santé au travail.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITÉRATURE

1.1 Introduction

L'industrie du polissage contribue de manière significative à l'économie, mais présente des risques environnementaux et professionnels. Le processus génère des effluents, tels que des poussières de silice et des aérosols, qui peuvent présenter des risques pour la santé des travailleurs. Des techniques de traitement par voie humide, telles que la lubrification par quantité minimale (MQL) et la lubrification complète, ont été mises au point pour réduire les émissions de particules fines et ultrafines (PF, PUF), ainsi que les aérosols, dans l'air. Cette revue de littérature porte sur les matériaux en pierre naturelle et artificielle, le processus de polissage machine-outil, les effluents de polissage, la qualité des pièces, l'effet du traitement par voie humide sur les émissions, les stratégies de contrôle, les risques d'exposition pour la santé et les réglementations en matière de santé et de sécurité au travail dans l'industrie. Cette étude se concentre plus particulièrement sur le granit, et ses risques respectifs, notamment la silice cristalline respirable, connue pour provoquer la silicose, le cancer du poumon et d'autres problèmes de santé. L'objectif de cette étude est de fournir une analyse complète de l'état de l'art dans l'industrie et d'identifier les domaines de recherche pour l'avenir.

1.2 Matériaux

1.2.1 Granite

Le granite est très résistant et prend un beau poli, ce qui en fait un matériau très apprécié dans le secteur de la construction et de la fabrication de comptoirs de cuisine et de salles de bains, grâce à ses caractéristiques telles que ses bonnes qualités esthétiques, son excellente stabilité dimensionnelle, et sa résistance aux environnements agressifs, aux chocs et à l'usure sans altération de la couleur ou de la forme.

Le granite est essentiellement constitué 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) aussi appelé silice, est présent soit sous forme de grands cristaux incolores, colorés ou fumés, soit sous forme de cristaux microscopiques d'aspect translucide (Bahloul et al., 2019). Le feldspath, le plus grand groupe de minéraux de la croûte terrestre, constitue la plus grande partie de la roche. Il est fortement cristallisé et à la propriété de former des macles et de rayer le verre. Il est souvent opaque, blanc, gris ou rose pâle. Le mica, quant à lui, présente une structure stratifiée de paillettes noires régulières et brillantes (MIGAN, 2015). L'observation de la structure cristalline d'un échantillon de granite à l'œil nu, à la loupe ou au microscope révèle sa composition en différents matériaux (quartz, feldspath et mica) avec leurs dispositions, leurs tailles et leurs textures.

Les échantillons de granite noir et blanc utilisés dans l'étude de Songmene, Kouam, & Bahloul (2018) et la confirmation de leur composition par l'analyse MEB et les examens pétrographiques sur des échantillons de lames minces ont révélé que le granite blanc (Figure 1.1 a) s'est avéré être un granite de taille moyenne à grande avec une texture automorphe granulaire et porphyrique. Ce granite contient 41% de quartz, 33% de plagioclase et 23% de K-feldspath. Le granite noir (Figure 1.1 b) est une anorthosite à gros grains, composée principalement de plagioclase (environ 83 %). Il ne contient pas de quartz. L'analyse minéralogique a également montré que la taille des grains du granite noir (0,2-17 mm) est supérieure à celle du granite blanc (0,5-7 mm). Bien que le granite noir ne contienne ni quartz (SiO_2) ni feldspath, il contient du silicium comme le plagioclase ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

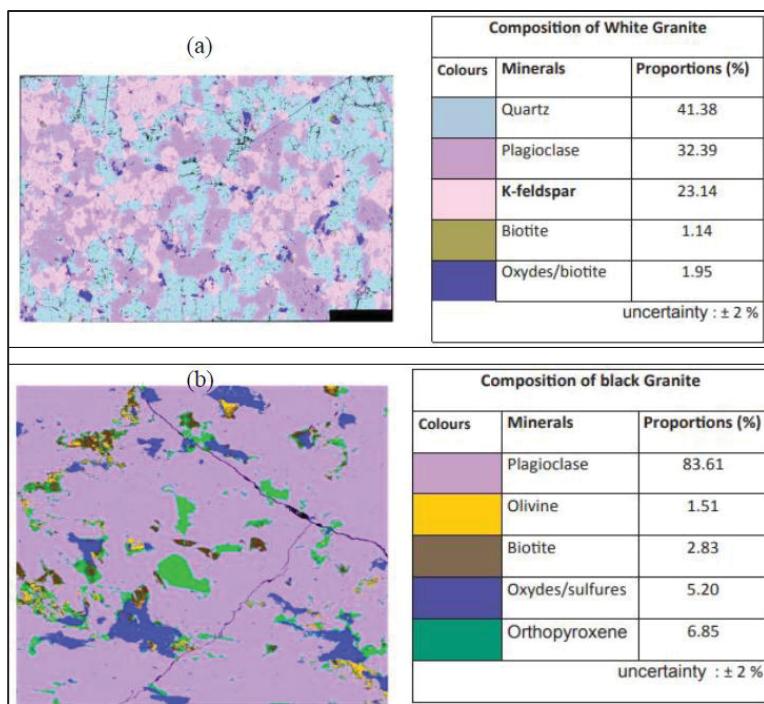


Figure 1.1 Compositions des échantillons de granite (a)
granite blanc (b) granite noir
Tiré de Songmene et al. (2018)

1.2.2 Marbre

Le marbre est une roche métamorphique composée principalement de carbonate de calcium (CaCO_3), le reste de la composition étant constitué de diverses impuretés. Les impuretés du marbre peuvent inclure des minéraux tels que le quartz, le feldspath, le mica et d'autres minéraux accessoires, et il est utilisé depuis des siècles dans l'architecture et la sculpture. Il est apprécié pour sa beauté, sa durabilité et sa polyvalence dans toute une série d'applications, notamment les revêtements de sol, les comptoirs et les façades de bâtiments. Ces dernières années, l'utilisation du marbre dans la construction a connu un regain d'intérêt, de nombreux architectes et designers utilisant les caractéristiques uniques de ce matériau dans leurs créations.

La composition chimique exacte du marbre peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la source géologique, la quantité et le type d'impuretés présentes et le degré de

métamorphisme subi par la roche. Les auteurs notent que le marbre est généralement classé en fonction de la quantité d'impuretés présentes, le marbre pur contenant moins de 5 % d'impuretés et le marbre impur contenant entre 5 et 20 % d'impuretés.

La présence d'impuretés dans le marbre peut avoir un impact sur ses propriétés physiques et chimiques. Par exemple, les impuretés peuvent affecter la couleur et la texture du marbre, ainsi que sa résistance, sa dureté et sa durabilité. Les auteurs notent que certaines impuretés, comme l'oxyde de fer, peuvent provoquer une décoloration du marbre, tandis que d'autres, comme la serpentine, peuvent rendre la roche plus sensible aux intempéries et à l'érosion. (Kogel, Trivedi, Barker, & Krukowski, 2006).

1.2.3 Pierre artificielle

Pierre artificielle, également connue sous le nom de pierre reconstituée ou composite est un type de matériau de construction composé de pierres concassées ou d'autres minéraux liés par une résine ou un liant à base de ciment. Elle est couramment utilisée dans des applications telles que les plans de travail, les revêtements de sol et les façades. La composition chimique de la pierre artificielle peut varier en fonction du type de pierre et du liant utilisés pour sa production.

Carrieri et al. (2020) a mené une étude pour caractériser l'exposition à la silice lors de la fabrication de comptoirs en pierre artificielle. L'étude a révélé que les principaux composants de la pierre artificielle étaient le quartz, la résine et d'autres additifs tels que des pigments et des charges. Le quartz est une forme cristalline de silice, qui constitue une préoccupation majeure pour les travailleurs de l'industrie en raison du risque de silicose.

Kramer et al. (2012) a indiqué que la pierre artificielle est généralement constituée de 93 à 95 % de matériaux contenant de la silice, tels que le quartz, le pourcentage restant étant composé de résines, de pigments et d'autres additifs. L'étude souligne la nécessité de prendre des mesures préventives pour réduire l'exposition à la silice lors de la fabrication et de l'installation de la pierre artificielle.

Ronmans et al. (2019) a également identifié le quartz comme le principal composant de la pierre artificielle, avec des résines et d'autres additifs. L'étude a souligné la nécessité de mesures préventives pour réduire le risque de maladie professionnelle chez les travailleurs impliqués dans la fabrication et l'installation de la pierre artificielle.

1.3 Processus de polissage à la machine-outil

Le processus de polissage des granits, des marbres et des pierres artificielles sur une machine-outil consiste à utiliser une série de tampons ou de disques abrasifs pour poncer, lisser et faire briller la surface de la pierre. Le processus comprend généralement les étapes suivantes :

1. Ponçage : La première étape consiste à utiliser un disque diamanté grossier pour poncer la surface de la pierre, en éliminant toutes les zones rugueuses ou irrégulières;
2. L'affûtage : Après le meulage initial, une série de disques diamantés plus fins sont utilisés pour affiner la surface de la pierre, en la lissant progressivement et en créant une texture plus uniforme;
3. Polissage : une fois la surface adoucie, une série de disques diamantés encore plus fins sont utilisés pour polir la surface de la pierre jusqu'à ce qu'elle soit très brillante. Le processus de polissage peut être répété plusieurs fois avec des disques diamantés de plus en plus fins afin d'obtenir le niveau de brillance souhaité;
4. Scellement : Enfin, la surface de la pierre peut être scellée à l'aide d'un agent de scellement spécial pour la protéger des taches et des dommages.

Globalement, le processus de polissage de la pierre sur une machine-outil consiste à utiliser une combinaison de techniques de meulage, de rodage et de polissage pour obtenir une surface lisse, uniforme et brillante sur la pierre.

1.4 Polissage des bords des matériaux en pierre

Le polissage des bords de matériaux en pierre, également connu sous le nom de finition des bords, est une opération essentielle réalisée sur des pièces en matériau pierre déjà polies en

surface. Pour obtenir la même rugosité et la même brillance que sur les surfaces des parties déjà polies, et pour éliminer les traces des outils de polissage sur les bords, des opérations de polissage des bords sont nécessaires avant de livrer le produit final au client. Cette opération est similaire à l'ebavurage des matériaux métalliques, qui est également considéré comme nécessaire après l'apparition d'ébarbures sur les bords dues à l'usinage d'un matériau métallique, généralement suffisamment ductile pour favoriser la formation de ces ébarbures.

Le polissage des bords de matériaux en pierre peut être réalisé manuellement avec les mêmes polisseuses et outils abrasifs utilisés pour le polissage de surface mais avec des techniques différentes, ou sur des machines à commande numérique (CNC) à l'aide d'outils conçus pour donner aux bords des pièces les formes désirées dès le premier passage de l'outil de dégrossissage à travers le bord tranchant. Le choix de cet outil est fait en fonction de la demande des clients qui nécessitent une forme et des dimensions du bord (angle de biseau, rayon d'arrondi, etc.) trouvées dans le catalogue du fournisseur des outils.

Il existe une grande variété d'outils de façonnage pour les pierres naturelles et artificielles, compatibles avec des machines manuelles, automatiques ou CNC (USA Granite Tools, 2024 ; GranQuartz, 2024) ; Alpha Professional Tools, 2024, etc.). Ces outils incluent des fraises à liant métallique, des outils de profilage avec guides à rouleaux, des meules électroplaquées sur mesure, ainsi que des fraises diamantées. Le choix de la forme d'outil dépend principalement du profil de bord recherché par le client. Selon USA Granite Tools (2024), les profils les plus couramment utilisés sont le profil droit (bord vertical avec angles vifs), le profil arrondi, le profil full bullnose (rayon complet arrondi qui adoucit le bord), le demi-bullnose, les profils ogee (bords courbes décoratifs), le profil waterfall, les profils beveled ou chanfreinés, ainsi que le profil eased edge (bords supérieurs et inférieurs adoucis). La Figure 1.2 illustre certains de ces profils fréquemment employés dans la fabrication de plans de travail en granit.

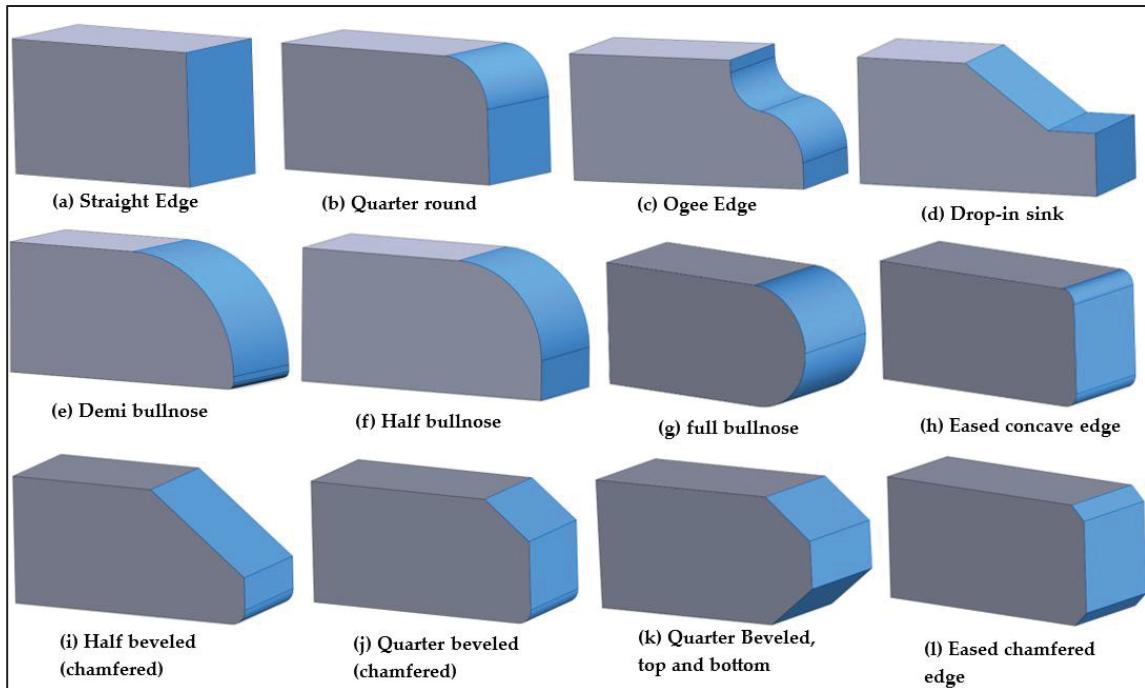


Figure 1.2 Les profils de bord de comptoir en granite les plus populaires
Tirée de Mateur, Songmene & Kouam (2024)

1.5 Effluents de polissage

1.5.1 Poussière de silice

La transformation du granite génère des copeaux, mais aussi et surtout des poussières composées de particules fines et ultrafines qui contiennent de la silice cristalline dangereuse pour l'homme.

La silice est le nom donné à un groupe de minéraux composés de silicium et d'oxygène (SiO_2), ou quartz, qui sont les deux éléments les plus abondants de la croûte (Goyer, Bahloul & Veillette, 2010). On le trouve le plus souvent sous deux formes:

- à l'état amorphe (lorsqu'il n'est pas encore usiné) : dans ce cas, il ne pose pas de problème de santé;
- sous forme cristalline : cet état résulte des différents processus de fabrication (polissage, découpage, etc.). C'est sous cette forme que la silice crée le plus de

dommages sur la santé. La silice cristalline est plus communément appelée quartz (Sabourin, 2013).

1.5.2 Aérosols

Un aérosol est composé de particules liquides ou solides en suspension dans un gaz (généralement l'air). L'aérosol généré par des particules liquides peut prendre la forme d'un brouillard ou d'une brume et l'aérosol généré par des particules solides peut prendre la forme d'une fumée ou d'une poussière.

Les particules de l'aérosol sont classées en trois types en fonction de leur diamètre : nanométrique (0,001 - 0,1 μm), submicronique (0,1 - 1 μm) et micrométrique (1 - 10 μm) (Hinds, 1999). Une autre classification est proposée, qui inclut les aérosols dans les particules ultrafines (PUF) (0,001 - 0,1 μm) et les particules fines (PF) (0,1 - 10 μm). Les particules solides d'un aérosol peuvent prendre de nombreuses formes : sphériques, cubiques irrégulières, en plaques, fibreuses et agrégées (Tableau 1.1). Les particules contenues dans l'aérosol peuvent partir et se déposer de 5 façons (Figure 1.3 a):

- l'impact des particules sur une surface en raison de leur masse importante et d'un changement brusque dans la trajectoire de l'aérosol;
- sédimentation de particules de masse élevée sous l'effet de la gravité;
- interception de particules de taille moyenne par une surface en raison de leur faible densité et de la faible vitesse des aérosols;
- attraction électrostatique de particules chargées à partir de surfaces de charge opposées;
- la diffusion ou le mouvement brownien de petites particules suivant une trajectoire aléatoire par rapport à celle du flux d'aérosol en raison de l'interaction avec les atomes d'un gaz ou les molécules d'air.

Tableau 1.1 Formes des particules solides des aérosols
Tiré de Beaudet (1985)

Forme	Apparence	Nature	Formation
Sphérique		Fumée Pollen Cendres volantes	Condensation Disperser Combustion
Cubique irrégulier		Minéraux	Désintégration mécanisée
Assiette		Minéraux Épiderme	Désintégration mécanisée
Fibreux		Fibres végétales et minérales	Disperser Désintégration mécanisée
Dans l'ensemble		Fusain Fumée	Évaporation et condensation

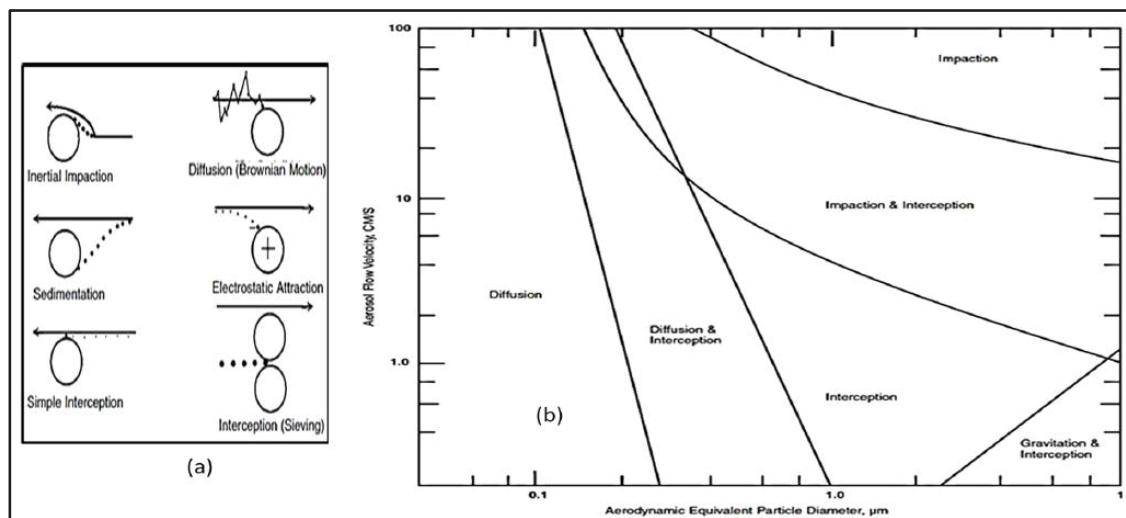


Figure 1.3 Mécanismes de dépôt des particules d'aérosol (a) différents mécanismes de dépôt (b) mécanismes de dépôt en fonction du diamètre des particules et de la vitesse d'écoulement de l'aérosol
Tiré de Plog & Quinlan (2012)

1.6 Qualité des pièces lors de l'usinage par humide

Il existe une différence remarquable entre l'usinage du granite à sec et à l'eau, Bahri et al. (2021) ont remarqué que le broyage du granite à sec présentait un Ra 10 fois plus élevé que le broyage avec lubrification, comme le montre la figure 1.4

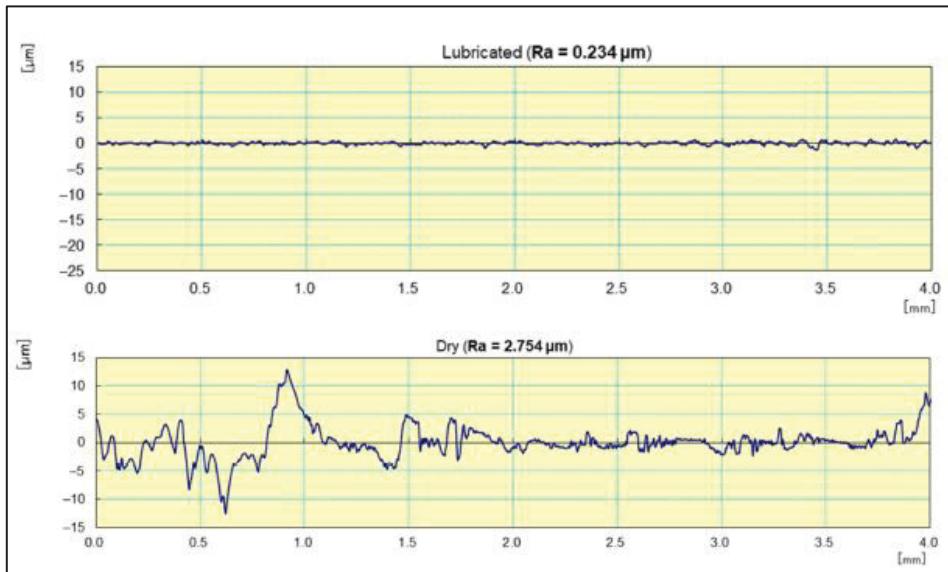


Figure 1.4 Surface de profil d'un granite blanc poli, humide et à sec
Tiré de Bahri et al. (2021)

L'étude menée par Bahri et al. (2022) a examiné l'effet du débit MQL (Minimum Quantity Lubrication) sur la qualité des pièces et l'émission de poussières lors de la finition des arêtes du granit. L'étude a révélé que le débit MQL avait un impact significatif sur la qualité des pièces et l'émission de poussières.

Les résultats ont montré que l'augmentation du débit MQL entraînait une réduction de la rugosité de surface et de l'usure de l'outil, ce qui améliorait la qualité de la pièce, comme le montre la figure 1.5 où, dans les graphiques 3D, les régions présentant la rugosité Ra la plus faible sont représentées en bleu, tandis que les zones présentant des valeurs de rugosité élevées sont indiquées par la couleur rouge.

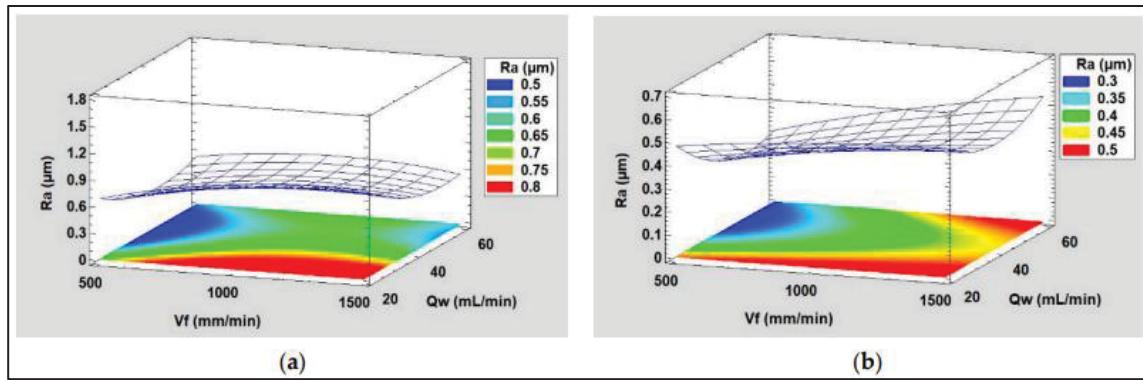


Figure 1.5 Tracés de surface de réponse 3D de R_a lors de l'utilisation : (a) d'un outil en forme de chanfrein, (b) d'un outil en forme concave
Tiré de Bahri, Songmene et Kouam (2022)

1.7 Effet du processus humide sur les émissions et la dispersion de PF, PUF et aérosols

1.7.1 Lubrification par quantité minimale (MQL)

L'utilisation du système MQL affecte directement l'émission des PF et des PUF. Ainsi, Songmene et al. (2018), Bahloul et al. (2019), et Bahri et al. (2021) ont travaillé sur la lubrification en quantité minimale où Songmene et al. (2018) ont observé, en travaillant sur l'effet de la MQL sur l'émission de PF, et PUF pendant le polissage, qu'un débit élevé réduit l'émission d'aérosols ultrafins avec une grande quantité, mais avec une quantité plus faible pour les aérosols fins. Les mêmes résultats sont examinés par Bahloul et al. (2019) qui ont caractérisé la poussière émise pendant le polissage du granite avec un effet notable réduisant les PF mais plus faible pour les PUF.

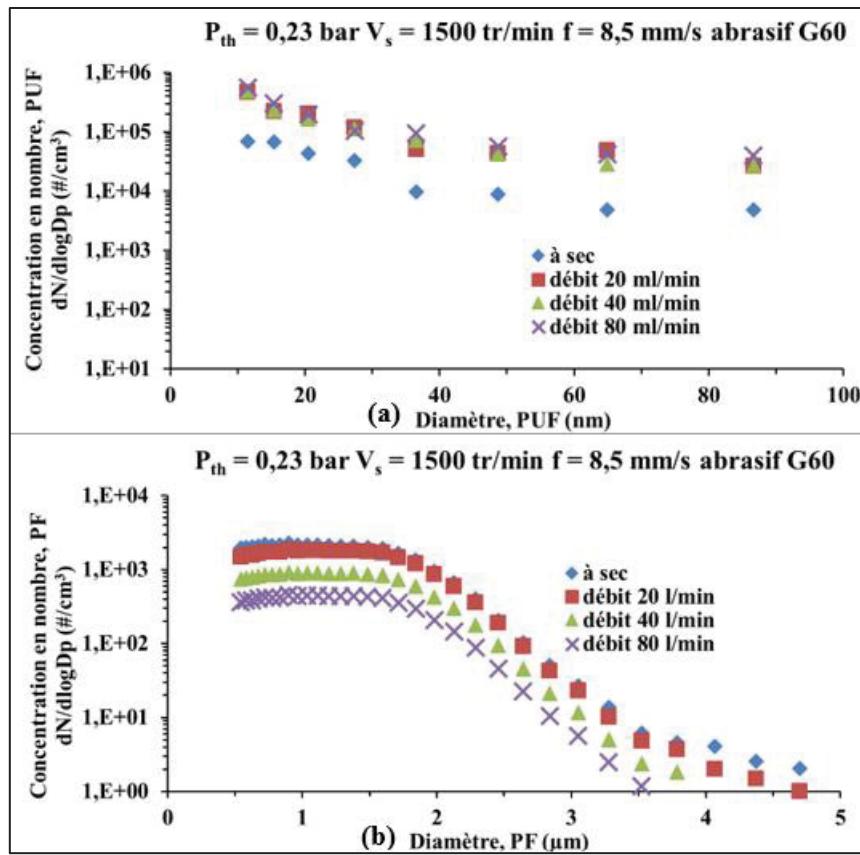


Figure 1.6 Effet du débit de lubrification sur l'émission de particules (a) concentration sur le nombre de FP (b) concentration sur le nombre d'UFP
Tiré de Bahloul et al. (2019)

Bahri et al. (2021) ont constaté que la diminution du taux de lubrification génère plus de PF, avec une réduction de 45% de 20 mL/min à 60 mL/min en utilisant un outil de forme chanfreinée et de 56% avec un outil de forme concave.

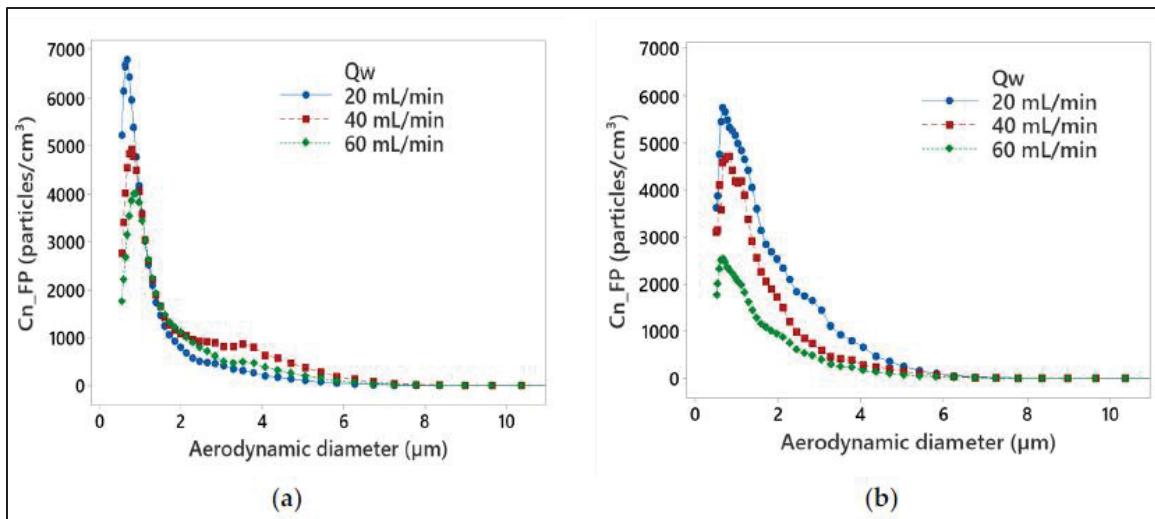


Figure 1.7 Effet de la MQL sur l'émission de PF (a) granite blanc (b) granite noir
 (Granulométrie : G150 ; N = 1500 tr/min ; Vf = 1500 mm/min)
 Tiré de Bahri et al. (2021)

1.7.2 Lubrification complète

En ce qui concerne la lubrification complète, Akbar-Khanzadeh et al. (2007) ont étudié l'efficacité du meulage humide et du meulage ventilé pour réduire l'exposition des travailleurs à la silice cristalline lors du meulage du béton en intérieur par rapport au meulage conventionnel. Les résultats ont montré que le broyage humide des dalles de béton réduit de manière significative les émissions de poussières avec 98,2 % pour la poussière de silice respirable et 97,6 % pour la poussière de silice respirable pour la matière particulaire en suspension respirable (RSP). En plus de la lubrification complète, un système d'échappement local a été examiné et a donné des résultats encore meilleurs que la lubrification complète. Ainsi, les émissions de poussières ont été réduites de 99,7 % et les particules en suspension respirables de 99,6 %, ce qui indique qu'il s'agit d'une mesure de contrôle efficace pour réduire l'exposition aux poussières.

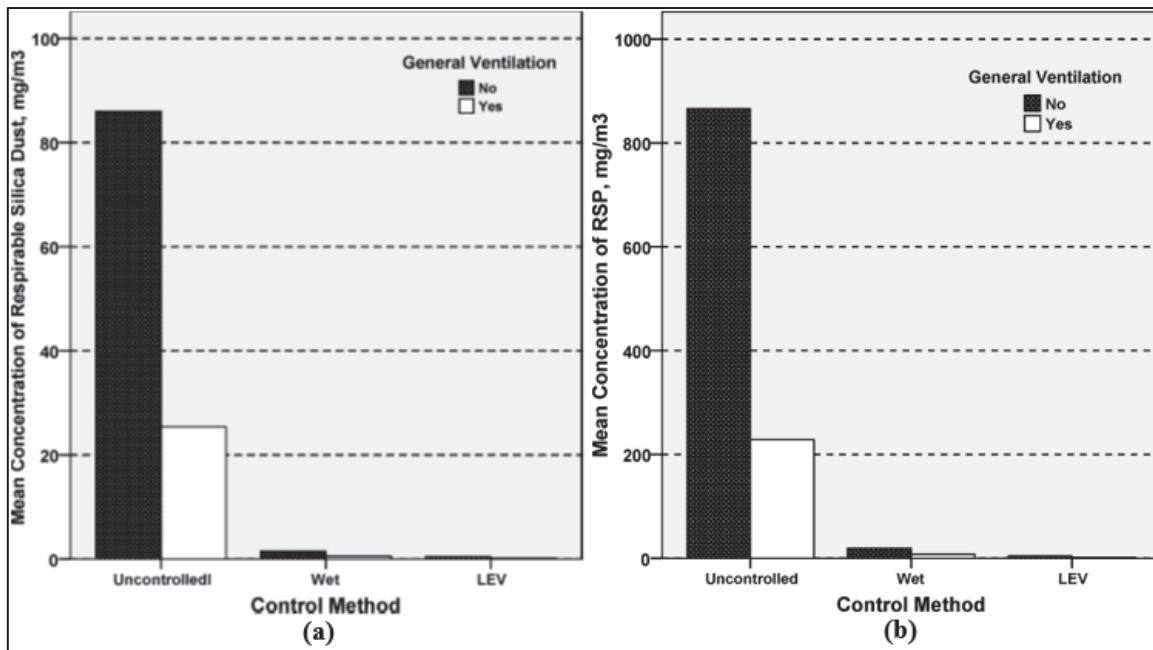


Figure 1.8 Effet des méthodes de contrôle sur les émissions de poussières (a) concentration moyenne de silice cristalline respirable (b) concentration moyenne de (RSP)
Tiré de Akbar-Khanzadeh et al. (2007)

La réduction des poussières respirables à l'aide d'un flux continu d'eau a été démontrée par Johnson, Phillips, Qi, Van, & Hawley, 2017 en expérimentant 4 processus d'usinage du granit. Ils ont constaté que l'utilisation de l'humidification par flux de feuilles, illustrée à la figure 1.9, était efficace pour réduire la concentration de poussières respirable (RD) et la concentration de silice cristallin respirable (RSC) d'environ 50 % en utilisant l'humidification par flux de feuilles seule et de 95 % en y ajoutant la ventilation locale par aspiration (LEV) pour le meulage des arêtes avec une meule abrasive en carbure de silicium.



Figure 1.9 Système de mouillage à écoulement en nappe
Tiré de Johnson et al. (2017)

Pour la découpe, l'utilisation de la seule humidification de la feuille par le flux montre une réduction de 52% de la RD et de 72% lorsque le LEV est ajouté.

La lubrification complète rabat fortement la génération de particules fines lors du polissage des bords de granite, le pic de C_{n_FP} pour $D_p < 1 \mu\text{m}$ tombe d'environ 1220 à $\approx 198 \#/cm^3$, soit une baisse d'environ 85 % par rapport au polissage à sec (Figure 1.10); sur le spectre des diamètres, lors de la coupe humide, les niveaux de concentration des particules fines (C_{n_FP}) se maintiennent autour de $10 \#/cm^3$ et descendent jusqu'à l'ordre de quelques dizaines pour les classes de diamètres les plus élevées ($1,5$ à $4 \mu\text{m}$), confirmant l'efficacité de la lubrification à étouffer les FP, (Bahri et al., 2022).

En revanche, cet effet de la lubrification n'est pas transposable aux particules ultrafines. En effet, alors que la lubrification réduit en moyenne par un facteur de l'ordre 4 la concentration totale de FP (Figure 1.11), elle n'entraîne pas de diminution significative du nombre total des UFP, (Bahri et al., 2021).

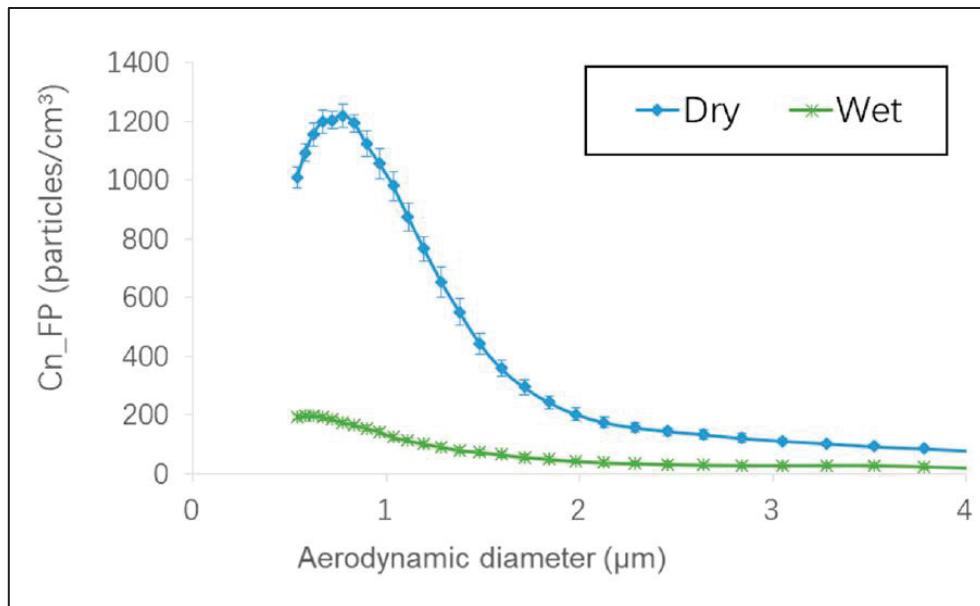


Figure 1.10 Distribution granulométrique de la concentration numérique des particules fines (Cn_FP) pour différents modes de lubrification (outil chanfreiné, grain 150, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)
Tiré de Bahri et al. (2022)

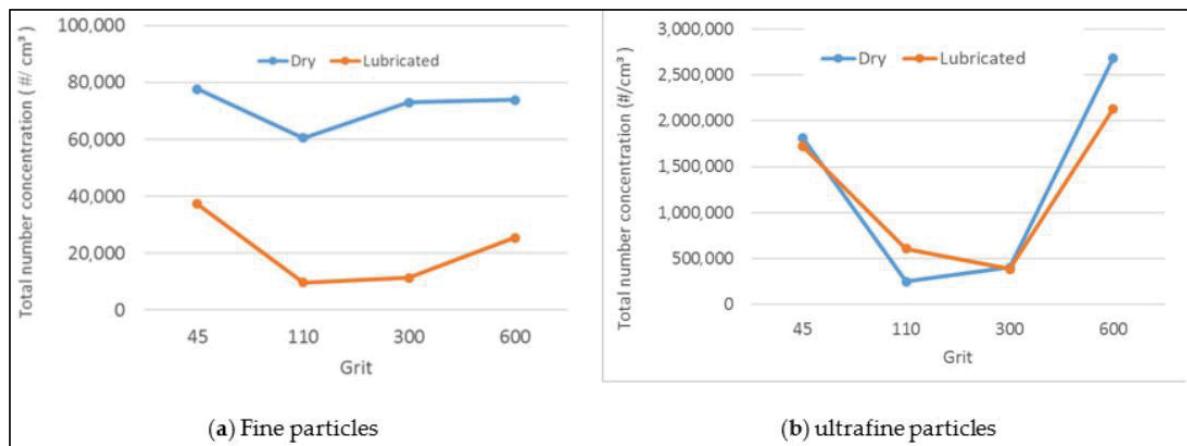


Figure 1.11 Concentration numérique totale des particules lors du finition de bords du granite blanc en conditions sèches et lubrifiées (N = 3500 rpm, Vf = 1000 mm/min, grain 600): (a) particules fines FP, (b) particules ultra fines UFP
Tiré de Bahri et al. (2021)

Outre l'effet de la lubrification complète sur la réduction de l'exposition, il est important de mentionner l'avantage du LEV. Une autre limite soulignée par Salamon et al. (2021) est la possibilité que le traitement humide augmente la teneur en humidité des matériaux, ce qui peut les rendre plus susceptibles de coller aux surfaces et à l'équipement. Cela peut créer des opportunités supplémentaires pour la poussière de silice de devenir aéroportée lorsque les surfaces sont nettoyées ou que les matériaux sont déplacés.

Le rapport du NIOSH (2016) a constaté que les méthodes de coupe humide réduisaient mais n'éliminaient pas l'exposition à la poussière de silice. Les méthodes de traitement humide impliquent l'utilisation d'eau pour supprimer la poussière pendant la coupe, le meulage et le polissage de la pierre. Toutefois, le rapport souligne que l'eau peut ne pas atteindre toutes les zones de l'outil ou de la pièce à usiner, et que la boue créée peut entraîner un colmatage et une réduction de l'efficacité de la coupe.

Dans le rapport de l'EPHB (2015) a proposé plusieurs contrôles techniques pour réduire l'exposition à la poussière de silice, y compris la coupe humide avec un système de dépoussiérage, des systèmes de ventilation fermés et une protection respiratoire. Ils ont noté que les méthodes de traitement par voie humide étaient efficaces pour réduire la poussière en suspension dans l'air, mais pas pour contrôler la poussière générée au point d'opération, comme autour de la lame de coupe.

Phillips & Johnson (2012) ont mené une étude préliminaire pour déterminer les facteurs qui contribuent à l'exposition à la silice alvéolaire dans la fabrication de comptoirs en pierre. Ils ont constaté que l'utilisation d'eau pendant la coupe et le meulage réduisait l'exposition, mais n'était pas suffisante pour respecter les limites d'exposition professionnelle. Ils ont recommandé une combinaison de méthodes de traitement humide, une ventilation locale par aspiration et une protection respiratoire.

1.8 Stratégies de contrôles

La CNESST, en collaboration avec l'IRSST, a élaboré un guide complet pour la mise en œuvre de bonnes pratiques visant à prévenir l'exposition des travailleurs au quartz. Le guide comprend

des solutions efficaces telles que la ventilation générale, la ventilation locale, la lubrification à l'eau et les équipements de protection individuelle.

Le guide présente diverses solutions de ventilation qui peuvent être utilisées pour prévenir l'exposition des travailleurs à la silice dans différentes industries. Les solutions de ventilation générale présentées dans la référence comprennent la ventilation locale par aspiration (LEV), la ventilation générale, la ventilation naturelle et les cabines fermées. La LEV capture et élimine les poussières et autres contaminants aériens à leur source, tandis que la ventilation générale utilise le mouvement de l'air pour diluer et disperser les contaminants aériens dans toute la zone de travail. La ventilation naturelle utilise les courants d'air naturels pour éliminer les poussières, et les cabines fermées sont une solution de contrôle technique qui peut être efficace pour réduire l'exposition des travailleurs à la silice dans certaines situations, comme lors de l'utilisation d'équipements lourds (Goyer et al., 2010).

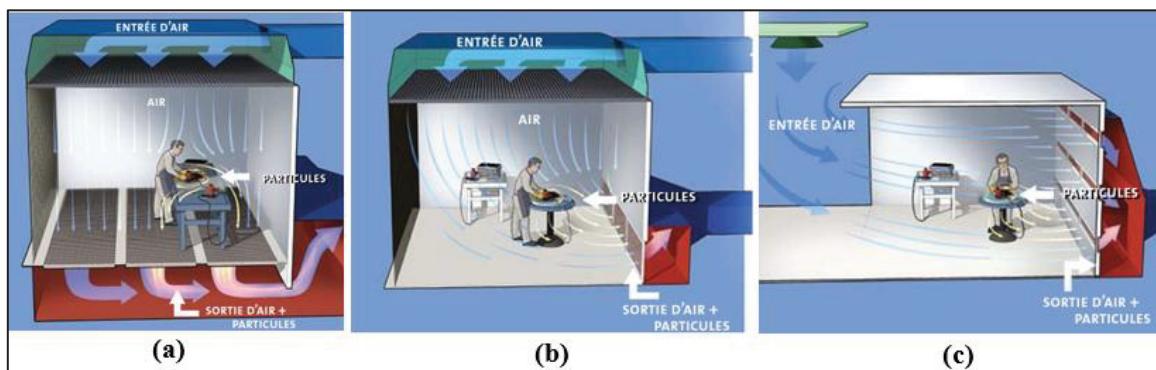


Figure 1.12 Cabine ventilée avec flux d'air dans les directions (a) oblique, (b) verticale et (c) horizontale
Tiré de (Goyer et al., 2010)

Cependant, chaque solution de ventilation a ses limites qui doivent être prises en compte lors de sa mise en œuvre. La LEV nécessite une conception, une installation et une maintenance appropriées pour être efficace, et les travailleurs ne se positionnent pas toujours correctement pour bénéficier du système. La ventilation générale nécessite une conception et un entretien minutieux pour garantir un mouvement et une distribution de l'air corrects, et elle peut ne pas être efficace pour capturer et éliminer la poussière de silice à la source. La ventilation naturelle est généralement moins efficace que les systèmes de ventilation mécanique, et elle peut ne pas

fournir un mouvement d'air et une dilution adéquate pour réduire l'exposition des travailleurs à la silice. Les cabines fermées peuvent ne pas convenir à tous les environnements de travail ou à tous les équipements, et leur installation et leur entretien peuvent s'avérer coûteux. Par conséquent, pour garantir la solution de ventilation la plus efficace, une combinaison de solutions de ventilation adaptées à l'environnement de travail et à l'opération spécifiques peut être nécessaire.

L'IRSST a proposé trois concepts pour la réduction à la source des émissions dans un travail de Bahloul et al. (2019) sur une étude de la transformation du granite. Ainsi, le premier concept était un système d'aspiration par soufflage composé d'une hotte d'aspiration et d'un souffleur d'air laminaire (à faible débit) pour diriger les contaminants en direction de la hotte d'aspiration. Le deuxième concept était un boîtier d'aspiration utilisant le confinement des disques pour intégrer un aspirateur. Le troisième concept utilisait l'aspiration par disque à travers des trous ; l'outil abrasif était utilisé comme aspiration localisée.

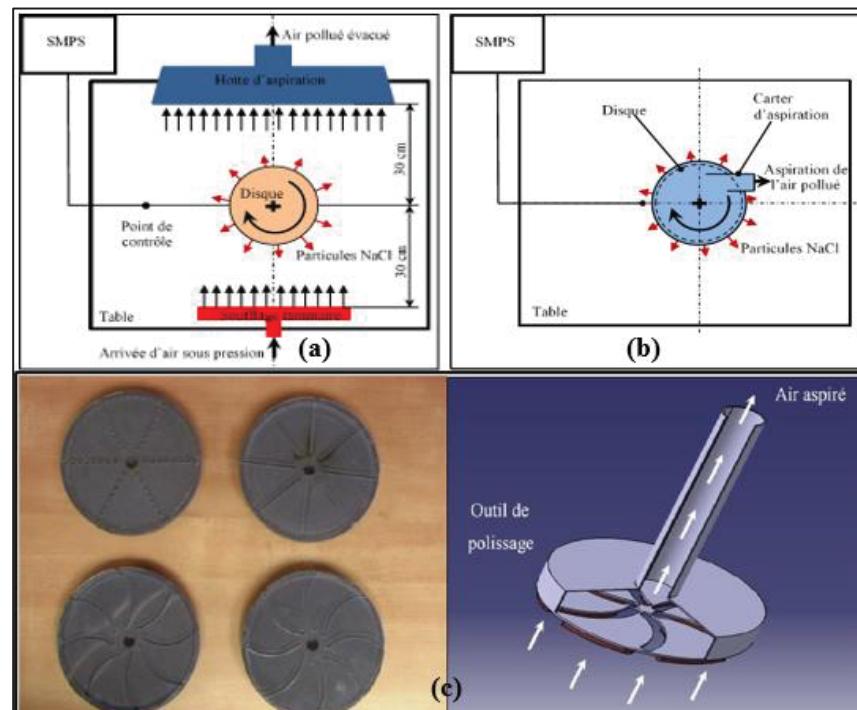


Figure 1.13 Concepts de réduction à la source (a) système d'aspiration par soufflage (b) carter d'aspiration (c) aspiration par disque

Tiré de Bahloul et al. (2019)

Les trois concepts de réduction à la source (aspiration-soufflage, carter d'aspiration et fentes d'aspiration intégrées au disque) ont été évalués. L'étude paramétrique a montré que les trois concepts permettent d'atteindre un degré d'efficacité de réduction des émissions supérieur à 95%. Un modèle de calcul a également été établi pour le concept de réduction à la source par soufflage-aspiration. Il a permis de déterminer le taux de soufflage laminaire optimal pour atteindre un rendement de 95%. Les performances de ces trois concepts de ventilation ont été évaluées en fonction des différents paramètres de ventilation.

Cependant, l'une des limites des systèmes de ventilation par aspiration locale est qu'ils n'abordent pas la question du polissage humide. Le polissage humide, qui consiste à utiliser de l'eau pour refroidir l'outil de polissage et supprimer la production de poussière de silice, s'est avéré être une solution efficace pour réduire l'exposition à la poussière de silice pendant le polissage du granite (Johnson et al., 2017). Les systèmes de ventilation locale par aspiration peuvent ne pas suffire à contrôler l'exposition à la poussière de silice si le polissage humide n'est pas mis en œuvre. Par conséquent, une combinaison de polissage humide et de systèmes de ventilation locale par aspiration peut être nécessaire pour contrôler efficacement l'exposition à la poussière de silice pendant le polissage du granit.

Cao et al. (2016) ont mis en évidence une méthode d'évaluation des performances du système push-pull présenté à la figure 1.14. Ils ont mesuré la vitesse de l'air et la concentration de particules et de gaz en différents points du lieu de travail, y compris dans la zone respiratoire des travailleurs.

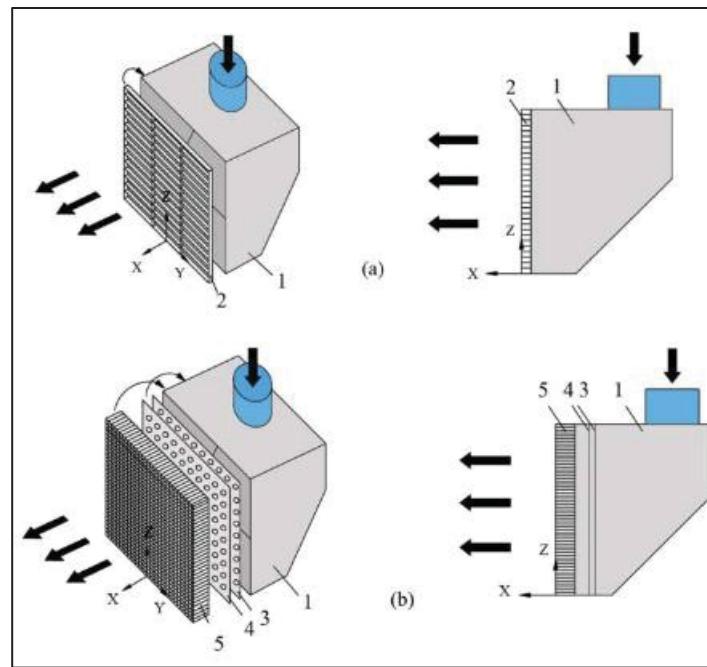


Figure 1.14 Système push-pull (a) ouverture de l'obturateur du système normal ; (b) ouverture du système à flux parallèle
Tiré de Cao et al. (2016)

Les résultats ont montré que le système à flux parallèle était efficace pour réduire la concentration de polluants sur le lieu de travail. La figure 1.15 montre que la concentration de particules et de gaz était nettement plus faible dans la zone respiratoire des travailleurs lorsque le système fonctionnait que lorsqu'il était éteint.

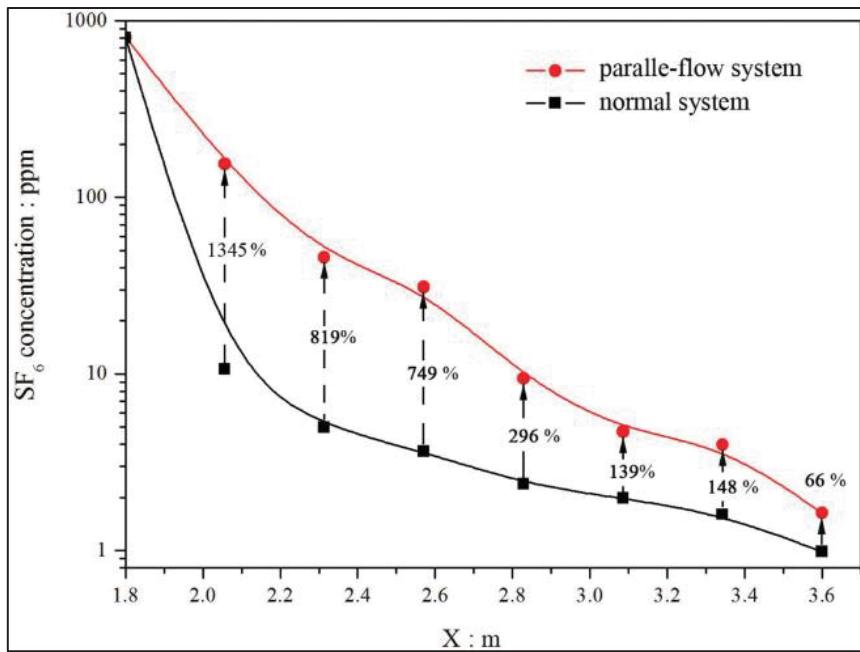


Figure 1.15 Comparaison de la variation de la concentration de SF6 sur la ligne d'axe (Y = 0 m ; Z = 0,63 m)
Tiré de Cao et al. (2016)

1.9 Exposition au risque sanitaire

1.9.1 Dépôt de particules d'aérosol dans les voies respiratoires humaines

L'inhalation de particules de poussière peut être nocive car elles peuvent pénétrer dans les voies respiratoires humaines et atteindre diverses régions des voies respiratoires, notamment la région extrathoracique, la région trachéobronchique et la région alvéolaire. La figure 1.16 fournit une représentation visuelle de ces régions respiratoires et met en évidence les endroits où les particules sont susceptibles de se déposer. Plus précisément, les particules ultrafines (PUF) d'un diamètre compris entre 1 et 100 nm se déposent principalement dans la région alvéolaire. Notamment, les particules d'un diamètre de 100 nm peuvent se déposer sur une plus grande surface des parois internes des poumons humains, comme le montrent les simulations numériques (figure 1.17). En revanche, les particules d'un diamètre de 10 nm se déposent sur une surface plus petite (figure 1.17 a). La grande quantité de ces particules ultrafines déposées

dans les poumons crée des sites d'interaction qui favorisent leur absorption par le corps humain, ce qui peut être problématique car ces particules peuvent être porteuses de substances toxiques.

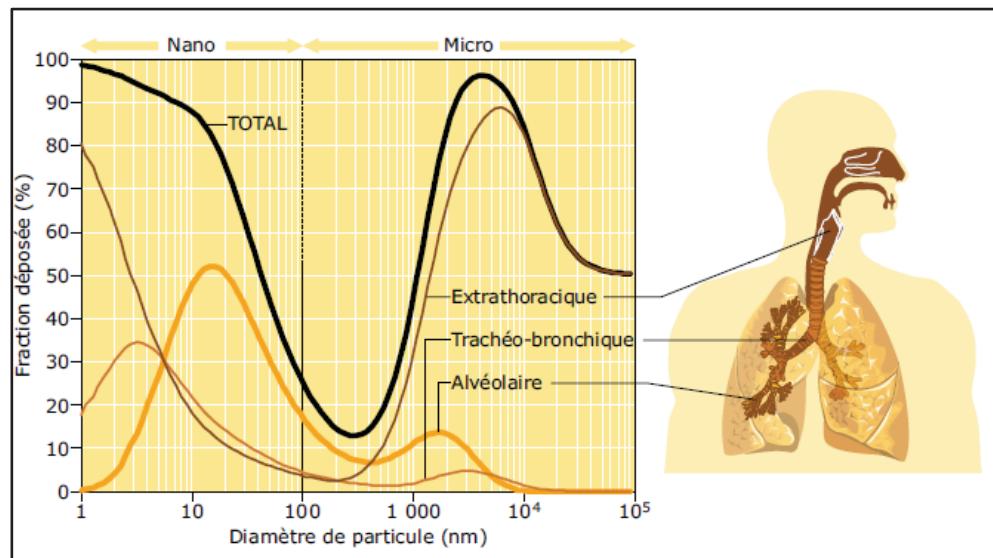


Figure 1.16 Dépôt théorique total et régional chez l'homme, en fonction du diamètre des particules inhalées (modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique, CIPR)
Tiré de Ricaud & Witschger (2012)

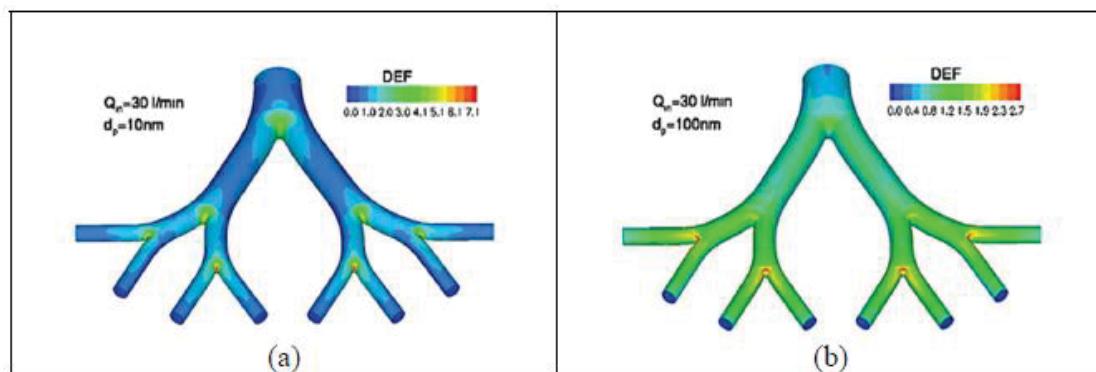


Figure 1.17 Distribution du facteur de dépôt 3D de l'PUF (DEF) dans le modèle numérique des voies aériennes avec $Q_{in} = 30 \text{ l/min}$ (a) diamètre des particules 10 nm (b) diamètre des particules 100 nm
Tiré de Zhang, Kleinstreuer, Donohue, & Kim (2005)

1.9.2 Risque pour la santé au travail

L'exposition à la poussière de silice est un risque professionnel important qui peut entraîner des maladies respiratoires telles que la silicose, le cancer du poumon et la bronchopneumopathie chronique obstructive. Plusieurs études ont examiné les risques pour la santé associés à l'exposition à la silice lors de la fabrication de comptoirs en granit, en marbre et en pierre artificielle.

Carrieri et al. (2020) ont mené une étude pour caractériser l'exposition à la silice lors de la fabrication de comptoirs en pierre artificielle. Ils ont constaté que la concentration moyenne de poussière de silice respirable était de 0,157 mg/m³, avec une plage de 0,003-3,270 mg/m³. Ils ont également constaté que la poussière générée par les matériaux dont les pourcentages de silice sont supérieurs à ceux du granite naturel pendant le processus de coupe et de meulage présentait une concentration plus élevée de nanoparticules que la poussière générée pendant d'autres processus de fabrication.

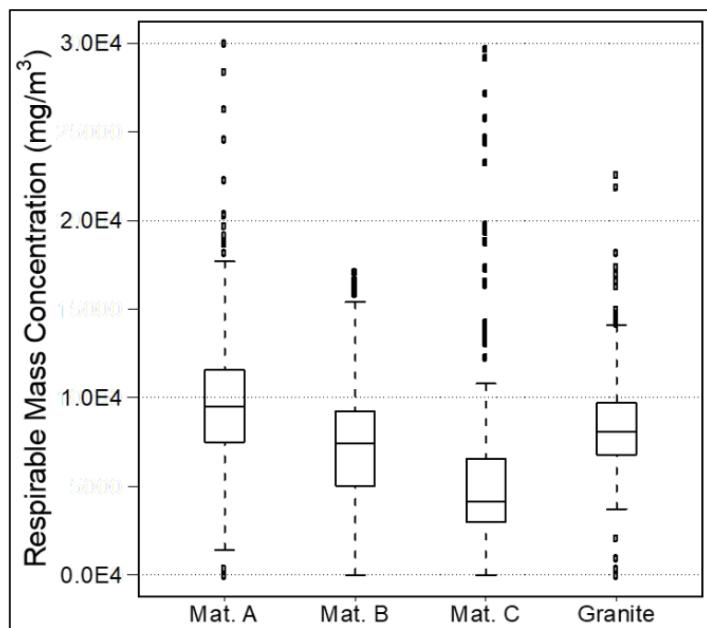


Figure 1.18 Concentrations de masse respirable par matériau
Tiré de Carrieri et al. (2020)

García Vadillo, Sánchez Gómez, & Romero Morillo (2011) ont mené une étude sur la prévalence de la silicose parmi les travailleurs des conglomérats de quartz. Ils ont constaté que 15 travailleurs sur 41 (36,6 %) souffraient de silicose, avec une durée d'exposition moyenne de 9,5 ans. La concentration moyenne de silice sur le lieu de travail était de 0,102 mg/m³.

Kramer et al. (2012) ont fait état de la résurgence de la silicose chez les travailleurs de la pierre artificielle. Ils ont constaté que 46 travailleurs avaient été diagnostiqués avec la silicose, dont 19 entre 2008 et 2010, et que la durée moyenne d'exposition était de 19,5 ans.

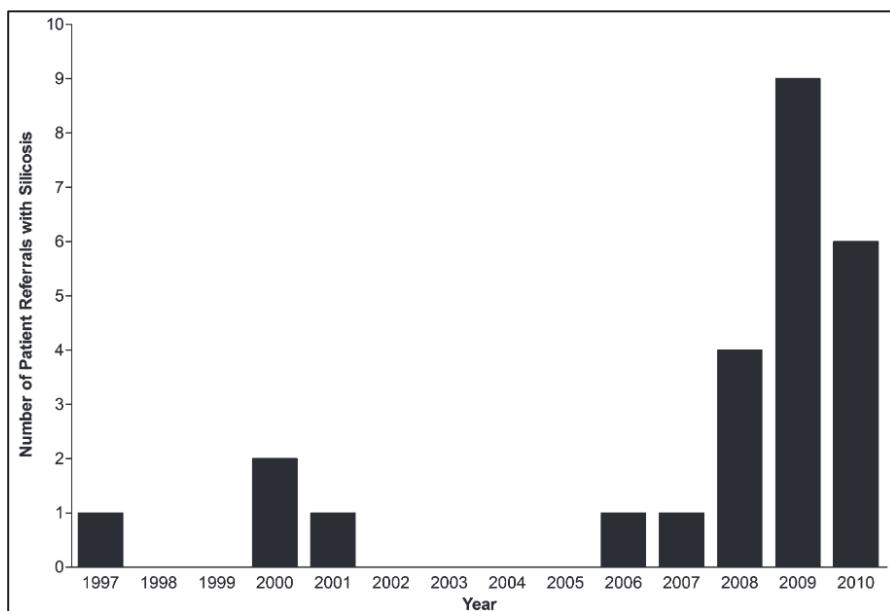


Figure 1.19 Cas signalés de silicose due à la pierre artificielle parmi des candidats à une transplantation pulmonaire
Tiré de Kramer et al. (2012)

Ramkissoon et al. (2022) ont mené une étude pour caractériser les émissions de poussières provenant de pierres artificielles usinées afin de comprendre le risque de silicose accélérée. Ils ont constaté que la poussière générée lors de la coupe et du meulage de pierres artificielles contenait des niveaux élevés de silice respirable, avec des concentrations dépassant 10 mg/m³ dans certains cas.

Dans leur étude, Ronsmans et al. (2019) ont mis en évidence deux cas de silicose chez des travailleurs employés par une petite entreprise qui produisait et installait des comptoirs de

cuisine en pierre artificielle. Le premier cas concernait un homme de 44 ans qui travaillait pour l'entreprise depuis neuf ans et était exposé à la poussière de pierre artificielle lors des processus de production et d'installation. Il a présenté des symptômes de toux et d'essoufflement et a été diagnostiqué comme souffrant de silicose sur la base d'une tomodensitométrie et de tests de la fonction pulmonaire. Le second cas concernait un homme de 50 ans qui avait travaillé pour la même entreprise pendant six ans et avait été exposé de la même manière à la poussière de pierre artificielle, mais qui présentait des symptômes plus avancés, notamment une toux, un essoufflement et une perte de poids, et chez qui on a diagnostiqué une silicose à un stade avancé.

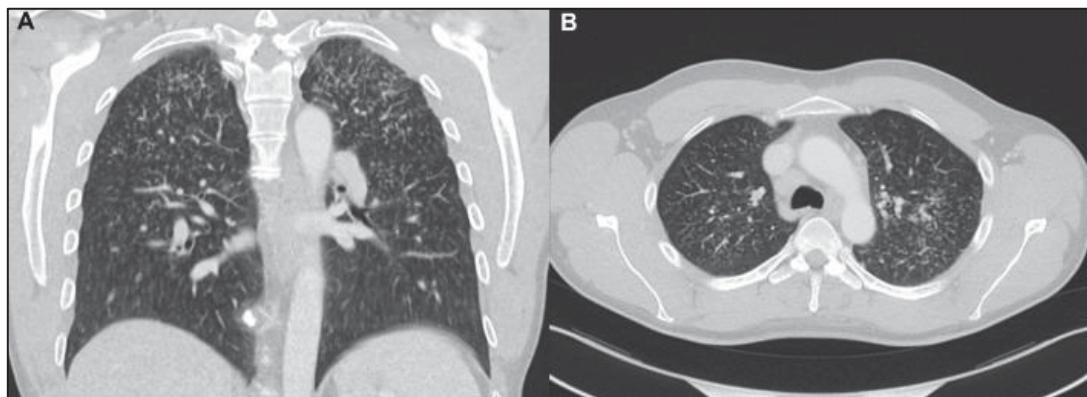


Figure 1.20 Premier ouvrier Ct haute résolution montrant des micronodules diffus bilatéraux avec un lobe supérieur et une prédominance postérieure
Tiré de Ronsmans et al. (2019)

L'étude de Verma et al. (2011) visait à évaluer les niveaux d'exposition à la silice dans une étude de mortalité des travailleurs du granite du Vermont. La population étudiée était composée de travailleurs employés dans quatre usines de granite du Vermont entre 1950 et 2000. Des échantillons d'air personnels et locaux ont été prélevés et analysés pour déterminer l'exposition à la silice cristalline respirable (RCS). Les résultats ont montré que le niveau médian d'exposition à la silice cristalline alvéolaire parmi les travailleurs était de 0,049 mg/m³. Les expositions les plus élevées ont été observées dans les catégories de travail du sciage et du polissage. L'étude a également révélé une corrélation positive significative entre la durée de l'emploi et les niveaux d'exposition aux RCS. Les auteurs ont conclu que les niveaux d'exposition aux RCS parmi les travailleurs du granite du Vermont étaient généralement

faibles, mais que les travailleurs de certaines catégories d'emploi, telles que le sciage et le polissage, présentaient un risque d'exposition plus élevé.

1.10 Réglementation en matière de santé et de sécurité au travail

La règle finale de l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration) établit de nouvelles normes pour l'exposition à la poussière de silice sur le lieu de travail, abaissant la limite d'exposition admissible (PEL) pour la silice cristalline à 50 microgrammes par mètre cube d'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur une journée de travail de 8 heures. La règle exige également que les employeurs mettent en œuvre des contrôles techniques, fournissent des respirateurs, proposent des examens médicaux aux travailleurs fortement exposés et forment les employés aux dangers de l'exposition à la silice (OSHA, 2016).

Le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) a classé le quartz comme ayant un effet potentiellement cancérogène pour l'homme. Pour assurer la sécurité, la valeur d'exposition ne doit pas dépasser $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$ pendant 40 heures de travail par semaine, avec un maximum de 8 heures par jour (RSST, 2024). Cette valeur est appelée "VEMP", ou valeur d'exposition moyenne pondérée du quartz, et doit être strictement respectée. De plus, le RSST exige que cette exposition soit minimisée autant que possible, même si elle est inférieure à la valeur autorisée.

Le NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) a émis une recommandation selon laquelle l'exposition à la silice cristalline (quartz) devrait être limitée à $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$. L'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) est allée plus loin en proposant une limite encore plus basse de $0,025 \text{ mg}/\text{m}^3$ (OSHA, 2016b). Cela signifie que les employeurs doivent s'assurer que leurs travailleurs ne sont pas exposés à des niveaux de silice cristalline qui dépassent ces limites, car cela peut entraîner des risques pour la santé.

1.11 Conclusion

La présente revue de la littérature a permis d'identifier les principaux matériaux utilisés dans l'industrie de la pierre (granite, marbre, pierres artificielles) ainsi que les procédés de polissage à la machine-outil et leurs impacts sur la qualité des pièces et la santé des opérateurs. Si le polissage par voie humide se révèle efficace pour améliorer la finition et réduire l'émission de particules fines (PF), ultrafines (PUF) et d'aérosols, certaines limites subsistent, notamment la remise en suspension de poussières de silice lors de manipulations ou de nettoyages. Ces émissions représentent un risque non négligeable pour la santé des travailleurs, justifiant la mise en place de stratégies de contrôle rigoureuses et le respect strict des normes de sécurité. Ainsi, ce chapitre souligne l'importance d'un encadrement réglementaire adapté et d'un développement technologique orienté vers des pratiques plus sûres. Les éléments abordés constituent une base solide pour la suite de ce travail, qui vise à évaluer la performance du polissage humide dans différentes conditions d'usinage, tout en intégrant une dimension de prévention des risques sanitaires et environnementaux.

CHAPITRE 2

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale élaborée pour étudier l'influence croisée de la géométrie des outils, de la taille des grains abrasifs et des paramètres de coupe sur la génération de particules et la qualité de surface lors du polissage humide de granites noir et blanc. Les essais ont été réalisés à l'atelier mécanique de l'ÉTS à l'aide d'un plan d'expérience complet permettant de maîtriser les variations des vitesses de rotation, d'avance et des formes d'arêtes. L'ensemble des dispositifs de mesure – rugosité, efforts de coupe et émissions de particules – a été rigoureusement intégré dans le protocole afin d'assurer la reproductibilité et la fiabilité des données collectées.

2.2 Plan d'expérience et paramètres expérimentaux

Afin d'analyser l'influence de différents paramètres de procédé et de la géométrie des outils sur la rugosité de surface et les forces de coupe lors de l'usinage des pierres naturelles, une étude expérimentale approfondie a été réalisée. Un plan factoriel complet a été utilisé pour organiser les essais de manière systématique. Les facteurs d'entrée ainsi que leurs niveaux sont présentés dans le Tableau 2.1, tandis que les réponses mesurées sont répertoriées dans le Tableau 2.2.

Le modèle statistique illustrant les relations entre les variables d'entrée et les réponses de sortie est présenté à la Figure 2.1

Le plan détaillé des essais pour chaque configuration est présenté dans le Tableau-A II-1 (Annexe II).

Tableau 2.1 Paramètres d'entrée et niveaux étudiés

Facteurs	Niveaux			
Type de granite	Noir		Blanc	
Forme de l'outil	Eased chamfered	Half beveled	Eased concave	Ogee
Taille de grain de l'outil	150	300	600	
Vitesse de broche N (rpm)	1500	2500	3500	
Vitesse d'avance V_f (mm/min)	500	1000	1500	

Le plan d'expérience a conduit à un total de 216 essais, tel que calculé selon l'Équation 2.1. Afin d'assurer la fiabilité et la robustesse des analyses, chaque essai a été réalisé en double, portant le nombre total d'expériences à 432. Ces données ont servi de base aux analyses statistiques et à l'analyse de la variance (ANOVA) présentées dans ce mémoire.

$$\begin{aligned} Nbr\ d'essais &= \prod (Nbr\ de\ niveaux)^{(Nbr\ de\ paramètres)} \\ &= 2^1 * 4^1 * 3^3 = 216\ essais \end{aligned} \quad (2.1)$$

Tableau 2.2 Réponses de sortie étudiées

Réponses		Description
Émission de particules	Cn_FP [#/cm ³]	Concentration en nombre de particules fines
	Cm_FP [mg/m ³]	Concentration en masse de particules fines
	Cs_FP [μm ² /cm ³]	Concentration surfacique spécifique de particules fines
	Cn_UFP [#/cm ³]	Concentration en nombre de particules ultra fines
	Cm_UFP [μg/m ³]	Concentration en masse de particules ultra fines
	Cs_UFP [nm ² /cm ³]	Concentration surfacique spécifique de particules ultra fines
Rugosité	Ra (μm)	Écart moyen arithmétique du profil de surface
	Rt (μm)	Hauteur totale du profil de surface
Forces	F _x (N)	Force de coupe selon l'axe x
	F _y (N)	Force de coupe selon l'axe y
	F _z (N)	Force de coupe selon l'axe z

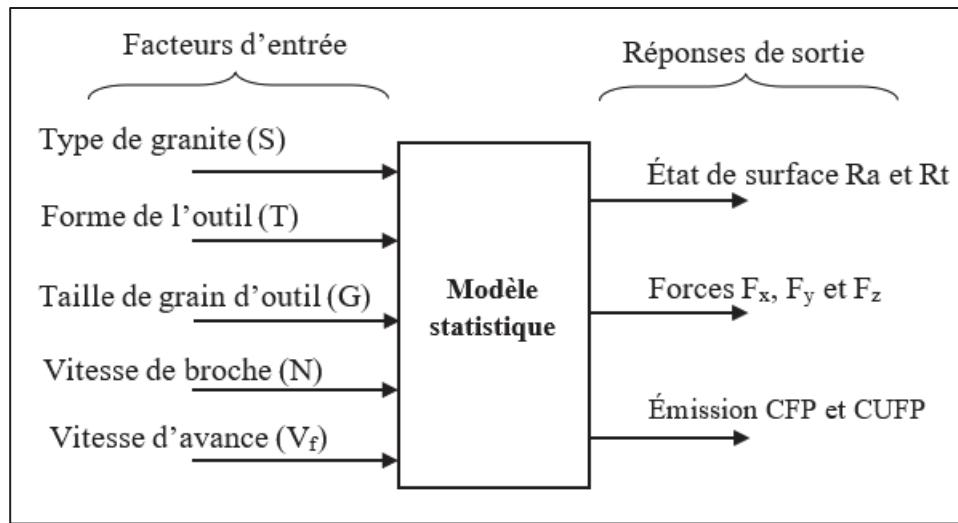


Figure 2.1 Modèle statistique

Pour chaque réponse de sortie Y (où Y représente Ra, Rt, Fx, Fy, Fz, CFP ou CUFP), le modèle statistique peut être formulé sous la forme d'une équation de régression linéaire multiple intégrant les effets principaux des facteurs d'entrée ainsi que, potentiellement, leurs interactions à deux facteurs ou d'ordre supérieur. La forme généralisée du modèle est présentée à l'équation 2.2 ci-dessous.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 T + \beta_3 S + \beta_4 N + \beta_5 V_f + \sum \beta_{ij} (X_i \cdot X_j) + \epsilon \quad (2.2)$$

Où :

- **Y** : Réponse de sortie (Ra, Rt, Fx, Fy, Fz, CFP ou CUFP)
- **β_0** : Ordonnée à l'origine (valeur de base de la réponse)
- **G** : Type de granite (catégorique : Noir, Blanc)
- **T** : Forme de l'outil (catégorique : Eased Chamfred Edge, Half Beveled, Eased Concave Edge, Ogee Edge)
- **S** : Taille de grain de l'outil (numérique : 150, 300, 600)
- **N** : Vitesse de broche (numérique : 1500, 2500, 3500 rpm)
- **V_f** : Vitesse d'avance (numérique : 500, 1000, 1500 mm/min)
- **$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$** : Coefficients des effets principaux de chaque facteur
- **$\sum \beta_{ij} (X_i \cdot X_j)$** : Coefficients et termes d'interactions entre facteurs (ex. : G·T, S·N, etc.)
- **ϵ** : Terme d'erreur aléatoire

2.3 Cadre expérimental et équipements utilisés

L'environnement expérimental regroupe l'ensemble des équipements, machines, échantillons de granite ainsi que les outils nécessaires à la réalisation des essais en atelier et des mesures dans le laboratoire de métrologie.

2.3.1 Échantillons de granite utilisés

Les échantillons de granite utilisés dans cette étude ont été fournis par l'entreprise A. Lacroix Granit (Saint-Sébastien-de-Frontenac, QC, Canada), dans le cadre de leur soutien au projet de recherche sur la transformation du granite. Ces échantillons, aux dimensions de $200 \times 200 \times 30$ mm³ (Figure 2.2), sont constitués de deux types de granite : un granite blanc et un granite noir.



Figure 2.2 Échantillons de granite utilisés dans cette étude (a)
granite noir, (b) granite blanc

La composition minéralogique de ces matériaux est présentée au Tableau 2.3. Le granite blanc est composé d'environ 41 % de quartz, 33 % de plagioclase et 23 % de feldspath potassique (K-feldspath). Sa granulométrie varie entre 0,5 et 7,0 mm, et sa densité moyenne est d'environ 2,7 g/cm³, selon les travaux de Bahri et al. (2021).

Le granite noir, classé comme une anorthosite canadienne à grains grossiers, est constitué majoritairement de plagioclase ($\approx 83\%$) et ne contient pas de quartz. Sa granulométrie est plus élevée, variant de 0,2 à 17,0 mm, selon l'analyse minéralogique de Bahloul et al. (2019). Sa densité moyenne est également plus élevée, atteignant environ 3,1 g/cm³, comme le rapporte Bahri et al. (2021).

Tableau 2.3 Caractéristiques minéralogiques des matériaux testés

Minéraux	Matériaux et composition	
	Granite noir (Canadian anorthosite)	Granite blanc
Quartz	0 %	41.4%
Plagioclase	83.6%	32.4%
K-feldspar	-	23 %
Orthopyroxene	6.85%	-
Biotite	2.83%	1.14 %
Oxydes	5.2%	2 %

2.3.2 Machine-outil utilisée pour le polissage

Les opérations de polissage des bords en granite ont été réalisées sur une machine CNC 3 axes, modèle K2X10 conçue par Huron (Figure 2.3). Cet équipement de haute performance permet d'usiner avec une grande précision et d'obtenir une excellente finition de surface. Il est équipé d'une broche capable d'atteindre une vitesse de rotation de 28 000 tr/min, avec une puissance maximale de 40 kW et un couple de 50 N.m, tandis que la vitesse d'avance peut atteindre 30 m/min.

La machine prend en charge aussi bien les opérations à sec que le polissage sous forte lubrification. Dans le cadre des essais, la lubrification a été mise en œuvre en lubrification abondante par émulsion eau/huile minérale soluble (Novamet 875, Oemeta) dosée à 5 % de lubrifiant (95 % d'eau), avec un débit de 30 L/min sous 3 bar. Pour limiter l'exposition aux polluants générés, elle est dotée de systèmes d'aspiration des poussières solides ainsi que des brouillards d'huile.



Figure 2.3 Machine de polissage CNC Huron K2X10

2.3.3 Outils de polissage utilisés

Dans le cadre de cette étude, le polissage des arêtes de granite a été réalisé à l'aide d'outils spécialisés, sélectionnés selon deux critères principaux : leur popularité auprès des clients de l'industrie de la pierre et la nécessité d'intégrer des profils à géométrie chanfreinée et concave, afin d'analyser l'effet des angles et courbures sur les performances de finition. Les quatre formes de bords étudiées, Eased chamfer (AR30-2), Half beveled (E30-12), Eased concave (T30-10) et Ogee (F30), sont présentées avec leurs caractéristiques géométriques dans le Tableau 2.4. Ces profils combinent des considérations esthétiques et fonctionnelles, influençant à la fois la durabilité et la qualité finale du polissage.

Pour chaque forme, un jeu d'outils de polissage à grains variés a été utilisé, afin de transformer une arête brute en une finition brillante conforme à la géométrie souhaitée. Chaque jeu comprend cinq outils de formes identiques mais de granulométries différentes : Grain 45, 150, 300 et 600. Ces outils permettent de progresser par étapes successives, correspondant aux phases classiques de l'usinage :

- ébauche : Grain 45 et 150;
- semi-finition : Grain 300;
- finition : Grain 600.

Les Tableaux 2.4, 2.5, 2.6 et 2.7 récapitulent l'ensemble des outils utilisés ainsi que leur taille de grain respective.

Tableau 2.4 Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Eased concave edge

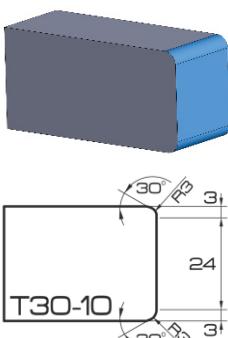
Profile	Outil
	 <p>ADI UHS Segmented 80 Series Profile Wheels T30-10 35mm Bore, Position 1 (Grit 45)</p>
 <p>Eased concave edge</p>	 <p>ADI UHS 80 Series Profile Wheels T30-10 35mm Bore, Position 2 (Grit 150)</p>
	 <p>ADI UHS 80 Series Profile Wheels T30-10 35mm Bore, Position 3 (Grit 300)</p>
	 <p>ADI UHS 80 Series Profile Wheels T30-10 35mm Bore, Position 4 (Grit 600)</p>

Tableau 2.5 Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Eased chamfred edge

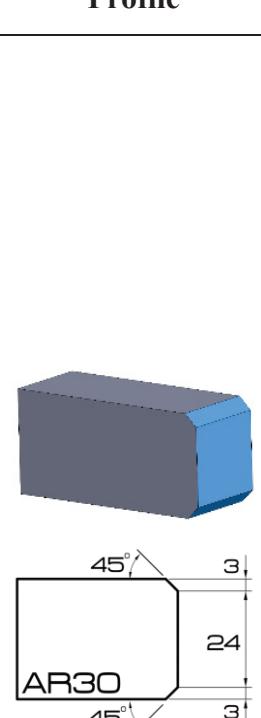
Profile	Outil
 Eased chamfred edge	 ADI UHS Segmented 80 Series Profile Wheels AR30 35mm Bore, Position 1 (Grit 45)
	 ADI UHS 80 Series Profile Wheels AR30 35mm Bore, Position 2 (Grit 150)
	 ADI UHS 80 Series Profile Wheels AR30 35mm Bore, Position 3 (Grit 300)
	 ADI UHS 80 Series Profile Wheels AR30 35mm Bore, Position 4 (Grit 600)

Tableau 2.6 Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Ogee edge

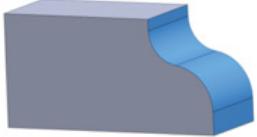
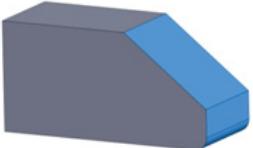
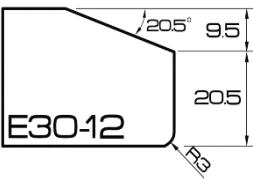
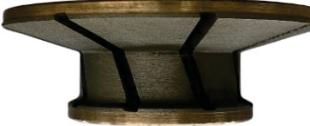
Profile	Outil
	 <p>ADI UHS Segmented 120 Series Profile Wheels F30 35mm Bore, Position 1 (Grit 45)</p>
  <p>Ogee edge</p>	 <p>ADI UHS 120 Series Profile Wheels F30 35mm Bore, Position 2 (Grit 150)</p>
	 <p>ADI UHS 120 Series Profile Wheels F30 35mm Bore, Position 3 (Grit 300)</p>
	 <p>ADI UHS 120 Series Profile Wheels F30 35mm Bore, Position 4 (Grit 600)</p>

Tableau 2.7 Caractéristiques des outils de polissage utilisés de forme Half beveled

Profile	Outil
  Half beveled (chamfered)	 ADI UHS 120 Series Profile Wheels E30-12 35mm Bore Position 1 (Grit 45)
	 ADI UHS 120 Series Profile Wheels E30-12 35mm Bore Position 2 (Grit 150)
	 ADI UHS 120 Series Profile Wheels E30-12 35mm Bore Position 3 (Grit 300)
	 ADI UHS 120 Series Profile Wheels E30-12 35mm Bore Position 4 (Grit 600)

2.3.4 Équipements de captation et de quantification des particules émises

Le spectromètre APS (Aerodynamic Particle Sizer, modèle 3321, TSI Inc.) Figure 2.4 a été utilisé pour analyser la concentration des particules fines générées durant le polissage. Fonctionnant par détection optique, il permet de mesurer simultanément la concentration en nombre, en masse et en surface spécifique des particules dont le diamètre aérodynamique varie de 0,54 à 19,81 µm. L'appareil opère avec un débit d'échantillonnage de 5 L/min, assurant une

captation efficace des particules en suspension. En plus de fournir la granulométrie complète, l'APS permet une caractérisation fiable des poussières micrométriques émises lors des opérations de finition.

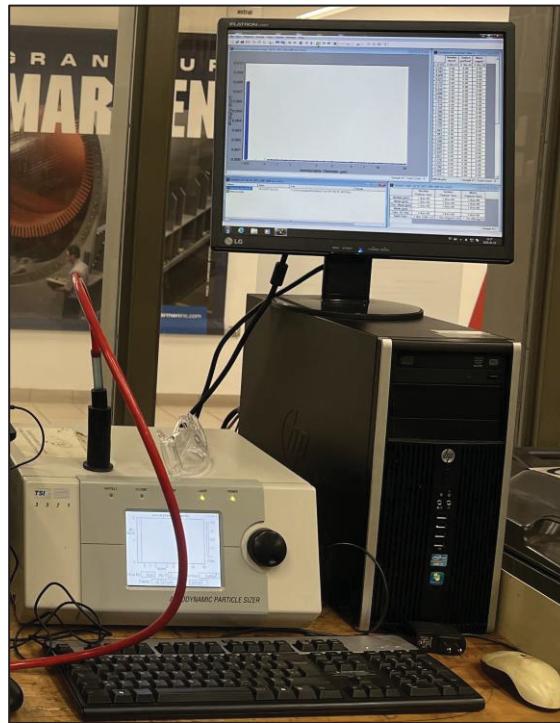


Figure 2.4 Aerodynamic Particle Sizer (APS)

La mesure des particules ultrafines (PUF) a été réalisée à l'aide d'un spectromètre SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) Figure 2.5, configuré avec un classificateur électrostatique (modèle 3080), un analyseur différentiel de mobilité (DMA modèle 3081), un impacteur de 0,0457 cm, et un compteur de particules à condensation (CPC modèle 3775), tous de marque TSI Inc. Ce dispositif mesure les particules en fonction de leur mobilité électrique, avec un débit d'aérosol de 0,3 L/min et un débit de gaine de 3,0 L/min. La plage de mesure du SMPS s'étend de 14,3 à 673,2 nm. La durée d'échantillonnage a été fixée à 135 secondes. Les résultats fournis comprennent les concentrations en nombre, en masse et en surface, en fonction du diamètre électrique. Pour les comparaisons avec les données de l'APS, la conversion du diamètre aérodynamique (D_a) en diamètre géométrique (D_p) est réalisée via l'équation suivante (TSI, 2006) :

$$D_p = D_a \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (2.3)$$

où ρ_0 représente la densité de référence (1 g/cm^3) et ρ la densité du matériau analysé (granite).

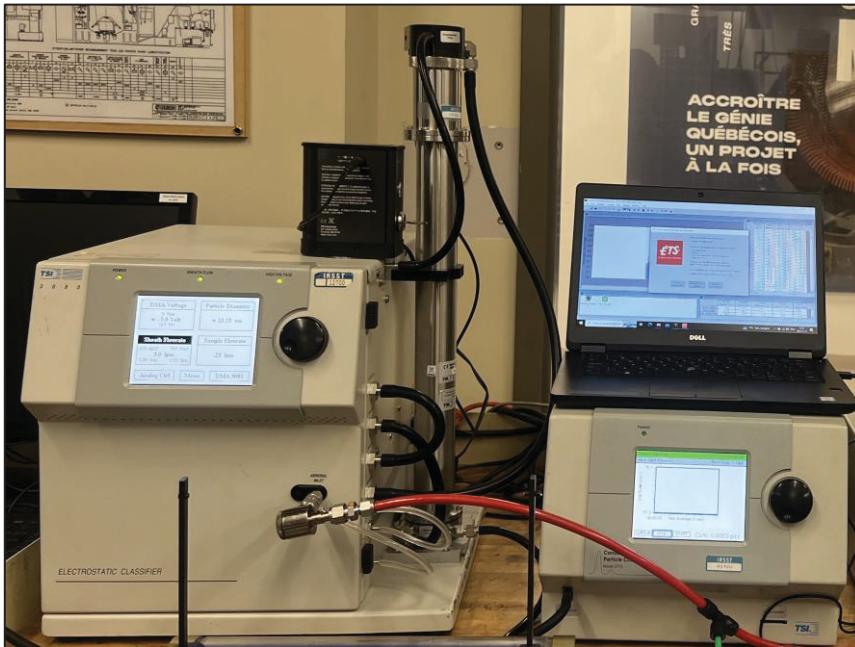


Figure 2.5 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Afin d'éliminer l'humidité résiduelle présente dans les aérosols de particules générés lors du polissage, un tube de séchage rempli de gel de silice a été installé en amont des équipements de mesure. Ce dispositif, illustré à la Figure 2.6, est interposé entre la source de particules et les instruments de captation (SMPS et APS) afin d'assurer un échantillonnage à sec, condition essentielle pour éviter toute altération des mesures. Le gel de silice, connu pour ses propriétés déshydratantes, est utilisé comme dispositif de séchage afin d'assurer la stabilité et la reproductibilité des mesures. Il change de couleur en présence d'humidité, ce qui permet un contrôle visuel simple de son efficacité. La Figure 2.6 (b) illustre un tube partiellement saturé dont le gel a viré au rosâtre, indiquant l'adsorption d'eau et la perte progressive de capacité de séchage. La Figure 2.6 (c) présente, quant à elle, un tube neuf contenant du gel sec, de couleur bleue uniforme, garantissant une efficacité optimale. Lorsque le gel est entièrement saturé, ce changement de teinte signale la nécessité de remplacer le contenu afin de maintenir l'efficacité

du dispositif. Enfin, la Figure 2.6 (a) montre un tube vide, destiné à illustrer la structure interne du système avant remplissage. Ce procédé assure que les particules restent dans un état sec avant leur analyse, minimisant ainsi les biais liés à l'humidité.

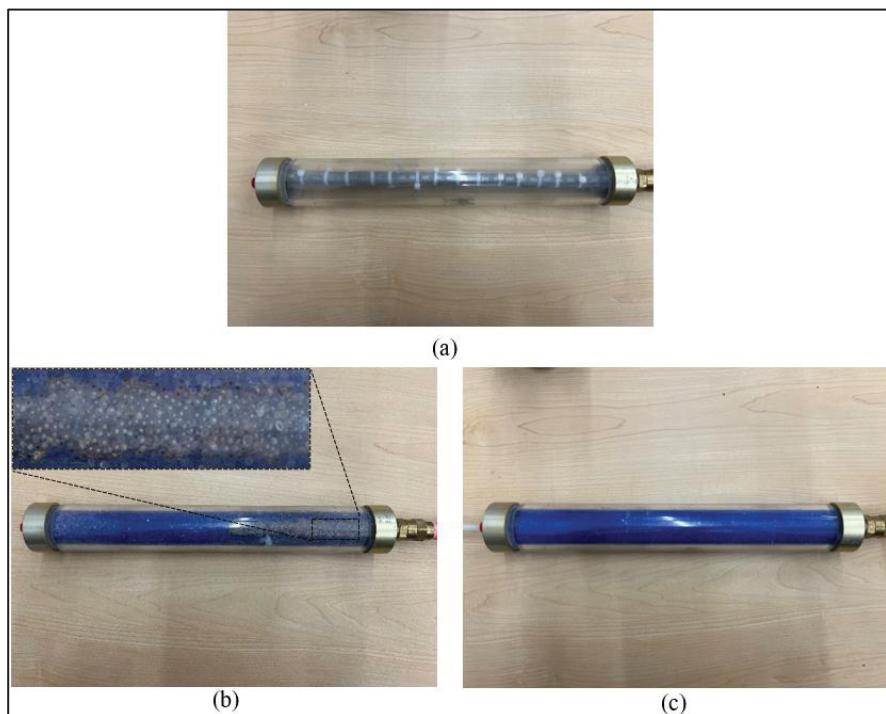


Figure 2.6 Dispositif de séchage à gel de silice (a) tube vide, (b) gel partiellement saturé (changement de couleur visible), (c) gel neuf et sec (bleu uniforme)

Ces conditions de séchage contrôlées s'appuient sur des résultats publiés qui démontrent l'efficacité du gel de silice pour conditionner l'aérosol avant mesure. D'une part, les mesures comparatives avec et sans gel de silice montrent une baisse marquée de la concentration apparente en particules ultrafines lorsque l'aérosol est séché (Figure 2.7), ce qui confirme que l'humidité résiduelle peut artificiellement gonfler les comptages si elle n'est pas éliminée (Songmene et al., 2018). D'autre part, il a été montré que ce séchage est obtenu sans perturber significativement la fraction particulaire solide : la capacité du gel de silice à retirer l'eau des particules humides dépasse 95 %, tandis que la perte de particules sèches submicroniques reste inférieure à 10 %, et l'effet sur les niveaux mesurés de particules fines (PF) et ultrafines (PUF) lors du polissage à sec et humide du granite (noir et blanc) est jugé négligeable (Bahloul et al., 2019).

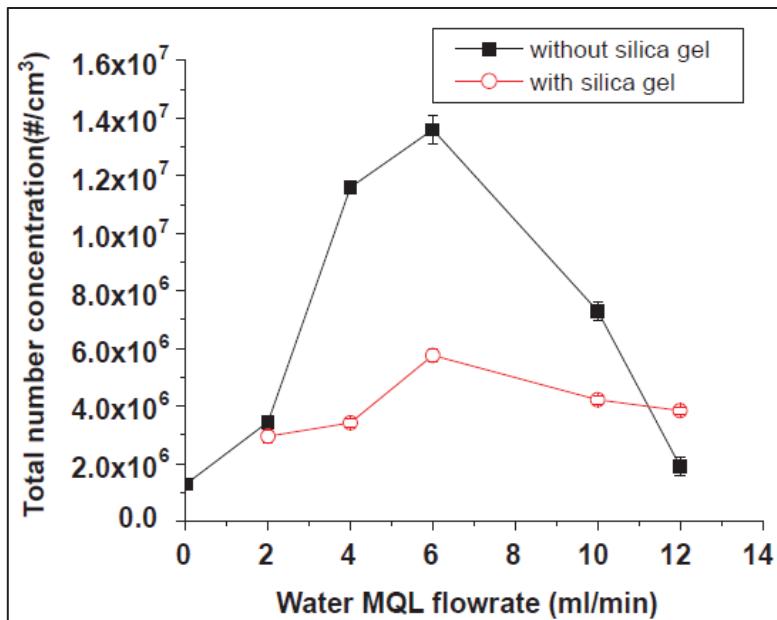


Figure 2.7 Effet de l'utilisation du gel de silice sur la concentration d'aérosols ultrafins lors de l'utilisation d'eau en mode MQL : granite noir ; vitesse 1000 tr/min ; grain abrasif 60
Tiré de Songmene et al. (2018)

2.3.5 Équipements de mesure de la rugosité de surface

La caractérisation de la rugosité des surfaces polies a été effectuée à l'aide d'un profilomètre portatif Mitutoyo Surftest SJ-201 (Figure 2.8 b), adapté aux mesures en environnement expérimental. Cet appareil utilise un palpeur mécanique linéaire qui balaye la surface du matériau et permet d'extraire plusieurs paramètres de rugosité, notamment (R_a , R_t , R_q , R_z , ...) couramment utilisés dans l'analyse des états de surface. Afin d'assurer la répétabilité et la stabilité des mesures entre les différents essais, un gabarit de positionnement spécifique a été conçu dans les ateliers de l'ÉTS (Figure 2.8 c). Ce dispositif a permis de maintenir une orientation constante de la pièce lors des mesures, limitant ainsi les variations liées à l'angle ou à la position de mesure. La fiabilité des données acquises a été vérifiée ponctuellement à l'aide du modèle Surftest SJ-410 (Figure 2.8 a), un instrument de précision offrant une meilleure résolution. Avant chaque série de mesures, une calibration systématique a été

réalisée à l'aide d'un étalon certifié de rugosité ($R_a = 2,95 \mu\text{m}$) afin de garantir l'exactitude métrologique des résultats obtenus.

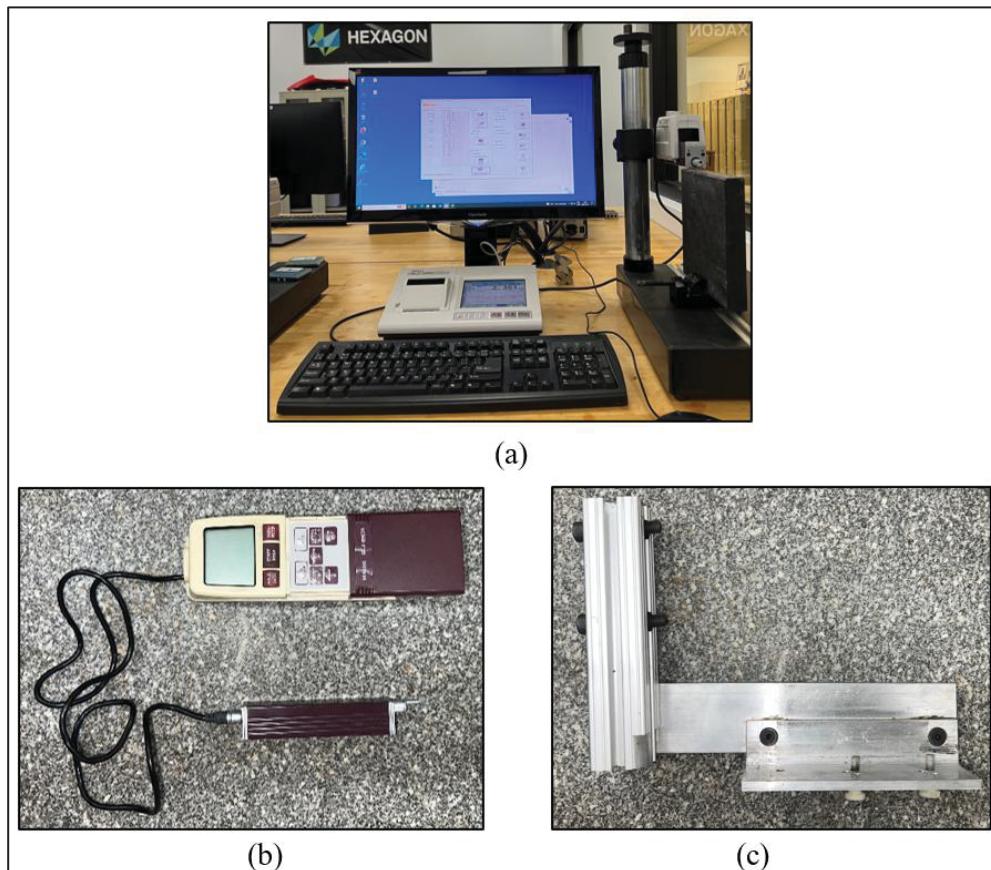


Figure 2.8 Appareils de mesure de la rugosité (a) surftest SJ-410, (b) surftest SJ-201, (c) dispositif de positionnement du rugosimètre sur la machine de polissage

2.3.6 Table dynamométrique pour l'acquisition des forces de coupe

La mesure des efforts de coupe a été réalisée à l'aide d'une table dynamométrique Kistler 9255B, Figure 2.9 (b), reliée à une unité électronique dédiée à l'acquisition et à l'analyse des données Figure 2.9 (a). Ce dispositif permet de mesurer les composantes des forces selon les trois axes orthogonaux (x, y, z), grâce à cinq capteurs intégrés. Deux capteurs sont responsables de la détection des forces selon l'axe x , deux autres selon l'axe y , tandis qu'un capteur central

assure la mesure de la composante selon l'axe z. Cette configuration assure une acquisition précise et en temps réel des efforts mécaniques générés lors du polissage.

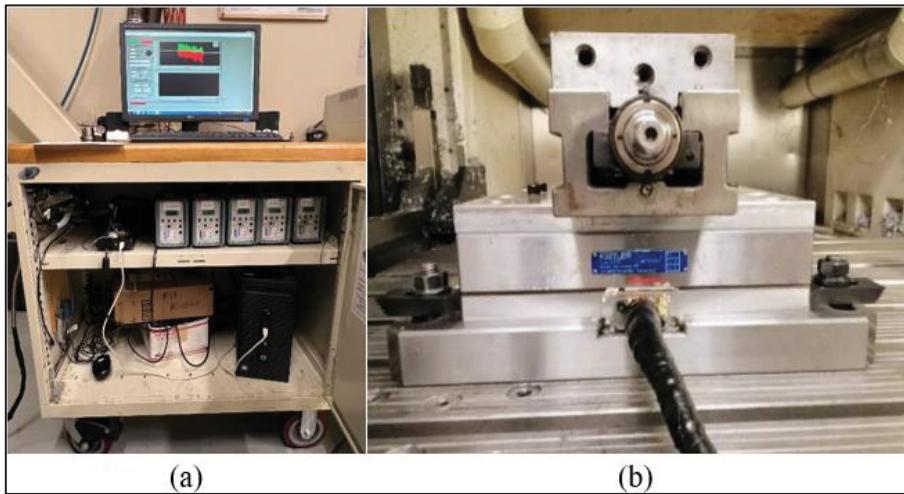


Figure 2.9 Système de mesure des efforts de coupe : (a) unité d'acquisition et interface logicielle, (b) table dynamométrique Kistler 9255B installée sur la machine CNC

2.4 Méthodologie expérimentale

Pour chaque profil de bord souhaité, un jeu d'outils profilés comportant quatre tailles de grains distinctes (45, 150, 300 et 600) est utilisé afin de transformer un bord brut en un bord poli conforme à la forme géométrique cible. L'outil à grain 45 est réservé à la phase de préparation, consistant à effectuer trois passes consécutives sur un bord brut avec une profondeur de passe de 0,1 mm, une vitesse de rotation de $N = 2500$ tr/min et une vitesse d'avance de $V_f = 1000$ mm/min.

Le protocole expérimental débute par la fixation de la pièce de granite sur la table de la machine CNC de polissage, suivie du montage de l'outil à forme concave (grain 45) sur le porte-outil. Le tuyau de captation des particules est positionné à une distance fixe de $D = 115,5$ mm par rapport à l'outil, comme illustré à la Figure 2.10 (b), et cette position est maintenue constante pour tous les essais. Deux types de granite, noir et blanc, ont été utilisés selon le plan d'expériences (DoE). Pour chaque type, deux échantillons ont été usinés : l'un avec les profils

Eased chamfer et Eased concave, l'autre avec les profils Half beveled et Ogee, réalisés sur deux arêtes parallèles opposées.

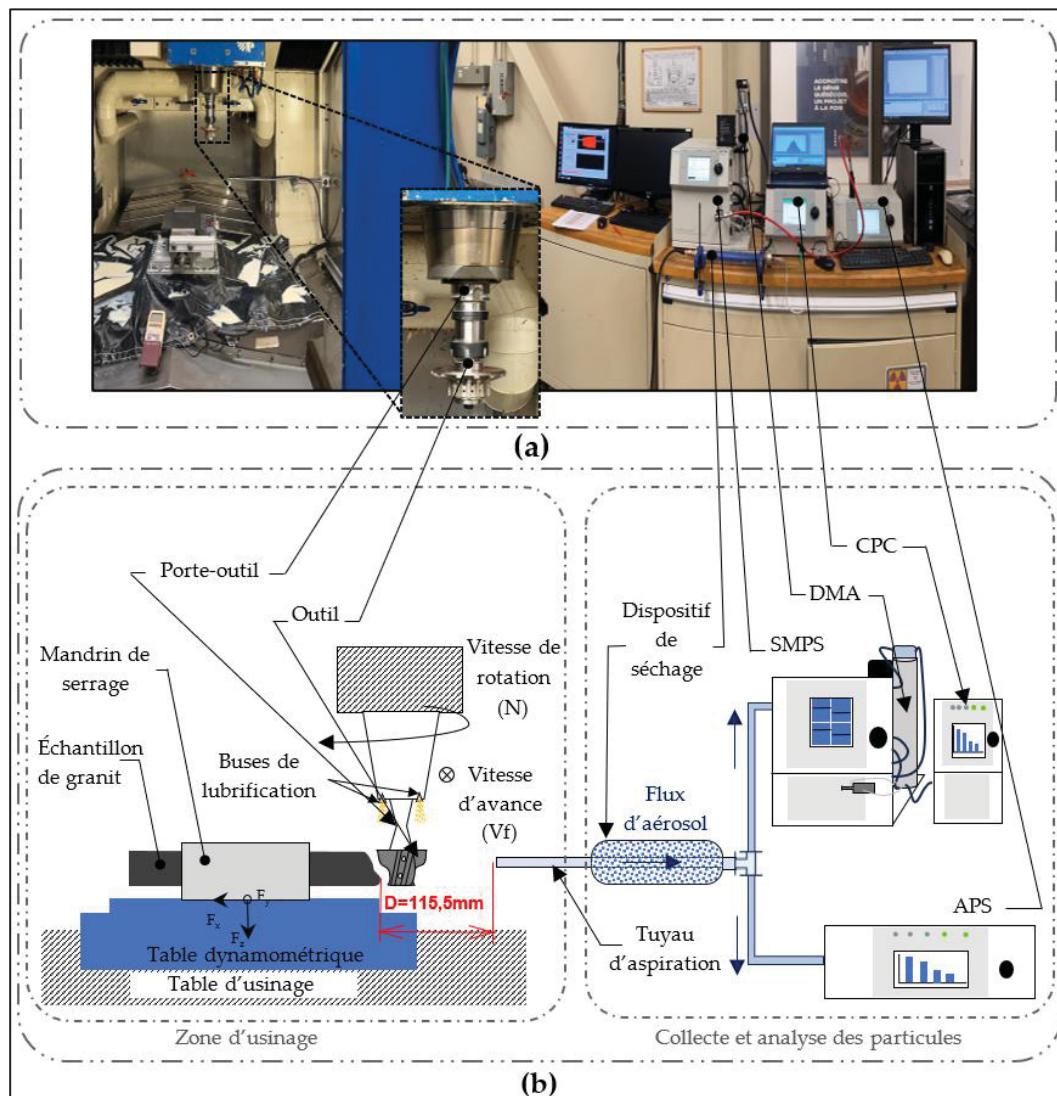


Figure 2.10 Dispositif expérimental, (a) photographies des équipements réels,
(b) schéma du montage expérimental

Par la suite, un changement d'outil vers le grain 150 a été effectué pour réaliser les neuf essais du DoE, en faisant varier les paramètres de coupe, à savoir la vitesse de rotation et la vitesse d'avance, selon l'ordre indiqué dans le tableau de l'Annexe II. Chaque condition d'usinage a été répétée deux fois, et au cours de chaque passe, une acquisition simultanée des particules

fines (FP) et ultrafines (UFP) a été réalisée sur une période d'échantillonnage de 50 secondes, tandis que les forces de coupe ont été enregistrées pendant 25 secondes (Figure 2.10).

À la fin de chaque séquence d'essais, le gabarit de positionnement du rugosimètre SJ-201 est installé sur le mandrin de fixation de la pièce de granite afin d'effectuer la mesure de rugosité sur le bord fraîchement poli. Le palpeur est soigneusement positionné à un point stable de l'arête polie, puis maintenu fermement contre la surface à l'aide de deux vis de serrage intégrées au gabarit, garantissant ainsi une mesure fiable et reproductible (Figure 2.11). Chaque mesure est réalisée trois fois consécutivement afin d'assurer la répétabilité des résultats.

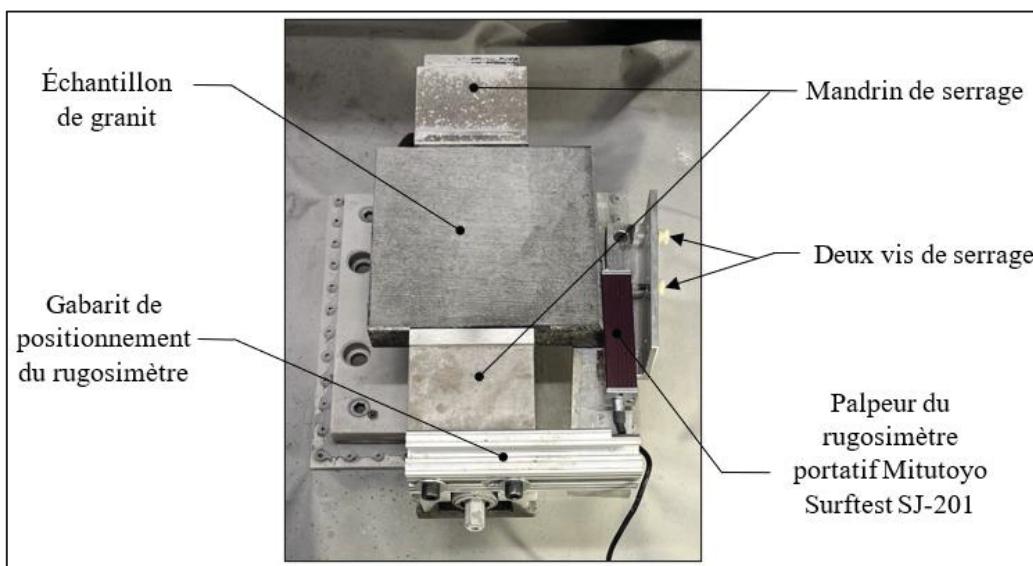


Figure 2.11 Détails sur la fixation du gabarit de positionnement du rugosimètre

Une fois l'ensemble des tests avec l'outil concave grain 150 finalisés, l'outil de semi-finition (grain 300) est monté sur la machine pour poursuivre les essais selon la même procédure décrite précédemment. Ensuite, l'outil de grain 600, destiné à la phase de finition, est utilisé pour compléter l'usinage des bords. Tous ces tests sont réalisés sur une deuxième arête brute parallèle à celle déjà traitée, en utilisant cette fois les outils de forme chanfreinée. Une fois cette série terminée, la pièce de granite est remplacée par une autre du même type, et la même séquence d'essais est répétée sur les deux arêtes perpendiculaires, permettant ainsi de réaliser les tests avec les outils de forme Half Beveled et Ogee.

2.5 Limites de la recherche et difficultés rencontrées

Lors de la réalisation des essais, plusieurs contraintes techniques ont été rencontrées, notamment liées à l'acquisition des données sur les particules fines (FP) et ultrafines (UFP). En effet, un grand nombre de mesures n'ont pas pu être enregistrées en raison de pannes fréquentes de l'appareil APS et de l'indisponibilité du SMPS, en particulier lors des essais effectués avec les outils de forme Eased chamfer et Eased concave. Ce manque est particulièrement marqué pour le granite blanc, pour lequel aucune donnée exploitable n'a pu être collectée avec ces deux outils. La Figure 2.12 illustre un exemple représentatif pour l'outil Eased concave et le grain 600 avec le granite noir, où seules les premières conditions d'essai ont permis de collecter des données de concentration en FP. Des dysfonctionnements similaires ont également été observés avec les grains 150 et 300. Les résultats partiels obtenus pour le granite noir sont présentés en Annexe II (Tableaux-A II-10 à II-13), où l'on constate l'absence de valeurs pour les concentrations en UFP et les lacunes importantes concernant les essais réalisés sur granite blanc. Le problème a été résolu en empruntant un autre SMPS de l'IRSST, (celui décrit dans ce mémoire, section 2.3.4) et en calibrant le spectromètre APS.

Ces défaillances rendent difficile, voire impossible, toute comparaison rigoureuse ou interprétation fiable des émissions particulières pour les outils Eased chamfer et Eased concave. Néanmoins, malgré ces limitations, il demeure possible d'établir certaines tendances en se basant sur l'effet global du type d'outil et du matériau, en complément des analyses réalisées sur les outils Half Beveled et Ogee, pour lesquels les données sont complètes et exploitables.

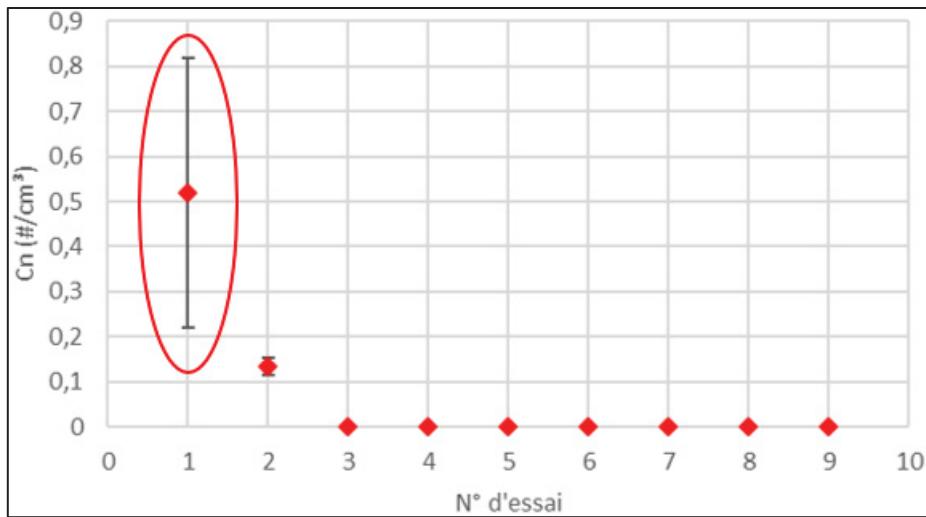


Figure 2.12 Courbe de variation de la concentration en nombre total de particules micrométriques du granite noir en fonction du numéro d'essai lors du polissage avec l'outil Eased concave et le grain 600

2.6 Conclusion

L'ensemble du protocole expérimental mis en œuvre pour l'étude des performances de polissage du granite a été présenté dans ce chapitre. Il inclut la description des matériaux, outils, équipements et dispositifs de captation utilisés, ainsi que l'organisation systématique des essais selon un plan factoriel complet. Cette démarche vise à identifier les paramètres exerçant une influence significative sur les émissions de particules fines et ultrafines, la rugosité de surface et les forces de coupe. Les résultats issus de cette campagne expérimentale feront l'objet d'analyses approfondies dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 3

ÉMISSIONS DE PARTICULES

3.1 Introduction

Le polissage humide des bords de granite génère des émissions de particules fines (FP) et ultrafines (UFP), susceptibles d'impacter la santé des opérateurs et l'environnement de travail. Ce chapitre vise à modéliser ces émissions en fonction des paramètres de coupe, de la géométrie d'outil, de la taille de grain abrasif et du type de granite. Une approche statistique fondée sur des modèles quadratiques et linéaires a été adoptée pour prédire les concentrations totales et surfaciques de particules, et en identifier les facteurs déterminants. L'influence du granite, particulièrement entre granite noir et blanc, a également été examinée à l'aide de tests de normalité, de Student et de Mann–Whitney.

3.2 Analyse statistique des émissions

Cette section présente les résultats de la modélisation statistique des émissions de particules fines (Cn_FP) et ultrafines (Cn_UFP) lors du polissage humide des bords en granit. L'objectif est d'identifier les paramètres de coupe les plus influents (vitesse de broche N et avance Vf), d'établir des équations de régression prédictives, et d'évaluer la qualité des modèles selon la forme d'outil (Half Beveled, Ogee), la granulométrie abrasive (G150, G600) et le type de granite (noir, blanc). Conformément à l'analyse de la Figure 3.1 détaillée ci-après, nous retenons G600 pour l'étude des UFP et G150 pour l'étude des FP : le grain fin G600 intensifie la micro-abrasion et la nucléation de fragments submicroniques, particulièrement sur le granite blanc riche en quartz ($\approx 41,4\%$), tandis que le grain plus grossier G150 favorise l'arrachement d'éclats et d'agrégats plus volumineux comptés comme FP, effet moins marqué sur le granite noir ($\approx 0\%$ de quartz). Une lecture rapide de la Figure 3.1 confirme cette tendance générale : les UFP culminent sur granite blanc et bénéficient du grain fin, alors que les FP atteignent leurs maxima avec G150, nettement plus élevés sur granite blanc (HB dominant) et très faibles sur granite noir. Ce choix maximise le contraste signal-bruit, stabilise les ajustements (R^2 élevés)

et s'accorde avec l'ANOVA, qui confirme la prépondérance de N et la contribution marginale de Vf.

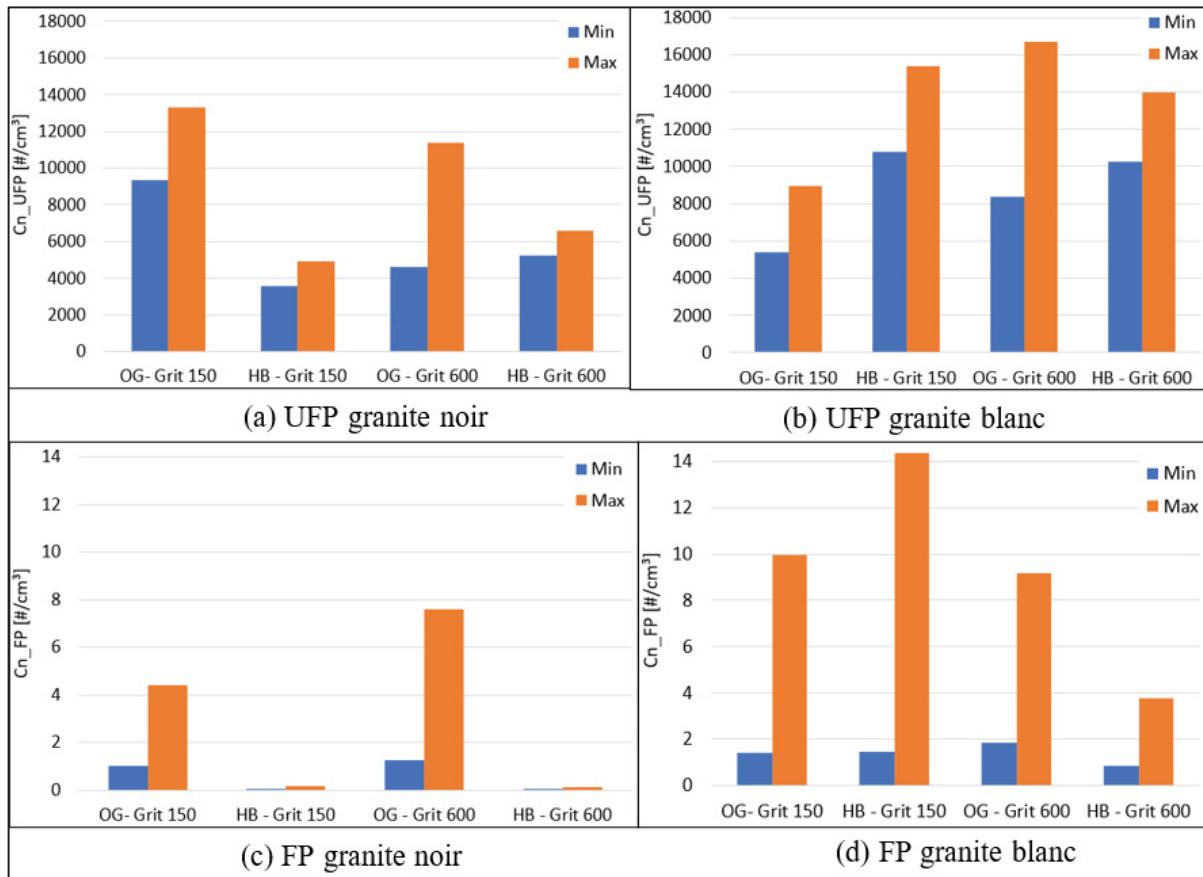


Figure 3.1 Valeurs minimale et maximale des concentrations numériques en particules ultrafines ($C_n \text{ UFP}$) et fines ($C_n \text{ FP}$) lors du polissage humide du granite, selon la géométrie d'outil et la granulométrie (a) UFP, granite noir ; (b) UFP, granite blanc ; (c) FP, granite noir ; (d) FP, granite blanc

3.2.1 Modèles quadratiques

Les équations de régression ont été construites à l'aide d'un modèle polynomial du second ordre incluant :

$$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot V_f + \beta_3 \cdot N^2 + \beta_4 \cdot V_f^2 + \beta_5 \cdot N \cdot V_f \quad (3.1)$$

où Y représente la concentration en particules fines ou ultrafines. L'ajustement statistique des modèles est évalué via le coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté) et la significativité globale du modèle (valeur $p < 0,05$).

Le Tableau 3.1 présente les équations de régression obtenues pour modéliser les concentrations en particules fines (Cn_FP) et ultrafines (Cn_UFP) selon les paramètres de coupe, la forme d'outil, la taille de grain et le type de granit. Les modèles sont issus d'une régression quadratique incluant les effets linéaires, quadratiques et d'interaction. Les coefficients de détermination ajustés (R^2 ajusté) et les valeurs p indiquent la qualité d'ajustement de chaque modèle.

Les ANOVA détaillées et diagnostics (Pareto, résiduels) des modèles quadratiques sont présentés en Annexe III (Tableaux-A III-1 à III-8 ; Figures-A III-1 à III-4).

$$Cn_{FP} = 10^{-4} (0,92 N - 7,7 V_f) \quad (3.2)$$

$$Cn_{FP} = 10^{-3} (1,32 N - 1,96 V_f) + 10^{-6} V_f^2 \quad (3.3)$$

$$Cn_{FP} = 10^{-2} (0,799 N + 1,77 V_f) + 10^{-5} (1,1 V_f^2 - 0,2 N \cdot V_f) \quad (3.4)$$

$$Cn_{FP} = 10^{-3} (1,28 N + 1,39 V_f) + 10^{-6} (N^2 - N \cdot V_f) \quad (3.5)$$

$$Cn_{UFP} = 3 N + 4,23 V_f - 10^{-4} (4,02 N^2 + 0,95 V_f^2 + 7,22 N \cdot V_f) \quad (3.6)$$

$$Cn_{UFP} = -3,8 N + 22,7 V_f + 10^{-3} (0,8 N^2 - 9,97 V_f^2 - 0,14 N \cdot V_f) \quad (3.7)$$

$$Cn_{UFP} = 9,85 N + 0,34 V_f - 10^{-3} (1,585 N^2 - 0,98 V_f^2 + 1,19 N \cdot V_f) \quad (3.8)$$

$$Cn_{UFP} = 11,8 N - 2,6 V_f - 10^{-3} (2,65 N^2 - 0,3 V_f^2 + 1,02 N \cdot V_f) \quad (3.9)$$

Tableau 3.1 Équations de régression et qualité d'ajustement des modèles quadratiques et les interactions selon l'outil, le grain et le type de granit

Outil	Grain	Granit	Réponse	Équation de régression	R^2 ajusté	p (modèle)	
HB	150	Noir	Cn_FP	(3.2)	54,46 %	0,144	
OG				(3.3)	75,57 %	0,046	
HB		Blanc		(3.4)	81,85 %	0,026	
OG				(3.5)	89,37 %	0,009	
HB	600	Noir	Cn_UFP	(3.6)	98,74 %	0,0001	
OG				(3.7)	84,03 %	0,021	
HB		Blanc		(3.8)	98,63 %	0,0001	
OG				(3.9)	85,21 %	0,018	

Le Tableau 3.2 résume les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) associée aux modèles quadratiques. Il identifie les facteurs dominants influençant significativement les émissions de particules, notamment la vitesse de broche (N) et, dans une moindre mesure, l'avance (Vf). La contribution relative de chaque facteur à la variance totale est exprimée en pourcentage.

Tableau 3.2 Résultats ANOVA des modèles quadratiques et les interactions et contributions dominantes selon l'outil, le grain et le granit

Outil	Grain	Granit	Réponse	Facteur dominant	Contribution (%)
HB	150	Noir	Cn_FP	Vitesse de broche (N)	75,4 %
OG					87,8 %
HB		Blanc			86,1 %
OG					90,5 %
HB	600	Noir	Cn_UFP		91,5 %
OG					80,1 %
HB		Blanc			91,9 %
OG					80,0 %

Les résultats confirment que la vitesse de broche (N) est le paramètre le plus influent sur l'émission de particules, expliquant à elle seule entre 80 % et 92 % de la variance selon les configurations. Les contributions de l'avance (Vf) et des interactions N·Vf sont négligeables dans tous les cas étudiés.

Les modèles de régression pour les particules ultrafines (Cn_UFP) présentent une qualité d'ajustement remarquable, en particulier pour les outils Half Beveled à grain G600, sur granite noir ou blanc, avec des R^2 ajustés supérieurs à 98 %. À l'inverse, certains modèles des particules fines (Cn_FP) présentent une variabilité plus grande, notamment pour le granite noir en HB-G150.

Enfin, une distinction claire apparaît entre les deux types de granite : le granite noir montre une variabilité plus marquée liée à sa densité élevée et à sa granulométrie hétérogène, alors que le granite blanc permet une modélisation plus stable et prévisible, surtout avec les outils Ogee.

3.2.2 Modélisation et équations de régression (modèles linéaires simplifiés)

L'analyse repose sur des régressions linéaires entre les variables de coupe (vitesse de rotation N, avance V_f) et les concentrations de particules, selon la géométrie de l'outil, la granulométrie (G150, G600) et le type de granite (noir, blanc).

Les modèles retenus ont la forme :

$$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot V_f \quad (3.10)$$

Les équations suivantes résument les modèles validés :

$$Cn_FP = 10^{-4} (9,46 N - 2,67 V_f) \quad (3.11)$$

$$Cn_FP = 10^{-5} (4 N - 2,4 V_f) \quad (3.12)$$

$$Cn_FP = 10^{-3} (2,88 N - 2,25 V_f) \quad (3.13)$$

$$Cn_FP = 10^{-3} (3,26 N - 1,86 V_f) \quad (3.14)$$

$$Cn_UFP = 1,031 N + 3,93 V_f \quad (3.15)$$

$$Cn_UFP = 1,378 N - 2,293 V_f \quad (3.16)$$

$$Cn_UFP = 2,21 N + 3,94 V_f \quad (3.17)$$

$$Cn_UFP = 3,253 N + 3,36 V_f \quad (3.18)$$

Les résultats des régressions linéaires (ANOVA, Pareto, résiduels) figurent en Annexe III (Tableaux-A III-9 à III-16 ; Figures-A III-5 à III-8).

Tableau 3.3 Équations de régression et qualité d'ajustement des modèles linéaires simplifiés selon l'outil, le grain et le type de granit

Outil	Grain	Granit	Réponse	Équation linéaire	R ² ajusté	p (modèle)	
OG	150	Noir	Cn_FP	(3.11)	84,69 %	0,001	
HB				(3.12)	70,55 %	0,006	
OG		Blanc		(3.13)	92,94 %	0,0001	
HB				(3.14)	84,31 %	0,001	
OG	600	Noir	Cn_UFP	(3.15)	84,47 %	0,001	
HB				(3.16)	93,90 %	0,000	
OG		Blanc		(3.17)	78,92 %	0,002	
HB				(3.18)	92,25 %	0,000	

L’analyse de la variance (ANOVA) met en évidence la contribution des paramètres de coupe à la variance totale des émissions. Voici les résultats synthétiques :

Tableau 3.4 Résultats ANOVA des modèles linéaires simplifiés et contributions dominantes selon l’outil, le grain et le granit

Outil	Grain	Granit	Réponse	Facteur dominant	Contribution (%)	p (significatif)	
OG	150	Noir	Cn_FP	Vitesse de broche (N)	87,76 %	0,007	
HB					75,44 %	0,023	
OG					90,46 %	0,0001	
HB					86,10 %	0,004	
OG		Blanc	Cn_UFP		80,09 %	0,216	
HB					91,50 %	0,011	
OG					80,03 %	0,135	
HB					91,99 %	0,009	

Dans toutes les configurations étudiées, la vitesse de broche N est le facteur dominant. Pour les particules fines Cn_FP avec G150, la part de N varie d’environ 75 à 90 % selon l’outil et le granit, et elle est statistiquement significative dans chaque cas ($p \leq 0,023$). Pour les particules ultrafines Cn_UFP avec G600, N contribue entre 80 et 92 %. La significativité est avérée pour HB-Noir ($p = 0,011$) et HB-Blanc ($p = 0,009$), tandis qu’elle n’est pas significative pour OG-Noir ($p = 0,216$) et OG-Blanc ($p = 0,135$). Ces tendances sont visibles sur les Figures 3.2 et 3.3, où N occupe largement la part des contributions.

L’avance Vf demeure marginale dans l’ensemble des scénarios, avec des contributions comprises entre ~ 8 et 25 % selon la configuration, et sans significativité statistique. Aucune configuration ne montre un effet robuste de Vf sur Cn_FP ou Cn_UFP une fois les p-values considérées.

La prédominance de N s’explique par son impact direct sur l’apport d’énergie et le régime d’arrachement des grains minéraux, qui gouvernent la fragmentation et donc la génération d’aérosols. À l’inverse, Vf agit surtout via le temps de contact et la pression locale moyenne; son influence reste secondaire dans ces conditions, d’autant plus pour des matériaux hétérogènes comme le granite noir. Les résultats confirment que les variations de Vf peuvent

modifier finement la cinématique de contact, mais sans effet statistiquement stable sur les émissions.

Les ajustements les plus stables sont observés dans les cas où la structure du matériau est plus régulière (granite blanc), ainsi qu'avec HB-G600 sur Cn_UFP, ce qui se traduit par une meilleure prédictibilité dans ces scénarios.

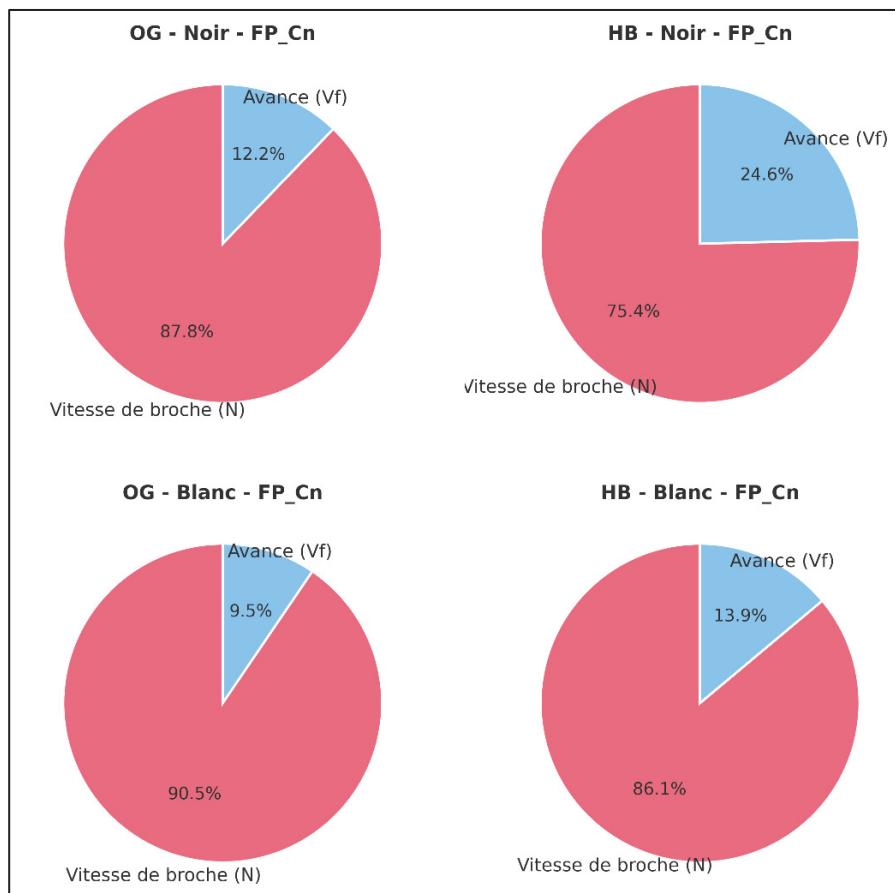


Figure 3.2 Répartition des contributions (%) entre N et Vf pour chaque configuration avec G150

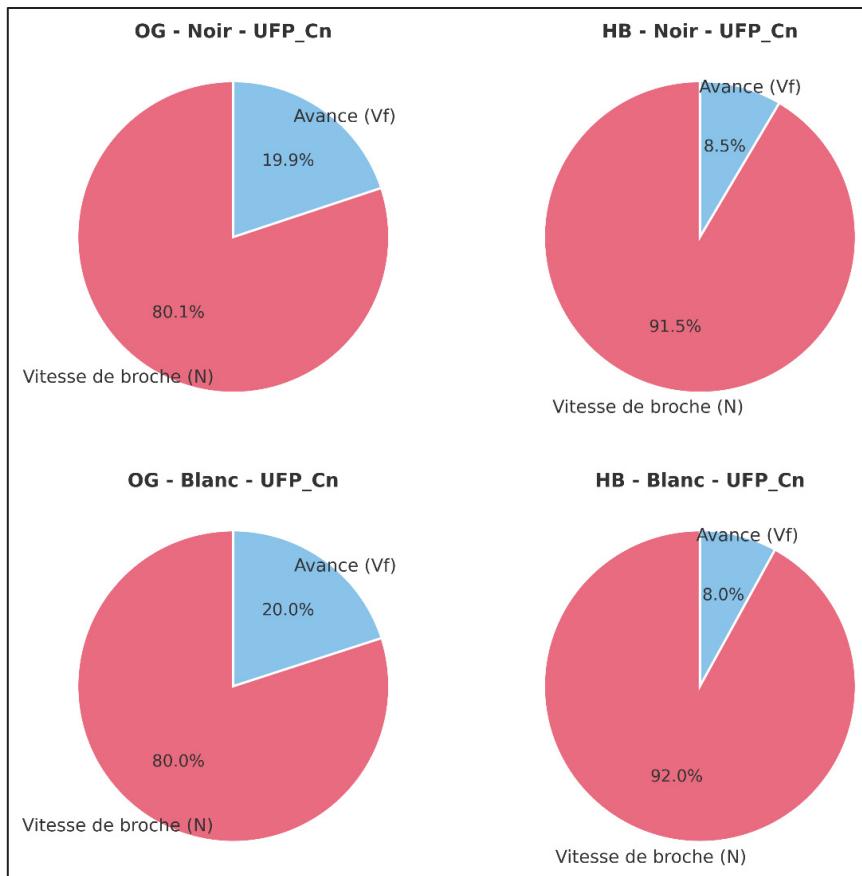


Figure 3.3 Répartition des contributions (%) entre N et Vf pour chaque configuration avec G600

En résumé, les analyses statistiques confirment que la vitesse de rotation de la broche (N) constitue le facteur le plus influent, avec plusieurs configurations où sa valeur p se rapproche du seuil de significativité ($p < 0,10$). À l'inverse, l'avance (Vf) ainsi que les termes quadratiques (N^2 , Vf^2) et l'interaction croisée ($N \cdot Vf$) présentent dans la majorité des cas des valeurs p élevées (souvent $> 0,25$), traduisant une contribution limitée ou non significative.

La Figure 3.4 illustre ces résultats à travers une carte de chaleur des valeurs p, comparant modèles linéaires et quadratiques pour les concentrations en particules fines (Cn_FP) et ultrafines (Cn_UFP). Les cellules blanches correspondent aux effets absents des modèles linéaires, tandis que les cellules colorées indiquent le niveau de significativité statistique.

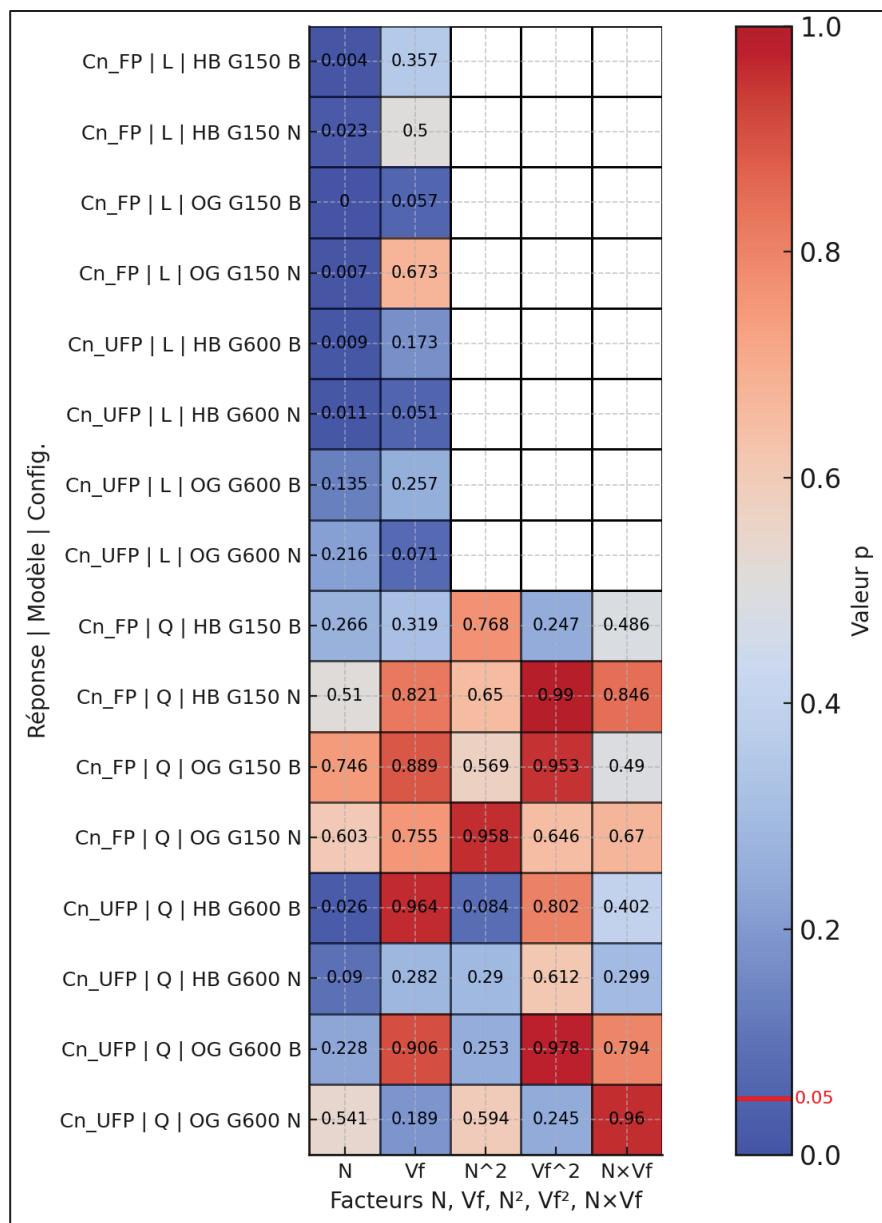


Figure 3.4 Carte de chaleur des valeurs p associées aux facteurs N, Vf, N^2 , Vf^2 et $N \cdot Vf$ dans les modèles quadratiques et linéaires, pour les concentrations en particules fines (Cn_FP) et ultrafines (Cn_UFP)

Globalement, N est le seul facteur qui approche ou atteint régulièrement la significativité. Il est significatif pour Cn_FP (G150) avec HB-Noir ($p = 0,023$), OG-Blanc ($p \approx 0,0001$) et OG-Noir ($p = 0,007$), ainsi que pour Cn_UFP (G600) avec HB-Blanc ($p = 0,009$) et HB-Noir ($p = 0,011$). À l'inverse, pour OG-G600 (noir et blanc), N n'est pas significatif ($p = 0,216$ et $0,135$).

L'avance Vf n'est pas significative dans toutes les configurations; au mieux elle reste proche du seuil pour Cn_UFP linéaire, HB-G600-Noir ($p = 0,051$).

Dans les modèles quadratiques, un seul cas demeure significatif: N pour Cn_UFP, HB-G600-Blanc ($p = 0,026$). Tous les autres termes, y compris N^2 , Vf^2 et $N \cdot Vf$, affichent des p-values élevées (souvent $> 0,25$), ce qui ne justifie pas leur maintien dans des modèles simplifiés.

3.3 Analyse des surfaces de réponse 3D des émissions

Cette section présente une analyse détaillée des réponses 3D obtenues par les surfaces de concentration totale en nombre des particules fines (Cn_FP) et ultrafines (Cn_UFP) selon la vitesse de broche (N) et l'avance (Vf). Les figures analysées correspondent aux combinaisons suivantes : formes d'outil (Ogee et Half Beveled), types de granite (noir et blanc) et grains abrasifs (G150 pour FP et G600 pour UFP).

3.3.1 Émissions de particules fines (Cn_FP)

Les concentrations en particules fines (Cn_FP) issues du polissage humide dépendent fortement de la vitesse de broche (N), tandis que l'effet de l'avance (Vf) est plus modéré, sauf en interaction sur le granite blanc. Les outils Ogee génèrent systématiquement plus de particules fines que les outils Half Beveled, ce qui s'explique par leur géométrie plus agressive favorisant la micro-fracturation du matériau.

Sur granite noir, l'outil Ogee atteint un maximum de $\sim 4,3 \text{#/cm}^3$ à $N = 3500 \text{ rpm}$ et $Vf = 500 \text{ mm/min}$, marquant une augmentation sensible avec la vitesse de broche. À l'opposé, la configuration Half Beveled-granite noir est la plus propre, avec des émissions comprises entre 0,01 et $0,18 \text{#/cm}^3$, et une surface de réponse stable sur l'ensemble des paramètres.

Sur granite blanc, les effets d'interaction entre N et Vf deviennent plus marqués. L'outil Half Beveled génère la concentration maximale de $\sim 14,0 \text{#/cm}^3$ à $N = 3500 \text{ rpm}$ et $Vf = 500 \text{ mm/min}$, reflétant une montée rapide de l'abrasion avec les vitesses élevées. L'outil Ogee atteint un pic plus modéré de $\sim 9,9 \text{#/cm}^3$ à $N = 3500 \text{ rpm}$ et $Vf = 1000 \text{ mm/min}$, mais avec

une topographie plus instable. Cette différence s'explique par la structure abrasive et hétérogène du granite blanc, qui amplifie l'usure mécanique et la libération de particules.

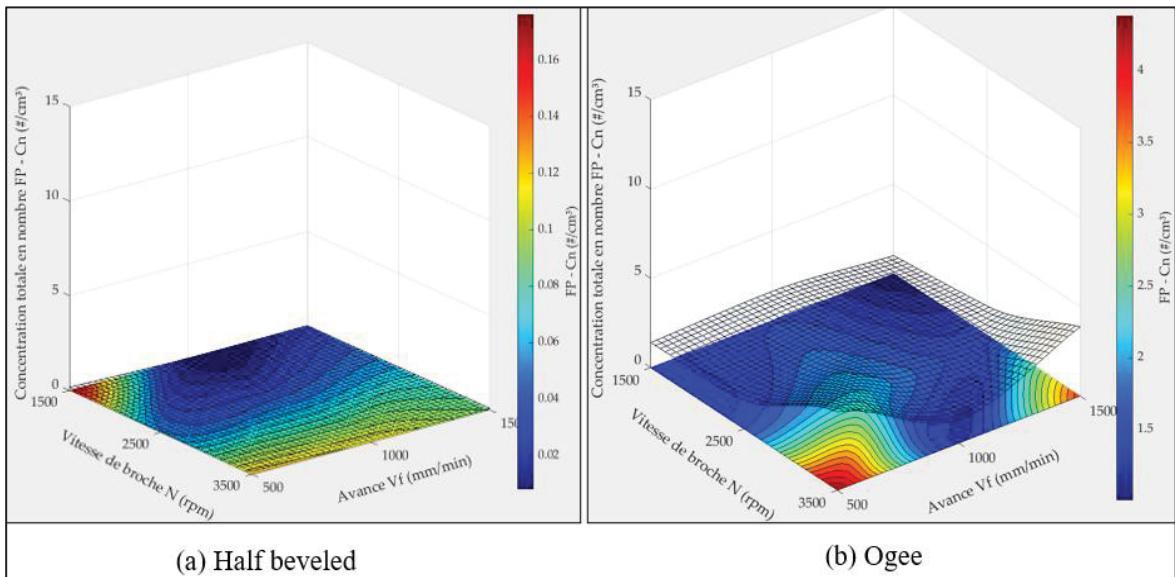


Figure 3.5 Graphiques de surface 3D des émissions de particules fines (Cn_FP) lors de la finition humide des bords sur granite noir (grain 150) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee

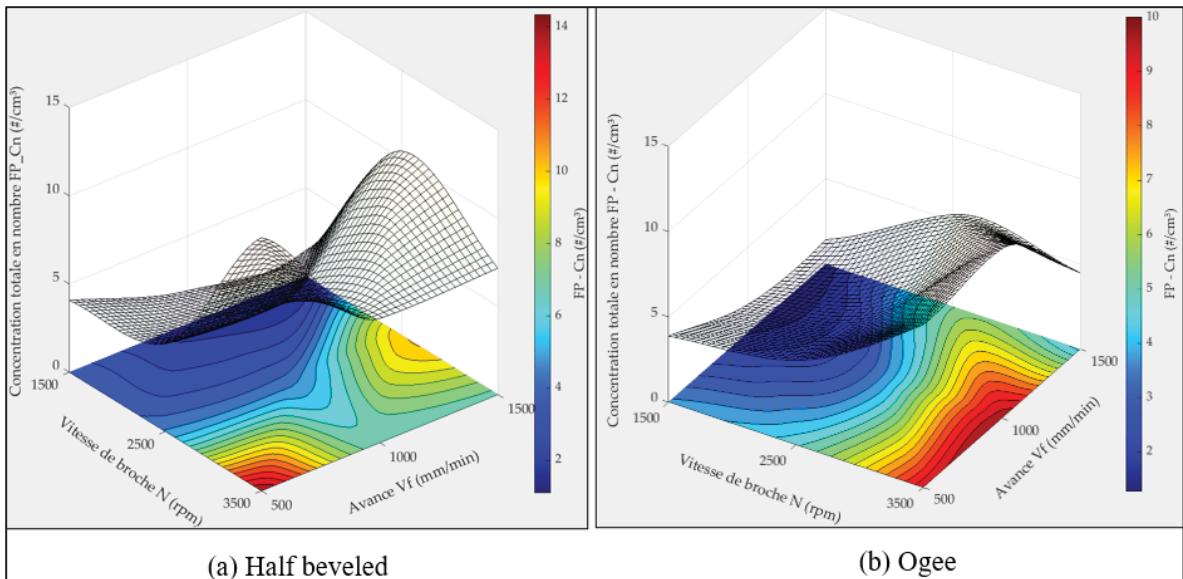


Figure 3.6 Graphiques de surface 3D des émissions de particules fines (Cn_FP) lors de la finition humide des bords sur granite blanc (grain 150) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee

3.3.2 Émissions de particules ultrafines (Cn_UFP)

Les émissions de particules ultrafines (Cn_UFP) dépassent largement celles des FP, atteignant jusqu'à 16 500 #/cm³ selon les conditions de coupe. La vitesse de broche (N) reste un facteur clé, mais son interaction avec l'avance (Vf) influence fortement les émissions, notamment sur le granite blanc.

Les outils Ogee sont associés aux plus fortes concentrations : sur granite noir, un pic d'environ 11 000 #/cm³ est atteint à N = 1500 rpm et Vf = 1000 mm/min. Sur granite blanc, la variabilité est marquée, avec un maximum d'environ 16 500 #/cm³ observé à basse vitesse (1500 rpm) et faible avance (500 mm/min), ce qui reflète une dynamique d'usure accélérée liée à la structure abrasive du matériau.

À l'inverse, les outils Half Beveled produisent des émissions plus modérées et stables. Sur granite noir, les valeurs fluctuent peu, autour de 6400 #/cm³, tandis que sur granite blanc, une montée progressive avec Vf est observée, culminant à environ 13 500 #/cm³.

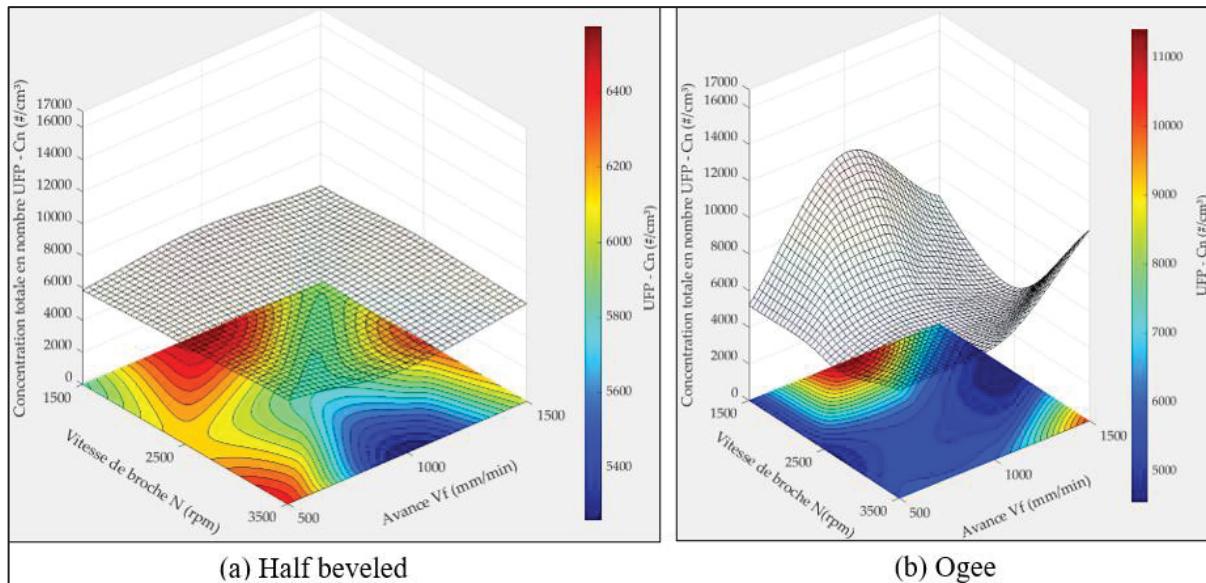


Figure 3.7 Graphiques de surface 3D des émissions de particules ultra fines (Cn_UFP) lors de la finition humide des bords sur granite noir (grain 600) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee

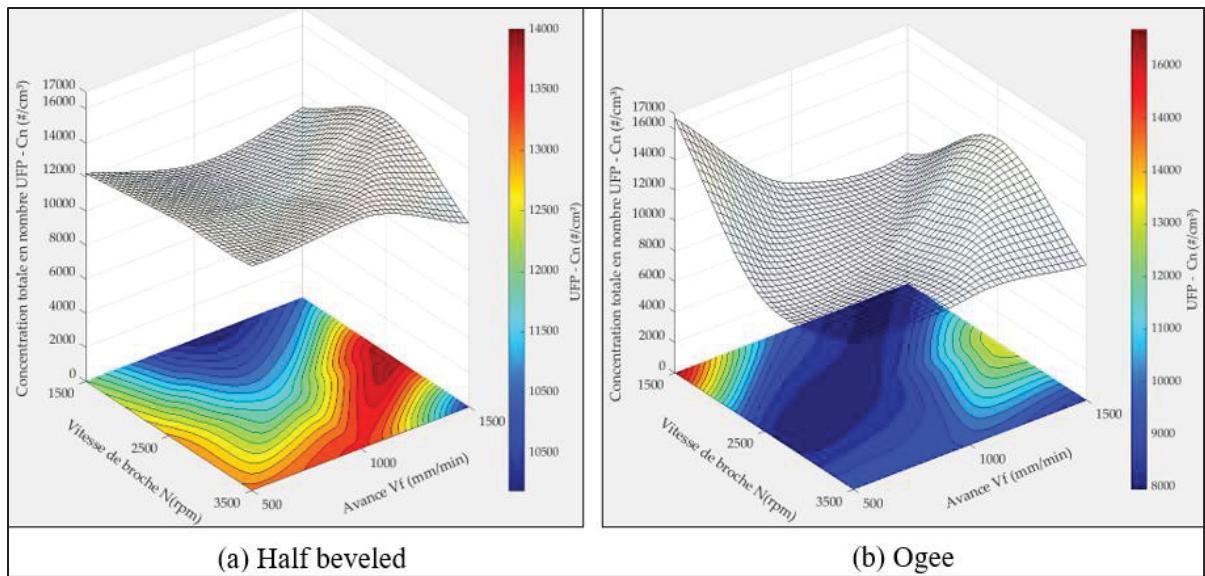


Figure 3.8 Graphiques de surface 3D des émissions de particules ultra fines (C_n _UFP) lors de la finition humide des bords sur granite blanc (grain 600) (a) outil de forme Half beveled, (b) outil de forme Ogee

3.4 Influence de la géométrie de l'outil sur les émissions

Afin de comparer l'effet de la géométrie de l'outil sur les émissions de particules, une configuration expérimentale standardisée a été retenue : granite blanc, grain G150 (FP), grain G600 (UFP), $N = 2500$ rpm, $V_f = 1000$ mm/min. Le granite blanc, homogène et riche en quartz, assure une meilleure stabilité des mesures. Le grain G600 met en évidence les différences d'émission d'UFP, tandis que le G150 reste représentatif pour les FP. Les paramètres de coupe intermédiaires évitent les effets extrêmes, garantissant des conditions d'usinage réalistes et comparables. Cette configuration minimise les biais et optimise la sensibilité expérimentale.

3.4.1 Influence de la géométrie de l'outil sur les particules fines (FP)

L'analyse de l'impact de la géométrie d'outil sur les particules fines (FP) a été conduite à partir de la concentration surfacique spécifique (C_s _FP). Les tests ont été réalisés pour le granite blanc avec une taille de grain G150.

La Figure 3.9 présente les valeurs moyennes de Cs_FP pour les outils Ogee et Half Beveled. On observe une tendance à une concentration surfacique légèrement plus élevée pour l'outil Half Beveled. Toutefois, les barres d'erreur représentant l'intervalle de confiance à 95 % se chevauchent nettement, suggérant l'absence de différence significative.

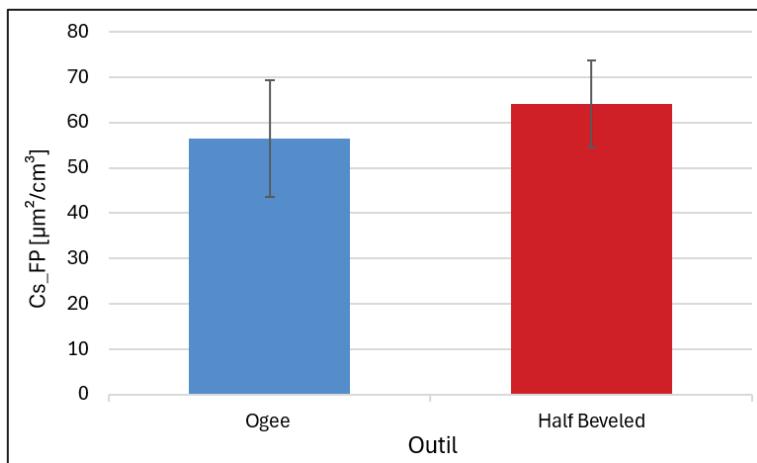


Figure 3.9 Concentration surfacique spécifique des particules fines (Cs_FP) en fonction de la géométrie d'outil
(Granite blanc, grain G150, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)

Pour confirmer cette tendance, une analyse de variance (ANOVA à un facteur) a été menée sur Cs_FP. Le tableau suivant présente les résultats :

Tableau 3.5 Résultats ANOVA pour Cs_FP_1 selon l'outil (G150 – granite blanc)

Source de variation	DL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Outil	1	394,3	394,3	0,15	0,708
Erreur	16	43486	2717,9	-	-
Total	17	43880,3	-	-	-

Les résultats confirment que l'effet de la géométrie d'outil sur Cs_FP n'est pas significatif ($p = 0,708$), avec une grande dispersion des valeurs pour les deux outils. Cela est cohérent avec l'analyse graphique, et souligne que la variabilité expérimentale masque toute tendance nette dans cette configuration.

3.4.2 Influence de la géométrie de l'outil sur les particules ultrafines (UFP)

Contrairement aux particules fines (FP), les particules ultrafines (UFP) présentent une granulométrie inférieure à 100 nm, et une capacité accrue de pénétration dans les voies respiratoires profondes. Leur analyse est donc essentielle dans l'évaluation des risques sanitaires liés à l'usinage du granite.

La Figure 3.10 présente la comparaison graphique des concentrations surfaciques spécifiques ($C_s\text{-UFP}$) entre les outils Ogee et Half Beveled, avec une taille de grain G600. On constate une différence visuelle marquée que l'outil Half Beveled génère une $C_s\text{-UFP}$ significativement plus élevée.

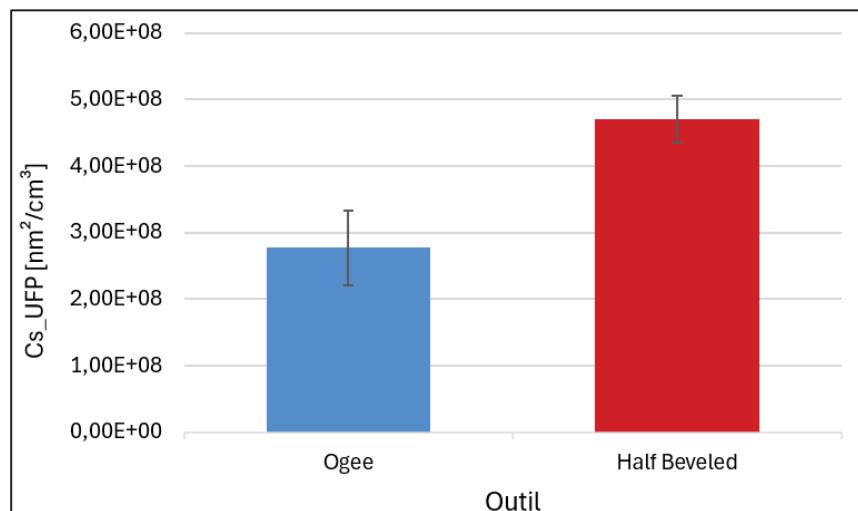


Figure 3.10 Concentration surfacique spécifique des particules ultrafines ($C_s\text{-UFP}$) en fonction de la géométrie d'outil (Granite blanc, grain G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)

Pour valider cette observation, une ANOVA à un facteur a été réalisée. Le tableau suivant synthétise les résultats :

Tableau 3.6 Résultats ANOVA pour $C_s\text{-UFP}$ selon l'outil (G600 – granite blanc)

Source de variation	DL	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Outil	1	$1,49331.10^{17}$	$1,49331.10^{17}$	35,12	0,000
Erreur	16	$6,80325.10^{16}$	$4,25203.10^{15}$	-	-
Total	17	$2,17364.10^{17}$	-	-	-

Les résultats indiquent que l'effet de l'outil sur la concentration surfacique spécifique des UFP est hautement significatif ($p < 0,001$). L'outil Half Beveled présente une valeur moyenne nettement supérieure, avec des intervalles de confiance bien distincts.

Ces observations suggèrent que la géométrie de l'outil influence fortement la génération de particules ultrafines, à la fois en nombre et en surface. Cette sensibilité pourrait être liée à la configuration de coupe plus agressive ou localisée induite par la géométrie Half Beveled, favorisant la micro-fracturation du granite.

3.5 Influence du type de granite sur les émissions

Afin d'évaluer l'influence du type de granite (noir vs blanc) sur la concentration massique des particules fines (Cm_FP) et ultrafines (Cm_UFP), une série d'analyses statistiques a été menée sur des échantillons issus de neuf conditions expérimentales distinctes (N et Vf variables), avec granulométries abrasives fixées (G150 pour FP et G600 pour UFP).

Des tests de normalité (Anderson-Darling) ont été effectués sur les sous-groupes (granite noir et blanc, séparément pour Cm_FP et Cm_UFP). Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.7 Résultats des tests de normalité pour la concentration massique des particules fines (Cm_FP) et ultrafines (Cm_UFP) selon le type de granite

Variable	Granite	Moyenne	Écart-type	p-value normalité	Interprétation
Cm_UFP	Noir	16,53 µg/m ³	2,53	> 0,10	Distribution normale
Cm_UFP	Blanc	40,98 µg/m ³	6,08	> 0,10	Distribution normale
Cm_FP	Blanc	0,0578 mg/m ³	0,0381	> 0,10	Distribution normale
Cm_FP	Noir	0,00025 mg/m ³	0,00052	< 0,01	Distribution non normale

Sur cette base, le test t de Student a été utilisé pour comparer Cm_UFP entre les deux granites, ainsi que Cm_FP du granite blanc. Le test non paramétrique de Mann–Whitney, plus robuste aux écarts de normalité, a été appliqué pour Cm_FP du granite noir.

Pour les particules ultrafines (UFP), le test t à deux échantillons a révélé une différence significative entre les granites ($p < 0,001$). Le granite blanc produit une concentration massique moyenne de $40,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit plus du double de celle du granite noir ($16,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$). L'intervalle de confiance à 95 % de la différence se situe entre $-29,34$ et $-19,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, excluant ainsi la valeur nulle.

Pour les particules fines (FP), le granite blanc génère également une Cm_FP significativement plus élevée ($0,0578 \text{ mg}/\text{m}^3$) comparée à celle du granite noir ($0,00025 \text{ mg}/\text{m}^3$). La distribution non normale des données pour le granite noir a nécessité l'emploi du test de Mann–Whitney, qui confirme la significativité de cette différence ($p < 0,001$). L'intervalle de confiance de la différence entre les médianes est $[-0,1154 ; -0,0170] \text{ mg}/\text{m}^3$, confirmant l'écart observé.

La Figure 3.11 illustre ces résultats à l'aide de boîtes à moustaches comparant Cm_FP et Cm_UFP pour les deux types de granite. On observe des médianes et des amplitudes nettement plus élevées pour le granite blanc, traduisant une émission massique plus importante pour les deux catégories de particules.

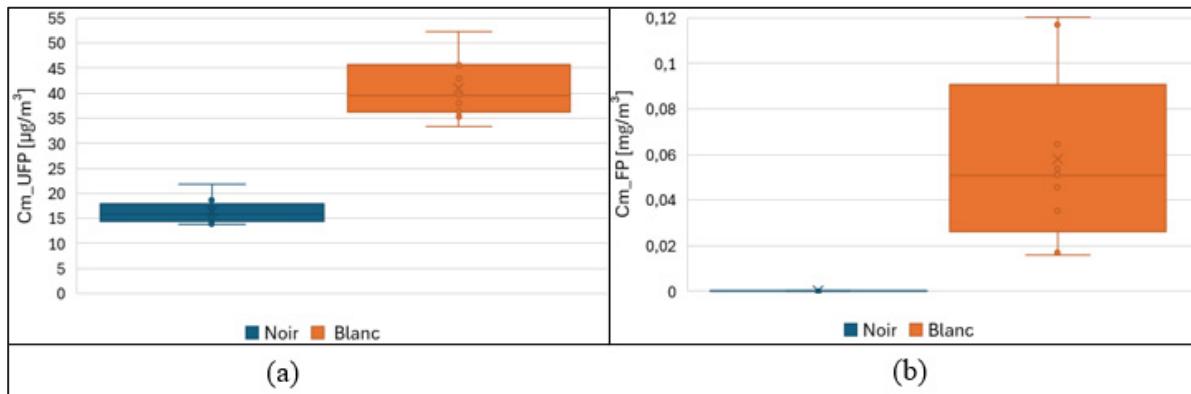


Figure 3.11 Comparaison des concentrations massiques en particules fines (FP) et ultrafines (UFP) selon le type de granite, (a) concentration massique des particules ultrafines Cm_UFP (outil Half Beveled, grain 600), (b) concentration massique des particules fines Cm_FP (outil Half Beveled, grain 150)

3.6 Conclusion

L'étude statistique révèle que la vitesse de broche (N) est le paramètre de coupe prédominant dans la génération de particules, expliquant jusqu'à 92 % de la variance observée, tandis que l'effet de l'avance (Vf) reste marginal, sauf cas spécifique. Les outils Half Beveled associés au

granite blanc et au grain G600 se distinguent par une génération accrue d'UFP, avec des modèles hautement prédictifs (R^2 ajusté > 98 %). L'analyse par surface de réponse confirme la sensibilité des émissions aux conditions de coupe et au matériau, le granite blanc favorisant des concentrations plus élevées. Enfin, les comparaisons entre granites montrent que le granite blanc induit significativement plus d'émissions massiques que le granite noir, validées par des tests statistiques adaptés à la distribution des données.

CHAPITRE 4

ANALYSE DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE ET DES FORCES DE COUPE

4.1 Introduction

L'étude de la rugosité de surface et des forces de coupe constitue un axe central dans l'évaluation des performances du polissage humide des granites. Ces paramètres traduisent à la fois l'efficacité du processus d'enlèvement de matière et la qualité finale des arêtes finies. L'analyse menée dans ce chapitre vise à établir les liens entre la géométrie de l'outil, les conditions de coupe (N et V_f), la taille de grain abrasif et le type de matériau (granite noir et blanc). En combinant des approches statistiques (ANOVA, régression) et des visualisations multi-échelles (profils de rugosité, boxplots, surfaces de réponse 3D), l'objectif est de dégager les facteurs dominants et les interactions critiques influençant simultanément la qualité de surface (R_a) et les charges mécaniques (F_x , F_y , F_z). Le choix d'intégrer à la fois des mesures dynamiques (profils temporels des forces) et des analyses en conditions de finition (grain G600) permet d'obtenir une vision complète du comportement tribo-mécanique du couple outil–matériau dans les phases les plus sensibles du procédé.

4.2 Forces de coupe

4.2.1 Statistiques par configuration

Les efforts latéraux F_x sont particulièrement faibles pour les outils Chamfer et Concave, avec des valeurs moyennes inférieures à 10 N (Tableau 4.1, Figure 4.2). Cette faible sollicitation tangentielle traduit une interaction douce avec la surface du matériau. À l'inverse, les outils Half Beveled et Ogee présentent des moyennes plus élevées (respectivement 106 N et 62 N) et des pics marqués ($F_x \text{ max} \approx 688 \text{ N}$ et 347 N), comme l'indique la Figure 4.3. Leurs écarts-types (σ) respectifs, notamment 66 N pour Half Beveled, illustrent une forte instabilité des charges latérales (Figure 4.1).

Tableau 4.1 Statistiques descriptives des composantes d'effort par outil (moyenne, max, σ); (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)

		Outil			
		Chamfer	Concave	Half Beveled	Ogee
Fx	Moy (N)	4,53	7,58	105,94	62,01
	Max (N)	7,93	10,99	688,48	347,29
	σ	0,85	0,75	66,01	54,11
Fy	Moy (N)	123,27	122,64	82,88	35,69
	Max (N)	944,21	464,48	384,52	157,47
	σ	97,84	62,40	58,56	39,84
Fz	Moy (N)	138,35	187,58	17,19	14,25
	Max (N)	1625,06	1672,36	248,72	168,76
	σ	169,95	128,38	25,14	24,18
Fxy	Moy (N)	123,49	123,23	138,87	77,72
	Max (N)	944,22	464,54	689,24	356,49
	σ	93,74	61,67	76,65	35,15

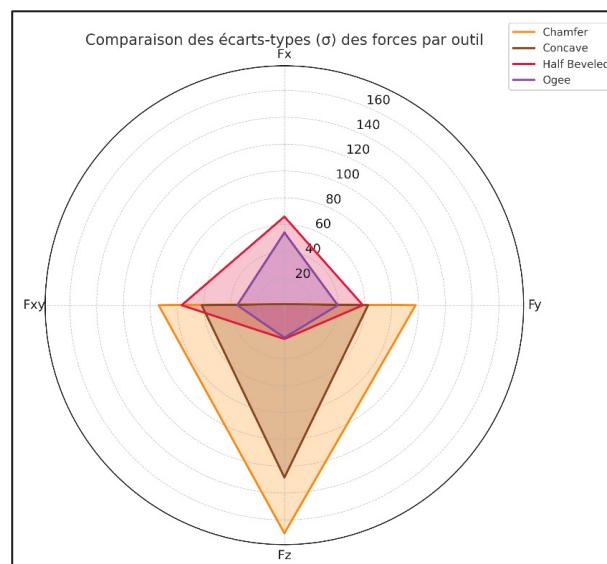


Figure 4.1 Diagramme radar des écarts-types des forces (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)

Concernant les efforts transversaux Fy, Chamfer et Concave affichent les valeurs moyennes les plus élevées (≈ 123 N), avec un maximum remarquable pour Chamfer (Fy max ≈ 944 N). Ces résultats, visibles sur le Tableau 4.1 et la Figure 4.3, suggèrent une pénétration latérale importante, liée à leur géométrie. En revanche, Half Beveled (Fy moy = 83 N, $\sigma = 58$ N) et Ogee (Fy moy = 36 N, $\sigma = 40$ N) manifestent des sollicitations moindres et un comportement plus stable.

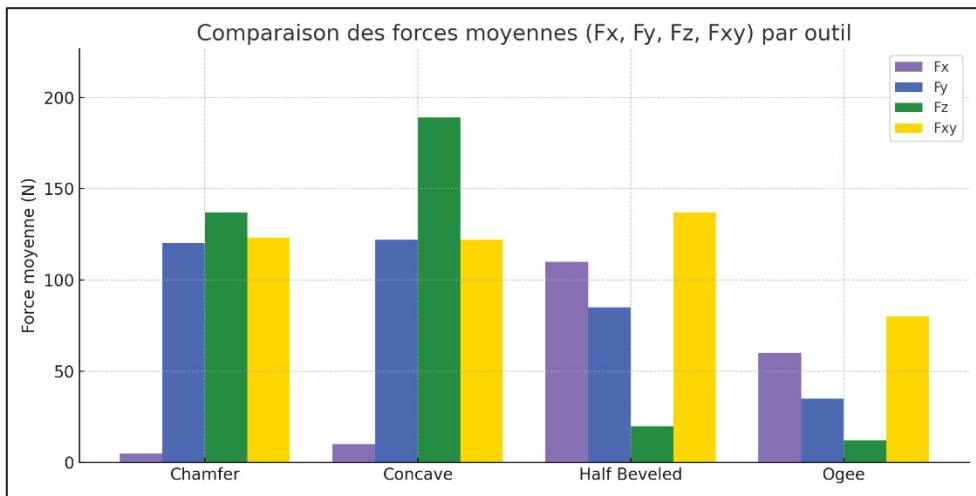


Figure 4.2 Histogramme des forces moyennes (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)

Les efforts verticaux Fz révèlent un contraste marqué. Concave et Chamfer imposent des sollicitations d'enfoncement très élevées, avec Fz max > 1600 N et Fz moy > 130 N (Tableau 4.1, Figure 4.3). Les écarts-types correspondants (170 N et 128 N) traduisent une variabilité significative des poussées verticales, possiblement liées à une coupe agressive. À l'opposé, Half Beveled et Ogee se caractérisent par de très faibles moyennes (17 N et 14 N), avec une dispersion modérée (Figure 4.1), ce qui reflète un engagement plus superficiel.

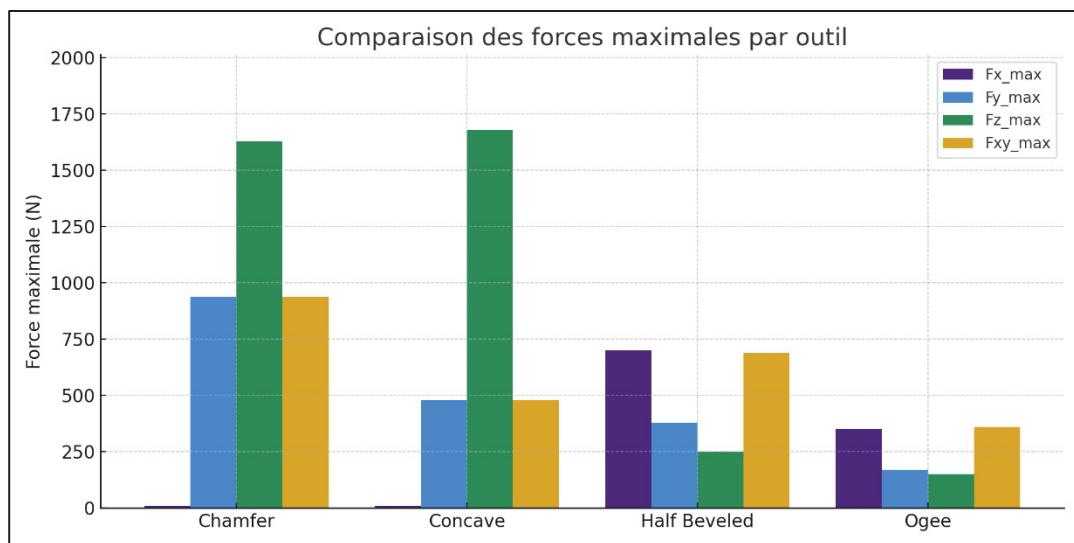


Figure 4.3 Histogramme des forces maximales (Granite noir, G600, N = 2500 rpm, Vf = 1000 mm/min)

L'effort résultant F_{xy} permet de résumer la sollicitation globale dans le plan. Chamfer et Concave présentent des valeurs moyennes proches (≈ 123 N), mais avec une dispersion plus faible pour Concave ($\sigma = 62$ N contre 94 N). Half Beveled montre la F_{xy} moyenne la plus élevée (139 N) et aussi la plus instable ($\sigma = 77$ N), suggérant une coupe énergique mais irrégulière. Ogee confirme son profil équilibré avec une F_{xy} modérée (78 N) et un écart-type le plus faible ($\sigma = 35$ N), ce qui reflète une meilleure régularité opérationnelle (Figure 4.1).

4.2.2 Résultats de l'analyse de variance (ANOVA)

Cette analyse statistique repose sur les p-valeurs associées aux effets principaux (outil, type de granit, vitesse de rotation, vitesse d'avance, taille du grain abrasif) ainsi qu'à leurs interactions. Les outils étudiés dans cette expérience sont le Half Beveled et le Ogee, sélectionnés pour leur géométrie contrastée. Le Tableau 4.2 ci-dessous résume les p-valeurs issues du modèle linéaire pour F_x , tandis que le Tableau 4.3 présente celles associées à F_y , et le Tableau 4.4 celles relatives à F_z . La Figure 4.4 fournit une représentation synthétique par carte de chaleur, facilitant la lecture de l'intensité des effets.

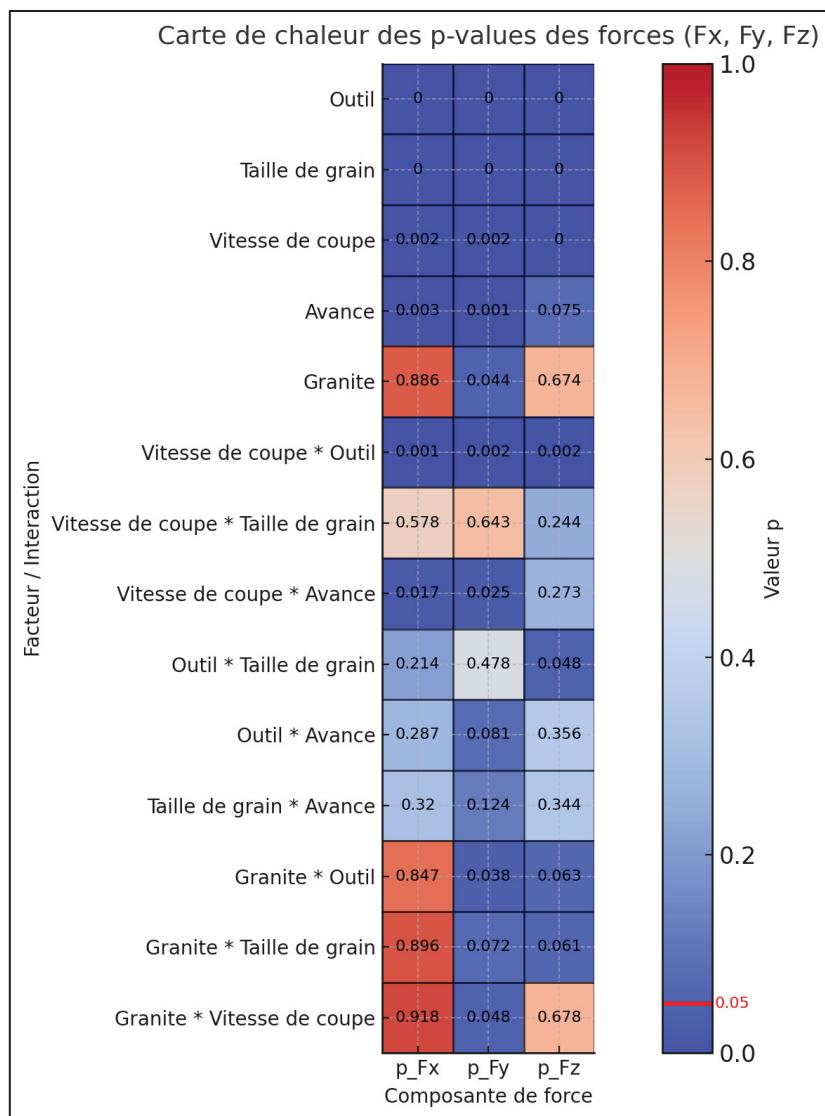


Figure 4.4 Carte de chaleur des p-valeurs des effets principaux et interactions pour Fx, Fy et Fz

L'ANOVA révèle que l'outil ($p = 0,0001$) et la taille de grain ($p = 0,0001$) ont un effet hautement significatif sur Fx, traduisant l'influence directe de la géométrie de coupe et de l'abrasivité sur l'effort tangent. Les effets de la vitesse de rotation ($p = 0,002$) et de la vitesse d'avance ($p = 0,003$) sont également significatifs, indiquant que les conditions de coupe influencent la stabilité tangentielle. En revanche, le type de granite n'a pas d'effet direct significatif ($p = 0,886$).

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort tangent Fx en fonction des facteurs principaux et de leurs interactions

Facteur / Interaction	DL	SC	CM	F	p-valeur
Outil	1	186536,2	186536,2	12,4	0,0001
Taille de grain	2	306804,6	153402,3	10,2	0,0001
Vitesse de coupe	2	130402,7	65201,4	4,4	0,002
Avance	2	132604,1	66302,1	4,4	0,003
Granite	1	516,7	516,7	0,0	0,886
Vitesse de coupe * Outil	2	301701,8	150850,9	10,0	0,001
Vitesse de coupe * Taille de grain	4	29964,3	7491,1	0,5	0,578
Vitesse de coupe * Avance	4	123365,7	30841,4	2,0	0,017
Outil * Taille de grain	2	39343,9	19672,0	1,3	0,214
Outil * Avance	2	26923,7	13461,8	0,9	0,287
Taille de grain * Avance	4	46747,9	11687,0	0,8	0,320
Granite * Outil	1	2082,3	2082,3	0,1	0,847
Granite * Taille de grain	2	1380,0	690,0	0,0	0,896
Granite * Vitesse de coupe	2	716,4	358,2	0,0	0,918
Erreur	75	1128682,5	15049,1	-	-
Total	105	2994482,0		-	-

Comme illustré dans le Tableau 4.2 et visible sur la Figure 4.4, certaines interactions jouent également un rôle non négligeable : l'interaction Vitesse de coupe * Outil ($p = 0,001$) est très significative, tandis que l'interaction Outil * Taille de grain ($p = 0,214$) présente un effet modéré mais à considérer dans certains cas. Ces effets croisés confirment l'importance d'une approche combinée pour comprendre la variabilité de Fx.

La composante Fy est influencée de manière plus complexe. Les facteurs outil ($p = 0,0001$), vitesse de rotation ($p = 0,002$), vitesse d'avance ($p = 0,001$), type de granite ($p = 0,044$) et taille de grain ($p = 0,0001$) montrent tous des effets statistiquement significatifs (voir Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort transversal Fy en fonction des facteurs principaux et de leurs interactions

Facteur / Interaction	DL	SC	CM	F	p-valeur
Outil	1	228581	228581	18,0	0,0001
Taille de grain	2	225914	112957	8,9	0,0001
Vitesse de coupe	2	131873	65936	5,2	0,002
Avance	2	96514	48257	3,8	0,001
Granite	1	5597	5597	0,4	0,044
Vitesse de coupe * Outil	2	170804	85402	6,7	0,002
Vitesse de coupe * Taille de grain	4	38376	9594	0,8	0,643
Vitesse de coupe * Avance	4	96917	24229	1,9	0,025
Outil * Taille de grain	2	60745	30373	2,4	0,478
Outil * Avance	2	37035	18518	1,5	0,081
Taille de grain * Avance	4	56479	14120	1,1	0,124
Granite * Outil	1	48919	48919	3,9	0,038
Granite * Taille de grain	2	44310	22155	1,7	0,072
Granite * Vitesse de coupe	2	44697	22349	1,8	0,048
Erreur	75	951849	12691	-	-
Total	105	2179189	-	-	-

La Figure 4.4 met en évidence plusieurs interactions significatives : Vitesse de coupe * Outil ($p = 0,002$), Vitesse de coupe * Avance ($p = 0,025$), Granite * Outil ($p = 0,038$) et Granite * Taille de grain ($p = 0,072$). Ces résultats traduisent une forte sensibilité de Fy aux interactions entre le matériau, l'outil et les conditions d'usinage, en particulier dans le cas des contacts transversaux.

Concernant Fz, les effets principaux sont prédominants : outil ($p = 0,0001$), vitesse de rotation ($p = 0,0001$) et taille de grain ($p = 0,0001$) sont hautement significatifs, comme le montrent le Tableau 4.4 et la Figure 4.4.

Tableau 4.4 Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'effort vertical Fz en fonction des facteurs principaux et de leurs interactions

Facteur / Interaction	DL	SC	CM	F	p-valeur
Outil	1	106664,8	106664,8	8,3	0,0001
Taille de grain	2	226063,7	113031,9	8,8	0,0001
Vitesse de coupe	2	159962,0	79981,0	6,3	0,0001
Avance	2	37831,3	18915,6	1,5	0,075
Granite	1	17898,6	17898,6	1,4	0,674
Vitesse de coupe * Outil	2	51869,7	25934,9	2,0	0,002
Vitesse de coupe * Taille de grain	4	128560,3	32140,1	2,5	0,244
Vitesse de coupe * Avance	4	85288,6	21322,1	1,7	0,273
Outil * Taille de grain	2	81135,2	40567,6	3,1	0,048
Outil * Avance	2	52455,3	26227,7	2,0	0,356
Taille de grain * Avance	4	90260,8	22565,2	1,8	0,344
Granite * Outil	1	41245,2	41245,2	3,2	0,063
Granite * Taille de grain	2	39987,4	19993,7	1,5	0,061
Granite * Vitesse de coupe	2	25910,6	12955,3	1,0	0,678
Erreur	75	959222,2	12789,6	-	-
Total	105	2309403,6	-	-	-

L'effet du type de granite n'est pas significatif isolément ($p = 0,674$), mais l'interaction Outil * Taille de grain ($p = 0,048$) s'avère importante, signalant une réponse dépendante de la combinaison outil-abrasif. À la différence de Fy, les interactions impliquant la vitesse d'avance ou le granite seul sont beaucoup moins marquées sur Fz.

Ces résultats confirment que la géométrie de l'outil est systématiquement significative pour toutes les composantes d'effort, suivie du type de granite et du grain abrasif, surtout pour Fz.

L'interprétation de ces résultats guidera l'optimisation des conditions de coupe pour réduire les charges mécaniques selon les priorités (pénétration, friction, stabilité).

4.2.3 Analyse des efforts de coupe Fz selon les facteurs d'usinage

Dans cette section, l'analyse se concentre sur la force normale Fz, considérée comme la composante la plus représentative des sollicitations mécaniques exercées pendant le polissage. Elle reflète directement la résistance du matériau à la pénétration de l'outil, varie de manière significative selon les facteurs d'usinage, et constitue un indicateur pertinent pour évaluer les conditions de coupe et comparer les configurations expérimentales.

4.2.3.1 Influence du matériau

Pour isoler l'influence du matériau, les autres facteurs ont été maintenus constants. Après essais de sensibilité, il a été décidé d'utiliser l'ensemble des tailles de grain abrasif (45, 150, 300, 600) avec un outil de type Ogee, dont la géométrie agressive accentue les contrastes mécaniques. Les conditions de coupe ont été fixées à $N = 2500$ rpm et $Vf = 1000$ mm/min, valeurs médianes assurant une bonne stabilité du processus. Ce choix permet d'explorer la réponse du matériau à différents régimes d'abrasion, de l'ébauche à la finition, tout en mettant en évidence les écarts de résistance à la coupe entre les granites. L'outil Ogee, en concentrant les charges sur des zones étroites de contact, amplifie les effets de dureté, d'hétérogénéité minéralogique et de comportement à la rupture, ce qui en fait un révélateur efficace des différences de comportement entre granite noir et granite blanc.

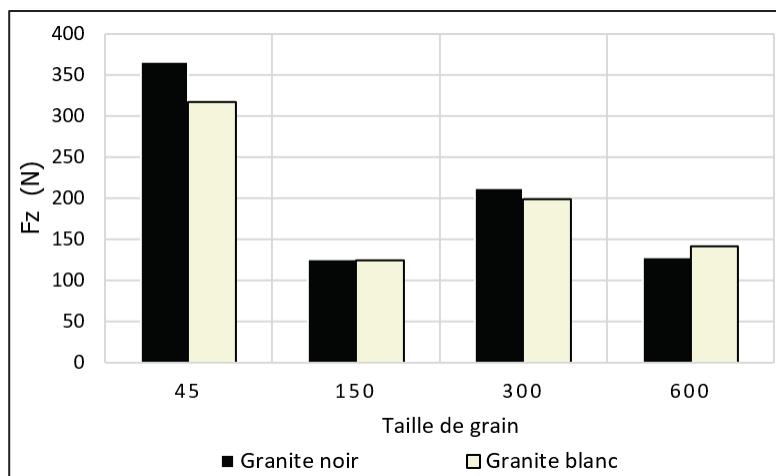


Figure 4.5 Variation de la force normale F_z en fonction de la taille de grain pour le granite noir et le granite blanc (outil = Ogee, $N = 2500$ rpm, $V_f = 1000$ mm/min)

La Figure 4.5 présente la variation de la force normale F_z en fonction de la taille de grain pour les deux granites. Il apparaît clairement que le granite noir génère des efforts F_z systématiquement plus élevés que le granite blanc, pour l'ensemble des grains abrasifs testés. Cette différence est particulièrement marquée en phase d'ébauche (grain 45), où les contraintes d'enfoncement sont maximales. Ce comportement peut être attribué à la densité minéralogique plus importante et à la structure plus hétérogène du granite noir, qui s'oppose davantage à la pénétration de l'outil. En finition (grain 600), les charges diminuent significativement pour les deux matériaux, traduisant une abrasion plus douce, mais l'écart entre les deux granites reste maintenu, ce qui indique une influence persistante de la nature du matériau, même à faible sollicitation.

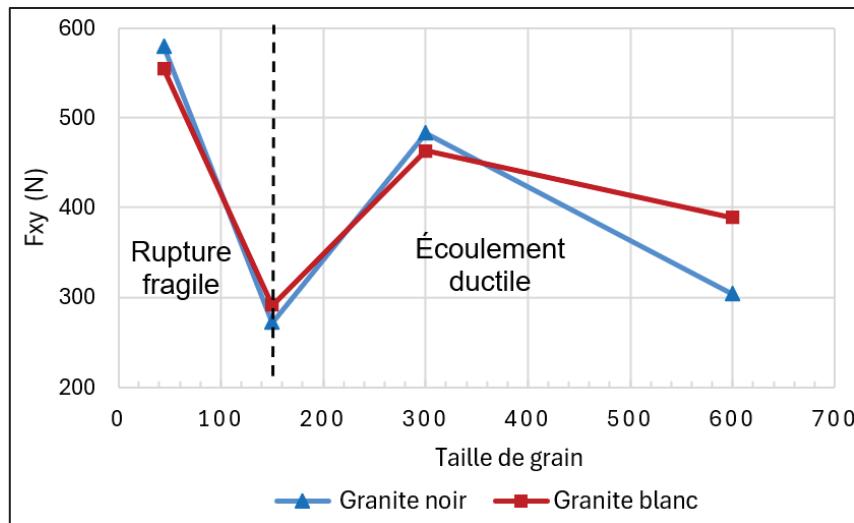


Figure 4.6 Évolution de la force tangente combinée F_{xy} selon la taille de grain pour le granite noir et le granite blanc (outil = Ogee, $N = 2500$ rpm, $V_f = 1000$ mm/min)

La Figure 4.6 montre l'évolution de la force combinée F_{xy} selon la taille de grain, en distinguant deux régimes : rupture fragile (G45–G150) et écoulement ductile (G300–G600). On observe une chute marquée de F_{xy} entre les grains 45 et 150, suivie d'une remontée vers le grain 300. Cette transition reflète un changement de mécanisme d'enlèvement de matière : les gros grains provoquent une fracture cassante des cristaux, tandis que les grains fins entraînent davantage de frottement par glissement. Le granite noir présente un pic de F_{xy} plus important au grain 300, indiquant une intensité de frottement plus élevée dans le régime ductile. En revanche, au grain 600, le granite blanc dépasse le granite noir en termes de F_{xy} , suggérant une interaction plus continue et un contact outil-matériau plus stable.

L'analyse conjointe de F_z et F_{xy} met en évidence des comportements contrastés selon le type de granite. Le granite noir résiste davantage à la pénétration verticale, mais présente un frottement latéral plus variable selon le régime d'abrasion. Le granite blanc, bien que moins résistant en F_z , développe des efforts F_{xy} significatifs en finition, traduisant une interaction tribologique plus homogène.

4.2.3.2 Influence de la forme de l'outil

Afin de mettre en évidence l'effet de la géométrie de l'outil sur les efforts de coupe, les profils d'évolution temporelle de F_z (effort vertical) et F_{xy} (effort tangentiel combiné) ont été extraits

pour les quatre formes étudiées : Ogee, Half Beveled, Eased Chamfered et Eased Concave. Pour garantir une comparaison équilibrée et représentative, les paramètres de coupe ont été fixés à $N = 2500$ rpm (vitesse médiane), $Vf = 1000$ mm/min (avance médiane), et un grain G600 (finesse de polissage), sur granite noir (matériau le plus exigeant mécaniquement). Ce choix permet de révéler les différences de comportement entre outils dans des conditions opérationnelles typiques et à sollicitations modérées.

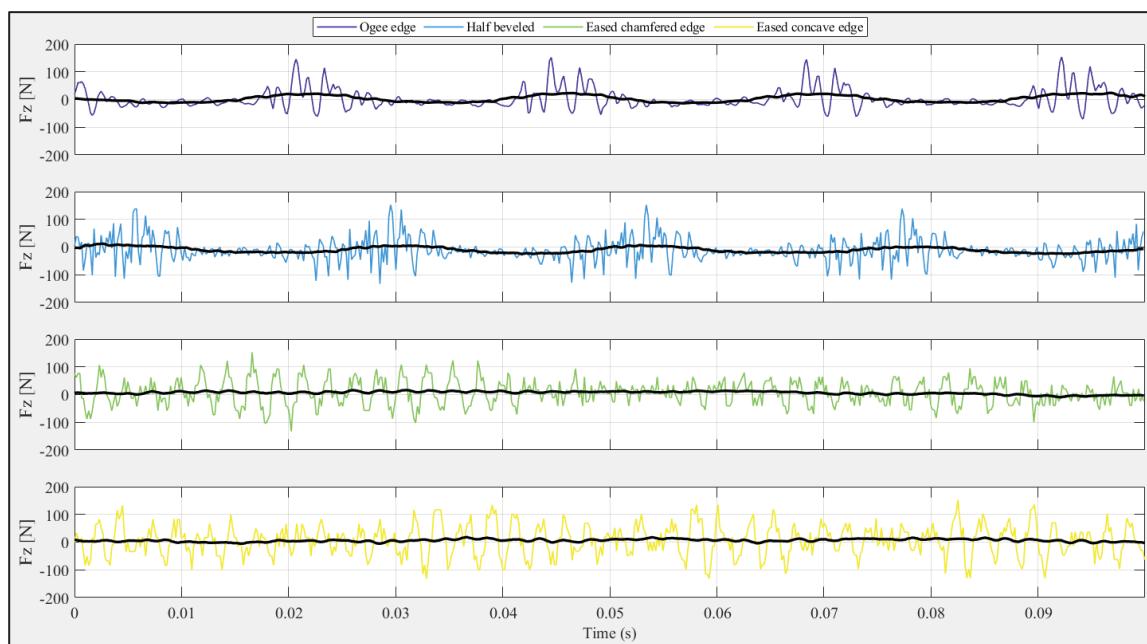


Figure 4.7 Profils dynamiques de l'effort vertical F_z selon la forme de l'outil (granite noir, $N = 2500$ rpm, $Vf = 1000$ mm/min, grain G600)

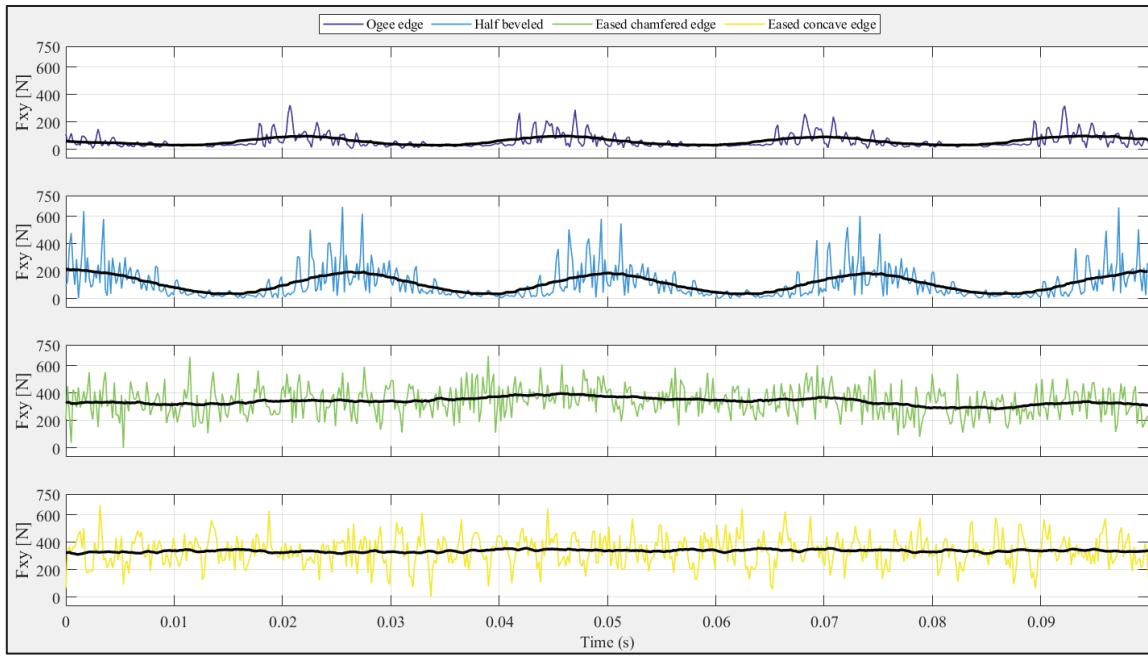


Figure 4.8 Profils dynamiques de l'effort tangentiel combiné F_{xy} selon la forme de l'outil
(granite noir, $N = 2500$ rpm, $V_f = 1000$ mm/min, grain G600)

Les Figures 4.7 et 4.8 illustrent les variations dynamiques des efforts mesurés. On observe que l'outil Ogee génère des pics plus marqués dans les deux composantes, avec des fluctuations de F_z atteignant ± 180 N et des valeurs de F_{xy} proches de 400 N, traduisant un contact plus heurté lié à sa forme pointue. Le Half Beveled présente également une instabilité notable, mais avec des amplitudes moins extrêmes. À l'inverse, les outils Eased Chamfered et Eased Concave produisent des efforts globalement plus stables, avec des pics plus atténus et une dispersion réduite. Ce comportement est cohérent avec les résultats publiés dans Mateur et al. (2024) (Annexe I), où les formes adoucies favorisent une interaction plus progressive avec la surface, réduisant ainsi les charges instantanées.

En synthèse, ces profils mettent en évidence que les géométries complexes ou abruptes (Ogee, Half Beveled) induisent davantage de déséquilibres dynamiques, potentiellement nuisibles à la stabilité du procédé et à la qualité de surface finale. Les formes arrondies et régulières (Eased) apparaissent plus adaptées pour assurer un polissage contrôlé avec un moindre risque d'endommagement du matériau.

4.2.3.3 Influence des paramètres de coupe

L'analyse de l'influence des paramètres de coupe, en particulier la vitesse de broche (N) et l'avance (Vf), a été menée lors du polissage du granite noir avec deux géométries d'outils contrastées : Ogee (profil agressif) et Half Beveled (géométrie intermédiaire). Afin d'isoler l'effet de N et Vf, les autres variables ont été maintenues constantes. Le matériau utilisé est exclusivement le granite noir, plus exigeant et sensible aux variations mécaniques. Pour capturer la réponse du système en phase d'ébauche et de finition, deux tailles de grain ont été sélectionnées : G150 pour les analyses de l'effort vertical Fz (où la profondeur de passe est plus importante), et G600 pour l'étude de l'effort combiné Fxy (où le frottement prédomine en phase de finition). Ces combinaisons permettent de révéler les sensibilités spécifiques de chaque outil à l'évolution des paramètres de coupe.

Tableau 4.5 Résultats de l'ANOVA pour Fz (outil Ogee, grain G150, granite noir)

Facteur / Interaction	DL	SC	CM	F	p-valeur
Vitesse de coupe	1	19307	19307	518.4	< 0.001
Avance	1	3107.7	3107.7	83.6	0.002
Vitesse de coupe * Avance	1	3085.6	3085.6	8.36	0.028
Erreur	6	2234	369.0	-	-
Total	9	21040	-	-	-

Les résultats montrent que la vitesse de broche exerce une influence majeure sur Fz et Fxy, en particulier avec l'outil Ogee. Pour Fz, la surface de réponse (Figure 4.9 a) montre une augmentation marquée de l'effort avec la vitesse de broche, notamment à faible avance. L'ANOVA (Tableau 4.6) confirme la significativité élevée de ce facteur ($p < 0,001$), avec une contribution de 92,28 %, tandis que l'avance présente un effet moins marqué (3,85 %, $p = 0,002$) mais statistiquement significatif. L'interaction N × Vf est également significative ($p = 0,028$), indiquant un effet synergique sur la charge verticale.

Tableau 4.6 Résultats de l'ANOVA pour Fz (outil Half Beveled, grain G150, granite noir)

Facteur / Interaction	DL	SC	CM	F	p-valeur
Vitesse de coupe	1	112754	112754	371.3	< 0.001
Avance	1	3627.3	3627.3	5.58	0.001
Vitesse de coupe * Avance	1	3628.2	3628.2	14.87	0.028
Erreur	6	1464	244.1	-	-
Total	9	144662	-	-	-

Avec l'outil Half Beveled, la tendance est similaire (Figure 4.9 b), bien que les valeurs absolues de Fz soient légèrement plus faibles. Le modèle de régression conserve une très bonne qualité d'ajustement (R^2 ajusté = 98,49 %) et les effets de N et Vf sont tous deux significatifs ($p < 0,001$). L'interaction entre les deux paramètres est également marquée ($p = 0,028$), ce qui révèle une sensibilité accrue à la combinaison des vitesses et avances, probablement liée à la forme arrondie et ouverte de l'arête de l'outil.

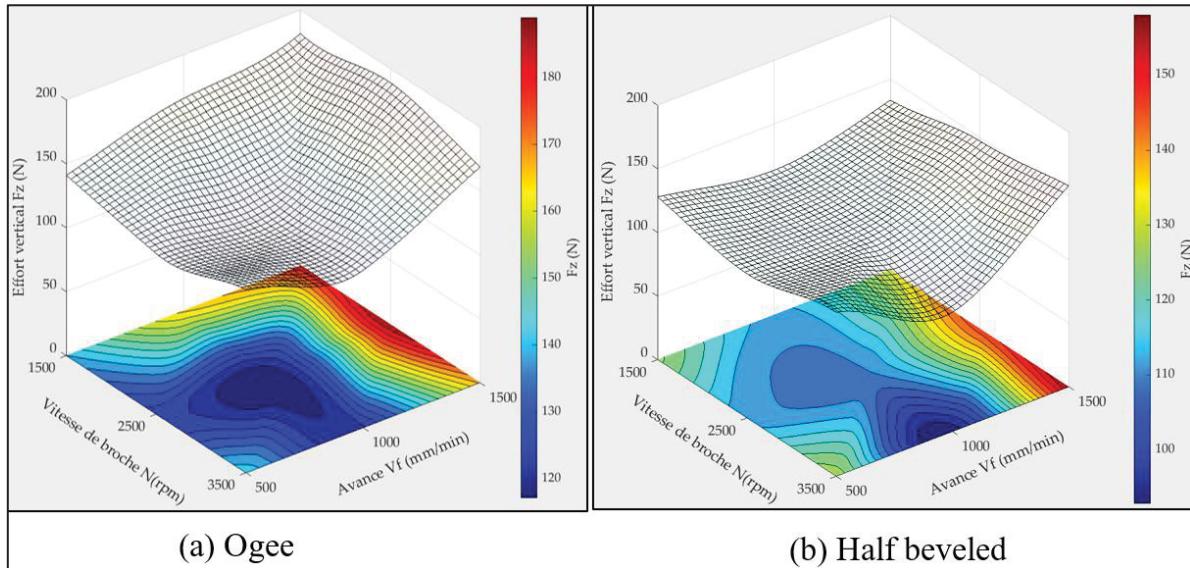


Figure 4.9 Surface de réponse Fz (N) en fonction de N et Vf (granite noir, grain G150),
(a) outil de forme Ogee, (b) outil de forme Half beveled

Tableau 4.7 Résultats de l'ANOVA pour Fxy (outil Ogee, grain G600, granite noir)

Facteur / Interaction	DL	SC	CM	F	p-valeur
Vitesse de coupe	1	94676	94676	249.7	< 0.001
Avance	1	31125	31125	23.33	0.003
Vitesse de coupe * Avance	1	625	625	0.47	0.519
Erreur	6	8003	1334	-	-
Total	9	124944	-	-	-

Concernant Fxy, l'outil Ogee combiné à un grain G600 génère des forces tangentielles élevées à haute vitesse de broche et forte avance (Figure 4.10 a). L'ANOVA (Tableau 4.7) indique un effet très significatif de la vitesse de broche ($p < 0,001$, contribution : 75,84 %), suivi de l'avance (23,33 %, $p = 0,003$). En revanche, leur interaction n'est pas significative ($p = 0,519$), ce qui suggère que ces deux facteurs influencent Fxy de manière relativement indépendante.

Tableau 4.8 Résultats de l'ANOVA pour Fxy (outil Half Beveled, grain G600, granite noir)

Facteur / Interaction	DL	SC	CM	F	p-valeur
Vitesse de coupe	1	226453	226453	1.33	0.293
Avance	1	261535	261535	2.30	0.108
Vitesse de coupe * Avance	1	140	140	0.00	0.958
Erreur	6	275623	45997	-	-
Total	9	316752	-	-	-

À l'inverse, les résultats obtenus avec l'outil Half Beveled (Figure 4.10 b) montrent que ni N ($p = 0,293$), ni Vf ($p = 0,108$), ni leur interaction ($p = 0,958$) n'ont d'influence statistiquement significative sur Fxy. Le comportement plus stable de cet outil pourrait s'expliquer par une meilleure répartition des efforts au contact, ou une sensibilité moindre de sa géométrie aux variations de coupe. Cela se traduit également par une courbe de réponse plus plate.

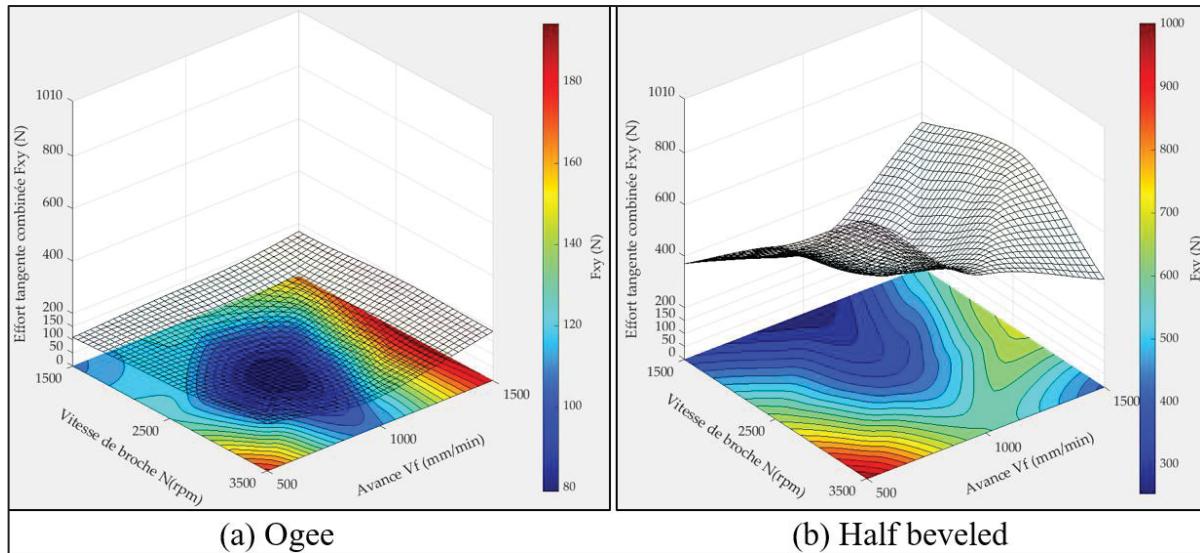


Figure 4.10 Surface de réponse $F_{xy}(N)$ en fonction de N et V_f (granite noir, grain G600), (a) outil de forme Ogee, (b) outil de forme Half beveled

Ces résultats concordent globalement avec ceux rapportés dans notre étude précédente publiée dans Mateur et al. (2024), où les outils Eased Chamfered et Eased Concave ont été testés. Dans cette publication, les effets de la vitesse de broche étaient également prédominants, avec un comportement similaire à celui observé ici pour Fz. Toutefois, pour Fxy, les géométries concaves se sont révélées plus sensibles à l'augmentation de l'avance, probablement en raison des contraintes mécaniques concentrées dans les zones étroites des arêtes. La comparaison suggère que les outils à arêtes internes (concaves, ogee) subissent des efforts plus intenses que les outils aux profils ouverts (half beveled, chamfered), soulignant l'importance de bien ajuster les conditions de coupe selon la géométrie pour éviter les surcharges mécaniques et améliorer la stabilité du procédé.

4.3 Rugosité de surface

4.3.1 Influence du matériau et de la taille de grain abrasif

L'influence croisée du matériau (granite noir vs blanc) et de la taille du grain abrasif (G45 à G600) sur la rugosité moyenne Ra a été évaluée pour deux outils aux géométries complexes : Ogee et Half Beveled. La Figure 4.11 illustre l'évolution de Ra en fonction de la granulométrie

abrasive, pour chacun des deux granites. On observe une diminution nette de la rugosité avec l'augmentation de la taille de grain, traduisant une transition progressive du mode de coupe vers un polissage plus fin. Cette tendance est particulièrement marquée pour l'outil Half Beveled appliqué sur le granite noir, dont les Ra chutent de plus de 7 μm à moins de 1 μm entre G45 et G600. À granulométrie identique, le granite noir génère systématiquement des Ra plus élevées que le granite blanc, en raison de sa plus grande dureté et hétérogénéité minéralogique.

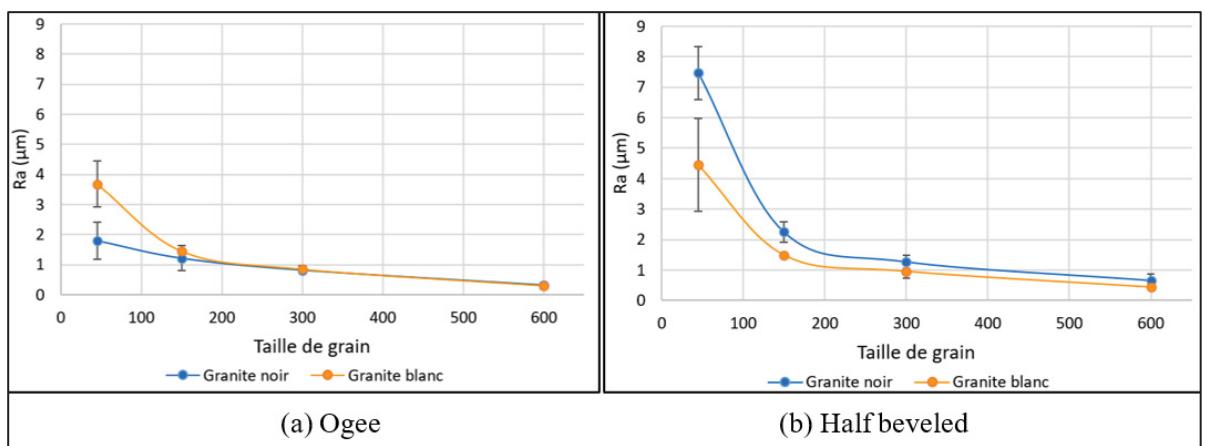


Figure 4.11 Influence du matériau et de la taille de grain abrasif sur la rugosité: (a) outil Ogee, (b) outil Half Beveled ($N = 2500 \text{ rpm}$; $V_f = 1000 \text{ mm/min}$)

Ces observations sont cohérentes avec les résultats obtenus pour les outils Eased Chamfered et Eased Concave, publiés dans notre étude précédente Mateur et al. (2024). Dans ce travail, les outils à géométrie douce appliqués en conditions humides ont permis d'obtenir des valeurs de Ra aussi faibles que 0.148 μm (Concave) et 0.364 μm (Chamfered) à G600. Ces résultats confirment que la forme de l'outil, combinée à un grain fin et un matériau moins abrasif (granite blanc), contribue significativement à la qualité de surface obtenue.

Ainsi, cette comparaison montre que, quelle que soit la géométrie, le grain abrasif est un levier majeur de réduction de Ra, mais son efficacité dépend du matériau usiné et de la géométrie de l'outil, les géométries adoucies montrant une performance supérieure dans les travaux de finition.

4.3.2 Influence de la forme de l'outil

L'analyse comparative de la rugosité Ra en fonction de la géométrie de l'outil a été réalisée sur granite noir en conditions de finition, avec grain G600, N = 3500 rpm et Vf = 1500 mm/min. Ce choix expérimental se justifie par le fait qu'il s'agit de la phase de polissage la plus fine et la plus exigeante, permettant d'isoler l'effet de la géométrie sur la qualité de surface sans l'influence dominante d'une coupe grossière.

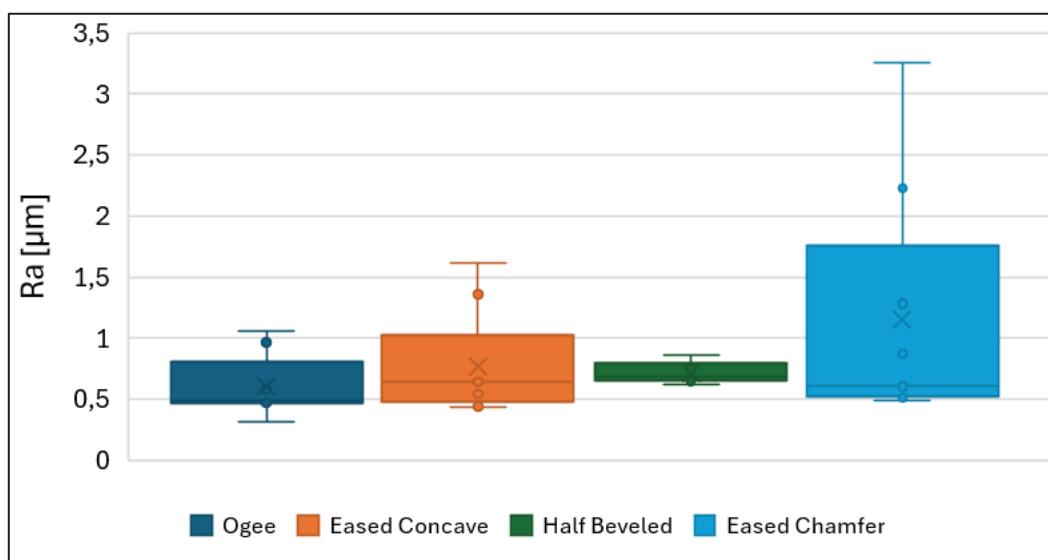


Figure 4.12 Distribution de Ra selon la géométrie pour le granite noir

Le diagramme en boîte (Figure 4.12) met en évidence des différences nettes entre les outils. Half Beveled présente la dispersion la plus faible et un Ra médian bas (~0,65 µm), indiquant un contact stable et homogène. Ogee montre également une bonne régularité, avec un Ra médian proche de 0,5 µm, mais une dispersion légèrement supérieure traduisant une sensibilité accrue aux micro-reliefs. À l'inverse, les outils à formes arrondies Eased Concave et surtout Eased Chamfered affichent une variabilité plus importante ; ce dernier présente même des valeurs extrêmes élevées, révélant un contact moins constant et des transitions d'arêtes marquées.

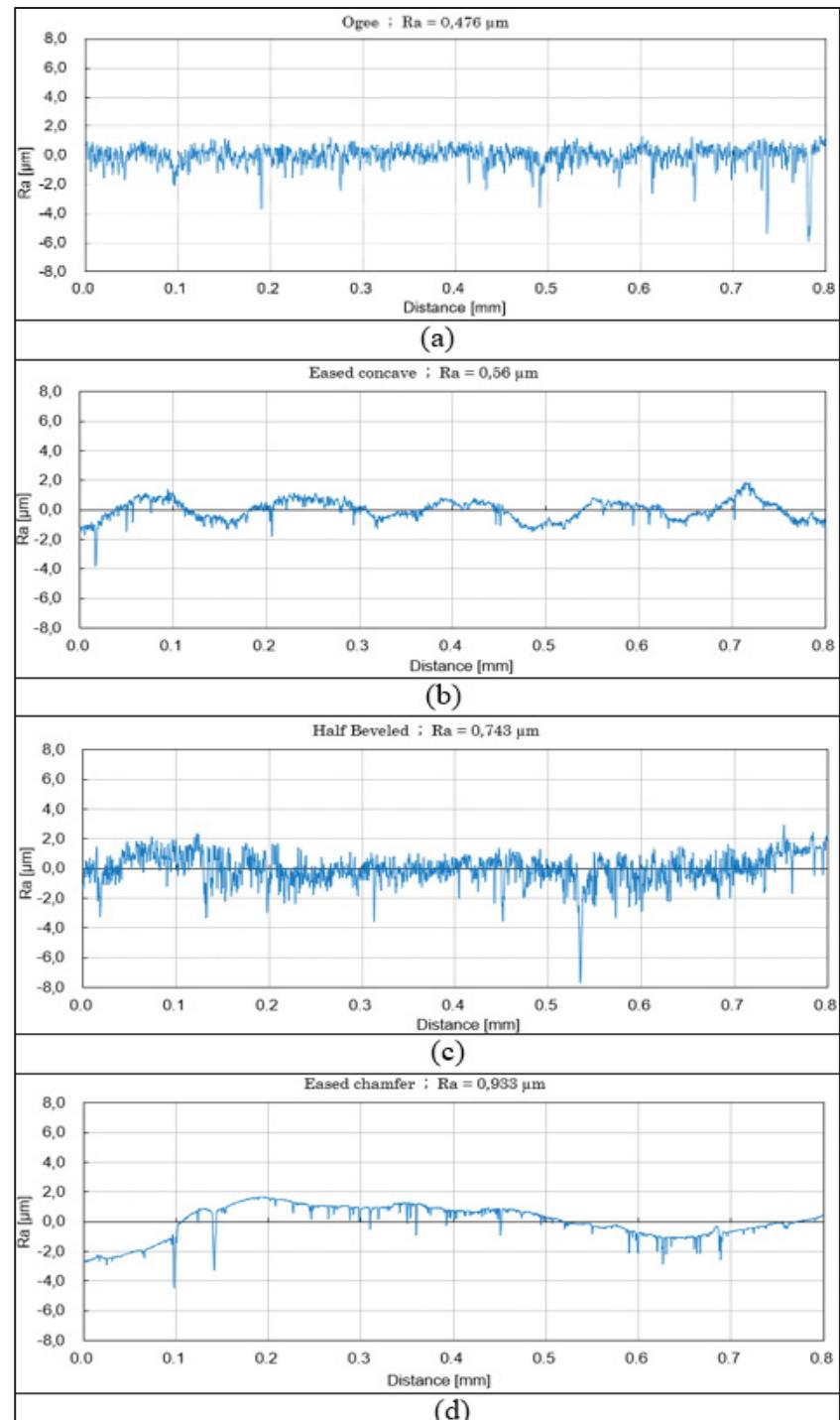


Figure 4.13 Profils de rugosité longitudinaux pour chaque outil (granite noir, G600, N = 3500 rpm, Vf = 1500 mm/min), (a) outil de forme Ogee, (b), outil de forme Eased concave, (c), outil de forme Half Beveled (d), outil de forme Eased chamfer

Les profils longitudinaux de Ra (Figures 4.13) corroborent ces tendances : le Half Beveled génère une trace régulière avec peu de fluctuations, l’Ogee présente des ondulations modérées, tandis que les Eased montrent des variations plus marquées dues à leur rayon de courbure et à une surface de contact élargie. La Ra moyenne la plus basse est obtenue avec l’Ogee (0,476 µm), suivie de l’Eased Concave (0,56 µm), alors que l’Eased Chamfered atteint la valeur la plus élevée (0,933 µm).

Ces résultats soulignent l’impact de la géométrie sur le mécanisme d’enlèvement de matière : les arêtes franches et localisées (Ogee, Half Beveled) favorisent une coupe contrôlée et une topographie de surface plus régulière, tandis que les formes adoucies induisent un écrasement partiel des grains et une variabilité accrue. En comparaison avec les résultats publiés dans Mateur et al. (2024), la tendance est confirmée : les outils à géométrie simple et contact réduit optimisent la finition en polissage humide, confirmant que la forme de l’outil est un facteur déterminant pour la qualité de surface.

4.3.3 Influence des paramètres de coupe (N et Vf)

L’effet combiné de la vitesse de rotation de la broche (N) et de l’avance (Vf) sur la rugosité moyenne Ra a été évalué au moyen de modèles de régression. Une première approche a envisagé une forme quadratique complète incluant les termes N^2 et Vf^2 . Toutefois, l’analyse de variance ($p > 0,05$) a révélé que ces termes n’étaient pas significatifs pour la majorité des cas et n’amélioraient que faiblement le pouvoir explicatif du modèle (gain de R^2 ajusté < 2 %). De plus, ces termes complexifiaient l’interprétation physique sans fournir d’informations additionnelles utiles. Par conséquent, un modèle linéaire avec interaction croisée N·Vf a été retenu, offrant un bon compromis entre précision statistique et lisibilité physique.

Le modèle adopté est de la forme :

$$Ra = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot V_f + \beta_3 \cdot N \cdot V_f \quad (4.1)$$

Les équations de régression obtenues pour chaque couple outil/granite au grain G600 sont :

$$Ra = 10^{-6}(263 N + 813 V_f) \quad (4.2)$$

$$Ra = 10^{-6}(282 N + 551 V_f) \quad (4.3)$$

$$Ra = 10^{-6}(147 N + 593 V_f) \quad (4.4)$$

$$Ra = 10^{-6}(193 N + 384 V_f) \quad (4.5)$$

Ces résultats, synthétisés au Tableau 4.9, montrent des modèles bien ajustés (R^2 ajusté entre ~79 % et ~96 %), avec des sensibilités qui varient selon l'outil et le granite : sur granite noir, l'outil Half Beveled présente une forte dépendance à N, tandis que l'outil Ogee est plus sensible à Vf; sur granite blanc, l'Ogee reste surtout piloté par Vf, alors que le Half Beveled conserve une dépendance marquée aux deux facteurs. En complément, l'interaction N·Vf a été testée : elle n'est pas significative et son coefficient estimé est nul (-0,000000), ce qui justifie son exclusion des équations de régression.

Tableau 4.9 Équations de régression et ajustement des modèles ($Ra = f(N, Vf)$, G600)

Outil	Granite	Équation de régression (Ra en μm)	R^2 ajusté (%)
Ogee	Noir	(4.2)	79,47
Half Beveled		(4.3)	95,53
Ogee	Blanc	(4.4)	79,41
Half Beveled		(4.5)	91,67

L'ANOVA (Tableau 4.10) confirme ces conclusions et précise la significativité des effets : sur granite noir, N et Vf sont significatifs pour Ogee ($p(N)=0,038^*$, $p(Vf)=0,032^*$) et pour Half Beveled ($p(N)=0,002^*$, $p(Vf)=0,011^*$), l'interaction N·Vf étant également significative dans les deux cas ($p=0,045^*$ et $p=0,023^*$), ce qui justifie sa présence dans le modèle pour ce matériau ; sur granite blanc, pour Ogee, N n'est pas significatif ($p=0,131$) et Vf est à la limite du seuil ($p=0,055$), l'interaction étant non significative ($p=0,179$), tandis que pour Half Beveled, N et Vf sont significatifs ($p(N)=0,007^*$, $p(Vf)=0,034^*$) et l'interaction reste proche du seuil mais non significative ($p=0,058$). Les valeurs p avec * indiquent des effets significatifs ($p < 0,05$).

Tableau 4.10 Résumé ANOVA : Influence de N et Vf sur Ra (G600)

Outil	Granite	p(N)	p(Vf)	p(N·Vf)	R ² ajusté (%)	Facteurs dominants
Ogee	Noir	0,038*	0,032*	0,045*	79,47	N, Vf
Half Beveled		0,002*	0,011*	0,023*	95,53	N, Vf
Ogee	Blanc	0,131	0,055	0,179	79,41	Vf (limite)
Half Beveled		0,007*	0,034*	0,058	91,67	N, Vf

En résumé, la réduction de Ra se pilote principalement par N sur Half Beveled et par Vf sur Ogee, avec un effet d'interaction N·Vf à considérer sur granite noir, mais négligeable sur granite blanc. Les diagnostics (Pareto, résidus) et les détails ANOVA sont fournis en Annexe IV (Tableaux-A IV-1 à IV-4, Figures-A IV-1 à IV-2).

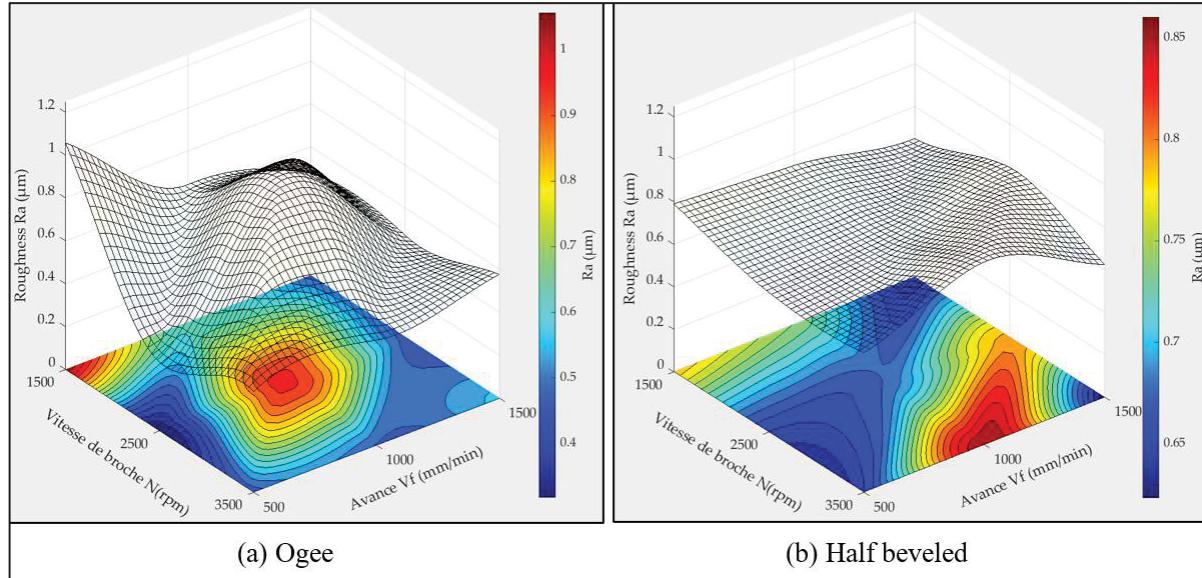


Figure 4.14 Surfaces de réponse 3D et cartes de contours de $Ra = f(N, Vf)$ pour granite noir
 (a) Ogee, (b) Half Beveled

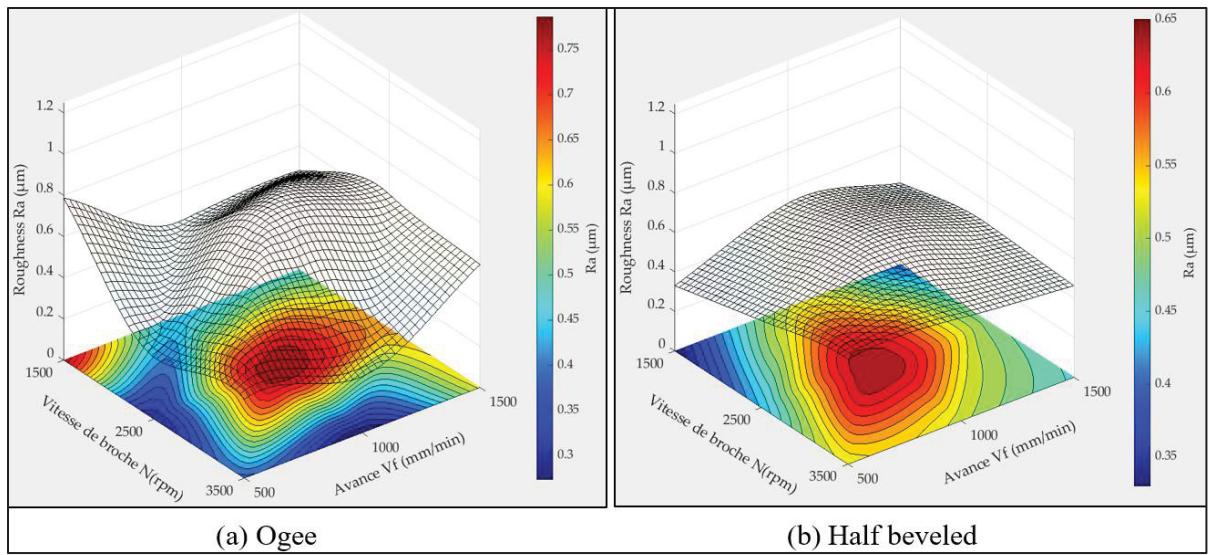


Figure 4.15 Surfaces de réponse 3D et cartes de contours de $R_a = f(N, V_f)$ pour granite blanc
 (a) Ogee, (b) Half Beveled

Les surfaces de réponse 3D et les projections 2D confirment ces tendances. Pour le granite noir (Figure 4.14), la rugosité Ra diminue avec des vitesses de rotation N élevées et des avances Vf modérées : l'outil Half Beveled présente une zone optimale nette avec $\text{Ra} \approx 0,27 \mu\text{m}$ localisée autour de $N \approx 3000 \text{ rpm}$ et $Vf \approx 1000 \text{ mm/min}$, tandis que l'Ogee atteint un minimum $\text{Ra} \approx 0,39 \mu\text{m}$ à $N \approx 3300 \text{ rpm}$ et $Vf \approx 750 \text{ mm/min}$.

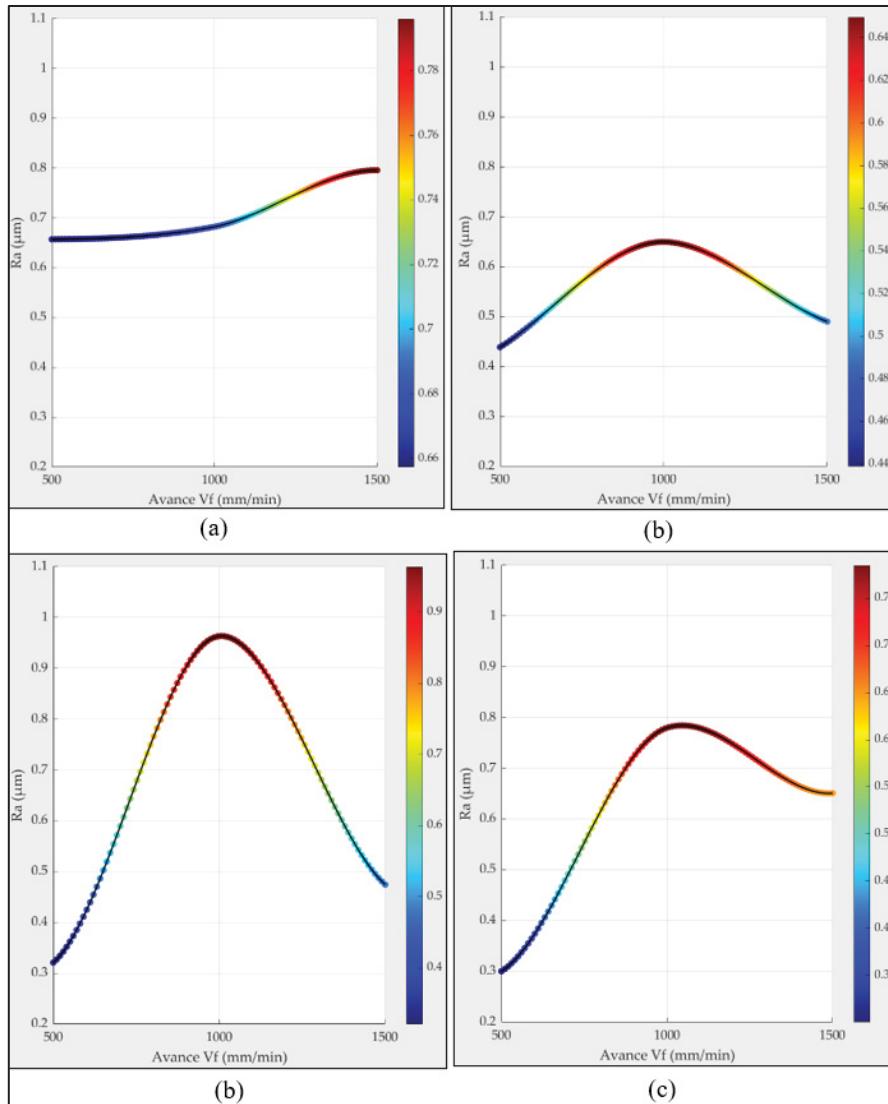


Figure 4.16 Projection 2D R_a - V_f pour granite noir et blanc, (a) Half Beveled ; granite noir, (b) Half Beveled ; granite blanc, (c) Ogee ; granite noir, (d) Ogee ; granite blanc

Pour le granite blanc (Figures 4.15), les zones optimales apparaissent entre $N \approx 3000$ – 3500 rpm et $V_f \approx 750$ – 1000 mm/min, avec une différence marquée entre les outils : l'Half Beveled présente une vallée large et plus tolérante aux variations d'avance, offrant $R_a \approx 0,25$ – $0,30$ μm sur un plateau stable, tandis que l'Ogee génère une zone plus resserrée, sensible aux écarts de V_f mais permettant d'atteindre des valeurs minimales $R_a \approx 0,35$ μm .

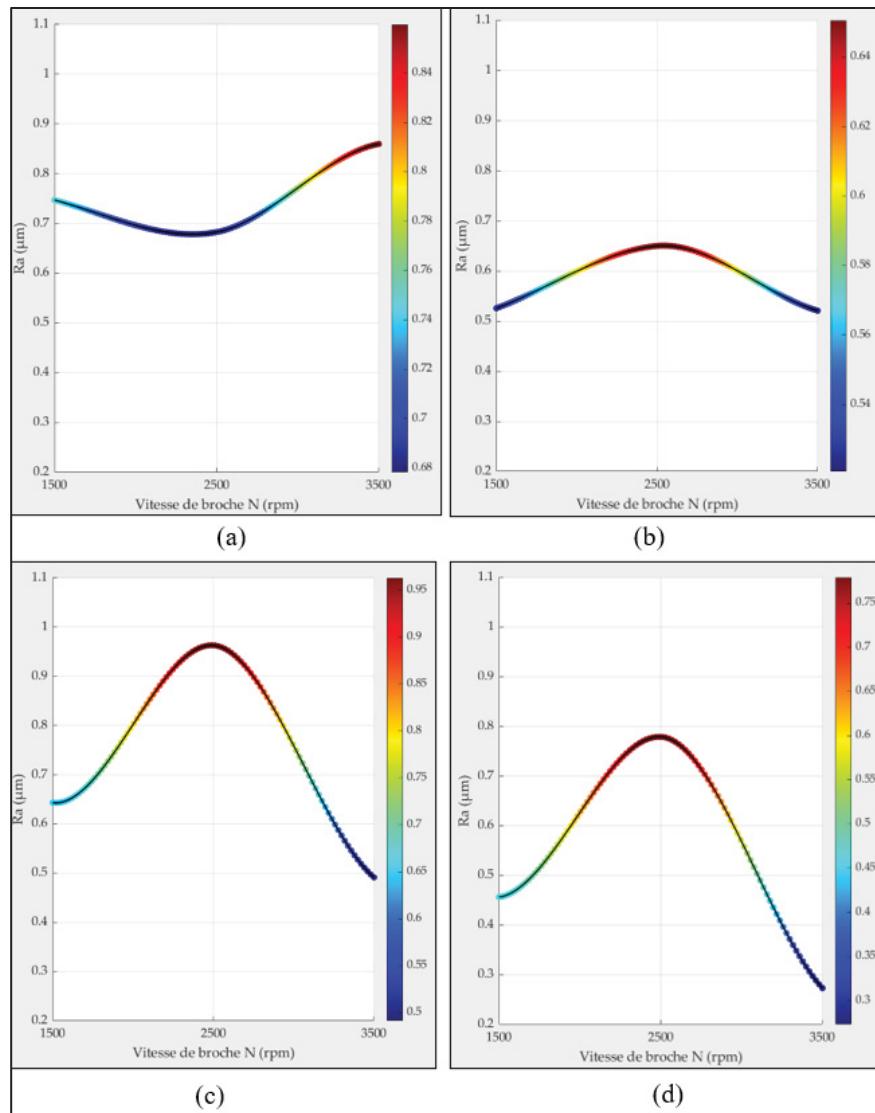


Figure 4.17 Projection 2D Ra–N pour granite noir et blanc, (a) Half Beveled ; granite noir, (b) Half Beveled ; granite blanc, (c) Ogee ; granite noir, (d) Ogee ; granite blanc

Ces résultats convergent avec ceux publiés dans Mateur et al. (2024), où l'outil Eased Chamfered présentait déjà une amélioration de la qualité de surface pour des vitesses de broche élevées et des avances modérées. La cohérence entre les différentes géométries confirme que la cinématique de coupe (N et Vf) reste le levier principal de réduction de la rugosité, la géométrie de l'outil agissant comme facteur amplificateur. L'outil Half Beveled sur granite blanc se distingue par un modèle prédictif robuste (R^2 adj > 91 %) et des valeurs minimales de Ra, ce qui en fait la combinaison la plus performante dans l'ensemble des conditions testées.

la préférence pour un modèle linéaire avec interaction repose à la fois sur des arguments statistiques (p-values et R²) et physiques (cohérence des tendances, simplicité interprétative). La vitesse de rotation N est le facteur déterminant, suivie de l'avance Vf, et leur interaction modérée doit être considérée pour éviter les zones de dégradation de surface. Les zones optimales globales se situent pour N ≈ 3000–3500 rpm et Vf ≤ 1000 mm/min.

4.4 Conclusion

Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact prépondérant de la géométrie de l'outil et de la vitesse de rotation N sur les réponses mécaniques et surfaciques. Les outils à arêtes localisées (Ogee, Half Beveled) favorisent une meilleure régularité de Ra et des sollicitations verticales réduites (Fz), tandis que les formes arrondies (Eased) produisent des surfaces plus variables mais des efforts dynamiques plus progressifs. L'ANOVA confirme que N et la taille de grain abrasif sont systématiquement significatifs sur Fz et Fx, avec des interactions marquées entre N et Vf sur les outils agressifs. Du point de vue de la rugosité, la combinaison Half Beveled – granite blanc – G600 apparaît comme la plus performante, atteignant des valeurs minimales de Ra sur un plateau stable de N ≈ 3000–3500 rpm et Vf ≤ 1000 mm/min.

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Ce chapitre vise à interpréter de manière croisée les résultats obtenus sur les émissions de particules fines (FP) et ultrafines (UFP), la rugosité de surface et les forces de coupe, afin de relier les paramètres de coupe et la géométrie des outils aux performances du polissage humide. L'objectif est de comprendre les mécanismes générateurs de particules, de caractériser l'effet des outils sur la topographie finale des pièces et d'évaluer la corrélation entre qualité de surface, contraintes mécaniques et émissions. Cette discussion s'appuie sur les modèles statistiques, les distributions granulométriques et l'analyse des surfaces polies pour établir des recommandations process minimisant à la fois les risques sanitaires et optimisant la finition.

5.2 Discussion sur les émissions de particules

L'analyse statistique confirme que la vitesse de broche (N) est le facteur déterminant des émissions FP/UFP, quelle que soit la configuration outil–granite. Cette tendance se retrouve dans la synthèse globale (Tableau 5.1) où, pour toutes les combinaisons, l'effet de N domine sur les émissions. Les modèles linéaires se sont avérés suffisants ($R^2 > 79\%$), en accord avec Saidi et al. (2015) et Songmene et al. (2018), qui soulignent également la prépondérance des paramètres cinématiques sur la génération de poussières.

Tableau 5.1 Comparaison des émissions de particules fines (FP) et ultrafines (UFP) selon les configurations d'outils, de granites et de taille de grains

Outil	Grain	Granite	Réponse	Émission max.	Régularité	Observations principales
OG	G600	Noir	UFP	≥ 11000	Moyenne	Sensible à N à faible Vf
OG	G600	Blanc	UFP	≥ 16000	Instable	Interaction N·Vf forte
HB	G600	Noir	UFP	~ 6500	Très stable	Émissions minimales
HB	G600	Blanc	UFP	~ 14000	Stable	Montée régulière avec Vf
OG	G150	Noir	FP	~ 4	Moyenne	Augmentation avec N
OG	G150	Blanc	FP	$\sim 9,5$	Moyenne	Effet cumulatif N+Vf
HB	G150	Noir	FP	$< 0,2$	Parfaite	Configuration optimale
HB	G150	Blanc	FP	~ 14	Variable	Fortes interactions

La lecture croisée du Tableau 5.1 montre que l'outil Half Beveled (HB), surtout avec le grain G600 et sur granite noir, réduit significativement les émissions d'UFP ($\sim 6500 \text{#/cm}^3$) tout en offrant une stabilité remarquable. À l'inverse, l'outil Ogee (OG) sur granite blanc présente des concentrations supérieures ($\geq 16000 \text{#/cm}^3$) et une régularité instable, reflétant l'interaction complexe entre N et Vf. Pour les FP, les valeurs ($< 0,2 \text{#/cm}^3$ pour HB-G150-Noir contre $\sim 9,5 \text{#/cm}^3$ pour OG-G150-Blanc) confirment que la géométrie de l'outil influence directement la dispersion des particules respirables. La configuration HB-G150 sur granite noir apparaît comme la configuration optimale pour minimiser les FP.

Afin d'approfondir ces tendances, une analyse granulométrique a été conduite pour caractériser la taille des particules émises selon les conditions de coupe. Dans cette analyse, le granite blanc a été choisi comme matériau de référence en raison de sa teneur élevée en quartz, un minéral abrasif favorisant la micro-fracturation et la génération de particules fines et ultrafines lors du polissage. Deux configurations de coupe ont été définies pour chaque type de particules : une première visant à provoquer une émission maximale (courbe rouge) et une seconde optimisée

pour réduire les émissions (courbe bleue). Ce protocole permet d'évaluer l'effet des paramètres N et Vf sur la distribution granulométrique et la dangerosité respiratoire des particules générées.

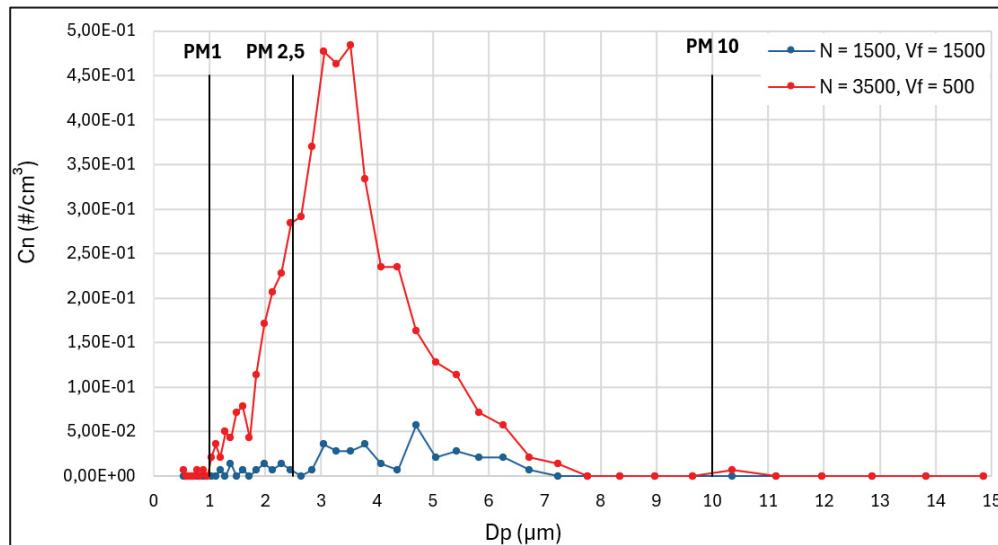


Figure 5.1 Distribution granulométrique des FP en nombre avec changement de paramètres de coupe (Forme Half Beveled, Grain 150, Granite blanc)

Les distributions granulométriques des FP (Figure 5.1, outil Half Beveled, G150) révèlent un pic marqué autour de 3–4 µm à vitesse de broche élevée et faible avance (N = 3500 rpm, Vf = 500 mm/min). Ces dimensions appartiennent à la gamme critique des PM2,5, capables d'atteindre les bronchioles et parfois les alvéoles pulmonaires (Zhang et al., 2005). L'augmentation de l'avance (N = 1500 rpm, Vf = 1500 mm/min) entraîne une réduction nette de la concentration et une dispersion plus homogène, confirmant que le couple N–Vf agit comme levier principal pour contrôler la génération de poussières respirables dans la plage PM2,5–PM10.

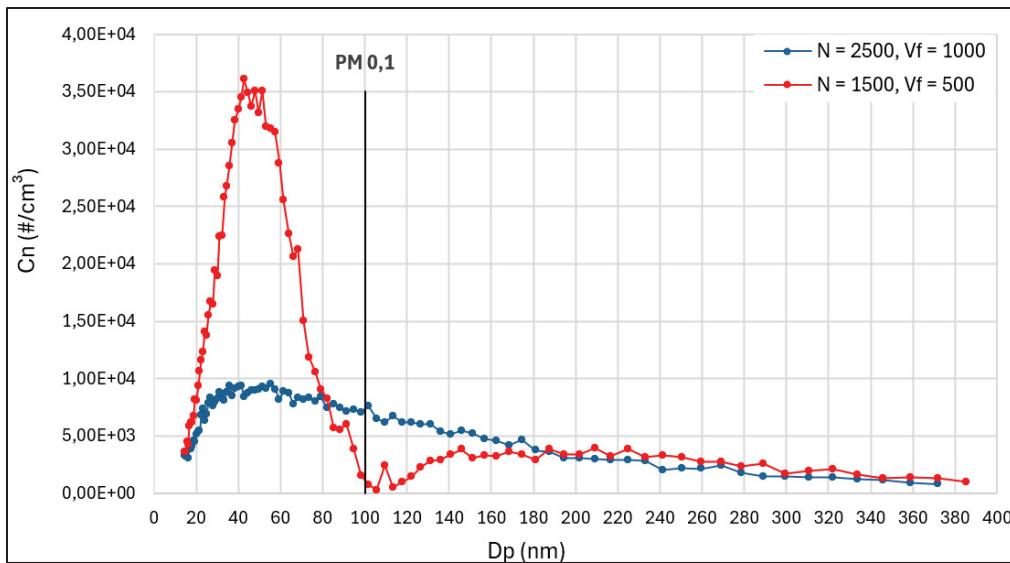


Figure 5.2 Distribution granulométrique des UFP en nombre avec changement de paramètres de coupe (Forme Ogee, Grain 600, Granite blanc)

Pour les UFP (Figure 5.2, outil Ogee, G600), la courbe rouge met en évidence un pic dominant à ~ 50 nm (PM0,1) dans la configuration à faible avance et vitesse réduite. Ces particules, d'une taille inférieure à 100 nm, sont particulièrement préoccupantes car elles pénètrent profondément dans les alvéoles pulmonaires (Figure 5.3), traversent la barrière biologique et peuvent atteindre le système cardiovasculaire (Hall et al., 2022 ; Thompson & Qi, 2023). L'optimisation des paramètres ($N = 2500$ rpm, $V_f = 1000$ mm/min) aplatisit significativement la distribution et réduit la concentration maximale sous 10^4 #/cm³, démontrant que l'ajustement des vitesses constitue une stratégie efficace pour limiter l'exposition aux UFP. Ce comportement rejoint les observations de Bahri et al. (2021, 2022), qui soulignent l'importance du contrôle cinématique dans la réduction des risques sanitaires liés au polissage humide.

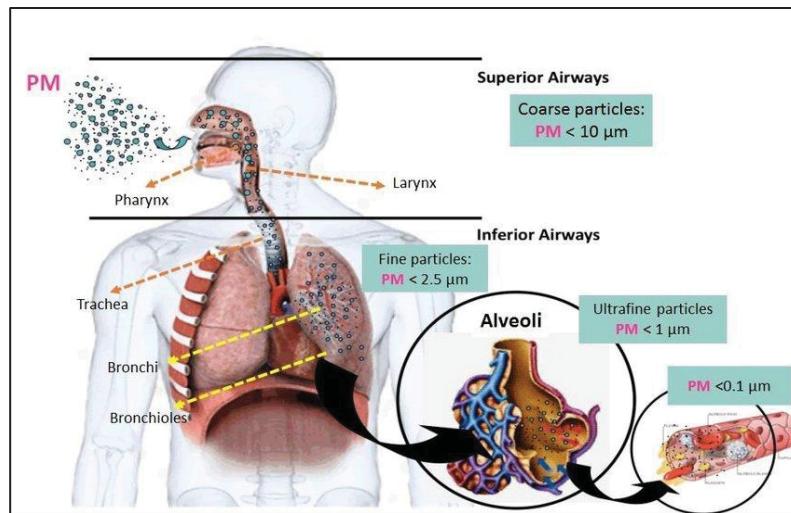


Figure 5.3 Classification de la taille des particules (PM) et du tractus respiratoire
Tirée de Barraza (2017)

En prolongeant cette lecture, la Figure 5.4 met en évidence, à avance fixée, le rôle décisif de la vitesse de broche N sur les UFP. À $V_f = 500$ mm/min (Figure 5.4 a), configuration la plus émissive, l'utilisation d'une vitesse basse ($N = 1500$ rpm) génère un pic aigu centré sous PM0,1 ($\approx 50\text{--}80$ nm) et une traîne marquée au-delà de 100 nm, alors que l'augmentation de la vitesse à 2500 rpm ou à 3500 rpm aplani nettement la distribution des PUF, rabaisse le maximum et contracte la traîne. Lorsque l'on fixe $V_f = 1000$ mm/min (Figure 5.4 b), niveau global minimal, les trois courbes se rapprochent mais conservent la même hiérarchie: N plus élevé demeure associé à des pics plus bas et à une décroissance plus rapide après 100 nm. Autrement dit, même à avance constante, accroître N atténue significativement l'intensité du mode sous-100 nm et limite la persistance du spectre, avec un effet très marqué en conditions défavorables ($V_f = 500$) et encore perceptible en conditions favorables ($V_f = 1000$). Cette stabilité de l'effet de N confirme que le réglage cinématique de la broche constitue le levier principal de réduction des UFP à V_f fixé.

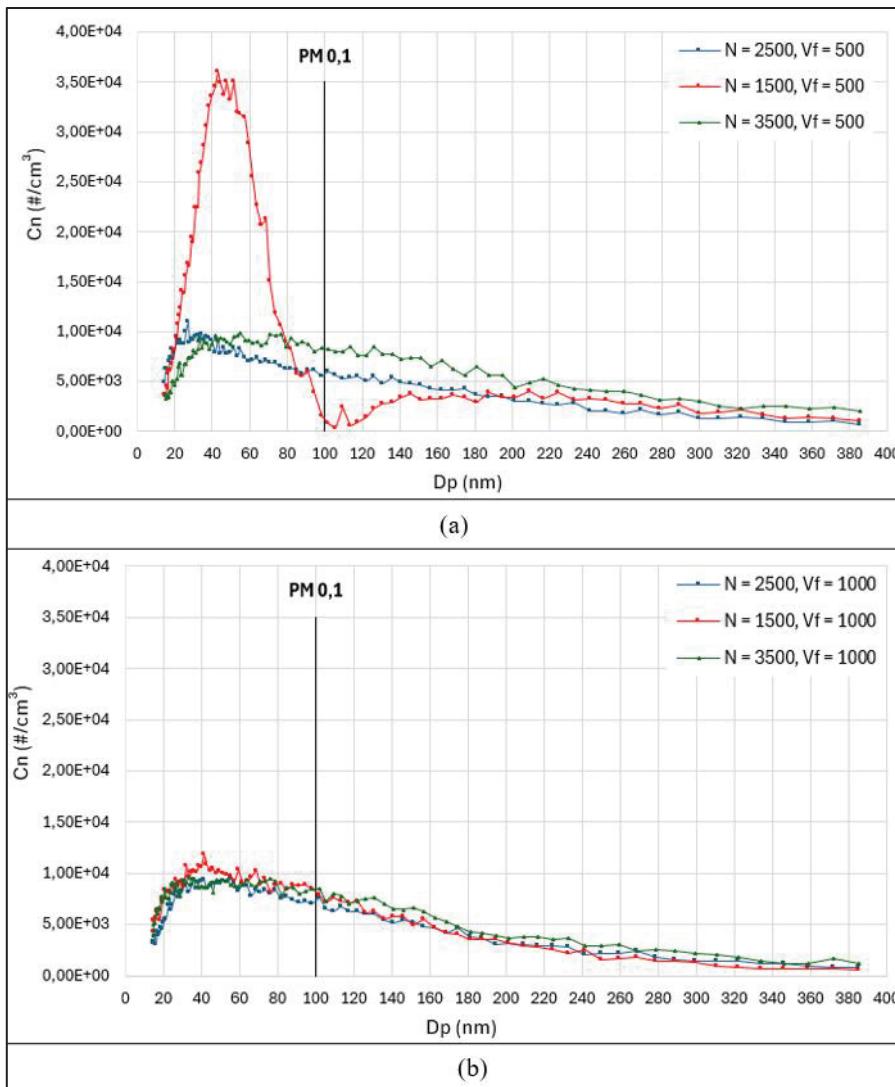


Figure 5.4 Distribution granulométrique des UFP en nombre avec changement de paramètres de coupe (Forme Ogee, Grain 600, Granite blanc) (a) Vitesse d'avance fixe Vf = 500 mm/min; (a) Vitesse d'avance fixe Vf = 1000 mm/min

Il convient toutefois de rappeler que l'analyse des émissions ne peut être dissociée du phénomène de dispersion spatiale des particules. En effet, une configuration de coupe qui semble produire des émissions minimales à proximité immédiate de la source peut générer, à distance, des concentrations plus élevées sous l'effet des écoulements d'air, de la turbulence locale et des conditions de confinement. Cette variabilité spatiale a été mise en évidence par Bahloul et al. (2019), qui ont montré que la dispersion des particules ultrafines pendant le polissage du granite pouvait conduire à des profils d'exposition hétérogènes, indépendamment

des paramètres de coupe initiaux. Ainsi, l'optimisation des conditions de polissage doit être complétée par une prise en compte de la dynamique de dispersion afin d'obtenir une évaluation réaliste des risques respiratoires liés au procédé.

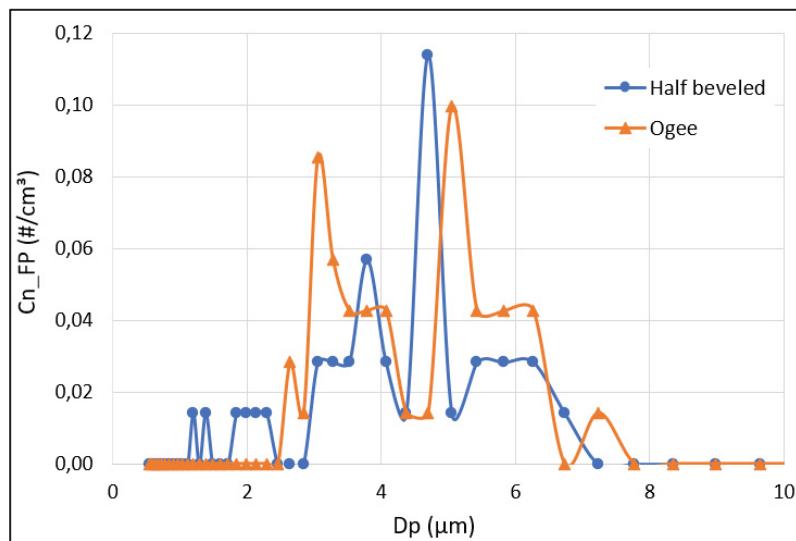


Figure 5.5 Distribution de la concentration numérique C_n_{FP} en fonction du diamètre aérodynamique D_p lors du polissage humide du granite blanc (grain 150) avec les outils Half Beveled et Ogee ($N = 1500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min)

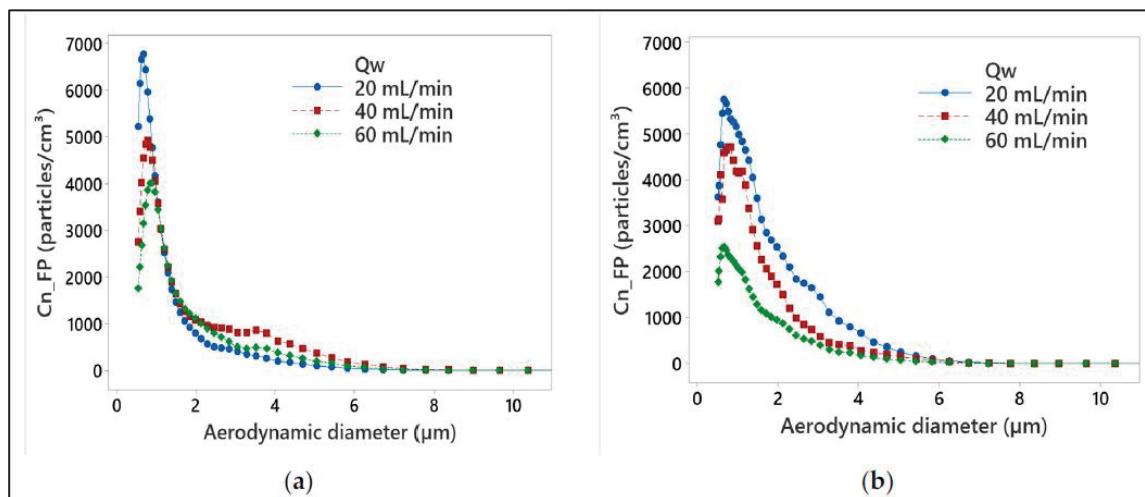


Figure 5.6 Distribution de la concentration numérique des particules C_n_{FP} en fonction du diamètre aérodynamique D_p pour différents débits MQL Q_w lors de la finition des arêtes du granite blanc (grain G150) : (a) outil chanfreiné, (b) outil concave ($N = 1500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min)
Tirée de Bahri et al. (2022)

En comparant la lubrification abondante utilisée dans la Figure 5.5 et la lubrification par MQL présentée par Bahri et al. (2022) dans la Figure 5.6, pour des conditions de coupe identiques (granite blanc, $N = 1500$ rpm, $V_f = 1500$ mm/min, grain 150), on observe deux comportements très différents d'émission particulaire.

En MQL, la distribution de la concentration numérique C_n_{FP} décroît progressivement avec l'augmentation du diamètre aérodynamique, aussi bien avec l'outil chanfrein qu'avec l'outil concave, ce qui correspond à un aérosol chargé généré par la fragmentation thermo-mécanique de la matrice minérale et projeté dans l'air par le jet de MQL (Figure 5.6). En lubrification abondante, la distribution obtenue avec les outils Half Beveled et Ogee ne présente pas le même profil : les niveaux de C_n_{FP} restent très faibles (inférieurs à $0,12 \text{#/cm}^3$ à l'échelle de la Figure 5.5) et les pics se situent principalement entre 3 et 6 μm , ce qui suggère une prédominance de particules plus grossières, possiblement agglomérées ou partiellement captées par le film d'eau avant remise en suspension. Toutefois, il reste nécessaire de vérifier spécifiquement les taux d'arrêt des particules fines par le gel de silice, afin de quantifier sa contribution réelle à la réduction des C_n_{FP} observées. Cette comparaison indique que l'arrosage abondant limite fortement la remise en air des particules fines par rapport l'usage du MQL, mais les deux modes d'usinage génèrent tout de même des particules ultrafines en quantité significative.

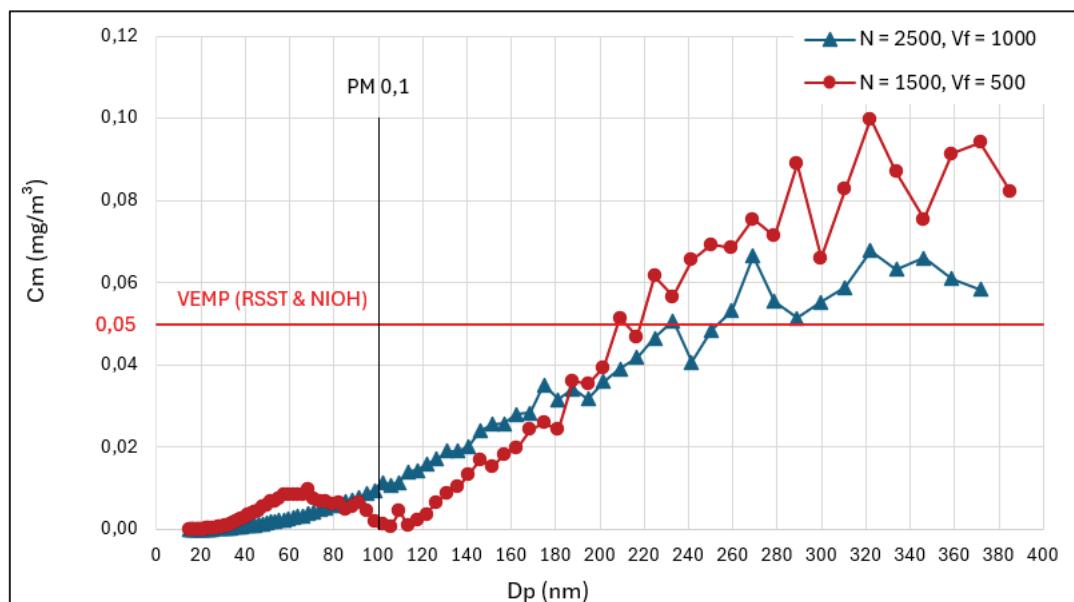


Figure 5.7 Distribution granulométrique des UFP en masse avec changement de paramètres de coupe (Forme Ogee, Grain 600, Granite blanc)

La Figure 5.7 montre qu'une lubrification efficace et un réglage plus favorable ($N = 2500$ rpm, $V_f = 1000$ mm/min) abaissent nettement C_m _UFP par rapport au cas défavorable ($N = 1500$ rpm, $V_f = 500$ mm/min), surtout sous PM0,1. Pourtant, la masse croît avec le diamètre et, au-delà d'environ 220–240 nm, la courbe rouge dépasse fréquemment le VEMP de $0,05 \text{ mg/m}^3$ (jusqu'à $\sim 0,10\text{--}0,12 \text{ mg/m}^3$), tandis que la courbe bleue l'atteint ou le frôle autour de 260–320 nm. Ces mesures correspondent à un temps d'usinage de l'ordre de 5 minutes, alors que le VEMP constitue une limite d'exposition moyenne pour 8 h. Il ne suffit donc pas d'optimiser N et V_f ni d'humidifier : le respect durable du VEMP exige des mesures complémentaires de maîtrise à la source et en milieu.

5.3 Discussion sur la rugosité de surface

L'évolution de R_a avec la taille de grain (Figure 4.11) suit la tendance classique ébauche–finition : diminution significative entre G45 et G600, confirmée par les études de Sanmartín et al. (2011) et López et al. (2018) sur le polissage des granites. Le granite noir présente systématiquement des R_a plus élevées, attribuées à sa dureté et à son hétérogénéité minéralogique (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, 2022 ; Sousa & Gonçalves, 2013).

La comparaison des outils (Figure 4.12) montre que Half Beveled génère une surface stable et homogène (R_a médian $\sim 0,65 \mu\text{m}$) tandis que Ogee atteint des valeurs minimales ($R_a \sim 0,47 \mu\text{m}$ à G600) mais avec une variabilité modérée. Les formes Eased Chamfered et Concave affichent des dispersions plus importantes et des R_a supérieures ($\sim 0,93 \mu\text{m}$ pour Chamfered). Les profils longitudinaux (Figure 4.13) corroborent ces résultats : Half Beveled offre des traces régulières, Ogee des ondulations modérées, alors que Chamfered présente des défauts localisés.

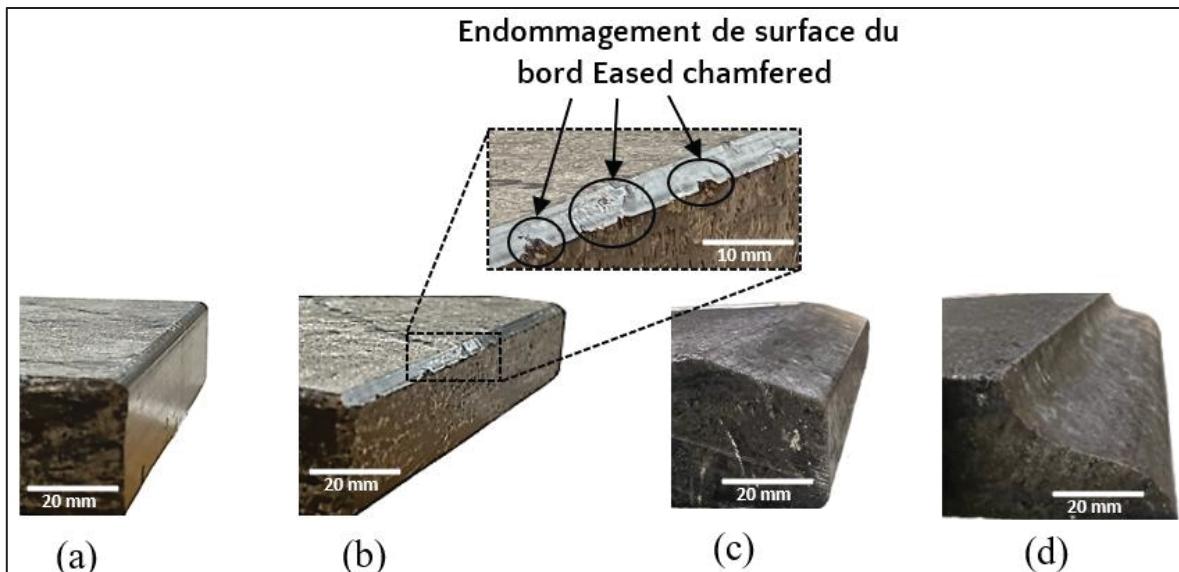


Figure 5.8 Résultats de finition de bord sur granite noir : (a) Eased concave, (b) Eased chamfered, (c) Half Beveled, (d) Ogee

La Figure 5.8 illustre ces différences sur granite noir : l'Eased Chamfered provoque des endommagements visibles liés à la concentration de pression à l'arête, confirmant les observations de Huang et al. (2002), Xu et al. (2003), Huang & Xu (2003b) sur l'effet de la géométrie sur la topographie finale. À l'inverse, Ogee et Half Beveled génèrent des finitions plus homogènes, rejoignant les conclusions de Sousa & Gonçalves (2013) et Bahri et al. (2021).

Ces résultats soulignent que les géométries à arêtes franches et localisées (Ogee, Half Beveled) favorisent une coupe contrôlée et une topographie régulière, tandis que les formes adoucies (Eased) induisent une plus grande variabilité en raison d'un contact plus étendu et d'un écrasement partiel des grains abrasifs.

En complément des paramètres classiques de rugosité (R_a et R_t), les indicateurs R_5 et R_{5m} caractérisent la distribution des micro-pics et micro-creux après polissage. Leur intérêt dépasse la simple description de l'état de surface : ils constituent des marqueurs fonctionnels reliant la topographie aux émissions de particules et à la performance finale de la pièce.

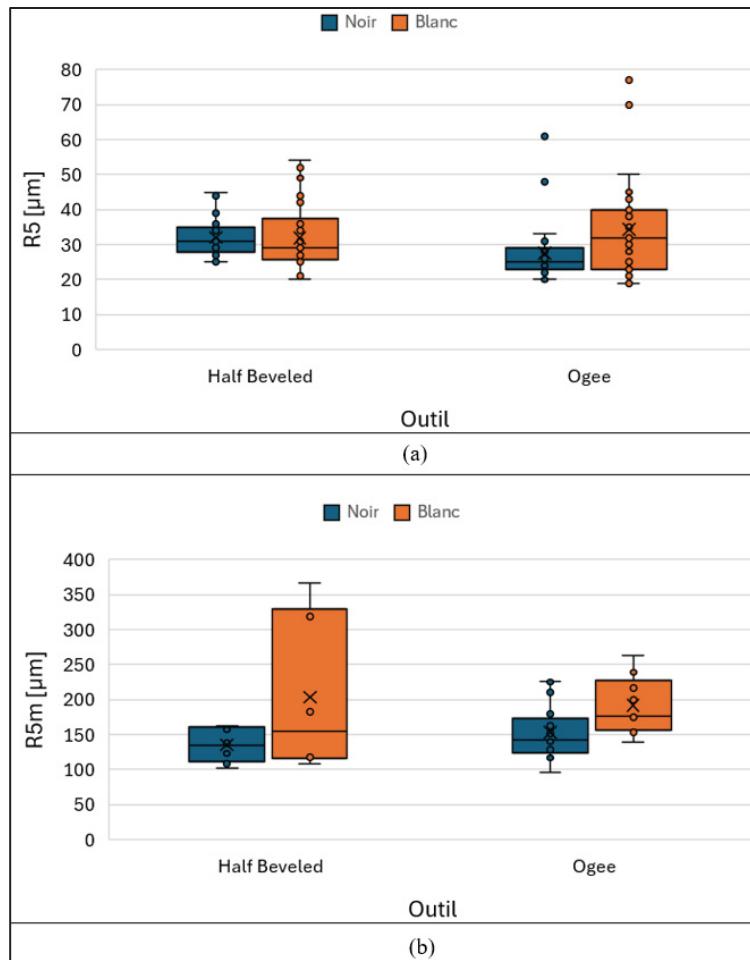


Figure 5.9 Distribution des valeurs de R5 et R5m pour les outils Half Beveled et Ogee sur granite noir et blanc (a) R5, (b) R5m

Les résultats mettent en évidence l'effet combiné de l'outil et du matériau. Sur granite noir, l'outil Half Beveled génère des R5 modérés et homogènes tandis que l'Ogee reste stable mais légèrement plus dispersé, traduisant un enlèvement de matière régulier pour le premier et un contact abrasif plus discontinu pour le second (Figure 5.8 a). L'Ogee appliqué au granite blanc présente des R5 plus élevés et plus variables, révélant des pics accentués cohérents avec les hausses de FP/UFP observées dans la section 5.2. L'analyse des R5m confirme cet effet : le Half Beveled noir maintient des creux limités, alors que le granite blanc affiche des R5m nettement supérieurs pour les deux outils (Figure 5.8 b), ce qui reflète une matrice plus sujette à la fissuration et à la rétention de fluide. La combinaison Ogee–granite blanc, avec pics et creux marqués, accentue les micro-fractures et les émissions.

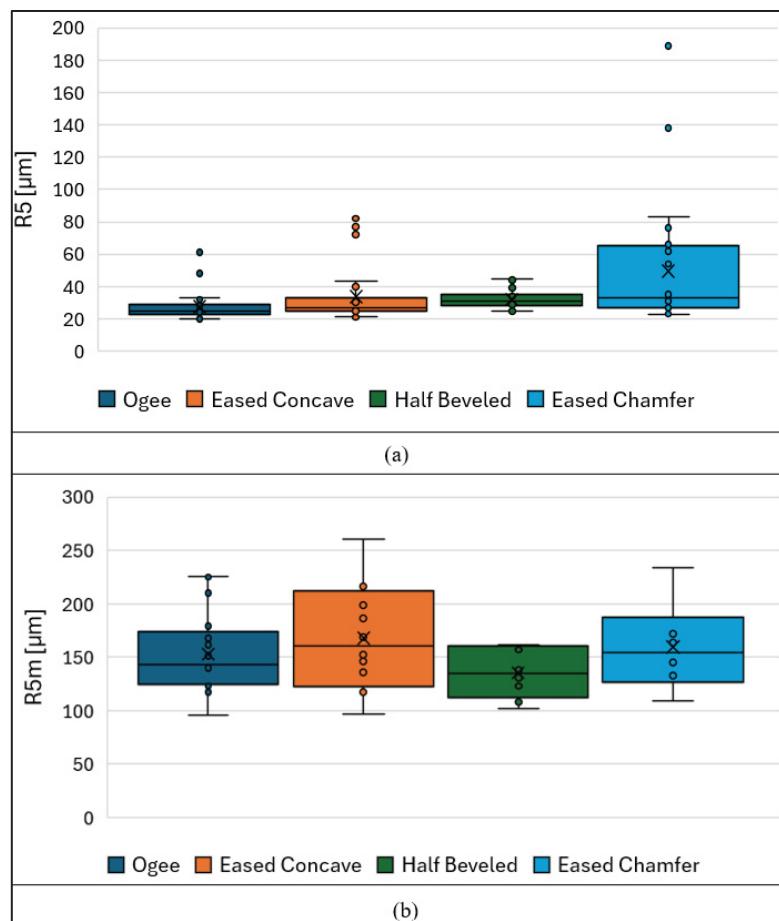


Figure 5.10 Distribution des valeurs de R5 et R5m pour les quatre géométries d'outils sur granite noir (a) R5, (b) R5m

Sur granite noir, la comparaison des quatre outils confirme que la géométrie influence la distribution des pics et creux. L'Eased Chamfered et l'Ogee présentent des R5 faibles traduisant des surfaces lisses, tandis que l'Eased Concave et le Half Beveled génèrent des valeurs légèrement supérieures mais homogènes (Figure 5.10 a). Pour les micro-creux, l'Eased Concave affiche les R5m les plus élevés, suggérant une meilleure rétention de fluide mais aussi un potentiel de piégeage de boues, tandis que le Half Beveled conserve des valeurs faibles adaptées à des surfaces fonctionnelles et faciles à nettoyer (Figure 5.10 b).

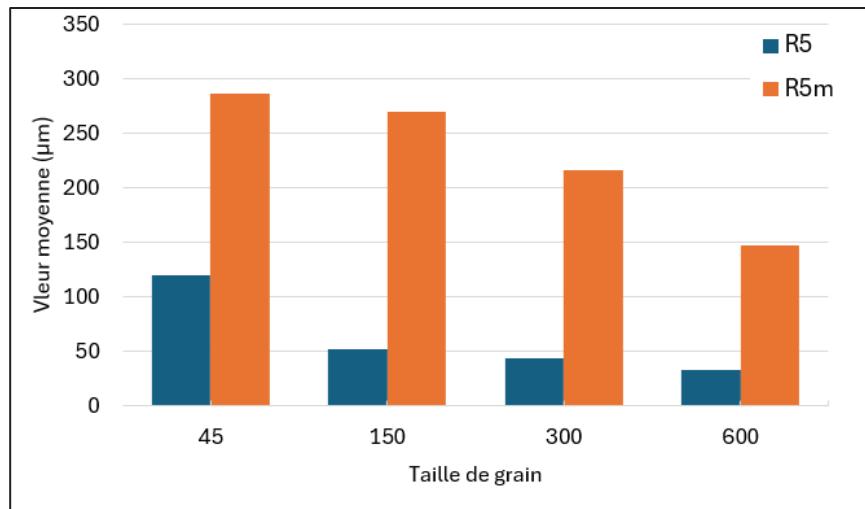


Figure 5.11 Comparaison R5/R5m selon la taille de grain (Half Beveled, Granite noir, $N = 2500$ rpm, $Vf = 1000$ mm/min)

L'effet de la granulométrie est clairement illustré avec l'outil Half Beveled sur granite noir ($N = 2500$ rpm, $Vf = 1000$ mm/min). La diminution progressive de R5 et R5m du grain 150 au grain 600 montre que l'affinage abrasif contrôle la topographie et réduit les micro-fractures génératrices de particules (Figure 5.11). Le grain 600 produit les valeurs les plus faibles, optimisant la finition pour une utilisation domestique où l'hygiène et la faible rétention de fluide sont recherchées, tandis que le grain 150, avec ses R5m élevés, génère des creux favorables à la lubrification mais aussi à l'accumulation de contaminants.

L'association Half Beveled–granite noir–grain 600 produit une surface régulière avec des émissions réduites, alors que le granite blanc, avec des R5m plus élevés, présente une plus grande capacité de rétention de fluide mais au prix d'une micro-fracturation accrue et de concentrations FP/UFP supérieures.

5.4 Discussion sur les forces de coupe

Les forces Fz révèlent un contraste marqué : les outils Eased Chamfered et Eased Concave génèrent des sollicitations verticales très élevées ($Fz \text{ max} > 1600$ N), traduisant une pénétration aggressive et des contraintes mécaniques importantes sur la pièce. À l'opposé, les formes Half Beveled et Ogee affichent des valeurs moyennes beaucoup plus faibles ($Fz \text{ moy.} \approx 17$ N et

14 N), en cohérence avec une interaction plus superficielle et un contrôle accru du processus de polissage.

Les efforts latéraux F_x soulignent également ces différences : l'outil Half Beveled présente une instabilité notable ($F_x \text{ max} \approx 688 \text{ N}$, $\sigma = 66 \text{ N}$) par rapport à l'Ogee, dont la régularité est meilleure ($\sigma = 54 \text{ N}$). Les outils Eased montrent des F_x très faibles (< 10 N), traduisant une interaction douce et progressive entre outil et matériau.

Les Figures 5.12 et 5.13 permettent de relier ces observations à la géométrie des outils et à la répartition des pressions de contact. L'Eased Concave, avec sa surface courbée et large (Figure 5.12 b), répartit la pression de manière homogène sur la surface de granite, ce qui réduit les concentrations locales de contraintes, limite l'abrasion ponctuelle et diminue les risques d'endommagement de surface. Cette géométrie favorise un enlèvement de matière progressif et contrôlé, contribuant à des finitions plus lisses et régulières.

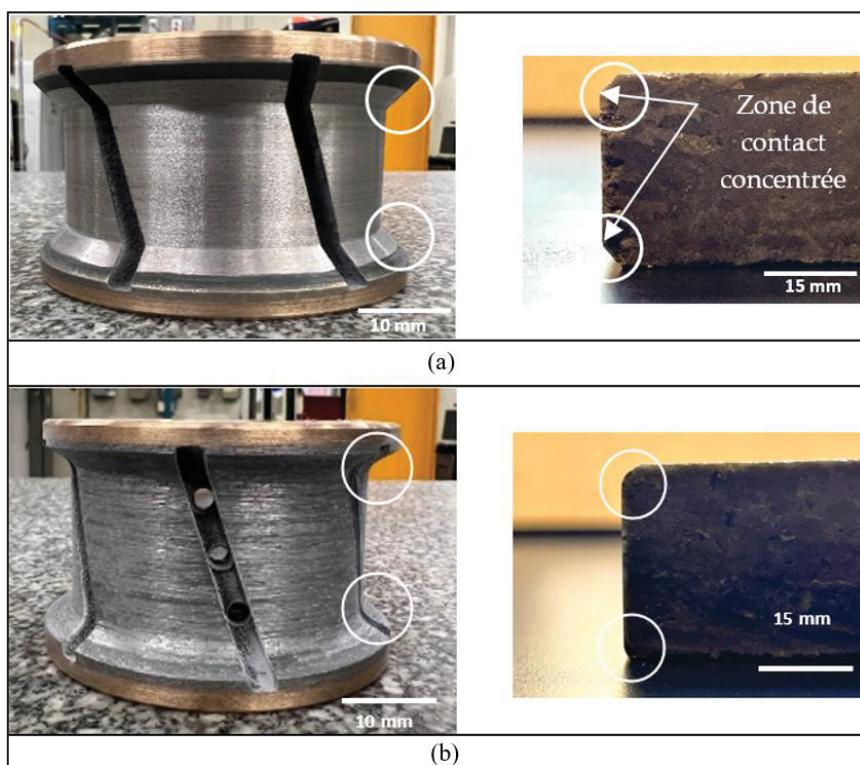


Figure 5.12 Illustration des caractéristiques et des formes produites avec chaque outil : (a) Eased chamfer, (b) Eased concave

À l'inverse, la Chamfered, caractérisée par une zone de contact très localisée (Figure 5.12 a), concentre la pression sur des points précis. Cette concentration engendre des poussées

verticales importantes et une variabilité accrue des forces, ce qui explique les endommagements visibles sur la Figure 5.8 b. La micro-fracturation observée sur le bord Eased Chamfered résulte directement de cette géométrie à arête vive qui amplifie les contraintes ponctuelles et provoque un arrachement localisé du matériau.

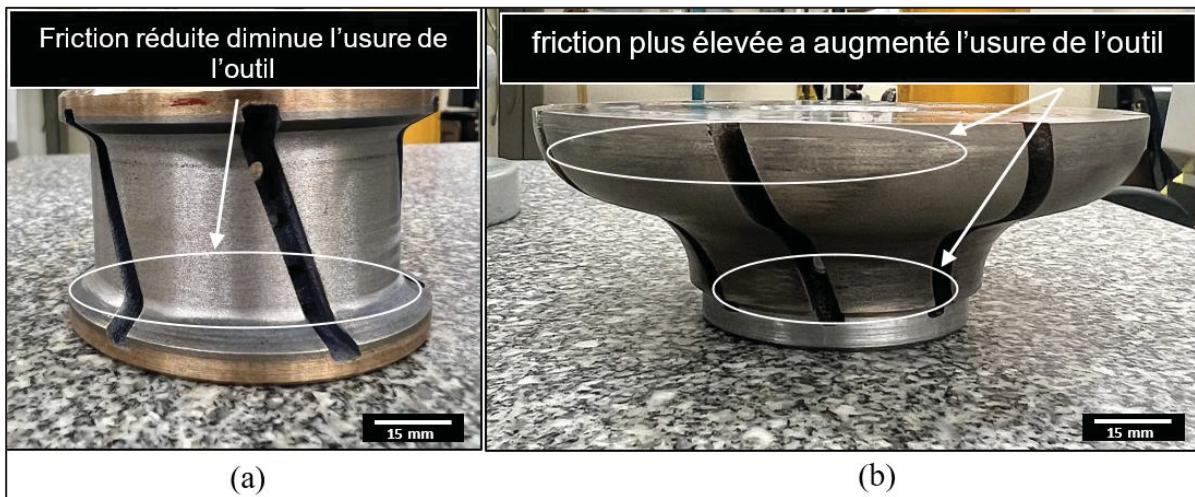


Figure 5.13 Comparaison de l'usure des outils : (a) forme Eased concave présente une usure de l'outil réduite, (b) forme Ogee présente une usure de l'outil augmentée

La Figure 5.13 illustre par ailleurs l'effet de la friction sur l'usure outil : l'Eased Concave (Figure 5.13 a) génère un frottement réduit et une usure minimale grâce à une répartition équilibrée des charges, tandis que l'Ogee (Figure 5.13 b), par sa géométrie complexe et ses multiples points de contact, induit des pics de F_z et une usure accélérée.

À l'opposé, les formes Half Beveled et Ogee (Figure 5.8(c-d)) présentent des surfaces finies sans endommagement visible et des valeurs F_z modérées, traduisant une répartition plus homogène de la pression de contact et un processus de polissage mieux maîtrisé. Ces observations corroborent les faibles valeurs de F_z et la régularité de F_x obtenues expérimentalement pour ces deux géométries.

En synthèse, la géométrie de l'outil apparaît comme un facteur clé dans la maîtrise des forces et de la qualité de surface. Les formes à contact large et progressif comme l'Eased Concave limitent les fluctuations et produisent des finitions douces, tandis que les arêtes concentrées comme la Chamfered induisent des pressions ponctuelles favorisant l'endommagement. Ces résultats confirment les conclusions de Songmene et al. (2018) et Bahri et al. (2021), qui

mettent en évidence la relation directe entre géométrie, répartition des charges et performance en polissage humide.

5.5 Corrélation émissions, rugosité et forces

Le schéma de synthèse (Figure 5.14) met en lumière les corrélations croisées entre les émissions de particules (FP/UFP), les forces de coupe (F_z / F_x) et la rugosité de surface (R_5 , R_{5m} , R_a), en fonction des paramètres de coupe.

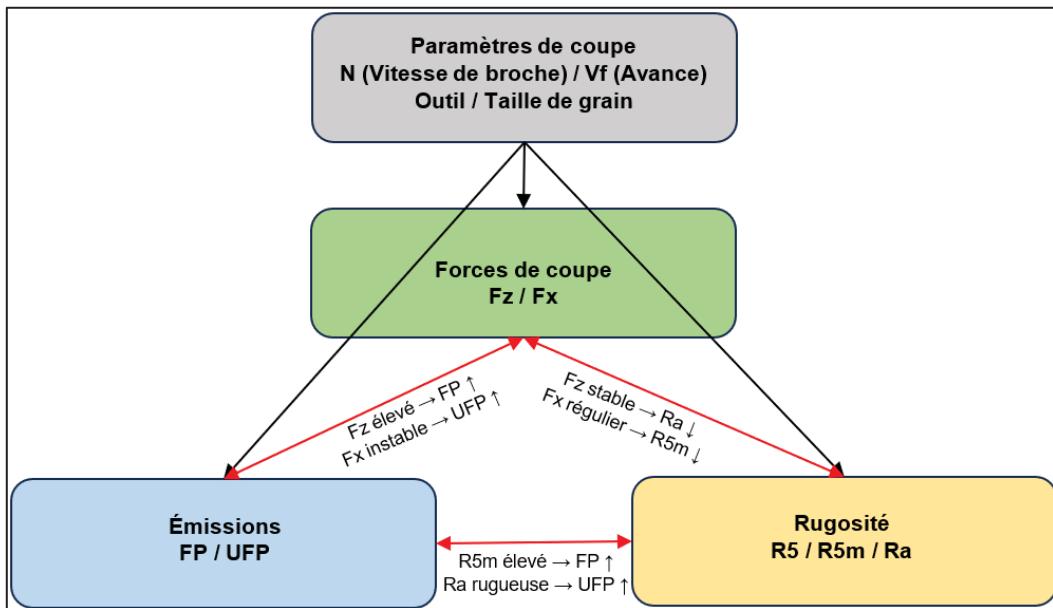


Figure 5.14 Schéma de synthèse des corrélations entre émissions de particules (FP/UFP), forces de coupe (F_z/F_x) et rugosité de surface ($R_5/R_{5m}/R_a$)

Les outils induisant des forces verticales élevées (F_z) et des efforts latéraux instables (F_x) favorisent la formation de micro-fractures, ce qui engendre une augmentation des FP/UFP. Ce phénomène est notamment observé avec les géométries Eased Chamfered et Eased Concave, dont les charges localisées ou excessivement réparties conduisent à une altération de la surface (Figure 5.8 b) et à une libération marquée de particules respirables. En revanche, les outils Half Beveled et Ogee, grâce à une interaction plus douce (F_z faibles, F_x stables), permettent de limiter les sollicitations mécaniques tout en produisant des surfaces lisses avec des émissions réduites.

Du côté de la rugosité, l'analyse des indicateurs R5 et R5m (Figures 5.9 à 5.11) montre que les micro-creux profonds (R5m élevés) sont systématiquement associés à des pics d'émissions de FP. Ce lien est particulièrement clair dans la configuration Ogee–granite blanc, où des valeurs élevées de R5m coïncident avec des pics granulométriques à ~ 50 nm (UFP, Figure 5.2), traduisant la propension du matériau à se fissurer sous contrainte mécanique.

La flèche bidirectionnelle entre la rugosité et les émissions (Figure 5.14) confirme ainsi que les surfaces rugueuses augmentent la génération de particules, mais que l'inverse est également vrai : des conditions de coupe agressives induisant plus de particules traduisent un état de surface dégradé. Les liens entre Fz/Fx et R5/R5m soulignent quant à eux que des forces stables favorisent une réduction des irrégularités de surface, tandis qu'une instabilité mécanique accroît la rugosité fonctionnelle.

En conclusion, le triptyque Fz/Fx – R5/R5m – FP/UFP est fortement interdépendant. Le choix de l'outil, de la taille de grain, et le réglage précis du couple N–Vf sont déterminants pour atteindre un compromis optimal entre performance de coupe, qualité de finition, et réduction des émissions. Ces résultats confirment les travaux de Saidi et al. (2015) et Bahri et al. (2021, 2022), qui ont montré que la génération de poussières fines lors du polissage humide est principalement liée aux micro-fracturations issues de sollicitations mécaniques mal maîtrisées.

5.6 Conclusion

La discussion a permis de mettre en évidence trois points majeurs :

- la vitesse de broche N est le facteur prédominant sur les émissions FP/UFP, et son interaction avec la vitesse d'avance contrôle directement la distribution granulométrique;
- la géométrie de l'outil influence à la fois les forces de coupe et la topographie finale : les formes à contact localisé (Chamfered) induisent des pressions ponctuelles génératrices de défauts et d'émissions élevées, tandis que les profils Half Beveled et Ogee permettent d'obtenir des surfaces régulières avec des émissions minimales;

- une corrélation forte existe entre R5/R5m, Fz et les concentrations FP/UFP, démontrant que la micro-fracturation de surface est le mécanisme principal de génération de particules lors du polissage humide.

Ces résultats fournissent un cadre d'optimisation process : combiner des outils Half Beveled avec un grain fin (G600) et ajuster le couple N–Vf pour limiter les contraintes mécaniques tout en assurant une finition lisse et une réduction significative des émissions, en particulier sur granite blanc plus abrasif. Ce chapitre établit ainsi les bases d'un contrôle intégré qualité-environnement pour le polissage humide des pierres naturelles.

CONCLUSION

L'industrie de la transformation des pierres naturelles et artificielles repose sur des procédés de finition où le polissage humide occupe une place essentielle pour assurer à la fois la qualité esthétique et la durabilité des pièces tout en limitant la dispersion de poussières dangereuses. Cependant, même en conditions lubrifiées, le processus génère des particules fines (FP) et ultrafines (UFP) contenant de la silice cristalline, dont l'impact sur la santé respiratoire est largement documenté, posant un double défi technique et sanitaire. Dans ce contexte, ce travail a proposé une analyse systématique des interactions entre la géométrie des outils de polissage, la taille de grain abrasif et les paramètres de coupe sur les émissions particulières, les forces de coupe et la qualité de surface des granites noir et blanc.

Une campagne expérimentale complète a été menée sur machine-outil CNC, combinant quatre géométries d'outils (Eased Concave, Eased Chamfered, Half Beveled et Ogee), plusieurs granulométries abrasives couvrant l'ébauche et la finition (G45 à G600) et trois niveaux de vitesses de broche et d'avance, avec des mesures simultanées de rugosité, de forces de coupe et de concentrations en particules fines et ultrafines grâce à un dispositif APS/SMPS et une table dynamométrique. L'analyse statistique des résultats a montré que la vitesse de broche constitue le facteur prédominant des émissions, devant la forme d'outil ou le type de matériau, et que les modèles linéaires simplifiés offrent une précision suffisante pour prédire les comportements observés. Les combinaisons associant l'outil Half Beveled, le grain G600 et le granite noir se distinguent par des émissions UFP minimales et une grande stabilité, tandis que l'Ogee, notamment sur granite blanc, bien que performant sur la qualité de surface, induit des pics d'émissions et une variabilité accrue liée aux interactions entre vitesse et avance.

L'étude de la rugosité a révélé que l'affinage abrasif de G45 à G600 permet une diminution progressive de Ra et des indicateurs fonctionnels R5/R5m, confirmant le lien direct entre la microtopographie et la génération de particules. L'outil Half Beveled offre la meilleure régularité et une surface stable, tandis que l'Ogee atteint les Ra les plus faibles mais au prix d'une variabilité modérée. Les formes Eased Chamfered et Concave génèrent des valeurs plus élevées de Fz et des rugosités supérieures, traduisant une sollicitation mécanique plus

importante et une tendance accrue à la micro-fracturation. Les forces de coupe confirment ces tendances : les Eased Chamfered et Concave imposent des charges verticales importantes, favorisant la libération de particules, alors que les Half Beveled et Ogee, avec des Fz modérés et des Fx plus réguliers, permettent de concilier contrôle mécanique et finition homogène.

L'intégration des résultats met en évidence une corrélation nette entre émissions, forces et rugosité : les charges mécaniques élevées et les R5m importants coïncident avec des hausses de FP/UFP, notamment sur granite blanc, confirmant que la micro-fracturation localisée est l'un des principaux vecteurs de génération de particules lors du polissage humide. À l'inverse, les combinaisons à contact progressif et grains fins réduisent simultanément les forces, la rugosité et les émissions, démontrant qu'un ajustement conjoint de la géométrie d'outil, de la taille de grain et du couple vitesse-avance constitue la clé pour optimiser à la fois la qualité de surface et la prévention sanitaire.

Ces travaux apportent ainsi une contribution scientifique et industrielle en proposant une méthodologie expérimentale intégrée et des modèles prédictifs permettant de guider le choix des paramètres et des outils en fonction des objectifs de performance et de réduction des risques. L'utilisation des paramètres optimisés ($N = 2500$ rpm, $Vf = 1000$ mm/min) a permis de réduire significativement la concentration maximale des PUF de 71% mais les valeurs sont restées de l'ordre de 10^4 #/cm³, indiquant la nécessité d'utiliser d'autres moyens de captation à la source pour les éliminer complètement de la zone de travail.

Il est aussi confirmé que l'outil Half Beveled associé à un grain fin et à des paramètres cinématiques modérés constitue une configuration optimale pour les granites, alors que l'Ogee, malgré sa capacité à produire des Ra faibles, requiert une maîtrise stricte des vitesses pour limiter les émissions. Ces résultats rejoignent et complètent les observations de la littérature sur le rôle critique des micro-fractures et de la répartition des charges dans la génération de particules et la qualité des finitions en usinage humide. Enfin, cette étude ouvre des perspectives vers l'évaluation de l'effet de la lubrification MQL, de l'usure des outils et de l'extension à d'autres matériaux comme les pierres calcaires et composites, contribuant à renforcer les connaissances et les pratiques pour un polissage industriel plus sûr et plus efficace.

RECOMMANDATIONS

Au vu des résultats obtenus sur le polissage humide des granites, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour améliorer simultanément la qualité de surface, la performance des procédés et la réduction des risques sanitaires liés aux émissions de particules fines et ultrafines:

1. Optimisation des paramètres de coupe :

- privilégier des vitesses de broche intermédiaires (≈ 2500 rpm) combinées à des vitesses d'avance modérées (≈ 1000 mm/min) pour maintenir un équilibre entre faible émission de FP/UFP et bonne qualité de surface;
- éviter les vitesses trop élevées (> 3500 rpm) sur granite blanc, en particulier avec l'outil Ogee, qui favorisent la micro-fracturation et augmentent les concentrations d'UFP.

2. Choix de la géométrie des outils :

- utiliser de préférence l'outil Half Beveled associé à des grains fins (G600) pour les finitions de granite noir, configuration démontrée comme la plus performante pour concilier rugosité faible, forces de coupe modérées et émissions minimales;
- limiter l'usage de l'Eased Chamfered pour les opérations de finition sur granites durs, car ses Fz élevés entraînent des micro-défauts et une dispersion accrue de particules.

3. Sélection des matériaux et grains abrasifs :

- adapter la taille de grain en fonction de la nature minéralogique : privilégier G600 pour les finitions de surfaces à usage hygiénique (plans de travail) et G150/G300 pour les pièces où la rétention de fluide est recherchée;
- tenir compte de la composition minérale : le granite blanc, riche en quartz, nécessite un contrôle cinématique renforcé pour limiter les émissions d'UFP (< 100 nm).

4. Contrôle des émissions et prévention sanitaire :

- maintenir un flux d'eau suffisant (> 20 L/min) pour assurer la capture des particules au point de génération et limiter leur remise en suspension;

- compléter le polissage humide par une ventilation locale par aspiration (LEV) positionnée au plus proche de la zone de coupe pour réduire les concentrations ambiantes, conformément aux recommandations de l'INSPQ et de la CNESST;
- intégrer un suivi périodique des concentrations FP/UFP dans les ateliers de transformation via APS/CPC afin d'adapter les protocoles aux exigences sanitaires (VEMP, REL).

5. Recommandations pour l'industrie et la recherche :

- concevoir des outils adaptés aux configurations optimales (ex. : Half Beveled avec G600 sur granite noir), intégrant des ajustements mécaniques pour une meilleure stabilité à vitesse intermédiaire. Les résultats montrent que certaines géométries et vitesses réduisent simultanément les forces de coupe, les émissions de particules et la rugosité. Il est ainsi recommandé de développer des outils modulaires à géométrie ajustable, permettant d'adapter précisément les conditions opératoires au matériau. L'ajout d'un petit rayon aux chanfreins est également conseillé pour limiter les contraintes, les microfissures et les pics d'émissions;
- pour la recherche : étendre l'étude à d'autres pierres artificielles à forte teneur en quartz, et intégrer l'influence du vieillissement et de l'usure des outils sur les émissions de particules et la topographie des surfaces polies;
- développer des modèles prédictifs intégrant simultanément forces de coupe, rugosité fonctionnelle (R_5/R_{5m}) et granulométrie des particules pour optimiser le procédé par simulation avant expérimentation.
- transposer les réglages robustes identifiés vers la finition manuelle des bords en recommandant l'usage de meuleuses portatives alimentées en eau, de guides d'angle, de capotage avec aspiration locale et de plages « vitesse-avance » intermédiaires pour limiter échauffement, micro-fracturation et émissions.
- élargir les recherches aux outils manuels en instrumentant pression d'appui, angle effectif, vibration et usure; comparer les émissions FP/UFP entre opérateurs et conditions de travail, puis formaliser des tolérances pratiques sur le geste pour stabiliser la qualité et la santé-sécurité.

- mener une comparaison systématique “sec vs totalement humide” à conditions identiques (géométrie (Eased, chamfer, Eased concave, Half beveled, Ogee...)), grain, matériau) afin de quantifier l'écart d'émissions FP/UFP; privilégier l'humide lorsque possible, et, si l'usinage à sec est imposé, exiger capotage intégral, LEV, filtration HEPA et EPI adaptés.
- étudier les effets de la dilution par l'eau sur la captation des PUF en faisant varier la distance et le type de buse, ainsi que le pourcentage eau/additif du fluide de coupe.
- élaborer un guide d'amélioration des conditions de travail structuré par niveau de dangerosité matériau-procédé, proposant des matrices de choix (sec/humide, géométrie, grain...), des réglages recommandés (N, Vf...), les configurations LEV et EPI requises, des protocoles de nettoyage humide et des check-lists de suivi FP/UFP.

En appliquant ces recommandations, le secteur de la transformation des pierres naturelles et artificielles peut réduire significativement l'exposition des travailleurs à la silice cristalline tout en garantissant des finitions de haute qualité, répondant ainsi aux objectifs de productivité, de sécurité sanitaire et de durabilité des procédés.

ANNEXE I

CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

- Article soumis :

Mateur W., Songmene V., Baloul A., Saidi Mohamed N. and Kouam J.: Investigation of air quality and particle emission during wet granite edge finishing on machine-tool with Half Beveled and Ogee profile tools, soumis à *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, jmmp-3968989, 21 oct. 2025.

- Article publié :

Mateur, W., Songmene, V., & Kouam, J. (2024). Experimental investigation on the effects of tool geometry and cutting conditions on machining behavior during edge finishing of granite using concave and chamfered profiling tools. *Micromachines*, 15(3), 315. Publié en février 2024.

ANNEXE II

TABLEAUX RÉCAPITULATIFS DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Tableau-A II-1 Plan d'expériences pour chaque configuration

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]
1	2500	1500
2	2500	500
3	3500	1000
4	1500	500
5	3500	500
6	2500	1000
7	1500	1500
8	3500	1500
9	1500	1000

Tableau-A II-2 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Ogee / G150)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	150	1,40	12150	2,477
9	1500	1000	150	1,64	9335	1,420
7	1500	1500	150	1,01	10860	1,547
2	2500	500	150	1,64	13000	1,670
6	2500	1000	150	2,04	12300	1,207
1	2500	1500	150	1,62	13000	1,833
5	3500	500	150	4,39	13300	2,680
3	3500	1000	150	1,32	12050	1,900
8	3500	1500	150	3,89	12150	2,143

Tableau-A II-3 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Ogee / G600)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	600	2,55	5205	0,963
9	1500	1000	600	1,55	11400	1,057
7	1500	1500	600	1,24	6955	0,577
2	2500	500	600	5,33	4955	0,490
6	2500	1000	600	2,64	5865	0,320
1	2500	1500	600	3,90	4625	0,470
5	3500	500	600	7,60	5880	0,643
3	3500	1000	600	6,59	6160	0,477
8	3500	1500	600	4,13	10440	0,473

Tableau-A II-4 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Half Beveled / G150)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	150	0,176	3815	2,633
9	1500	1000	150	0,013	3815	3,300
7	1500	1500	150	0,031	4305	2,607
2	2500	500	150	0,058	3575	2,697
6	2500	1000	150	0,050	4635	2,247
1	2500	1500	150	0,065	4530	2,623
5	3500	500	150	0,126	4795	2,907
3	3500	1000	150	0,120	4245	3,973
4	3500	1500	150	0,096	4915	3,960

Tableau-A II-5 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Half Beveled / G600)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	600	0,005	5850	0,683
9	1500	1000	600	0,011	5860	0,790
7	1500	1500	600	0,113	6060	0,623
2	2500	500	600	0,020	5260	0,860
6	2500	1000	600	0,006	6155	0,657
1	2500	1500	600	0,004	6435	0,657
5	3500	500	600	0,012	6575	0,747
3	3500	1000	600	0,006	5960	0,650
8	3500	1500	600	0,049	6345	0,797

Tableau-A II-6 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite blanc/ Ogee / G150)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	150	3,875	5540	2,217
9	1500	1000	150	1,655	6695	2,293
7	1500	1500	150	1,435	7310	1,747
2	2500	500	150	4,950	5365	1,547
6	2500	1000	150	3,550	7205	1,450
1	2500	1500	150	5,405	8310	2,153
5	3500	500	150	9,525	8970	1,693
3	3500	1000	150	9,935	7950	2,440
4	3500	1500	150	4,495	8005	1,770

Tableau-A II-7 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite blanc/ Ogee / G600)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	600	3,670	16700	0,780
9	1500	1000	600	3,195	9540	0,787
7	1500	1500	600	1,840	8530	0,597
2	2500	500	600	7,345	8575	0,273
6	2500	1000	600	3,560	8380	0,300
1	2500	1500	600	4,640	13350	0,383
5	3500	500	600	9,155	9580	0,457
3	3500	1000	600	9,160	9685	0,480
8	3500	1500	600	5,915	8880	0,650

Tableau-A II-8 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite blanc/ Half Beveled / G150)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	150	4,075	10800	2,617
9	1500	1000	150	1,890	13750	2,080
7	1500	1500	150	1,465	12750	1,770
2	2500	500	150	4,970	13400	2,300
6	2500	1000	150	4,570	12050	1,493
1	2500	1500	150	10,440	15400	2,857
5	3500	500	150	14,350	13400	2,377
3	3500	1000	150	7,035	12950	2,403
8	3500	1500	150	7,155	13400	2,293

Tableau-A II-9 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite blanc/ Half Beveled / G600)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	600	1,935	12200	0,650
9	1500	1000	600	1,069	10245	0,330
7	1500	1500	600	0,871	11145	0,463
2	2500	500	600	2,385	12950	0,520
6	2500	1000	600	1,770	11650	0,440
1	2500	1500	600	2,195	14000	0,530
5	3500	500	600	3,790	13200	0,527
3	3500	1000	600	3,145	13500	0,410
8	3500	1500	600	2,235	10775	0,490

Tableau-A II-10 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Eased Concave / G150)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	150	0,135	-	1,613
9	1500	1000	150	-	-	1,863
7	1500	1500	150	-	-	3,837
2	2500	500	150	-	-	3,937
6	2500	1000	150	0,520	-	2,297
1	2500	1500	150	-	-	2,330
5	3500	500	150	-	-	3,020
3	3500	1000	150	-	-	2,920
8	3500	1500	150	-	-	1,820

Tableau-A II-11 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Eased Concave / G600)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	600	1,470	-	0,547
9	1500	1000	600	0,312	-	0,433
7	1500	1500	600	0,014	-	0,440
2	2500	500	600	101,394	-	0,670
6	2500	1000	600	0,010	-	0,510
1	2500	1500	600	130,055	-	0,643
5	3500	500	600	8,999	-	0,693
3	3500	1000	600	0,056	-	1,613
8	3500	1500	600	116,600	-	1,360

Tableau-A II-12 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Eased Chamfred / G150)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	150	0,615	-	2,927
9	1500	1000	150	0,390	-	1,927
7	1500	1500	150	0,461	-	2,217
2	2500	500	150	0,349	-	3,423
6	2500	1000	150	1,167	-	2,270
1	2500	1500	150	0,541	-	1,910
5	3500	500	150	0,453	-	3,430
3	3500	1000	150	0,317	-	2,450
8	3500	1500	150	0,184	-	3,210

Tableau-A II-13 Résultats expérimentaux du plan d'expérience (Granite noir/ Eased Chamfred / G600)

Ordre des Essais	N [rpm]	Vf [mm/min]	Taille de grain	Cn_FP [#/cm³]	Cn_UFP [#/cm³]	Ra [µm]
4	1500	500	600	0,569	-	0,607
9	1500	1000	600	0,486	-	0,510
7	1500	1500	600	0,564	-	0,490
2	2500	500	600	0,251	-	0,603
6	2500	1000	600	0,046	-	0,873
1	2500	1500	600	0,397	-	0,533
5	3500	500	600	0,727	-	1,283
3	3500	1000	600	2,427	-	3,253
8	3500	1500	600	0,694	-	2,227

ANNEXE III

RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DES ÉMISSIONS

1. Modèles quadratiques

Tableau-A III-1 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_FP (Ogee / Granite noir/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	45,6631	89,14%	45,6631	9,13263	6,57	0,046
A: N [rpm]	1	44,9586	87,76%	0,4419	0,44192	0,32	0,603
B: Vf [mm/min]	1	0,1691	0,33%	0,1551	0,15507	0,11	0,755
AA	1	0,0288	0,06%	0,0044	0,00442	0,00	0,958
BB	1	0,2144	0,42%	0,3418	0,34181	0,25	0,646
AB	1	0,2923	0,57%	0,2923	0,29230	0,21	0,670
Erreur	4	5,5630	10,86%	5,5630	1,39076	-	-
Totale	9	51,2262	100%	-	-	-	-

Tableau-A III-2 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_FP (Half beveled / Granite noir/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	0,065220	79,76%	0,065220	0,013044	3,15	0,144
A: N [rpm]	1	0,061687	75,44%	0,002162	0,002162	0,52	0,510
B: Vf [mm/min]	1	0,001355	1,66%	0,000241	0,000241	0,06	0,821
AA	1	0,001981	2,42%	0,000990	0,000990	0,24	0,650
BB	1	0,000019	0,02%	0,000001	0,000001	0,00	0,990
AB	1	0,000177	0,22%	0,000177	0,000177	0,04	0,846
Erreur	4	0,016549	20,24%	0,016549	0,004137	-	-
Totale	9	0,081769	100%	-	-	-	-

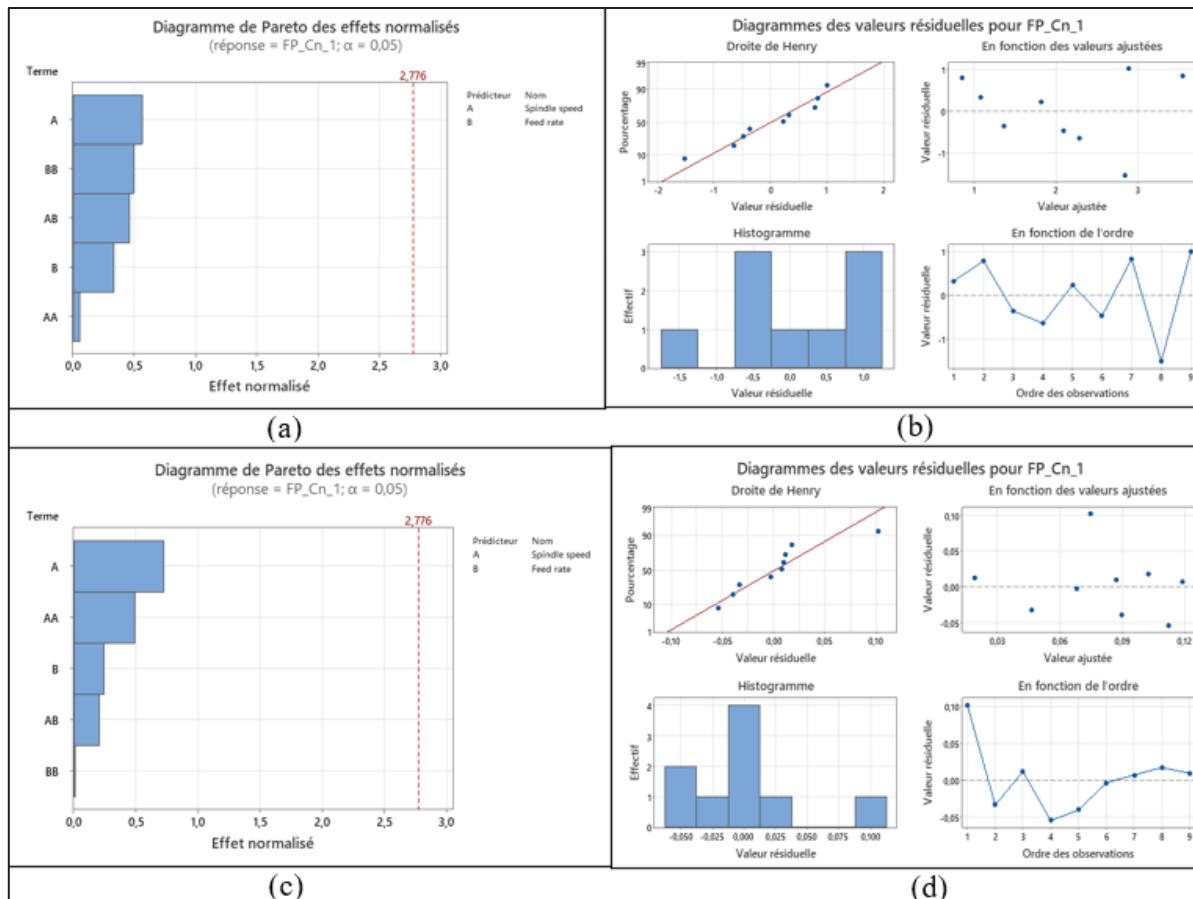


Figure-A III-1 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_FP en modèle quadratique (Granite noir/ G150) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

Tableau-A III-3 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_FP (Ogee / Granite blanc/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	281,793	95,27%	281,793	56,3585	16,13	0,009
A: N [rpm]	1	267,543	90,46%	0,421	0,4208	0,12	0,746
B: Vf [mm/min]	1	11,991	4,05%	0,078	0,0778	0,02	0,889
AA	1	0,005	0,00%	1,344	1,3439	0,38	0,569
BB	1	0,242	0,08%	0,014	0,0137	0,00	0,953
AB	1	2,013	0,68%	2,013	2,0128	0,58	0,490
Erreur	4	13,975	4,73%	13,975	3,4938	-	-
Total	9	295,768	100%	-	-	-	-

Tableau-A III-4 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_FP (Half beveled / Granite blanc/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	444,518	91,94%	444,518	88,9037	9,12	0,026
A: N [rpm]	1	416,324	86,10%	16,285	16,2851	1,67	0,266
B: Vf [mm/min]	1	8,196	1,70%	12,608	12,6081	1,29	0,319
AA	1	0,242	0,05%	0,968	0,9680	0,10	0,768
BB	1	14,026	2,90%	17,882	17,8822	1,83	0,247
AB	1	5,731	1,19%	5,731	5,7311	0,59	0,486
Erreur	4	38,993	8,06%	38,993	9,7482	-	-
Total	9	483,511	100%	-	-	-	-

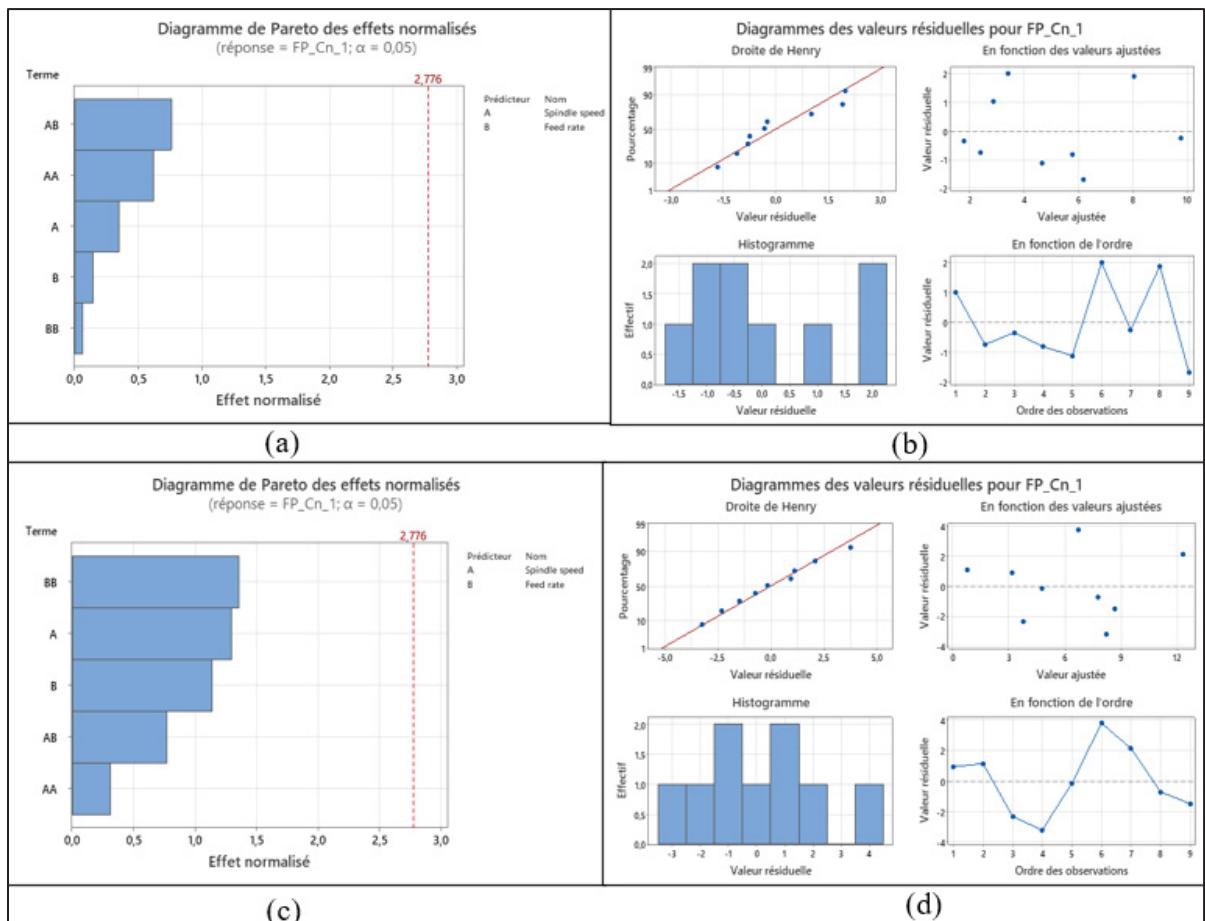


Figure-A III-2 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_FP en modèle quadratique (Granite blanc/ G150) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

Tableau-A III-5 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_UFP (Ogee / Granite noir/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	4,3411E8	92,90%	4,3411E8	8,6821E7	10,47	0,021
A: N [rpm]	1	3,7424E8	80,09%	3,6908E6	3,6908E6	0,45	0,541
B: Vf [mm/min]	1	3,6585E7	7,83%	2,0692E7	2,0692E7	2,5	0,189
AA	1	6,5307E6	1,40%	2,7672E6	2,7672E6	0,33	0,594
BB	1	1,6724E7	3,58%	1,5348E7	1,5348E7	1,85	0,245
AB	1	2,3805E4	0,01%	2,3805E4	2,3805E4	0	0,96
Erreur	4	3,3172E7	7,10%	3,3172E7	8,2929E6		
Totale	9	4,6728E8	100%				

Tableau-A III-6 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_UFP (Half beveled / Granite noir/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	3,2940E8	99,44%	3,2940E8	6,5879E7	141,56	0,00001
A: N [rpm]	1	3,0310E8	91,50%	2,2960E6	2,2960E6	4,93	0,09
B: Vf [mm/min]	1	1,2451E7	3,76%	7,1975E5	7,1975E5	1,55	0,282
AA	1	1,2826E7	3,87%	6,9237E5	6,9237E5	1,49	0,29
BB	1	3,6030E5	0,11%	1,4059E5	1,4059E5	0,3	0,612
AB	1	6,6251E5	0,20%	6,6251E5	6,6251E5	1,42	0,299
Erreur	4	1,8616E6	0,56%	1,8616E6	4,6540E5	-	-
Totale	9	3,3126E8	100%	-	-	-	-

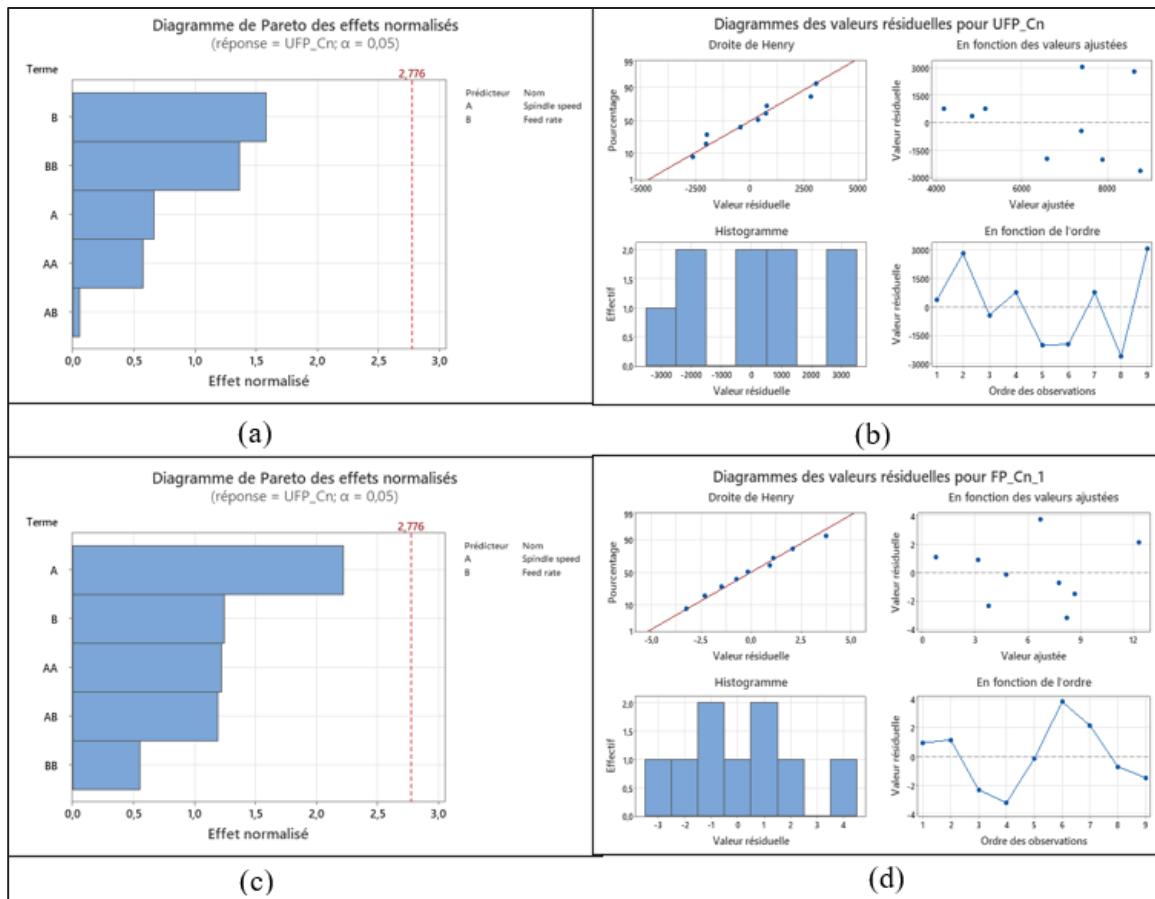


Figure-A III-3 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_UFP en modèle quadratique (Granite noire/ G600) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

Tableau-A III-7 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_UFP (Ogee / Granite blanc/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	9,6142E8	93,43%	9,6142E8	1,9228E8	11,37	0,018
A: N [rpm]	1	8,2359E8	80,03%	3,4217E7	3,4217E7	2,02	0,228
B: Vf [mm/min]	1	3,6786E7	3,57%	2,6527E5	2,6527E5	0,02	0,906
AA	1	9,9700E7	9,69%	3,0105E7	3,0105E7	1,78	0,253
BB	1	3,0573E4	0,00%	1,4680E4	1,4680E4	0	0,978
AB	1	1,3187E6	0,13%	1,3187E6	1,3187E6	0,08	0,794
Erreur	4	6,7648E7	6,57%	6,7648E7	1,6912E7	-	-
Totale	9	1,0291E9	100%	-	-	-	-

Tableau-A III-8 Tableau ANOVA des modèles quadratiques des émissions Cn_UFP (Half beveled / Granite blanc/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	5	1,3418E9	99,39%	1,3418E9	2,6836E8	130,71	0,00001
A: N [rpm]	1	1,2419E9	91,99%	2,4743E7	2,4743E7	12,05	0,026
B: Vf [mm/min]	1	2,6702E7	1,98%	4,7630E3	4,7630E3	0	0,964
AA	1	7,1377E7	5,29%	1,0775E7	1,0775E7	5,25	0,084
BB	1	2,1150E3	0,00%	1,4710E5	1,4710E5	0,07	0,802
AB	1	1,7983E6	0,13%	1,7983E6	1,7983E6	0,88	0,402
Erreur	4	8,2128E6	0,61%	8,2128E6	2,0532E6	-	-
Total	9	1,3500E9	100%	-	-	-	-

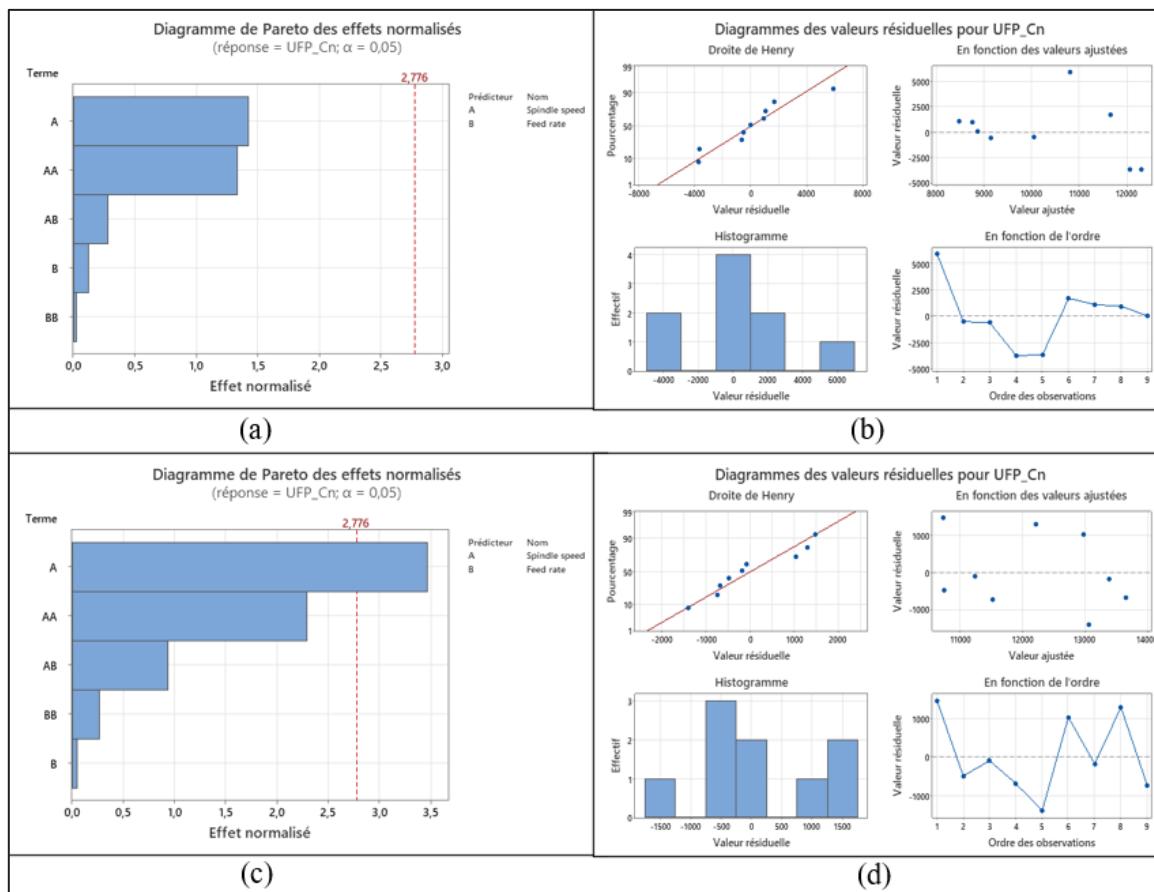


Figure-A III-4 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_UFP en modèle quadratique (Granite blanc/ G600) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

2. Modèles linéaires

Tableau-A III-9 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_FP (Ogee / Granite noir/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	45,1277	88,09%	45,1277	22,5638	25,90	0,001
A: N [rpm]	1	44,9586	87,76%	12,5721	12,5721	14,43	0,007
B: Vf [mm/min]	1	0,1691	0,33%	0,1691	0,1691	0,19	0,673
Erreur	7	6,0985	11,91%	6,0985	0,8712	-	-
Totale	9	51,2262	100,00%	-	-	-	-

Tableau-A III-10 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_FP (Half beveled / Granite noir/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	0,063042	77,10%	0,063042	0,031521	11,78	0,006
A: N [rpm]	1	0,061687	75,44%	0,022600	0,022600	8,45	0,023
B: Vf [mm/min]	1	0,001355	1,66%	0,001355	0,001355	0,51	0,500
Erreur	7	0,018727	22,90%	0,018727	0,002675	-	-
Totale	9	0,081769	100,00%	-	-	-	-

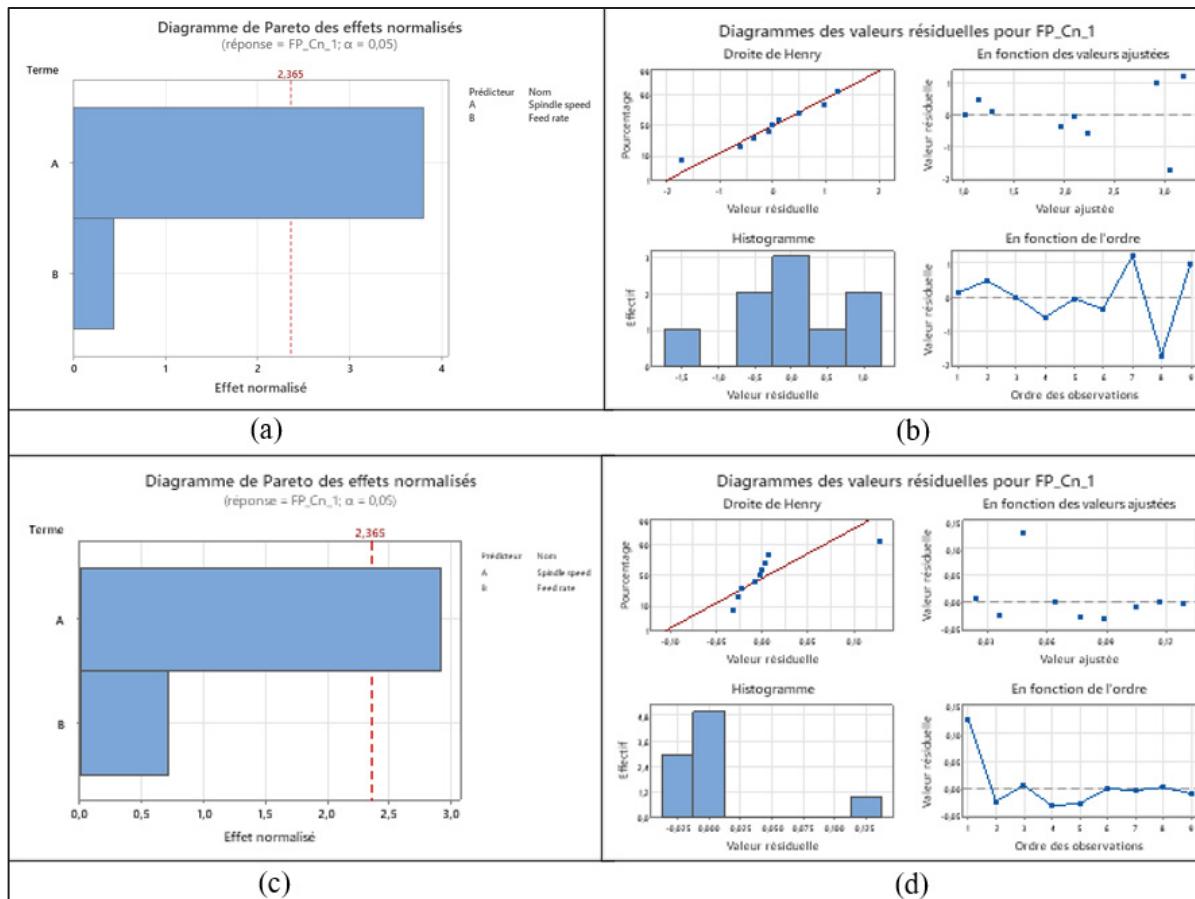


Figure-A III-5 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_FP en modèle linéaire (Granite noir/ G150) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

Tableau-A III-11 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_FP (Ogee / Granite blanc/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	279,53	94,51%	279,53	139,767	60,27	0,00001
A: N [rpm]	1	267,54	90,46%	116,95	116,949	50,43	0,00001
B: Vf [mm/min]	1	11,99	4,05%	11,99	11,991	5,17	0,057
Erreur	7	16,23	5,49%	16,23	2,319	-	-
Total	9	295,77	100,00%	-	-	-	-

Tableau-A III-12 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_FP (Half beveled / Granite blanc/ G150)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	424,520	87,80%	424,520	212,260	25,19	0,001
A: N [rpm]	1	416,324	86,10%	149,038	149,038	17,69	0,004
B: Vf [mm/min]	1	8,196	1,70%	8,196	8,196	0,97	0,357
Erreur	7	58,992	12,20%	58,992	8,427	-	-
Total	9	483,511	100,00%	-	-	-	-

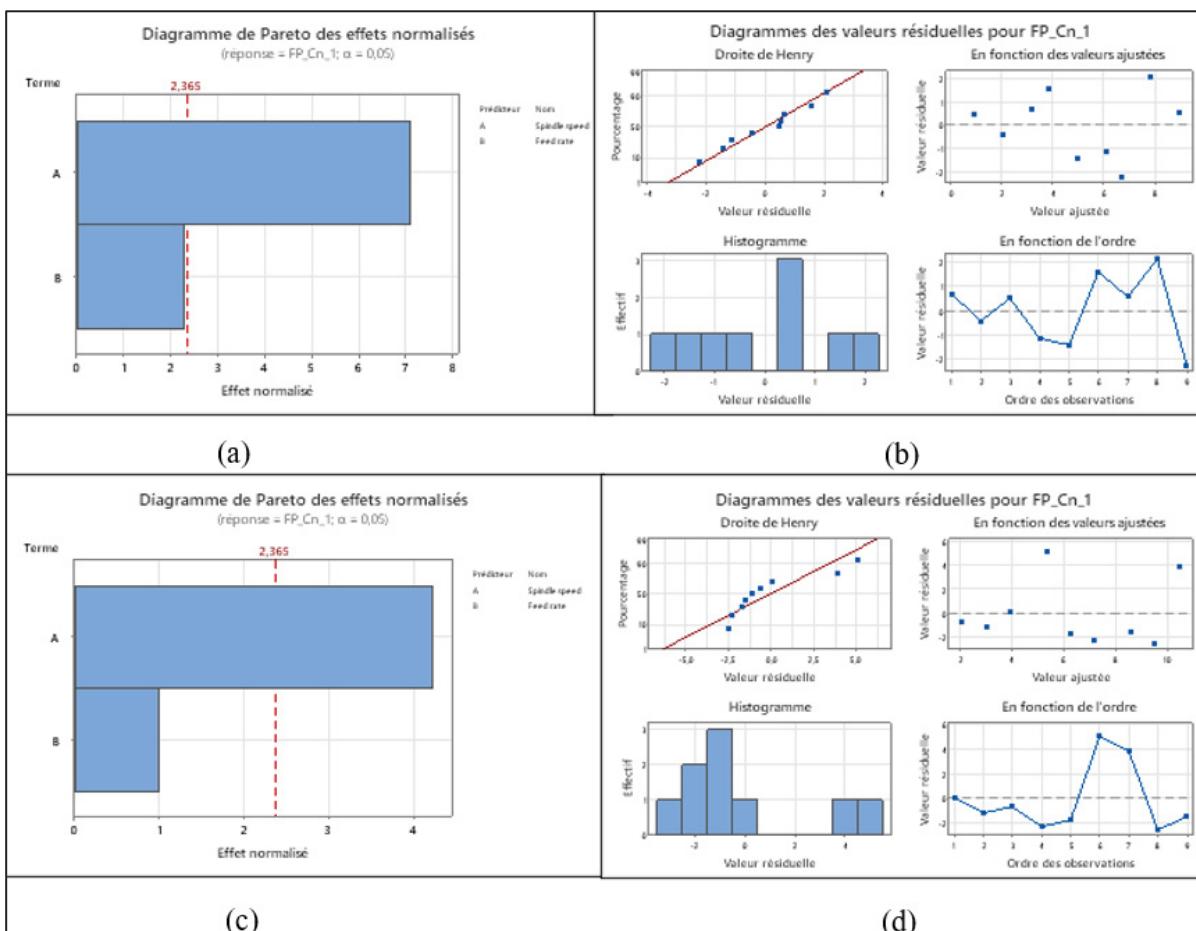


Figure-A III-6 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_FP en modèle linéaire (Granite blanc/ G150) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

Tableau-A III-13 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_UFP (Ogee / Granite noir/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	4,1083E8	87,92%	4,1083E8	2,0541E8	25,47	0,001
A: N [rpm]	1	3,7424E8	80,09%	1,4921E7	1,4921E7	1,85	0,216
B: Vf [mm/min]	1	3,6585E7	7,83%	3,6585E7	3,6585E7	4,54	0,071
Erreur	7	5,6450E7	12,08%	5,6450E7	8,0643E6	-	-
Total	9	4,6728E8	100%	-	-	-	-

Tableau-A III-14 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_UFP (Half beveled / Granite noir/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	3,1555E8	95,26%	3,1555E8	1,5777E8	70,3	0,00001
A: N [rpm]	1	3,0310E8	91,50%	2,6640E7	2,6640E7	11,87	0,011
B: Vf [mm/min]	1	1,2451E7	3,76%	1,2451E7	1,2451E7	5,55	0,051
Erreur	7	1,5710E7	4,74%	1,5710E7	2,2443E6	-	-
Total	9	3,3126E8	100%	-	-	-	-

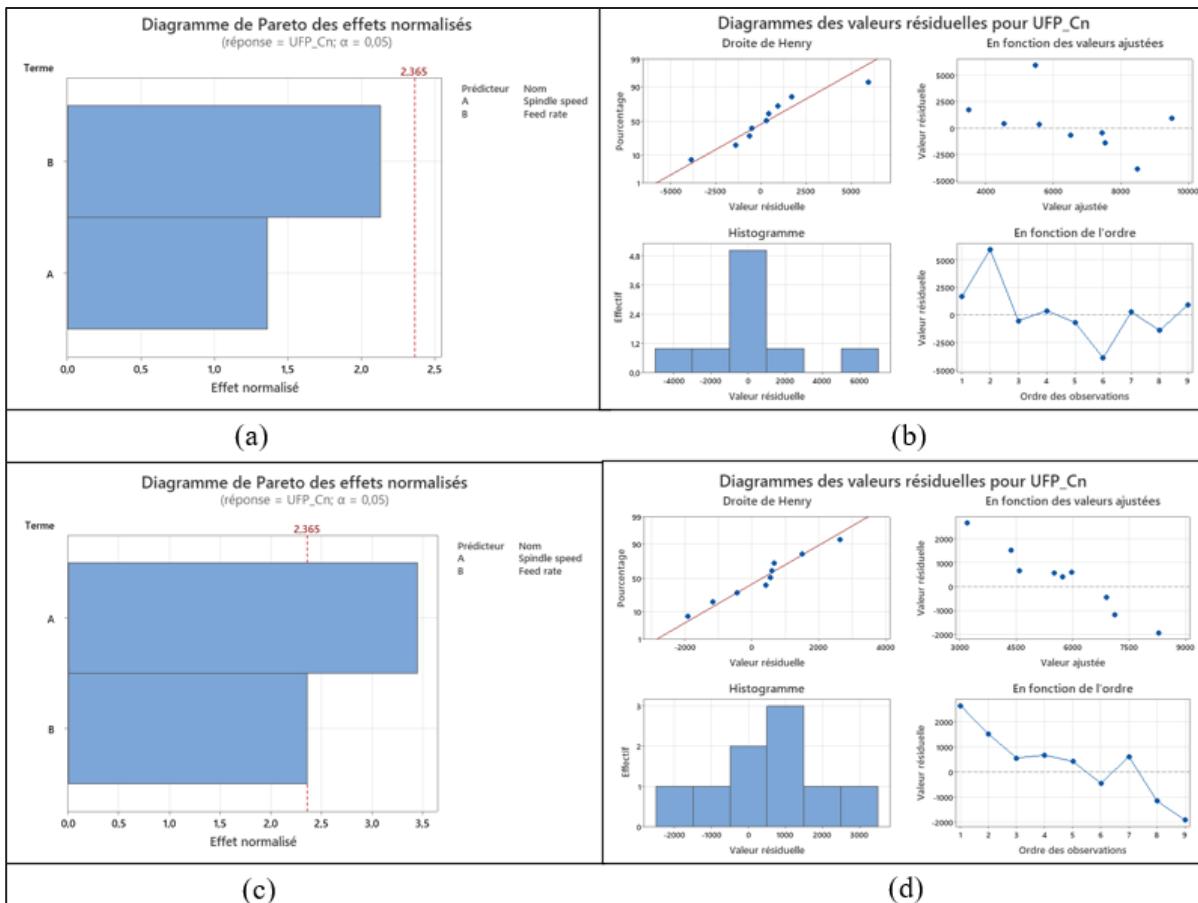


Figure-A III-7 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_UFP en modèle linéaire (Granite noir/ G600) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

Tableau-A III-15 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_UFP (Ogee / Granite blanc/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	8,6037E8	83,61%	8,6037E8	4,3019E8	17,85	0,002
A: N [rpm]	1	8,2359E8	80,03%	6,8713E7	6,8713E7	2,85	0,135
B: Vf [mm/min]	1	3,6786E7	3,57%	3,6786E7	3,6786E7	1,53	0,257
Erreur	7	1,6870E8	16,39%	1,6870E8	2,4100E7	-	-
Totale	9	1,0291E9	100%	-	-	-	-

Tableau-A III-16 Tableau ANOVA des modèles linéaires des émissions Cn_UFP (Half beveled / Granite blanc/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	2	1,2686E9	93,97%	1,2686E9	6,3432E8	54,55	0,00001
A: N [rpm]	1	1,2419E9	91,99%	1,4850E8	1,4850E8	12,77	0,009
B: Vf [mm/min]	1	2,6702E7	1,98%	2,6702E7	2,6702E7	2,3	0,173
Erreur	7	8,1390E7	6,03%	8,1390E7	1,1627E7	-	-
Total	9	1,3500E9	100%	-	-	-	-

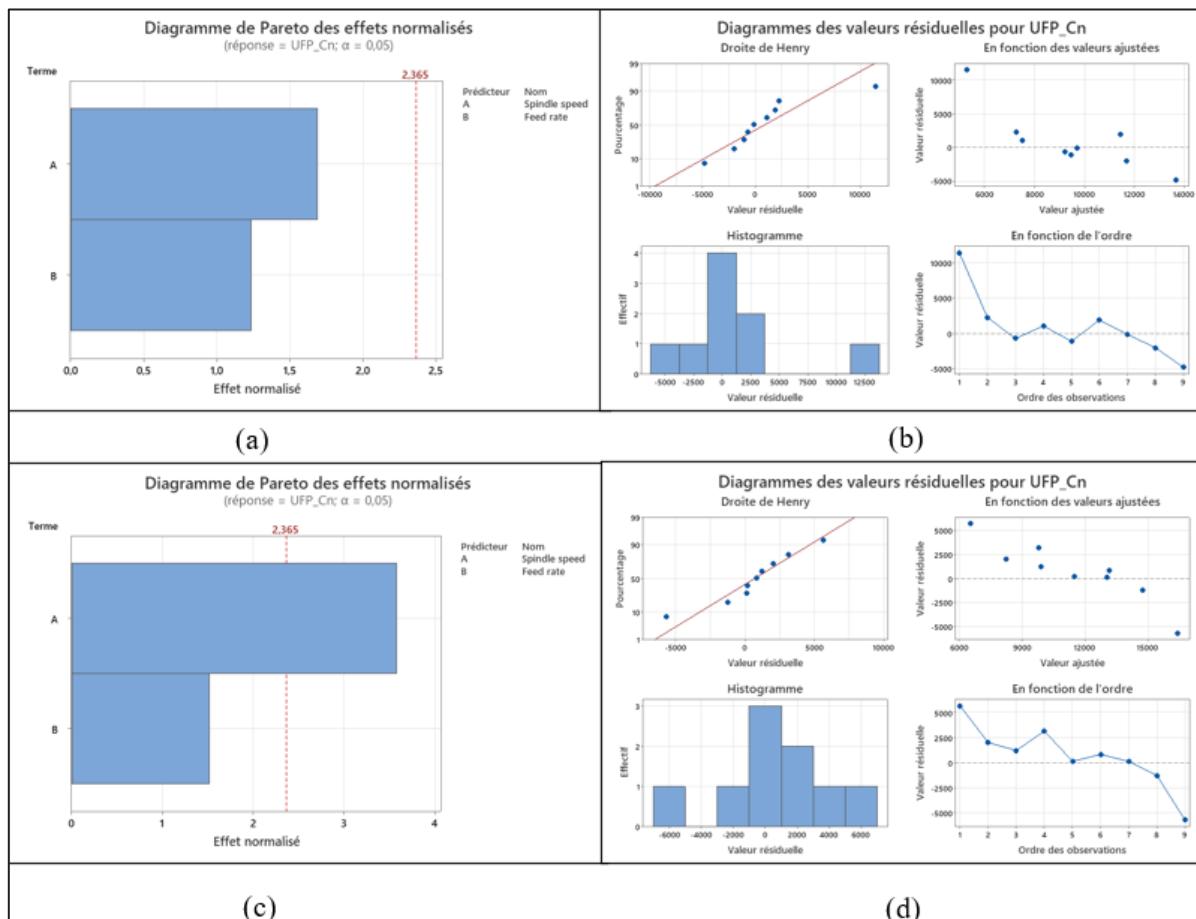


Figure-A III-8 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Cn_UFP en modèle linéaire (Granite blanc/ G600) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

ANNEXE IV

RÉSULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE DE RUGOSITÉ

Tableau-A IV-1 Tableau ANOVA de rugosité Ra (Ogee/ Granite noir/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	3	3,2848	86,31%	3,2848	1,09492	12,61	0,005
A: N [rpm]	1	2,5795	67,78%	0,6132	0,61323	7,06	0,038
B: Vf [mm/min]	1	0,1528	4,02%	0,6692	0,66915	7,71	0,032
AB	1	0,5525	14,52%	0,5525	0,55247	6,36	0,045
Erreur	6	0,5209	13,69%	0,5209	0,08681	-	-
Totale	9	3,8056	100,00%	-	-	-	-

Tableau-A IV-2 Tableau ANOVA de rugosité Ra (Half beveled/ Granite noir/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	3	4,55641	97,02%	4,5564	1,51880	65,14	0,00001
A: N [rpm]	1	4,24458	90,38%	0,7048	0,70482	30,23	0,002
B: Vf [mm/min]	1	0,09787	2,08%	0,3075	0,30752	13,19	0,011
AB	1	0,21396	4,56%	0,2140	0,21396	9,18	0,023
Erreur	6	0,13989	2,98%	0,1399	0,02331	-	-
Totale	9	4,69630	100,00%	-	-	-	-

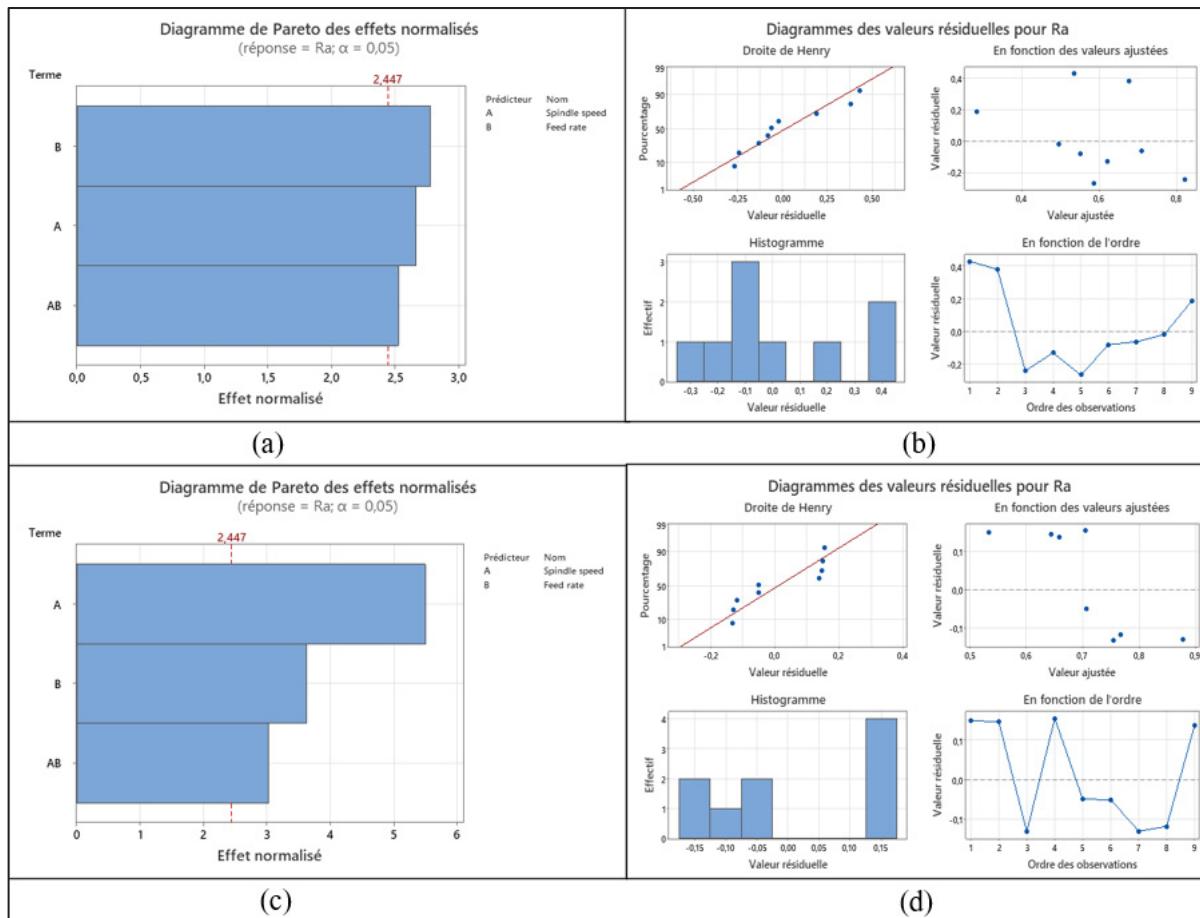


Figure-A IV-1 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Ra (Granite noir/ G600) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

Tableau-A IV-3 Tableau ANOVA de rugosité Ra (Ogee / Granite blanc/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	3	2,3780	86,27%	2,3780	0,79267	12,57	0,005
A: N [rpm]	1	2,0115	72,98%	0,1926	0,19255	3,05	0,131
B: Vf [mm/min]	1	0,2202	7,99%	0,3555	0,35548	5,64	0,055
AB	1	0,1463	5,31%	0,1463	0,14627	2,32	0,179
Erreur	6	0,3783	13,73%	0,3783	0,06306	-	-
Totale	9	2,7564	100,00%	-	-	-	-

Tableau-A IV-4 Tableau ANOVA de rugosité Ra (Half beveled / Granite blanc/ G600)

Source	DL	SC séq	Contribution	SC ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Régression	3	2,05573	94,45%	2,0557	0,68524	34,03	0,00001
A: N [rpm]	1	1,90276	87,42%	0,3323	0,33230	16,50	0,007
B: Vf [mm/min]	1	0,04314	1,98%	0,1494	0,14942	7,42	0,034
AB	1	0,10982	5,05%	0,1098	0,10982	5,45	0,058
Erreur	6	0,12083	5,55%	0,1208	0,02014	-	-
Totale	9	2,17656	100,00%	-	-	-	-

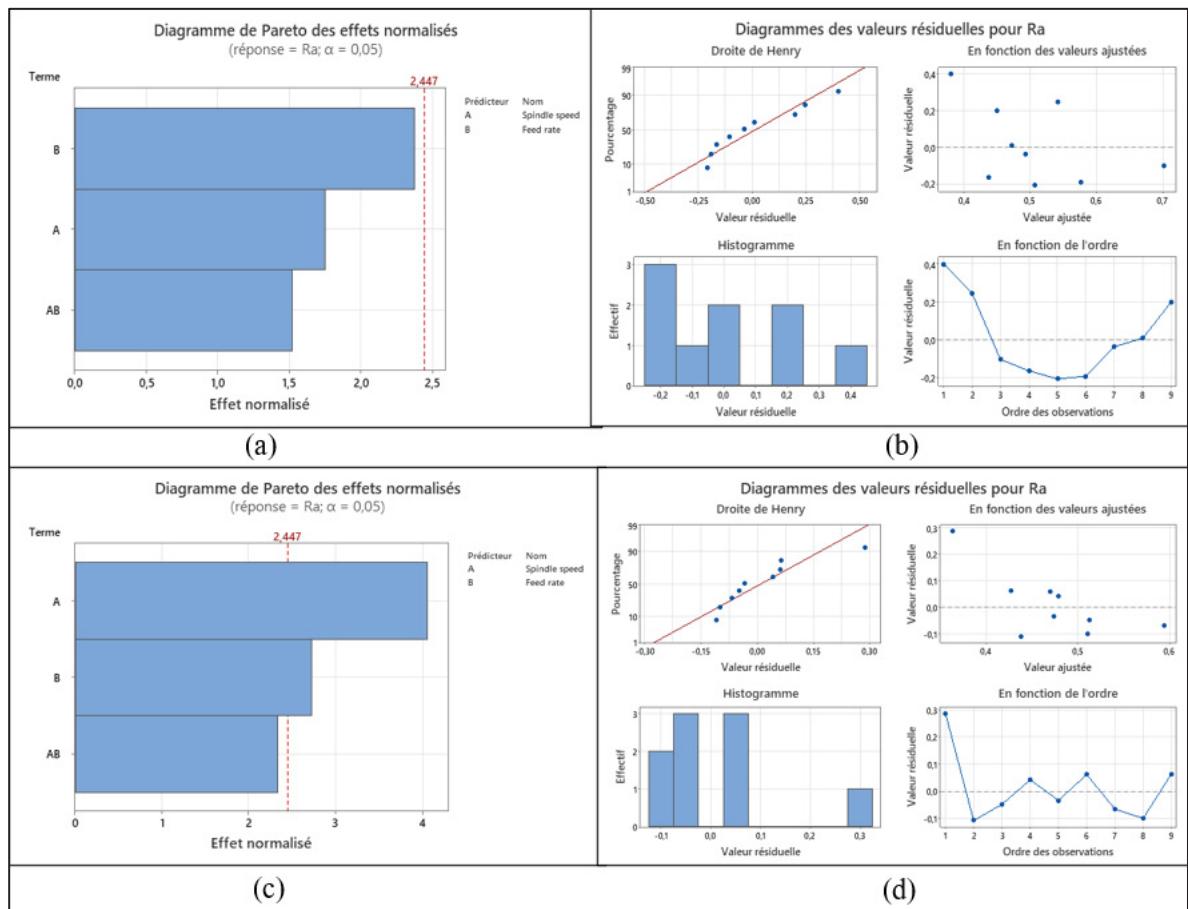


Figure-A IV-2 Diagrammes de Pareto et analyses résiduelles pour la réponse Ra (Granite blanc/ G600) (a) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Ogee (b) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Ogee (c) Diagramme de Pareto des effets normalisés forme Half beveled (d) Diagrammes des valeurs résiduelles forme Half beveled

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akbar-Khanzadeh, F., Milz, S., Ames, A., Susi, P. P., Bisesi, M., Khuder, S. A. & Akbar-Khanzadeh, M. (2007). Crystalline silica dust and respirable particulate matter during indoor concrete grinding—Wet grinding and ventilated grinding compared with uncontrolled conventional grinding. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(10), 770–779. <https://doi.org/10.1080/15459620701569708>
- Alpha Professional Tools® (2024). *Stone profiling tools*. <https://www.alpha-tools.com/> (consulté le 21 septembre 2024)
- Bahloul, A. (2019). *Transformation du granit : Caractérisation et contrôle de la poussière de la silice émise par le polissage* (Rapport scientifique R-1054). IRSST.
- Bahri, H., Songmene, V. & Kouam, J. (2022). Experimental investigation on part quality and dust emission during minimum quantity lubricated (MQL) edge finishing of granite. *Micromachines*, 13(10), 1714. <https://doi.org/10.3390/mi13101714>
- 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>
- Barraza, J. M. (2017). *Clasificación de partículas y su interacción con el tracto respiratorio humano*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Beaudet, M., Collège d'enseignement général et professionnel de Saint-Laurent, & Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec. (1985). *Hygiène du travail*. Sainte-Foy [Québec]: Éditions Le Griffon d'argile.
- Carrieri, M., Guzzardo, C., Farcas, D. & Cena, L. G. (2020). Characterization of silica exposure during manufacturing of artificial stone countertops. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4489. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124489>
- Cao, Y., Wang, Y., Li, C., Ding, J., Yang, Y. & Ren, X. (2016). A field measurement study of a parallel-flow push–pull system for industrial ventilation applications. *International Journal of Ventilation*, 15(2), 167–181. <https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1203615>
- García Vadillo, F. J., Sánchez Gómez, J., & Romero Morillo, J. (2011). Dust generation in marble and granite processing plants. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1375–1384.

Goyer, N., Bahloul, A. & Veillette, C. (2012). *Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice : Guide des bonnes pratiques à l'intention des entreprises du secteur de la transformation du granit et autres matériaux contenant du quartz.* IRSST & CSST.

GranQuartz (2024). *Router bits and profiling tools for stone fabrication.* <https://www.granquartz.com/> (consulté le 21 septembre 2024)

Hall, S., Stacey, P., Pengelly, I., Stagg, S., Saunders, J. & Hambling, S. (2022). Characterizing and comparing emissions of dust, respirable crystalline silica, and volatile organic compounds from natural and artificial stones. *Annals of Work Exposures and Health*, 66, 139–149. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab087>

Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles* (2e éd.). Wiley-Interscience.

Johnson, D. L., Phillips, M. L., Qi, C., Van, A. T. & Hawley, D. A. (2017). Experimental evaluation of respirable dust and crystalline silica controls during simulated performance of stone countertop fabrication tasks with powered hand tools. *Annals of Work Exposures and Health*, 61(6), 711–723. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx040>

Kogel, J. E. (2006). *Industrial minerals & rocks: Commodities, markets, and uses.* SME.

Kramer, M. R., Blanc, P. D., Fireman, E., Amital, A., Guber, A., Abdul Rahman, N. & Shitrit, D. (2012). Artificial stone silicosis. *Chest*, 142(2), 419–424. <https://doi.org/10.1378/chest.11-1321>

Mateur, W., Songmene, V. & Kouam, J. (2024). Performance study of wet edge finishing of granites and artificial stones on CNC machine tool. *Micromachines*, 15(3), Article 315. <https://doi.org/10.3390/mi15030315>

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

NIOSH. (2016). *Health hazard evaluation report 2014-0215-3250.* U.S. Department of Health and Human Services.

OSHA. (2016). *Respirable crystalline silica in the workplace: New OSHA standards.* Occupational Safety and Health Administration.

OSHA. (2016b). *Permissible exposure limits (PEL) for respirable crystalline silica.* Occupational Safety and Health Administration.

Plog, B. A. & Quinlan, P. (2012). *Fundamentals of industrial hygiene* (6e éd.). National Safety Council.

- Qi, C. & Echt, A. (2015). *Evaluation of ultrafine dust emissions in stone processing* (Report n° 375-11a). U.S. Public Health Service.
- Ramkissoon, C., Gaskin, S., Thredgold, L., Hall, T., Rowett, S. & Gun, R. (2022). Characterisation of dust emissions from machined engineered stones to understand the hazard for accelerated silicosis. *Scientific Reports*, 12(1), 4351. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08378-8>
- Ricaud, M. & Witschger, O. (2012). *Les nanomatériaux. Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention* (ED 6050). INRS.
- Ronsmans, S., Decoster, L., Keirsbilck, S., Verbeken, E. K. & Nemery, B. (2019). *Artificial stone-associated silicosis in Belgium. Occupational and Environmental Medicine*, 76(2), 133–134. <https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105436>
- Sabourin, G. (2013). *La poussière invisible qu'on a à l'œil !*. IRSST.
- Saidi, M. N., Songmene, V., Kouam, J. & Bahloul, A. (2015). Experimental investigation on fine particle emission during granite polishing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 2109–2121. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7303-z>
- 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>
- TSI. (2006). *Operating manual – Model 3936 scanning mobility particle sizer (SMPS)*. TSI Incorporated.
- USA Granite Tools. (2024). *Granite edge profile fabrication – Best tools*. <https://www.usagranitetools.com/granite-edge-profile-fabrication-best-tools/> (consulté le 21 septembre 2024)
- Verma, D. K., Vacek, P. M., des Tombe, K., Finkelstein, M., Branch, B., Gibbs, G. W. & Graham, W. G. (2011). Silica exposure assessment in a mortality study of Vermont granite workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(2), 71–79. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.543409>
- Zhang, Z., Kleinstreuer, C., Donohue, J. F. & Kim, C. S. (2005). Comparison of micro- and nano-size particle depositions in a human upper airway model. *Journal of Aerosol Science*, 36(2), 211–23

