

ÉTUDE DU POLISSAGE AUTOMATIQUE DES GRANITS

par

Fulbert Brice KOUAMOU NJOUOKEP

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 27 OCTOBRE 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

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 Kenné, Président
Département de Génie mécanique à l'École de Technologie supérieure

M. Michel Rioux, membre
Département de Génie mécanique à l'École de Technologie supérieure

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

LE 13 OCTOBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Victor Songmene pour sa disponibilité, ses conseils, sa patience et l'encadrement qu'il a porté à mon égard. Je remercie Jules Kouam, pour son implication, ses conseils et aussi son dévouement dans le bon accomplissement de ce travail.

Mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'examen de mon travail.

Mes remerciements à l'École de technologie Supérieure et au personnel du LIPPS (Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes) pour leur collaboration.

Mes profonds remerciements à mes parents M. et Mme Njouokep, mes frères et sœurs (Ghislain, Herman, Arlette, Christelle, Yvan et Didier, ainsi qu'à tous mes amis pour leur soutien inconditionnel et leur compréhension tout le long de ma maitrise.

À tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur pierre à l'accomplissement de ce travail, merci infiniment.

Étude du polissage automatique des granits

Fulbert Brice KOUAMOU NJOUOKEP

RÉSUMÉ

L'émission des poussières issues des opérations de polissage contient des particules fines (micrométriques) et ultrafines (nanométriques) ayant la capacité de s'accumuler en profondeur dans le système respiratoire et ainsi causé des graves maladies, dont la silicose. La réglementation au Canada prévoit ainsi une VEMP (valeur d'exposition moyenne pondérée) de $0,1 \text{ mg/m}^3$ dans les industries de transformation des matériaux contenant le quartz. Cette limite va sans doute être abaissée prochainement pour suivre celle des États-Unis qui est de $0,05 \text{ mg/m}^3$ depuis 2016. De ce fait, la recherche des moyens de réduction ou d'élimination des risques d'exposition aux poussières issues de l'usinage du granit constitue une urgence et un grand défi auquel les industriels font face. C'est dans ce sens que la présente étude a été faite.

Un plan d'expérience a été mis sur pied pour étudier les influences de la trajectoire de l'outil et des paramètres de polissage sur l'émission des particules et le fini de surface tout au long du polissage à sec (ébauche plus finition). Les facteurs du plan d'expérience sont : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la taille de grit et les trajectoires de l'outil (rectiligne, arc et spirale). Une optimisation des paramètres de coupe est ensuite réalisée.

La trajectoire de l'outil s'avère être un facteur significatif pour les concentrations des particules issues du polissage de granit. Nous avons pu déterminer le type de trajectoire et les conditions de polissage (vitesse et avance) qui permettent d'obtenir moins de particules de poussières tout en garantissant un bon état de surface. Il est démontré que la combinaison adéquate des paramètres de coupe et de la trajectoire peut ainsi réduire les émissions de particules lors du polissage du granit à sec.

Mots clés : Granit, polissage, paramètres de coupe, trajectoire de l'outil, émissions de particules, fini de surface

Automatic granite polishing study

Fulbert Brice KOUAMOU NJOUOKEP

ABSTRACT

Dust issued from polishing operations contains fine particles (micrometric size) and ultrafine particles (nanometric size) with the possibility to accumulate deep inside the respiratory system causing grave illnesses including silicosis. The Canadian's regulation plans a weighted average exposure value of $0,1 \text{ mg/m}^3$ in materials processing industries with quartz. This limit will most likely be lowered in the near future to follow the United States of America's limit of $0,1 \text{ mg/m}^3$ since 2016. As a result, the search for ways to reduce or eliminate the risks of exposure to dust from granite machining is an urgent and challenging task facing industrialists. It is in this sense that the present study has been carried out.

An experimental design was set up to study the influence of tool path and polishing parameters on particle emission and surface finish during dry polishing (roughing plus finishing). The experimental design factors are: cutting speed, feed rate, grit size and tool trajectories (straight, arc and spiral). The cutting parameters are optimized also.

The tool path was found to be a significant factor for particle concentrations from granite polishing. We have been able to determine the type of tool path and the polishing conditions (speed and feed rate) that result in fewer dust particles and a good surface finish. It has been shown that the right combination of cutting parameters and tool path can reduce particle emissions during dry granite polishing.

Keywords: Granite, polishing, cut parameters, tool path, particles emissions, surface finish

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Méthodes de polissage du granit.....	5
1.2.1 Polissage manuel.....	5
1.2.2 Polissage mécanique	6
1.2.3 Outil abrasif	7
1.2.4 Caractéristiques du matériau de la pièce à polir	9
1.3 Nanoparticules et particules ultrafines.....	12
1.3.1 Définition	12
1.3.2 Effets des nanoparticules sur la santé	15
1.4 Fini de surface.....	20
1.4.1 Défauts de surface.....	20
1.4.2 Techniques de caractérisation du fini de surface	21
1.4.3 Facteurs influant la rugosité de surface	21
1.5 Conclusion	22
CHAPITRE 2 PROCÉDURES EXPÉIMENTALES	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Matériel utilisé	25
2.2.1 Machine-outil.....	25
2.2.2 Outil abrasif	25
2.2.3 Pièce à polir.....	26
2.3 Appareils de mesure.....	27
2.3.1 Mesure des particules fines et ultrafines	27
2.3.2 Analyse de la forme et de la composition chimique des particules	29
2.3.3 Mesure de la rugosité de surface.....	30
2.4 Plan d'expérience.....	33
2.4.1 Préparation du plan d'expérience.....	33
2.4.2 Codage des variables.....	36
2.4.3 Modèle de prédiction	37
2.4.4 Analyse des résultats.....	38
2.5 Conclusion	41
CHAPITRE 3 POLISSAGE D'ÉBAUCHE.....	41
3.1 Introduction.....	41
3.2 Étude des émissions de particules.....	42
3.2.1 Étude des particules fines.....	42
3.2.2 Étude des particules ultrafines	45
3.3 Étude des répétitions	50

3.4	Étude de la poussière de granit	53
3.5	Conclusion	55
CHAPITRE 4 POLISSAGE DE FINITION		58
4.1	Introduction.....	58
4.2	Résultats et analyse	58
4.2.1	Influence des paramètres de coupe et des trajectoires	58
4.2.2	Modélisation des équations et optimisation des variables de réponses	76
4.3	Conclusion	86
CHAPITRE 5 DISCUSSION DES RÉSULTATS		89
5.1	INTRODUCTION	89
5.2	Émissions de particules.....	89
5.2.1	Particules fines.....	89
5.2.2	Particules ultrafines.....	90
5.3	Fini de surface.....	91
5.4	Situation de la concentration massique des particules par rapport à la VEMP	92
5.5	Conclusion	93
CONCLUSION		103
RECOMMANDATIONS		105
ANNEXE I Analyse de la concentration moyenne en masse des PF.....		119
ANNEXE II Analyse de la concentration en surface spécifique des particules fines.....		125
ANNEXE III Analyse de la concentration en surface spécifique des particules ultrafines...		128
ANNEXE IV Analyse des résidus de la concentration en nombre des particules fines et ultrafines.		131
ANNEXE V Résidus du fini de surface.....		133
ANNEXE VI Tableaux des résultats bruts.....		135
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		145

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1-1	Correspondance grandeur de grain et diamètre de grain selon les standards ANSI (American National Standards Institute). Tiréde (Washington Mills, 2015).....	9
Tableau 1-2	Propriétés physico-chimiques du granit.....	12
Tableau 1-3	formes des particules solides d'un aérosol. Tiré de (Vinchès, 2019).....	13
Tableau 1-4	Classification des aérosols suivant le processus de génération.	14
Tableau 2-1	Caractéristique de la machine à commande numérique.....	24
Tableau 2-2	caractéristique du profilomètre Mitutoyo tirée de www.etsmtl.ca	31
Tableau 2-3	Éléments analysés, paramètres mesurés et conditions de polissage lors du polissage de granit blanc en ébauche	32
Tableau 2-4	Niveaux de variation des facteurs	34
Tableau 2-5	Séquence de grandeur des grains abrasifs utilisée durant le polissage rotatif par les industriels et chercheurs tiré de (Saïdi, 2018)	35
Tableau 2-6	Matrice d'expérience	37
Tableau 3-1	Équation des courbes tendances du.....	47
Tableau 3-2	Équations des courbes tendances du logarithme de la concentration en masse en fonction du diamètre	48
Tableau 3-3	Équations des courbes tendances du logarithme de la concentration en surface spécifique en fonction du diamètre.....	49
Tableau 3-4	Morphologie des copeaux en fonction des trajectoires Morphologie (X 1000).....	54
Tableau 3-5	Répartition des pourcentages en silice en fonction des trajectoires.....	55
Tableau 4-1	Tableau d'analyse de la variance de CnbrePF.....	60
Tableau 4-2	Tableau d'analyse de la variance de la réponse C_nbrePUF.....	67
Tableau 4-3	Tableau d'analyse de la variance de la réponse LogC_nbrePUF	68
Tableau 4-4	Tableau d'analyse de la variance des facteurs significatifs de la réponse LogC_nbre PUF.....	68
Tableau 4-5	Tableau d'analyse de la variance de Ra	72
Tableau 4-6	Équations de prédictions des concentrations totales des particules fines, ultrafines et des paramètres de rugosité de surface	76

Tableau 4-7	Répartition du poids des désirabilités en fonction des variables de réponses.....	80
Tableau 4-8	Valeurs des facteurs optimisés pour la concentration en nombre.....	80
Tableau 4-9	Valeurs des facteurs optimisés pour la concentration en masse	83
Tableau 4-10	Valeurs des facteurs optimisés pour la concentration en surface spécifique.....	85

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1: Polissage manuel du granit	6
Figure 1-2 : Différents modes d'abrasion.....	8
Figure 1-3:Structure d'un outil abrasif de polissage	8
Figure 1-4: Composition du granit.....	11
Figure 1-5: Classification en matières particulières des aérosols solides.....	14
Figure 1-6: Dépôt théorique des particules chez l'homme en.....	16
Figure 1-7: Devenir et effets potentiels sur l'organisme des nanomatériaux	17
Figure 1-8 : Répartition de l'exposition au quartz par	17
Figure 1-9:Défauts de surface.....	21
Figure 2-1 Machine-outil CNC	24
Figure 2-2: Outil de polissage : (a) disque abrasif , (b) porte-outil	26
Figure 2-3: Composition du granit blanc (Songmene et al., 2018a)	26
Figure 2-4 :Granit blanc.....	27
Figure 2-5 Spectromètre	28
Figure 2-6 : Spectromètre SMPS avec ordinateur pour	29
Figure 2-7: Microscope électronique à balayage	30
Figure 2-8:Profilomètre Mitutoyo	31
Figure 2-9 Diagramme expérimental	36
Figure 2-10: Trajectoire rectiligne	39
Figure 2-11: Trajectoire en arc	40
Figure 2-12: Trajectoire spirale	40
Figure 3-1 Exemple de variation de la concentration totale en nombre de particules fines obtenues en ébauche en fonction de la vitesse de coupe ..	43
Figure 3-2: Exemple de courbe de comparaison de la concentration totale en masse en fonction du diamètre de particules fines obtenues en ébauche	44
Figure 3-3 :Exemple de courbe de comparaison de la concentration en surface spécifique totale de particules fines obtenues en ébauche	45
Figure 3-4: Exemple de variation de la concentration totale en surface spécifique de	

particules fines obtenues en ébauche en fonction de la vitesse de coupe	45
Figure 3-5: Exemple de variation de la concentration totale en surface spécifique de particules fines en fonction de la vitesse d'avance obtenues en ébauche	45
Figure 3-6: Exemple de courbe de comparaison de la concentration en surface spécifique moyenne de particules fines obtenue en ébauche	49
Figure 3-7: Exemple de courbe des variations de la concentration en	51
Figure 3-8 : Exemple de courbe des variations de la concentration en	52
Figure 3-9: Exemple de courbe des variations de la concentration en	52
Figure 3-10 : Exemple de courbe des variations de la concentration en	53
Figure 3-11:Exemple de Spectre EDX	55
Figure 4-1:Concentration en masse des particules fines suivant la trajectoire rectiligne pour une vitesse d'avance de 1000mm/min et une vitesse de coupe de 1000rpm : a) grit 100, b) grit 400 et c) grit 800 ..	59
Figure 4-2:Diagramme Pareto de la concentration totale en nombre	60
Figure 4-3:courbe des probabilités des facteurs sur la réponse C_nbrePF	60
Figure 4-4:Influence des interactions sur la concentration totale en nombre de particules fines	63
Figure 4-5:Graphe des concentrations totales en nombres de particules en fonction du diamètre suivant les trajectoires	65
Figure 4-6: Diagramme de Pareto de la concentration totale en nombre	66
Figure 4-7: Influence des facteurs principaux sur la réponse LogC_NumPUF	69
Figure 4-8: Rugosité de surface suivant les trajectoires a) rectiligne, b) arc et c) spirale ..	70
Figure 4-9: Diagramme de Pareto de Ra.....	72
Figure 4-10:Influence des facteurs principaux sur Ra : a) vitesse de coupe, b) vitesse d'avance, c) taille des grains, d) trajectoires.....	74
Figure 4-11: Influence des interactions sur le fini de surface Ra : a) vitesse de coupe et trajectoire, b) vitesse d'avance et taille des grains, c) taille des grains et trajectoire, d) trajectoires et vitesse d'avance	75
Figure 4-12 :Courbe de la fonction de désirabilité dans le cas minimal.....	79

Figure 4-3: Courbes des désirabilités Ra, C_NbrePF et C_NbrePUF	81
Figure 4-14: Courbes de surface et contours de la concentration totale en nombre	82
Figure 4-15: Courbes des désirabilités Ra, C_MassPF et C_MassPUF	83
Figure 4-16: Courbes de surface et contours de la concentration totale en masse	84
Figure 4-17: Courbes des désirabilités Ra, C_SurfPF et C_SurfPUF	85
Figure 4-18: Courbes de surface et contours de la concentration totale en surface spécifique.....	86
Figure 5-1: Influence de la trajectoire sur.....	91
Figure 5-2: Courbes des concentrations massiques en fonction des trajectoires	93

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANOVA : Analyse de la variance

APS : Aerodynamic particule sizer

C_NbrePF : Concentration totale en nombre des particules fines

C_NbrePUF : Concentration totale en nombre des particules ultrafines

C_MassPF : Concentration totale en masse des particules fines

C_MassPUF : Concentration totale en masse des particules ultrafines

CSST : Commission de santé et sécurité au travail

CNESST : Commission de normes, de l'équité, de la santé et sécurité au travail

C_SurfPF : Concentration totale en surface spécifique des particules fines

C_SurfPUF : Concentration totale en surface spécifique des particules ultrafines

LIPPS : Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes

MEB : Microscope électronique à balayage

PF : particules fines

PUF : Particules ultrafines

SMPs: scanning mobility particle sizer

VEMP : Valeur d'exposition moyenne pondérée

INTRODUCTION

Le Québec produit près de 90% de granit au Canada et compte près de deux cents entreprises spécialisées dans ce secteur. Cette production a doublé entre l'année 1991 et l'année 2000 dû à la forte demande du granit dans les ménages et les bâtiments tels qu'illustrés à la figure ci-dessous. L'émission des poussières issues des opérations de polissage contient des particules fines (micrométriques) et ultrafines (nanométriques) ayant la capacité de s'accumuler en profondeur dans le système respiratoire et ainsi causé de graves maladies, dont la silicose (McDONALD et al, 2005; Vacek et al, 2011).



Figure : Exemples d'utilisation du granite

Tiré de <https://www.recycledcabinetsolutions.com>

En effet le quartz contenu dans le granit donne lieu à la silice lors du polissage. Les particules de silice restant proche de la zone de travail exposent en continu les travailleurs. Le risque d'infection pulmonaires survient lorsque les travailleurs sont exposés à des concentrations de poussières de quartz variant entre 0,1 et 0,2 mg/m³ (Rushton, 2007). Les particules de poussières de quartz ultrafines augmentent la gravité des troubles pulmonaires (I. Ahmad, 2011). La taille des particules de silice a un impact sur les réponses immunitaires, les particules de silice ultrafines induisant des réponses inflammatoires plus élevées que les particules fines de silice (Kusaka et al., 2014).

Des données statistiques de la CSST dénombrent 157 cas de cette maladie au Québec entre 2004 et 2008(Goyer, Bahloul, & Veillette, 2010). La silice cristalline occupe le deuxième

rang de cette décennie dans le classement dramatique des décès dus à des poussières toxiques, tout de suite après l'amiante (Sabourin, 2012). La silicose fait partie des maladies pulmonaires professionnelles que reconnaît la CSST, après l'asthme professionnel et l'amiantose (Sabourin, 2012).

Pour prévenir ce danger, la CSST est passée à la « tolérance zéro » pour la quantité de poussière de silice permise dans le milieu de travail, depuis juillet 2012. La réglementation au Canada prévoit ainsi une valeur limite d'exposition (VEMP) de 0,1 mg/m³ (ROHS, 2020). Les Américains ont réduit cette limite à 0.05 mg/m³ depuis 2016 (OSHA Johnson Silica, 2019). Par conséquent, la recherche de moyens de réduction ou d'élimination des risques d'exposition aux poussières issues de l'usinage du granit constitue une urgence et un grand challenge auquel les industriels font face. Les recherches visant à établir les moyens de reductions de l'exposition par les solutions de ventilations locales par aspiration montrent que celles-ci ne peuvent pas reduire suffisamment les concentrations de poussières de granit (Johnson et al. (2017), Akbar-Khanzadeh et al.(2007), Croteau et al. (2002)). Une première étude (Saidi, 2018b) a été faite en utilisant une seule trajectoire (rectiligne), pourtant plusieurs autres trajectoires de polissage existent et elles peuvent avoir des effets sur la performance du procédé (qualité des pièces, émissions de particules et efforts de coupe).

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence de la trajectoire de l'outil et des paramètres d'usinage sur les particules de poussières émises lors du polissage du granit dans le but de réduire l'exposition des travailleurs tout en permettant l'obtention d'une bonne qualité de surface. L'étude se focalisera sur les trajectoires rectilignes, en arc et en spirale.

L'étude se fera au travers des mesures expérimentales de l'émission des micros et nanoparticules lors du polissage du granit blanc. L'étude se limitera au granit blanc qui contient près de 50% de quartz et le polissage se fera uniquement à sec. L'étude suivra un plan d'expérience et permettra d'analyser simultanément les différents facteurs tels que : vitesse de coupe, avance, outils et trajectoires. L'intérêt est de proposer des solutions pour éliminer ces émissions à la source.

La présentation du travail est articulée comme suit :

- Le chapitre 1 : Revue de la littérature présente l'état des travaux sur l'influence des paramètres d'usinages sur les émissions de particules et le fini de surface;
- Le chapitre 2 : Procédures expérimentales fait mention de la liste des matériels utilisés, du plan des expérimentations et la méthode utilisée;
- Le chapitre 3 : Polisage en ébauche présente les résultats obtenus du fini de surface et des émissions de particules lors du polissage de granit blanc à sec en ébauche
- Le chapitre 4 : Polissage en finition présente les résultats obtenus du fini de surface et des émissions de particules lors du polissage de granit blanc à sec en finition
- Le chapitre 5 : Discussion permet de comparer et discuter les différents résultats obtenus aux chapitres 3 et 4.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

L'augmentation de l'exploitation du granit dû aux nombreux domaines d'applications a rapidement fait développer diverses techniques de transformation et de traitement de surface liés à ce matériau. Les poussières issues du procédé de polissage de granit sont une problématique pour des chercheurs du domaine, car ces poussières sont nocives pour la santé des travailleurs comme l'illustre les travaux de Simcox et al (1999) et Verma et al (2011). L'étude des moyens et techniques de réduction des émissions de poussières lors du polissage du granit permet de sauvegarder la santé des travailleurs du domaine. Dans ce chapitre nous nous intéressons au procédé de polissage, et aux techniques de réduction des émissions de poussières à la source.

1.2 Méthodes de polissage du granit

Les industriels ont eu recours au polissage pour pallier l'exigence de la qualité de l'état de surface et de brillance de la pièce obtenue à partir de l'usinage du granit. Le polissage des granits se fait généralement par abrasion. Le polissage permet ainsi d'enlever de la matière de faible épaisseur ($25,4 \mu\text{m}$) ce qui contribue grandement au fini de surface obtenu par le procédé (Preston, 1929). Les méthodes de polissage de granit les plus rencontrées sont le polissage manuel et le polissage mécanique.

1.2.1 Polissage manuel

Les opérations de polissage manuel sont essentiellement des opérations de ponçage manuel successif (Yves Gendreau & Alain Morais, 2012). Le polissage manuel se prête mieux au polissage des pièces de formes géométriques complexes et aussi pour les matériaux fragiles. Il donne une très bonne qualité de surface, mais il est onéreux et nécessite une main-d'œuvre hautement spécialisée. Le processus de polissage manuel est le suivant (GPP, 2015):

- La préparation de la pièce (opération de dégrossissage) par meulage, ébavurage;
- Le feutrage qui affine la surface de la pièce en conservant sa géométrie ;
- Le tamponnage manuel qui permet enfin d'obtenir le brillant recherché.

Le polissage manuel (figure 1-1) maintient les cotes et la forme de la pièce puisqu'il enlève des particules de faibles tailles. La dernière étape du processus de polissage manuel est l'avivage qui transforme la surface brillante du tamponnage à une surface éclatante dépendamment du résultat recherché.



Figure 1-1: Polissage manuel du granit
Tiré de www.pierres-info.fr

1.2.2 Polissage mécanique

Le polissage mécanique est une méthode de polissage faite par des machines-outils; il permet donc d'avoir une plus grande production comparativement au polissage manuel. Le polissage mécanique se fait par micro-coupe à l'aide d'abrasifs afin d'obtenir une surface brillante et réfléchissante. Les pièces délicates, de formes complexes et nécessitant une finition soignée obtenue par le polissage mécanique doivent être contrôlées individuellement et retouchées le cas échéant par un polissage manuel. Le polissage mécanique est la méthode de polissage la plus répandue.

Le polissage mécanique suit un processus standard qui est une succession ordonnée des opérations (Saïdi, 2018) suivantes :

- 1^{ère} et 2^{ème} étapes (élimination de la plus grande quantité de matière) : abrasifs Grit 50 puis 100 ;
- 3^e étape (élimination des grosses rayures) : abrasif Grit 200 ;
- 4^e étape (élimination des petites rayures) : Abrasif Grit 400 ;
- 5^e étape (brillance de la pièce plus traitement de densification) : Abrasif Grit 800 ;
- 6^e et 7^e étape (surface réfléchissante) : Abrasif Grit 1500 puis Grit 3000.

Le choix de la méthode de polissage doit ainsi tenir en compte la quantité de pièces à produire (la série de production), les exigences et tolérances géométriques (qualité de l'état de surface) ainsi que le coût de production.

1.2.3 Outil abrasif

Les outils de meulage ont des caractéristiques spéciales du point de vue rigidité, vibrations et déformations thermiques contrairement aux autres outils de coupes. Les procédés d'abrasion sont classés suivant le type d'outil abrasif et le type de liaison abrasif dans la constitution de la roue de meulage (sable plus colle)(El-Hofy, 2013). Les procédés d'abrasion donnent une surface lisse et d'étroites tolérances. L'outil de coupe composé de grains abrasifs maintenus ensemble par un liant peut avoir la forme d'une roue ou d'une baguette ou d'autre forme dépendant de la géométrie qu'on veut donner à notre pièce. Les matériaux abrasifs sont durs avec une dureté élevée pour supporter les pressions de contact et doivent être tranchants pour pouvoir couper facilement et plusieurs fois les bords de la pièce. Les grains doivent pouvoir se fragmenter rapidement pour offrir de nouvelles arêtes de coupe saillantes pour ne pas endommager la surface de la pièce à polir (Goossens, 2015). Le détachement des grains abrasifs émoussés peut se faire suivant le processus d'abrasion à deux corps (dans lequel les grains abrasifs sont solidaires d'un support rigide ou non qui assure leur cheminement ainsi que l'effort presseur) et le processus d'abrasion à trois corps où les grains abrasifs sont libres et pressés contre la pièce à polir par une contre-pièce (figure 1-2). Le mode d'abrasion deux corps est celui qui est le plus employé par les industries. L'efficacité des abrasifs dépend de la

dureté, de la taille et la forme des particules d'une part, mais aussi des paramètres de coupe, de la méthode de polissage et du liant (Migan, 2015). La figure 1-3 montre la structure de l'outil abrasif. Les abrasifs utilisés dans le polissage peuvent être des particules de diamant, d'oxyde d'aluminium ou de carbure de silicium (FEPA, 2015).

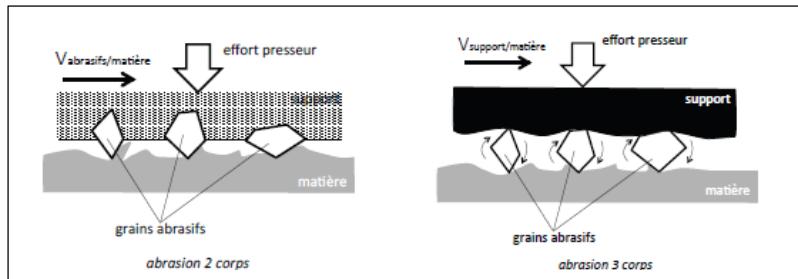


Figure 1-2 : Différents modes d'abrasion
Tirée de (Goossens, 2015)

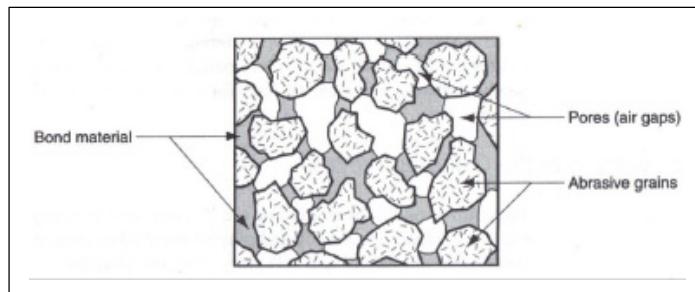


Figure 1-3:Structure d'un outil abrasif de polissage
Tirée de (Migan, 2015)

Tableau 1-1 : Correspondance grandeur de grain et diamètre de grain selon les standards ANSI (American National Standards Institute). Tiré de (Washington Mills, 2015)

Grandeur de grain	Diamètre moyen de grain (μm)	Grandeur de grain	Diamètre moyen de grain (μm)
8	2500	100	120
10	2000	120	100
12	1600	150	90
14	1300	180	75
16	1000	220	63
20	950	240	50
24	700	280	40
30	550	320	30
36	475	400	22
46	350	500	20
54	300	600	16
60	250	700	14
70	200	800	12
80	165	900	9
90	145	1000	7

L'outil abrasif en polissage est généralement lié à la taille des grains abrasifs le constituant, les abrasifs en diamant étant les plus durs rencontrés en industrie. Le tableau 1-1 établi une correspondance entre la grandeur des grains et le diamètre des grains (Saïdi, 2018).

1.2.4 Caractéristiques du matériau de la pièce à polir

Le granit est un matériau très apprécié en construction. Grâce à sa grande résistance, sa beauté visuelle, mais aussi son l'inaltérabilité aux intempéries, le granit demeure parmi les matériaux de construction les plus convoités. Il dispose des qualités pour un bon usinage abrasif

notamment par le polissage. Il est beaucoup utilisé pour la construction des édifices, les comptoirs de cuisine, les salles de bain, les tuiles, les mosaïques, ...etc.

1.2.4.1 Composition et propriétés du granit

Le granit appartient à la famille des roches magmatiques ce qui lui confère un aspect cristallin, car est issu de différents matériaux du magma terrestre. Il présente une texture graineuse due au refroidissement très lent du magma en profondeur. Ces grains n'ont pas une forme nette, mais ont quasiment la même taille et s'emboitent les uns aux autres. Le granit est composé principalement de trois minéraux : quartz, feldspath et de mica (Streckeisen, 1976) ce qui conduira aux noms quartzifères, feldspathiques ou micacés selon la prédominance de chacun. La figure 1-4 montre la constitution des trois principaux éléments du granit :

- Le quartz est un minéral composé de silicium (SiO_2), il arbore l'aspect de grands cristaux incolores, colorés ou fumés et dans d'autres cas revêt la forme de cristaux microscopiques d'aspect translucide. Le silicium est responsable de nombreux dommages sur la santé des personnes exposées notamment le cancer du poumon et d'autres maladies respiratoires.
- Le mica est un minéral foncé, brillant et tendre formé de petites lamelles. Il peut être de couleur noire (biotite) ou blanche (muscovite), et structuré en feuillets dus au silicate comprenant plusieurs éléments chimiques (fer, magnésium, potassium, aluminium...) en fonction de leur nature.
- Le feldspath est constitué de cristaux plus durs que l'acier. Les cristaux ont de nombreuses couleurs parmi lesquelles on peut citer le blanc, le rose et le bleuté. Le feldspath est composé de silicates d'aluminium constitué de potassium, du calcium ou du sodium le plus fréquent étant le potassium (feldspath potassique).

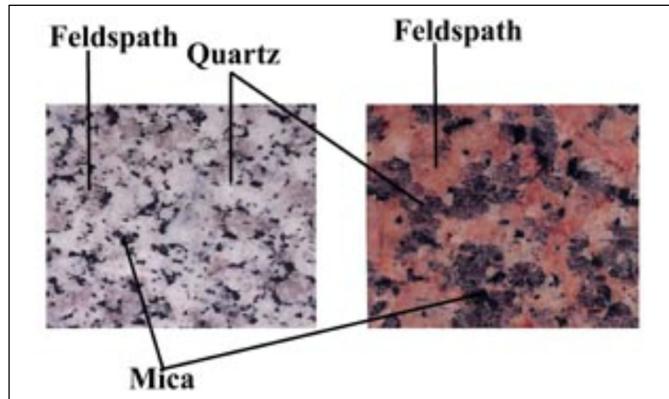


Figure 1-4: Composition du granit
Tirée de <http://www.societemcp.fr>

L'observation d'un échantillon de granit révèle la composition en quartz dont le pourcentage détermine la structure cristalline du granit, de feldspath et de mica. Nous pouvons observer la structure cristalline du granit à l'œil nu, à la loupe ou au microscope pour en déterminer les différents matériaux présents, leurs tailles, leurs dispositions et leurs textures.

De par sa composition minérale, le granit possède plusieurs propriétés, notamment :

- Il résiste bien aux environnements agressifs sans changement de couleur;
- Il est très résistant aux chocs, égratignures et à l'usure;
- Les acides hormis l'acide fluorhydrique ont très peu d'action sur lui;
- Il ne se détériore pas et a une bonne résistance à l'érosion.

Le tableau 1-2 présente quelques propriétés physico-chimiques.

Tableau 1-2 : Propriétés physico-chimiques du granit

Élément	Propriétés
Dureté	Elle peut varier entre 703 et 751 (Sánchez Delgado, Rodríguez-Rey, Suarez del Rio, Díez Sarriá, & Calleja, 2005).
Densité	Entre 2,6 et 2,8.
Résistance à la traction	Entre 7 et 25 MPa.
Résistance à la compression	Entre 100 et 300 MPa.
Température de fusion	1500°C il est incombustible.
Conductivité et magnétisme	0, il est non conducteur et amagnétique.
conductivité thermique	2,8 W/mK(Homand & Duffaut, 2000).

1.3 Nanoparticules et particules ultrafines

1.3.1 Définition

Les nano particules sont des particules dont les trois dimensions externes sont à l'échelle nanométrique (Andujar et al, 2009).

Dans les industries de transformation des granites, nous observons la présence des nanoparticules issues des différentes techniques d'enlèvement de matières. Ces nanoparticules sont des aérosols (suspension de particules solides ou liquides dans un gaz) solides. L'aérosol solide peut avoir plusieurs formes (tableau 1-3) dépendamment de la source d'émission. L'aérosol solide peut être classé suivant le processus de génération (tableau 1-4), ou selon le diamètre (nanométrique, submicronique et micrométrique)(Hinds, 1999). Suivant leur diamètre, les aérosols solides peuvent être classés en particules ultrafines (PUF) de diamètre variant de 0,001 µm à 0,1 µm et en particules fines (PF) de diamètre variant de 0,1 µm à 10 µm (Saidi et al, 2018a), ou encore suivant une échelle des matières particulaires (PM) (figure 1-5).

Plusieurs diamètres équivalents sont employés pour l'analyse des aérosols solides notamment le diamètre de Martin (M), le diamètre de Féret (F), le diamètre de Stokes (GPP), le diamètre

de masse équivalente (d_{me}), le diamètre équivalent optique (d_{opt}) et enfin le diamètre aérodynamique qui est celui utilisé dans la classification par matières particulières. Le diamètre aérodynamique est le diamètre d'une sphère imaginaire ayant la même vitesse de chute que la particule et de masse volumique égale à 1000 kg/m^3 .

Tableau 1-3 : formes des particules solides d'un aérosol. Tiré de (Vinches, 2019)

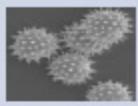
Forme	Apparence	Nature
Sphérique		Fumées Pollen
Cubique, irrégulière		Minerai Cendres
Flocon		Minerai
Fibre		Fibres végétales Fibres synthétiques
Noyau de condensation		Fumées de charbon

Tableau 1-4: Classification des aérosols suivant le processus de génération.

Tiré de (Vinches, 2019)

Description	Diamètre aérodynamique équivalent (μm)
Poussière : particule solide formée par un processus mécanique de désintégration de la matière première (meulage, sablage, sciage, etc.)	> 1
Fumée de combustion : particule solide formée par un processus de combustion incomplète de matière organique (incendie, moteur à combustion, brûleur à gaz, etc.)	0,01 - 1
Fumée de condensation : particule solide formée par un processus de condensation d'une vapeur de métal (processus de soudage, coulée de fonderie, etc.)	0,001 - 1
Fibre : particule solide formée par un processus mécanique dont le rapport de la longueur sur le diamètre est plus grand que 3 (industrie de l'amiante, la laine minérale, industrie textile, etc.)	> 0,003

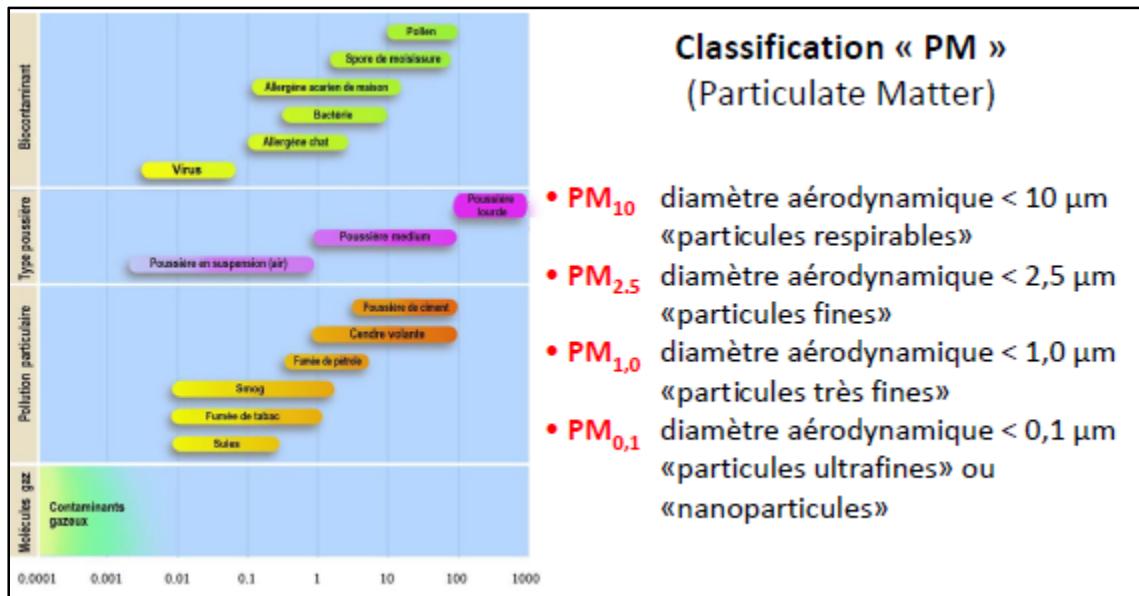


Figure 1-5: Classification en matières particulières des aérosols solides.

Tiré de (Vinches, 2019)

Les nanoparticules et les particules ultrafines émises lors des procédés d'usinage contaminent l'espace de travail (Saïdi et al., 2018). Ces particules pénètrent l'organisme des travailleurs au travers des différentes voies respiratoires causant ainsi des dommages à leur santé.

1.3.2 Effets des nanoparticules sur la santé

Les nanoparticules s'infiltrent dans l'organisme au travers de la voie respiratoire. La contamination des poumons est liée fortement aux dimensions des nanoparticules (Prosie, 2008). Les recherches sur la toxicité des nanomatériaux manufacturés se concentrent beaucoup plus sur les effets aigus effectués sur des cellules ou sur des animaux, ce qui rendent complexe leur extrapolation sur l'homme (Ostiguy et al., 2008). Néanmoins Rosenberg (2000) a montré que l'inhalation de la poussière de quartz provoque la formation de tissu cicatriciel dans les alvéoles des poumons.

1.3.2.1 Expositions aux particules fines et ultrafines

Les voies d'expositions potentielles aux particules fines et ultrafines sont l'inhalation, l'ingestion et le contact cutané. L'appareil respiratoire reste la principale voie de contamination de l'organisme des travailleurs. L'exposition est accrue si la personne exposée pratique une activité physique ou souffre d'une déficience pulmonaire (Martínez et al., 2010). Aussi l'exposition prolongée des travailleurs peut entraîner la perte des fonctions pulmonaires observable à des concentrations de quartz comprises entre 0,1 et 0,2 mg/m³ (Rushton, 2007). Le chemin parcouru dans l'organisme par les nanoparticules (valable pour celle qui n'ont pas été rejetés) dépend de leurs diamètres, des degrés d'agrégation et d'agglomération, ainsi que du comportement dans l'air des nano-objets. La figure 1-6 montre le processus de dépôt des particules dans l'organisme humain en fonction du diamètre de la particule. Le diamètre des particules est une donnée essentielle dans le processus de dépôt dans l'organisme. En effet, les particules de diamètre compris entre 10 et 100 nm se déposent majoritairement dans les alvéoles pulmonaires tandis que les particules plus petites se déposent dans les voies aériennes supérieures et dans la région trachéobronchique (Ricaud & Witschger, 2012).

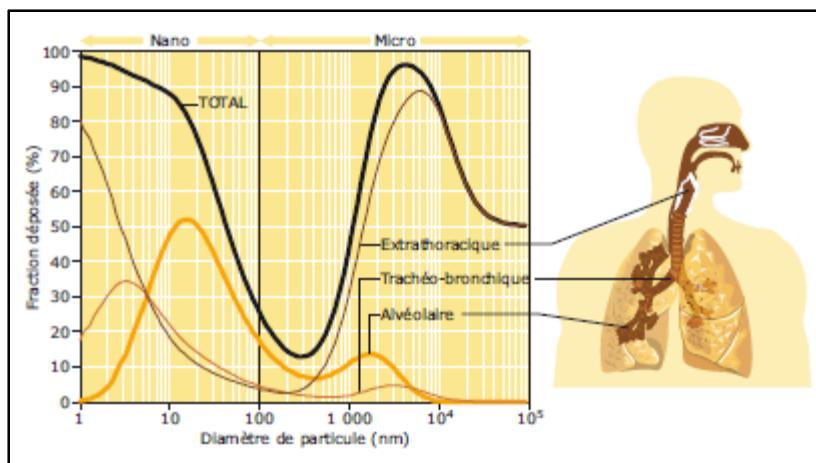


Figure 1-6: Dépôt théorique des particules chez l'homme en fonction du diamètre des particules.
Tiré de (Ricaud & Witschger, 2012)

La combinaison des effets de tailles, de la composition chimique et de la forme des nanoparticules entraînent une réponse cellulaire anormale et/ou une réponse tissulaire pathologique (Dubus et al., 2010). Certaines particules pourraient franchir les barrières biologiques de l'organisme et se retrouver dans différents sites de l'organisme via le sang et la lymphé. La figure 1-7 montre le devenir et les effets potentiels sur l'organisme des nanomatériaux. L'une des maladies responsables de l'exposition aux poussières de granite est la silice (Simcox et al., 1999).

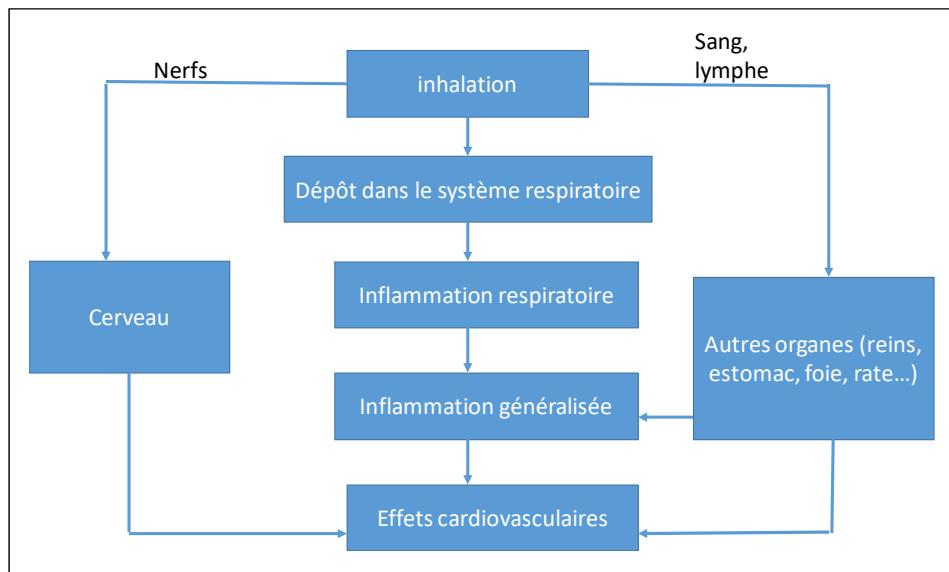


Figure 1-7: Devenir et effets potentiels sur l'organisme des nanomatériaux
Tiré de (Ricaud & Witschger, 2012)

L'étude menée dans une usine par Phillips et al.,(2013) montre que les travailleurs sont plus exposés aux particules de poussières lors de l'usinage semi-sec, partiellement à sec ou totalement à sec, (figure 1-8).

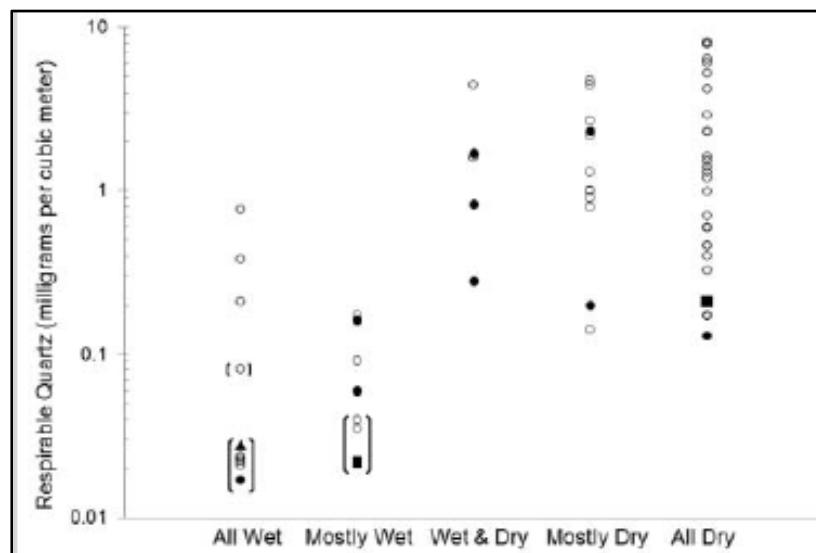


Figure 1-8 : Répartition de l'exposition au quartz par zone de travail
Tiré de (Phillips et al., 2013)

1.3.2.2 Mesure des particules fines et ultrafines

La mesure des nanoparticules s'effectue principalement au travers de la méthode de lecture directe ou par la méthode de prélèvement. La méthode de prélèvement permet de classifier les particules selon leur diamètre. La méthode de mesure à lecture directe quant à elle permet de ressortir les concentrations, de déterminer les valeurs optimales et de localiser les sources d'émission (Saïdi, 2018). La mesure de la concentration en masse par unité de volume d'air reste la norme pour la mesure des expositions professionnelles aux agents chimiques sous forme particulaire (à l'exception des fibres) bien que la connaissance des concentrations en nombres et en surfaces spécifique s'avèrent pertinentes dans l'étude des nanoparticules (Witschger, 2012). La mesure automatique à lecture directe regroupe : la méthode de jauge piézoélectrique, la méthode de jauge bêta, la méthode électrique et la méthode optique. La méthode électrique consiste à charger électriquement les particules d'aérosols par le biais des surfaces chargées pour les séparées par la suite en fonction de leur mobilité (Saïdi, 2018). Le spectromètre SMPS (Scanning mobility particle sizer) (voir Figure 2-5) est l'une des machines utilisant la méthode de la mesure électrique. La méthode optique est généralement utilisée pour les particules fines. Cette méthode exploite le principe d'interaction des ondes lumineuses avec les particules matérielles. Le spectromètre APS (Aerodynamic particle sizer) est l'une des machines utilisant la méthode de mesure optique (voir Figure 2-4).

1.3.2.3 Influence des paramètres d'usinage sur les émissions de particules

Les paramètres de coupes tels la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la grosseur des grains influencent les émissions de particules (Migan, 2015). La recherche de la dispersion des particules fines et ultrafines lors des différentes phases de polissage (ébauche et finition) sur le granit blanc (dur) et noir (souple) révèle que les grandes vitesses de coupe conduisent à une augmentation des émissions de particules tandis que les grandes vitesses d'avance réduisent les émissions de particules. Une vitesse de rotation de la broche recommandée est de 1000rpm, car celle-ci permet de réduire les émissions de particules tout en permettant l'obtention d'un bon fini de surface (Saidi et al., 2018). Un examen de la dispersion des poussières montre que

les particules restent très proches de l'outil et donc exposent les travailleurs aux dangers liés à l'absorption de particules de quartz. La distribution des diamètres des particules a un pic pour les particules de diamètres situés entre 0,54 et 0,77 μm pour les particules fines et entre 14,1 et 98,2 nm pour les particules ultrafines. (Saidi et al, 2018)

Les travaux de Saidi et al.(2018) sur le polissage libre en rotation et translation du granit, a établi que le granit noir émet plus de particules fine et ultrafine que le granit blanc. L'émission des particules respirables PM2,5 (diamètre inférieur à 2,5 μm) a été détecté lors du polissage. Il est à noter que l'ébauche génère plus de particules fines tandis que la finition génère plus de particules ultrafines (Songmene et al., 2018a). On observe aussi une spécificité dans les émissions entre le granite blanc et le granite noir. En effet le granit blanc produit une plus faible quantité de particules fines que le granit noir lors des deux phases de polissage. En outre le granit blanc génère moins de particules ultrafines que le granit noir. L'étude de la distribution moyenne des diamètres des particules de poussières montre un pic situé entre 0.583 à 0.673 μm pour les particules fines et entre 29 et 82 nm pour les particules ultrafines. (Saidi et al., 2018)

La taille des particules générées dépend de l'état de la face de coupe, des conditions de coupe, le matériau de la pièce et la température qui en modifiant les propriétés mécaniques de la pièce et par conséquent la formation des copeaux dans le cas de l'usinage des metaux. La réflexion est menée ici autour d'un nouveau paramètre nommé unité de poussières qui quantifie les émissions de particules relatives à la quantité de copeaux produits lors des opérations d'usinage. Un modèle basé sur une approche énergétique combinée à la micro friction et la déformation plastique des matériaux a été développée tenant en compte la géométrie de l'outil, les propriétés d'usinage du matériau de la pièce, les conditions de coupes et la segmentation des copeaux. L'application a été faite sur la coupe orthogonale de l'alliage d'aluminium 6061-T6, de l'acier laminé à froid AISI 1018, l'acier AISI 4140 trempé et la fonte grise.(R Khettabi, Songmene, & Masounave, 2007). Quant à la lubrification, Songmene et al (2018b) ont démontré que la lubrification agit sur les particules fines, mais très peu sur les particules ultrafines.

1.4 Fini de surface

L'état de surface obtenu par polissage dépend fortement de la granulométrie de l'outil abrasif. Plusieurs paramètres peuvent affecter la qualité de surface d'une pièce dont notamment les conditions de coupes en usinage.

1.4.1 Défauts de surface

L'état géométrique d'une surface est défini par l'ensemble des écarts par rapport à une surface idéale. Il dépend généralement de la technique d'usinage, mais à partir d'un usinage donné, on peut obtenir différents niveaux de rugosité qui auront une influence sur la qualité, la durée utile et le rendement de la pièce. Les éléments importants de la topographie de la surface sont les suivants : la rugosité, l'ondulation, les défauts de formes et les soufflures. Les soufflures étant des irrégularités discrètes qui ne sont pas très fréquentes (Migan, 2015). Balazinski (2013) et Ali (2007) classent les imperfections de surface selon les ordres suivants :

- Les défauts de 1^{er} ordre : écarts de forme et de position tels que : la triangulation et la conicité ;
- Les défauts de 2^e ordre : ondulations périodiques (ligne enveloppe supérieure), dues aux oscillations de basses fréquences provenant des imperfections des machines (variation de l'avance de la fraise, un mauvais guidage ou équilibrage et les vibrations);
- Les défauts de 3^e et 4^e ordre : rugosités, dues à des vibrations de hautes fréquences correspondant au passage des outils coupants et à l'enlèvement de matière. Stries et sillons, arrachements et marques d'outils dus à l'avance de l'outil ou de la meule.

La figure 1-9 illustre les différents défauts de surface observables sur une pièce.

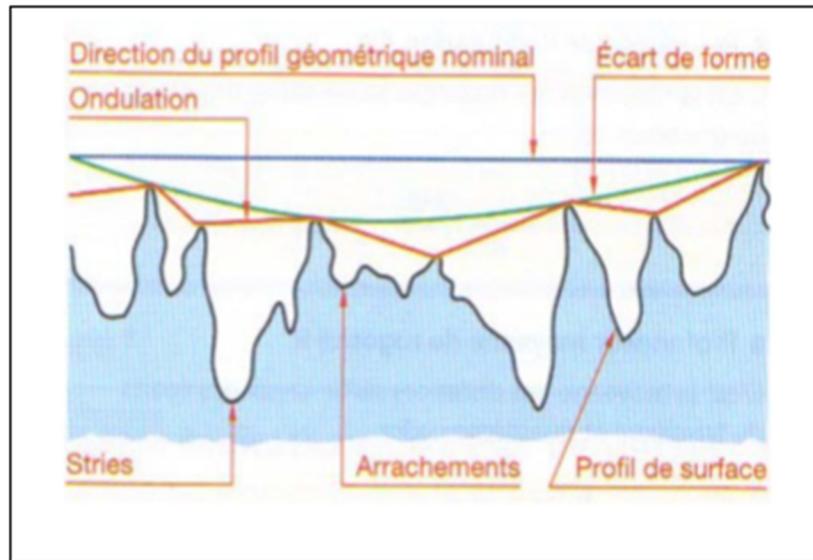


Figure 1-9:Défauts de surface
Tiré de <http://sti-beziers.fr>

1.4.2 Techniques de caractérisation du fini de surface

La rugosité est définie selon la norme ASME-B46 par : « les fines irrégularités espacées de la texture de surface qui résultent généralement de l'action inhérente du processus de production ou d'une condition du matériau ». La rugosité d'une surface se caractérise par un profilage linéaire ou par un profilage de surface (Urlea, 2017). Une mesure linéaire peut être effectuée avec un profilomètre à contact, tandis qu'une mesure de surface peut être prise avec un microscope tel que le microscope confocal ou AFM (microscope à force atomique).

1.4.3 Facteurs influant la rugosité de surface

Plusieurs études ont été effectuées dans le but d'améliorer l'état de surface en vérifiant l'influence des paramètres de coupe telles la vitesse de rotation, la vitesse d'avance ou encore la grosseur des grains abrasifs d'une part et en se tournant vers la lubrification d'autre part. L'étude sur le polissage du granit a permis de confirmer l'influence de la grosseur des grains sur l'état de surface (Migan, 2015).

Saidi, Songmene, Kouam, & Bahloul,(2015) ont montré que (Ra) et (Rt) varient avec la taille des grains utilisé et la relation entre eux et la taille des grains (G) est une fonction puissance. L'analyse de la hauteur des rugosités et du profil de rugosité de surface profil montre que la grande partie du matériau est retiré de la surface du granit au début du polissage (pendant l'ébauche).

Saidi et al. (2018) ont montré l'influence des paramètres de coupe en distinguant les différentes phases de polissage (l'ébauche et la finition) au cours desquelles chacune utilisant des grosseurs des grains d'abrasifs différents, impactaient sur la qualité de surface. La vitesse de rotation a une plus grande influence sur la rugosité de surface que la vitesse d'avance. L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une amélioration de l'état de surface tandis que la baisse de la vitesse d'avance conduit à une faible baisse de l'état de surface pendant l'ébauche et une augmentation durant la finition.

La trajectoire spirale correspondant au parcours de l'outil lors du polissage automatique à sec améliore la qualité de surface (Songmene et al, 2018). L'étude menée par Songmene et al. (2018) était faite uniquement en ébauche grâce à l'outil de taille de grains G80, les essais n'avaient pas eu à être répétées et enfin on note l'absence d'analyse statistique dans cette partie de l'article. Dans notre étude, nous suivront un plan d'expérience qui inclut les répétitions des essais, l'analyse statistique et le processus de polissage (ébauche et finition).

1.5 Conclusion

Nous avons présenté les différents facteurs ou paramètres susceptibles d'influencer le polissage du granit. Les différents paramètres de coupe impactent sur le résultat obtenu lors du polissage du granit.

L'état de surface est la principale caractéristique recherchée lors du choix du procédé de polissage. Plusieurs facteurs impactent directement sur la qualité de surface notamment la vitesse de coupe dont son augmentation améliore la qualité de surface, tandis que l'augmentation de la vitesse d'avance conduit à une dégradation de la qualité de surface.

L'exposition répétée des travailleurs aux poussières de granit peut être nocive pour leurs santés. Le respect de la réglementation sur les émissions de poussières a permis d'accroître les

recherches sur les facteurs influençant les poussières de granit. Ainsi l'étude des phénomènes pouvant influencer les émissions de poussières reste d'actualité et viendra compléter la liste des facteurs déjà connus comme les paramètres de coupe, la lubrification et le type de matériau.

Ce projet s'inscrit dans le même ordre d'idée, la recherche des moyens de réductions des émissions de particules à la source lors du polissage du granit. Il permet de continuer l'étude sur la recherches des facteurs pouvant influencer les émissions de poussières ainsi que le fini de surface lors du polissage du granit. Il ajoute ainsi un nouveau facteur à la liste des facteurs déjà étudiés (la vitesse d'avance, la vitesse de coupe, la taille des grains abrasifs, l'angle de coupe et la lubrification) jusque-là non considérés par les autres chercheurs à savoir la trajectoire de l'outil. La connaissance de ce nouveau facteur contribuera dans la réduction des émissions des particules à la source pendant le polissage du granit.

La revue de littérature présentée permet ainsi de choisir les paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la taille des grains comme facteurs principaux de notre plan d'expérience, la lubrification étant mis de côté à cause de sa faible influence sur les particules ultrafines. Elle nous permet aussi de ressortir l'inventaire des équipements à utiliser pour mener notre étude. Notre hypothèse de recherche stipule que la trajectoire de l'outil combiné aux paramètres de coupe ont une influence sur les émissions des particules et le fini de surface lors du polissage du granite à sec. Trois objectifs soutiennent notre recherche :

- La recherche des conditions optimales menant à la réduction des particules fines et ultrafines et à un bon état de surface ;
- La recherche meilleure trajectoire pouvant réduire l'émission des particules fines et ultrafines ;
- L'étude de l'interaction entre les paramètres de coupe et les trajectoires sur les particules fines et ultrafines ainsi que sur le fini de surface.

Le chapitre suivant fera mention de la procédure expérimentale adoptée pour la suite de ce travail.

CHAPITRE 2

PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1 Introduction

Cette étude du polissage du granit blanc à sec consiste à déterminer l'influence des trajectoires de l'outil sur les émissions de particules et le fini de surface. Lors de nos travaux sur le granit blanc, plusieurs facteurs sont pris en compte, notamment la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la taille des grains utilisés et les trajectoires. Ces facteurs sont des variables indépendantes de notre plan d'expérience dont les variables dépendantes sont les concentrations de particules fines et ultrafines et l'état de surface. Les modèles statistiques employés ont été choisis pour l'analyse et l'optimisation des facteurs pour aboutir à une solution permettant de réduire les émissions de particules tout en fournissant un bon état de surface.

2.2 Matériel utilisé

Il regroupe les différentes machines et instruments employés pour la réalisation du plan d'expérience.

2.2.1 Machine-outil

La machine-outil utilisée permettra d'effectuer les différentes opérations de polissage. Le laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes à l'ETS est doté d'une machine à commande numérique CNC (figure 2-1), trois axes Huron K2X10. Cette machine est munie d'un système d'aspiration de poussière, d'un système d'aspiration de brouillard d'huile et d'un système de micropulvérisation. La vitesse de rotation de la broche va jusqu'à 28 000 rpm avec une puissance de 40 kW et une avance de 30 m/min (1181 po/min), d'autres caractéristiques étant décrites dans le tableau ci-dessous (tableau 2-1).



Figure 2-1 Machine-outil CNC

Tableau 2-1:Caractéristique de la machine à commande numérique

Type de machine	Fraiseuse 3 axes U.G.V. à commandes numériques
Fabricant	HURON Graffestaden (2007)
Contrôleur	Siemens 840 D
Broche	28 000 TPM, 20.9 Nm
Nombre d'outils	20
Déplacements	1000×800×500 mm
Capacité	1150×800 mm, 1000 kg

Avance rapide	60 m/min
Avance de coupe	30m/min

2.2.2 Outil abrasif

L'outil employé est composé de grains abrasifs qui sont maintenus ensemble par un liant pouvant avoir la forme d'une roue (figure 2-2) de 127 mm de diamètre.

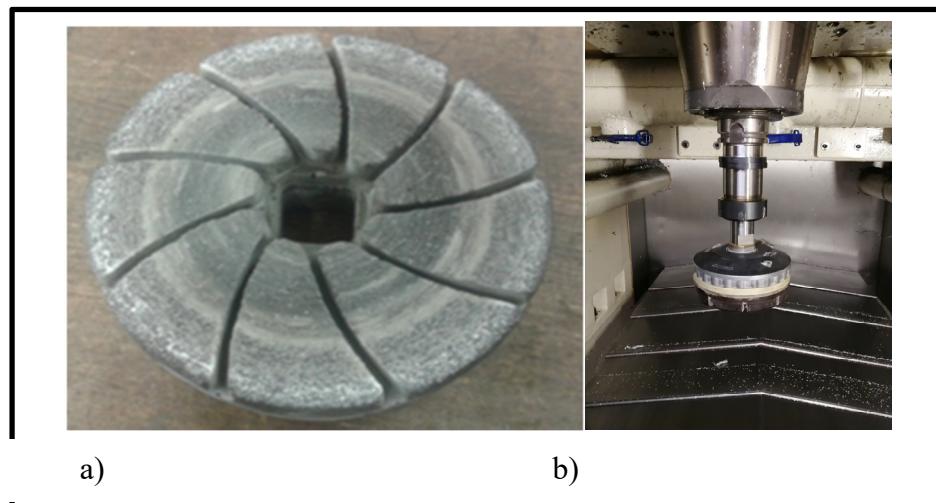


Figure 2-2: Outil de polissage : (a) disque abrasif , (b) porte-outil

2.2.3 Pièce à polir

La figure 2-3 présente la composition du granit blanc issu du microscope électronique. Le granit blanc utilisé contient des grains de granulométrie moyenne à grande avec une texture automorphe granulaire et porphyrique (Songmene, 2018a). Il contient 41% de quartz, 33% de plagioclase et 23% de feldspath potassique. La figure 2-4 montre le granit utilisé.

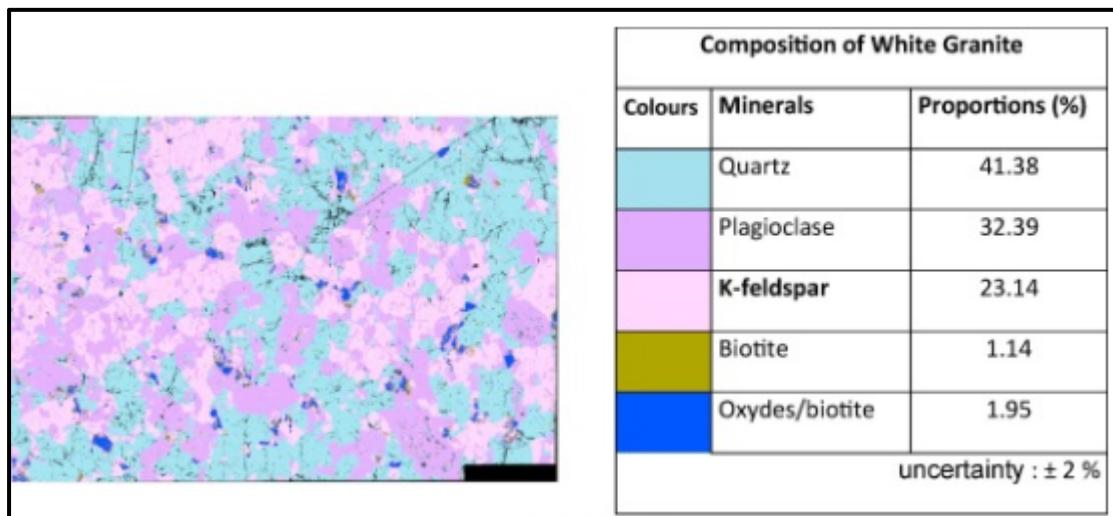


Figure 2-3: Composition du granit blanc (Songmene et al., 2018a)



Figure 2-4 :Granit blanc

2.3 Appareils de mesure

Les appareils de mesure sont employés ici dans le but d'évaluer les émissions de poussières issues du polissage du granit ainsi que l'état de surface.

2.3.1 Mesure des particules fines et ultrafines

La mesure des concentrations en masse, en nombre et en surface des particules fines ainsi que leur granulométrie sont faites par l'APS (Aerodynamic Particle Sizer) modèle 3321 de la compagnie TSI inc. (figure 2-5). L'APS permet de capter des particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 0,5 et 20 μm . L'aspiration de ces particules se fait au moyen d'un tuyau placé proche de la table de fraisage, permettant ainsi de capturer les particules à la source.



Figure 2-5 Spectromètre
APS (Aerodynamic Particle Sizer)
Tirée de www.tsi.com

La mesure de la concentration des particules ultrafines et leurs granulométries sont faites par le spectromètre SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). La figure 2-6 montre le SMPS muni d'un analyseur différentiels de mobilité pouvant capter les particules dont le diamètre est compris entre 2 et 150 nm.

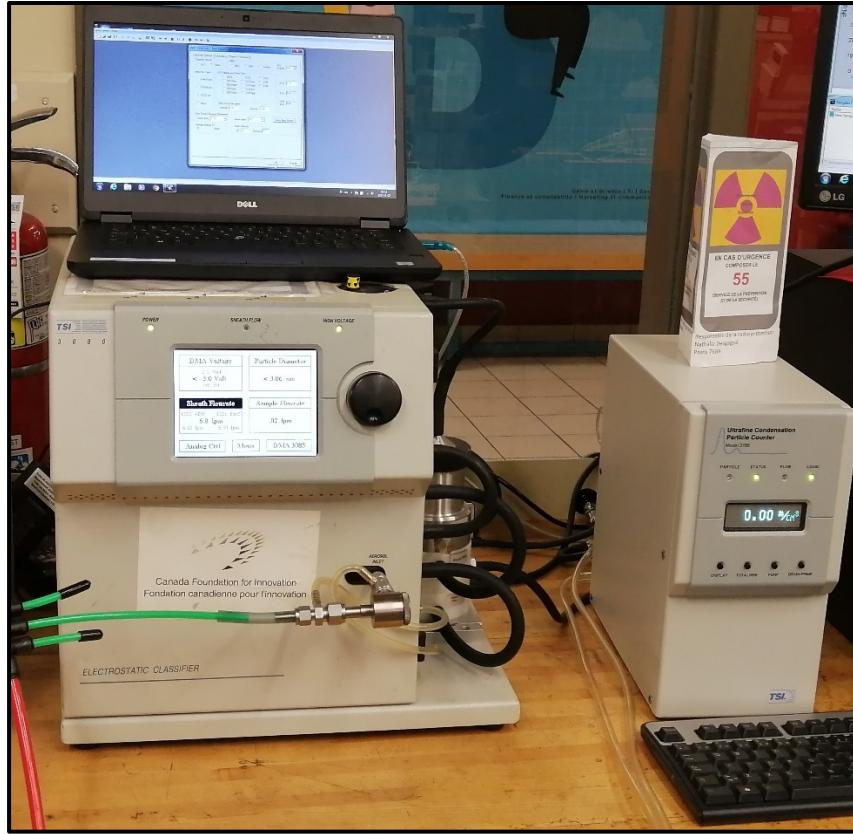


Figure 2-6 : Spectromètre SMPS avec ordinateur pour la collecte des résultats

2.3.2 Analyse de la forme et de la composition chimique des particules

Le microscope électronique à balayage (MEB) permet la visualisation en relief des objets. Il utilise un fin faisceau d'électrons émis par un canon à électrons dans le but de reconstruire et de fournir une image en relief d'un objet. Il nous permet ainsi d'avoir la forme des particules émises lors du polissage. La spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX) couplée au MEB(figure 2-7) permet de déterminer la composition chimique de la surface examinée. Elle consiste à analyser les rayons X générés par un échantillon placé sous le faisceau d'électrons du microscope électronique à balayage.

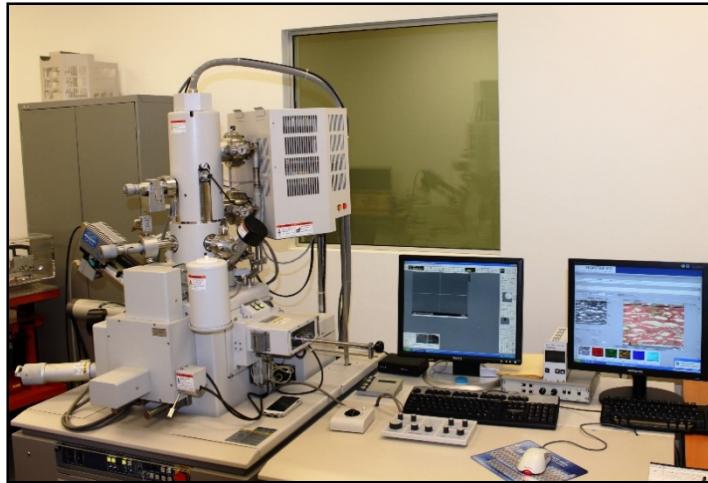


Figure 2-7: Microscope électronique à balayage
Hitachi SU-70
Tirée de www.etsmtl.ca

2.3.3 Mesure de la rugosité de surface

Les paramètres de rugosité de surface sont mesurés avant et après les essais au moyen du profilomètre Mitutoyo modèle S-J400 (figure 2-8) au sein du laboratoire de métrologie de l’ÉTS. Cet instrument permet d’évaluer les différents paramètres de rugosité de surface grâce à un palpeur dont la pointe en diamant parcourt la surface de la pièce d’une part et du logiciel SURFPAK-SJ permettant de générer les paramètres de rugosité (36 paramètres). Le tableau 2-2 présente les caractéristiques du profilomètre Mitutoyo. L’appareil est calibré à l’aide d’un étalon de $R_a = 2,95 \mu\text{m}$ pour assurer la répétabilité des mesures. Les mesures se font suivant chaque trajectoire de l’outil sur la surface de la pièce. Un total de six points répartis sur la surface de la pièce sont enregistrés.



Figure 2-8:Profilomètre Mitutoyo

Tableau 2-2:caractéristique du profilomètre Mitutoyo tirée de www.etsmtl.ca

Type de machine	Testeur d'état de surface
Fabricant	Mitutoyo
Plage de mesures	Axe des Z : 800µm, 80µm, 8µm Axe des X : 25 mm
Paramètres d'évaluation	Ra, Ry, Rz, Rq, Pc, R3z, mr, Rt, Rp, Rv, Sm, S, δc, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Lo, Ppi, R, AR, Rx, Δa, Δq, Ku, HSC, mrd, Sk, W, AW, Wte, Wx, Vo

Résolution minimale	0,000125µm(plage de 8µm)
----------------------------	--------------------------

Les essais se dérouleront suivant un plan d'expérience dans lequel seront pris en compte : la variation des paramètres d'usinage, la variation des trajectoires et la variation de la taille des grains utilisés (tableau 2-3).

Tableau 2-3: Éléments analysés, paramètres mesurés et conditions de polissage lors du polissage de granit blanc en ébauche

Éléments analysés	Paramètres mesurés	Conditions de polissage
Émissions de particules fines	Concentration en nombre(#/cm ³), Concentration en surface spécifique(µm ² /cm ³), Concentration en masse (mg/m ³)	- Outil abrasif G 80, 100, 220, 400 et 800 - Pièce à polir : Granit blanc (200 x 200 x30 mm ³) - Préparation des échantillons : obtenue par l'outil abrasif G 80
Émissions de particules ultrafines	Concentration en nombre(#/cm ³), Concentration en surface spécifique(nm ² /cm ³), Concentration en masse (µg/m ³)	
Finie de surface	Rugosité arithmétique Ra en µm Rugosité quadratique Rq en µm Hauteur maximale du profil Rz en µm	
Trajectoires	Rectiligne, Arc et Spiral	- Passe : 0,02 mm

		<ul style="list-style-type: none"> - Pas de lubrification - Pas d'aspiration d'air
--	--	--

2.4 Plan d'expérience

La construction des plans d'expériences et leur interprétation dépendent en grande partie des facteurs rencontrés dans l'étude. La définition du but principal, des objectifs associés, des variables de réponses, des facteurs (maintenus constants ou variables) pouvant affecter les variables de réponses sont autant de paramètres à prendre en compte pour bien définir son plan d'expérience. Ainsi les expériences ou essais sont réalisés par la suite suivant le plan d'expérience choisi.

2.4.1 Préparation du plan d'expérience

Cette étape est cruciale pour la réussite du traitement et l'analyse des résultats, elle comprend :

- Définition de l'objectif de l'étude

L'étude a pour principal objectif de réduire les émissions de particules tout en procurant un bon fini de surface. L'étude sera réussie si nous pouvons déterminer la combinaison des facteurs qui conduisent à minimiser les concentrations de particules fines et ultrafines tout en garantissant un bon état de surface.

- Choix des réponses permettant d'atteindre l'objectif :

Les réponses seront les concentrations en nombre, masses et surface spécifique des particules fines et ultrafines ainsi que la rugosité de surface.

- Choix des facteurs pouvant influencer les réponses :

La revue de la littérature nous a permis de cibler les facteurs pouvant influencer nos réponses. Il s'agit de la vitesse de coupe, vitesse d'avance, le mode de lubrification, le rayon de bec de l'outil, la taille des grains et le type de granit (noir ou blanc). Dans cette étude, nous allons étudier l'influence de quatre facteurs : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la taille des grains et la trajectoire de l'outil.

- Définition des niveaux de variation de chaque facteur

Il s'agit ici de définir conformément à la littérature, les niveaux de chaque facteur. Le tableau 2-4 résume les niveaux de variation de chaque facteur de notre étude.

Tableau 2-4: Niveaux de variation des facteurs

Facteurs	Modalités		
	-1	0	1
Vitesse de coupe (rpm)	1000	1750	2500
Vitesse d'avance (mm/min)	250	750	1500
Taille des abrasives	100	400	800
Trajectoire	Rectiligne	Arc	Spiral

- Examen des contraintes

Le facteur taille des grains présente la difficulté du protocole de polissage qui impose le changement progressif des tailles des grains. Ainsi conformément à la ligne 2 du tableau 2-5, une première préparation des surfaces de chaque pièce de granit se fera à l'aide du grit 46, ensuite suivra le déroulement des essais au grit 100, une seconde préparation de surface au grit 200 se fera avant les essais avec le grit 400 et enfin les essais au grit 800.

Tableau 2-5:Séquence de grandeur des grains abrasifs utilisée durant le polissage rotatif par les industriels et chercheurs tiré de (Saïdi, 2018)

Auteur	Séquence de grandeur des grains abrasifs						
Granit Polishing (GPP, 2015)	50	100	2	4	8	1	3000
			0	0	0	5	
			0	0	0	0	
						0	
Abrasive Technology (AT, 2015)	50	120	2	4	8	1	3500
			2	0	0	8	
			0	0	0	0	
						0	
Y.Li, Huang et Xu(Xu, Huang, & Li, 2003)	150	300	5	1	2	3	----
			0	0	0	0	
			0	0	0	0	
			0	0	0	0	

- Choix du plan d'expérience

Le plan d'expérience choisi est un plan factoriel complet de quatre facteurs variant à trois modalités. Ce type de plan permet de séparer aisément les effets des facteurs primaires des autres effets (ordre 2, 3...), de plus ce plan offre une hiérarchisation des effets (effet d'ordre 1 et 2 plus importants que les effets d'ordres 3...etc.).

La figure 2-8 résume la définition du plan d'expérience décrit plus ci-dessus.

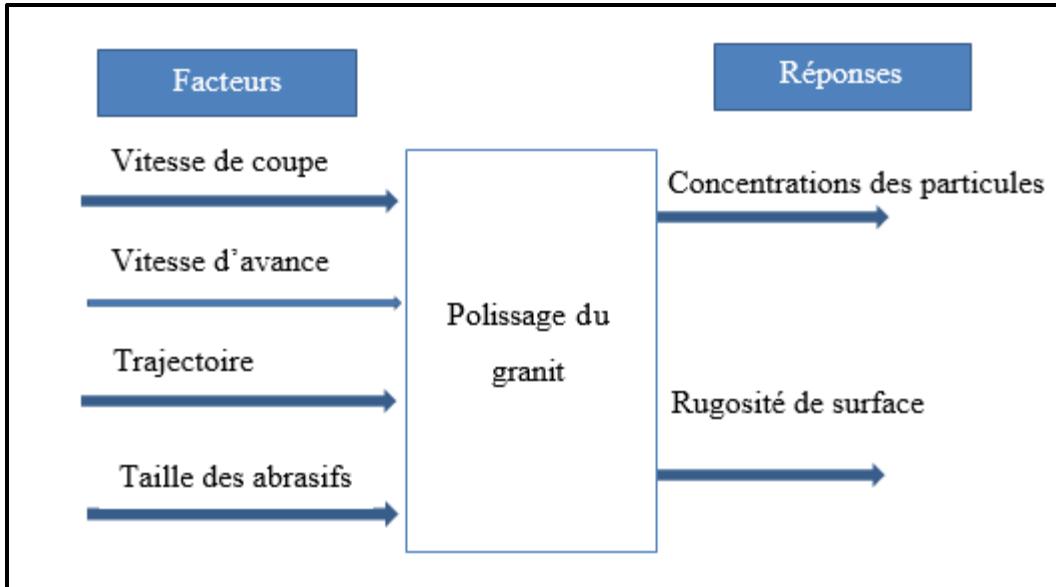


Figure 2-9 Diagramme expérimental

Le plan d'expérience comprendra trois échantillons de granit blanc à 40% de quartz, chacun des échantillons sera dédié à une trajectoire tout au long de l'expérience. Le polissage se fera à sec au moyen de l'outil sans ressort. Les paramètres à varier sont illustrés dans le tableau 2-5, ainsi les autres conditions de polissage données dans le tableau 2-4 restent inchangées. La randomisation des essais n'étant pas aisés à réaliser du point de vue technique, nous avons fixé le facteur taille des grains et avons procéder à la variation des facteurs restant. La répétition a été faite sur certains paramètres des facteurs choisis au hasard.

2.4.2 Codage des variables

Le codage des variables permet la manipulation aisée de celles-ci dans les équations mathématiques du modèle statistique choisi. Le tableau 2-6 montre le codage des facteurs ainsi que leur type et leur niveau de variation.

Tableau 2-6: Matrice d'expérience

		Type	Variables	Niveaux		
Facteurs	Unité		Codées	Bas (-1)	Centre(0)	Haut(1)
Vitesse de coupe	rpm	quantitative	Vc	1000	1750	2500
Vitesse d'avance	mm/ min	quantitative	f	250	750	1500
Trajectoire	NA	qualitative	Tr	Rectiligne	Arc	Spiral
Taille des grains	NA	qualitative	Grit	100	400	800

2.4.3 Modèle de prédiction

Le plan d'expérience s'appuie sur un modèle pour faciliter la méthode d'analyse. Les modèles de prédiction ont pour but de modéliser la fonction de transfert mettant en liaison les variables d'entrées (facteurs) et les variables de sortie (réponses).

Le modèle quadratique (d'ordre 2) est le modèle qui se prête le mieux à notre étude. C'est une série de fonctions polynomiale de chacune des variables de réponse (Y_i) en fonction des facteurs (X_u et al.) (équation 2-1).

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2-1)$$

- β_0 : coefficient du modèle (moyenne arithmétique des essais), correspondant à l'effet général;
- β_i : coefficient du modèle appliqué aux facteurs principaux linéaires;
- β_{ii} : coefficient du modèle appliqué aux facteurs quadratiques;

- β_{ij} : Coefficient du modèle appliqué aux interactions des facteurs;
- ε : erreur expérimentale;
- X_i : facteurs
- Y_i : réponses

2.4.4 Analyse des résultats

La variabilité étant rencontrée dans tous les processus, sa compréhension et la recherche des moyens de réduction sont nécessaires pour accroître la fiabilité des processus. L'analyse de la variance (ANOVA) permet de vérifier le degré de corrélation entre le modèle proposé liant les variables de réponses aux facteurs dépendants. L'analyse des résultats suit l'algorithme ci-après :

1. Spécification d'un modèle statistique
2. Estimation des paramètres du modèle
3. Décomposition de la variabilité : ANOVA
4. Tests d'hypothèses sur les paramètres
5. Analyse diagnostique des résidus
 - Vérification des hypothèses de base ;
 - Identification d'observations influente ;
 - Transformation Box-Cox de réponse Y ;
- 6 Si nécessaire : itération des étapes 1 à 5
- 7 Optimisation de la réponse (s'il y a lieu)
- 8 Graphiques de la réponse

Par la suite en fonction des résultats de l'analyse d'autres étapes peuvent s'ajouter :

1. Préparation de la matrice de tests pour la collecte des données
2. Spécification modèle pour l'analyse
3. *Optionnel* : examen de la variable de réponse avec des cartes de Shewhart (si on a des répétitions)
4. Ajustement du modèle : estimation des paramètres statistiques β_0, β_1, \dots
5. Calcul du tableau d'analyse de la variance : ANOVA

6. Tests d'hypothèses des paramètres (effets) : β_1, β_2, \dots
7. Analyse diagnostique des résidus
8. *Optionnel* : Itération des étapes 4-5-6-7 - modèle avec effets importants seulement
9. Présentation graphique des résultats : diagramme Pareto, diagrammes effets principaux, diagrammes interactions, courbes contour

Le choix du modèle et sa validation viennent clôturer l'analyse et donne ainsi les moyens d'agir suivant la roue du PDSA (Plan Do Study Act).

Le plan complet à 81 essais semble le mieux adapté de par sa facilité d'interprétation de résultats.

❖ Méthode

La technique de réduction étudiée est l'influence des trajectoires de l'outil sur les émissions de particules et le fini de surface. Ainsi trois trajectoires ont été sélectionnées, la trajectoire en arc, rectiligne et spirale. Les figures 2-10, 2-11 et 2-12 montrent les différentes trajectoires étudiées.

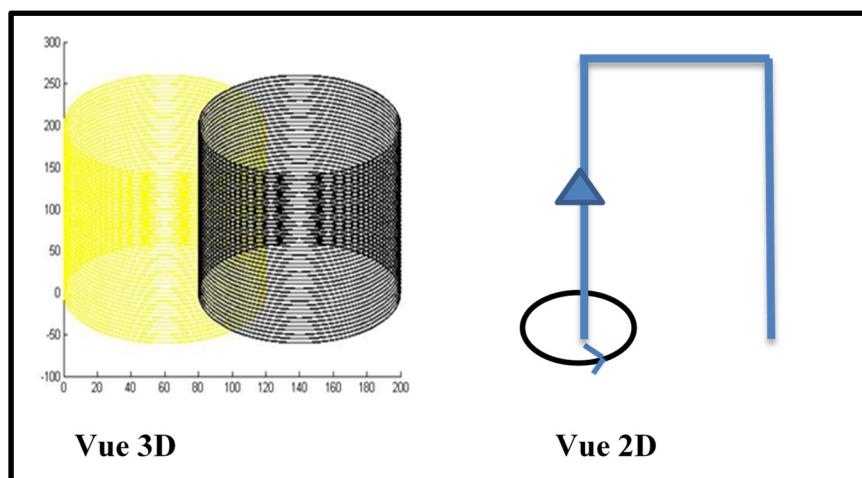


Figure 2-10: Trajectoire rectiligne

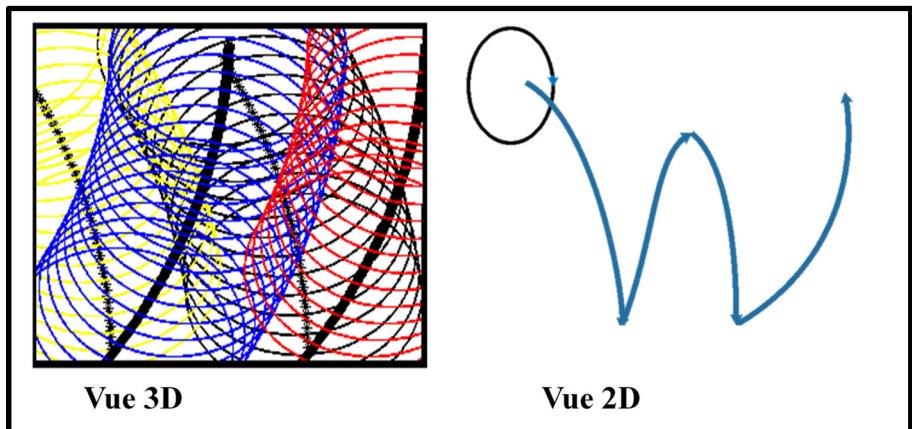


Figure 2-11: Trajectoire en arc

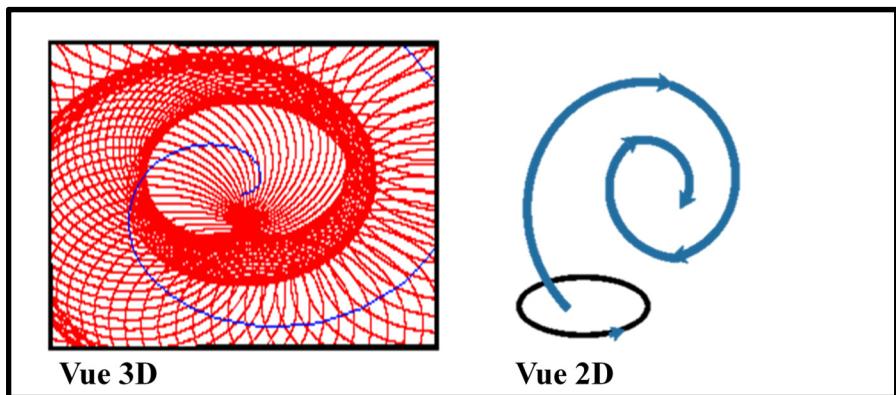


Figure 2-12: Trajectoire spirale

La trajectoire en spirale est celle qui devrait fournir le meilleur état de surface vu la multitude de passages sur la surface de la pièce. Les trajectoires rectilignes et en arc sont celles qu'on retrouve le plus dans les industries.

2.5 Conclusion

La démarche expérimentale adoptée lors de cette étude a été présentée ainsi que les équipements et matériels nécessaires, la méthode employée et le traitement des données basées sur le plan d'expérience. Le chapitre suivant traite des effets des trajectoires rectiligne, spirale et arc sur les émissions de particules et le fini de surface en ébauche.

CHAPITRE 3

POLISSAGE D'ÉBAUCHE

3.1 Introduction

Les procédés de fabrication mécaniques par enlèvement de la matière permettent de façonner les matériaux partant d'un état brut. Les procédés de finition viennent compléter ceux-ci en fournissant des pièces d'étroites tolérances géométriques, mais certains procédés de finitions nécessitent un premier travail en ébauche. Lors des opérations de polissage du granit, plusieurs phénomènes se produisent parmi lesquels les émissions de particules dues à l'enlèvement de matière. L'analyse grâce au microscope électronique à balayage de ces particules a révélé la présence de silice pour les granits contenant le quartz. La silice est responsable de la silicose (cancérogène) qui est une maladie pulmonaire irréversible entraînant des troubles respiratoires progressifs qui vont de l'essoufflement à l'effort à une déficience respiratoire très grave (CNESST, 2016b). Les complications (insuffisance cardiaque, tuberculose, etc.) causées par la silicose peuvent être mortelles chez les travailleurs. Ce chapitre met en exergue les résultats des essais préliminaires obtenus lors du polissage du granit blanc à sec avec des paramètres (tableau 3-1) variant suivant le plan d'expérience.

Tableau 3-1 : paramètres d'usinage de granit en ébauche

Paramètres	Valeurs
Grit	100
Vitesse de coupe	1000, 1750 et 2500rpm
Vitesse d'avance	500, 1000 et 1500 mm / min

Nombre de pièces par trajectoire	01
Nombre de passes	01

3.2 Étude des émissions de particules

Les émissions de particules issues du polissage de granit sont des aérosols solides de tailles micrométriques (particules fines) et nanométriques (particules ultrafines). Celles-ci se contaminent uniformément l'espace de travail affectant ainsi la santé des travailleurs (M. Saidi et al., 2018b).

3.2.1 Étude des particules fines

Les particules fines considérées ici sont des aérosols issus du polissage du granit et dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 µm.

La notion d'effet toxique suppose des conséquences nocives ou néfastes pour l'organisme. Il est lié à la dose, à la voie d'absorption, au type et à la gravité des lésions ainsi qu'au temps nécessaire à l'apparition d'une lésion (CNESST, 2016a). Inhaler, toucher et ingérer des substances chimiques n'entraîne pas nécessairement un effet toxique (CO₂ à la fois métabolite et présent dans l'environnement). L'absorption d'une substance en faible quantité peut s'avérer très toxique et provoquer des lésions graves, tandis que l'absorption en grande quantité d'une autre substance peu toxique peut produire un effet bénin (Vinches, 2019). La connaissance des concentrations des particules nocives à la santé est un facteur déterminant dans le processus de prévention contre celle-ci.

a) Concentration totale en nombres de particules fines

La figure 3-1 montre la variation de la concentration en nombre en fonction du diamètre aérodynamique permet ainsi de relever les différents pics des trajectoires. La trajectoire en arc

présente un pic autour de 1700#/cm^3 , la trajectoire spirale a un pic autour de 1300#/cm^3 et la trajectoire rectiligne a un pic autour de 116#/cm^3 le tout correspondant à un diamètre aérodynamique de $1,382\text{ }\mu\text{m}$. La forme gaussienne des courbes des trajectoires reste inchangée, présentant une concentration en nombre de particules élevée pour les diamètres aérodynamiques inférieurs à $2,5\text{ }\mu\text{m}$ les aérosols solides de diamètres inférieurs à $2,5\text{ }\mu\text{m}$ sont néfastes pour la santé humaine (Pozzi, De Berardis, Paoletti, & Guastadisegni, 2003). La trajectoire rectiligne produit bien moins de particules fines comparativement aux autres trajectoires (arc et spirale).

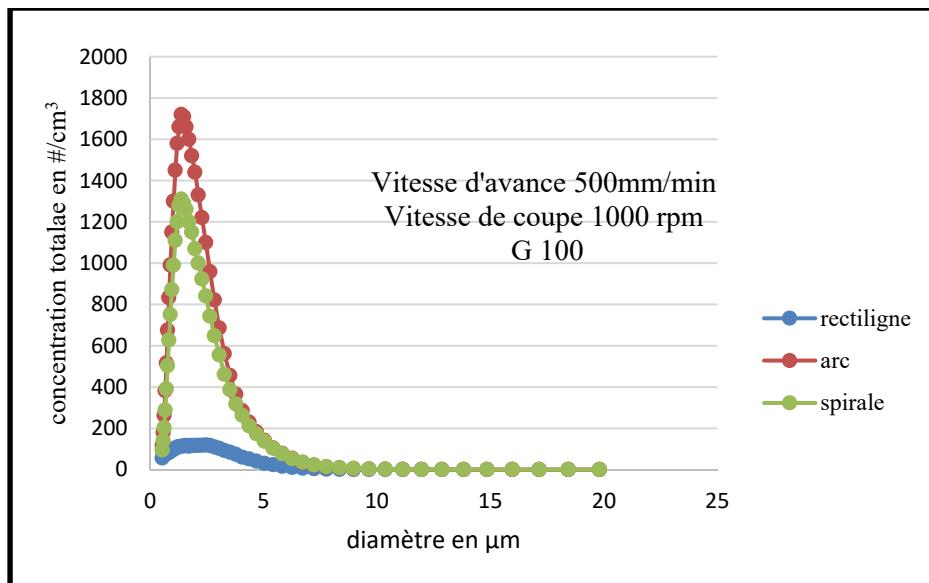


Figure 3-1: Exemple de courbe comparative des trajectoires suivant la concentration totale en nombres de particules fines en fonction du diamètre aérodynamique

b) Concentration moyenne en masse de particules fines

La figure 3-2 montre l'évolution de la concentration en masse en fonction du diamètre aérodynamique des particules fines. En terme de concentration de la masse totale pour une vitesse d'avance de 500 mm/min et une vitesse de coupe de 1000 rpm, la trajectoire en arc

(pic à $6,2 \text{ mg/m}^3$ correspondant à $3,8\mu\text{m}$ de diamètre) et la trajectoire en spirale (pic à $5,7 \text{ mg/m}^3$ correspondant à $4,3\mu\text{m}$ de diamètre) sont proches. La trajectoire rectiligne est celle dont la concentration de la masse moyenne (pic à $1,2 \text{ mg/m}^3$ correspondant à $4\mu\text{m}$ de diamètre) est la plus faible. Les concentrations en masses totales les plus élevées correspondent à des diamètres aérodynamiques supérieurs à $2,5 \mu\text{m}$.

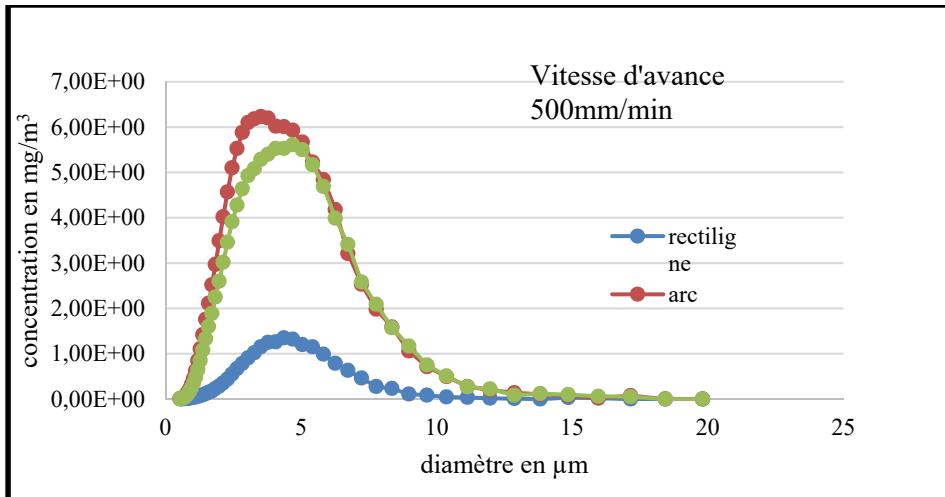


Figure 3-2: Exemple de courbe de comparaison de la concentration totale en masse en fonction du diamètre de particules fines obtenues en ébauche

c) Concentration totale en surface spécifique de particules fines

La figure 3-3 montre l'évolution de la surface spécifique totale en fonction du diamètre aérodynamique des particules fines. La concentration de la surface spécifique totale des trajectoires en arc (pic à $7500 \mu\text{m}^2 / \text{cm}^3$ correspondant à $3 \mu\text{m}$ de diamètre aérodynamique) et la trajectoire en spirale (pic à $6000 \mu\text{m}^2 / \text{cm}^3$ correspondant à $3\mu\text{m}$ de diamètre aérodynamique) sont proches. La trajectoire rectiligne est celle dont la concentration en surface spécifique totale (pic à $1100 \mu\text{m}^2 / \text{cm}^3$ correspondant à $3,5 \mu\text{m}$ de diamètre aérodynamique) est la plus faible. Les figures 3-8 et 3-9 révèlent l'effet de la variation de la vitesse de coupe et d'avance sur la concentration en surface spécifique.

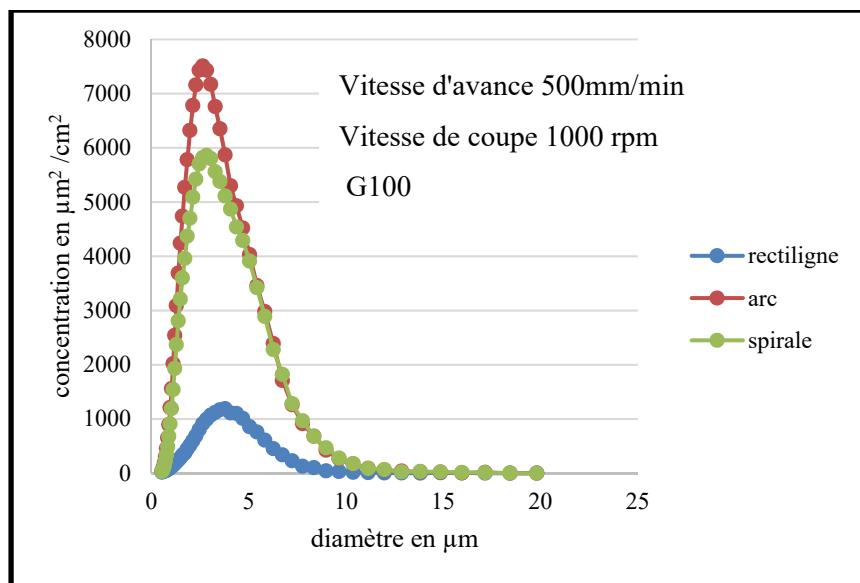


Figure 3-3 :Exemple de courbe de comparaison de la concentration en surface spécifique totale de particules fines obtenues en ébauche

En somme, la trajectoire en arc est celle qui laisse envisager une émission plus grande des particules fines suivies des trajectoires en spirale et rectiligne. Les particules fines causant le moins de dommage comparativement aux particules ultrafines, il est nécessaire pour l'étude d'observer leur comportement.

3.2.2 Étude des particules ultrafines

Les nano-objets sont des objets dont une des dimensions est comprise entre 1 et 100 nm (Haydon & Eng, 2012). L'étude a mené à la collecte de trois types de concentrations moyennes des particules ultrafines : la concentration en masse, en nombre et en surface spécifique.

Les concentrations moyennes en nombres, en masse et en surface spécifique des particules sont données par le SMPS. Les particules ultrafines présentent un plus grand risque pour la santé comparativement aux particules fines.

a) Concentration totale en nombre de particules ultrafines

La figure 3-4 décrit la concentration en nombres de particules ultrafines en fonction du diamètre aérodynamique. C'est la trajectoire spirale qui produit le plus grand nombre de particules ultrafines avec un max atteignant 3×10^8 particules / cm^3 correspondant aux particules de diamètre d'environ 3 nm. La trajectoire en rectiligne atteint son max à 5×10^7 particules / cm^3 correspondant aux particules de diamètre aérodynamiques d'environ 3 nm , tandis que la trajectoire en arc a son max à $1,5 \times 10^7$ particules / cm^3 correspondant aux particules de diamètre aérodynamiques d'environ 3 nm. La trajectoire spirale émet beaucoup plus de particules ultrafines que les trajectoires rectilignes et en arc.

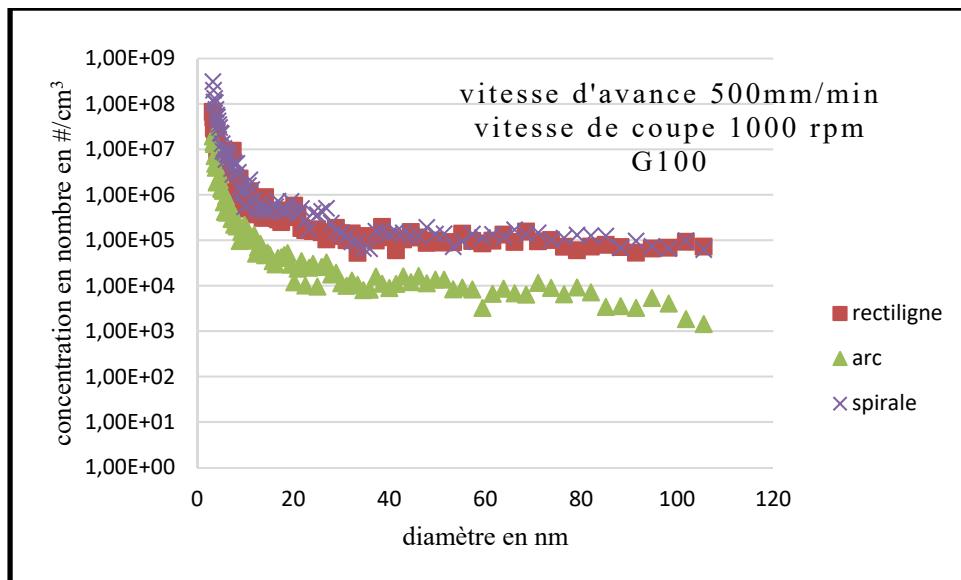


Figure 3-4 : Exemple de courbe de comparaison de la concentration en nombre de particules ultrafines obtenue en ébauche

Le tableau 3-1 donne les équations des courbes tendances suivant les trajectoires rectilignes, arcs et spirales.

Tableau 3-1: Équation des courbes tendances du Logarithme de la concentration en nombre en fonction du diamètre

Trajectoire	Équation tendance
Rectiligne	$y=8,1389x^{-0,125}$ $R^2 = 0,89$
Arc	$y=8,0868x^{-0,187}$ $R^2 = 0,94$
Spirale	$y=8,8586x^{-0,142}$ $R^2 = 0,88$

b) Concentration totale en masse de particules ultrafines

La figure 3-5 montre l'évolution de la masse en fonction du diamètre des particules ultrafines. Les particules de diamètres supérieurs à 40 nm sont plus présentes. Les courbes des trajectoires spirale et rectiligne sont semblables bien que la courbe de la trajectoire spirale demeure au-dessus des deux autres. La trajectoire rectiligne est celle dont la concentration de la masse est la plus faible.

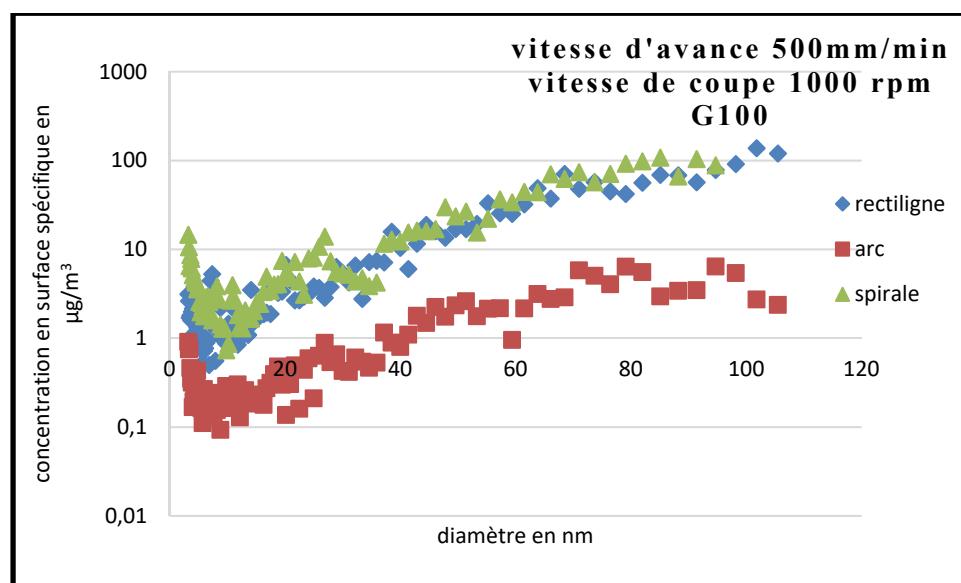


Figure 3-5 : Exemple de courbe de comparaison de la concentration en masse moyenne de particules ultrafines obtenue en ébauche

Les courbes logarithmiques des concentrations en masse et en surfaces spécifiques sont mieux corrélées par les fonctions polynomiales (R^2 supérieure à 70%). La meilleure correlation est obtenue par les fonctions polynomiales d'ordre 6 comme illustrés dans les tableaux 3-2 et 3-3.

Tableau 3-2: Équations des courbes tendances du logarithme de la concentration en masse en fonction du diamètre

Trajectoire	Équation tendance
Rectiligne	$y = 1E-10x^6 - 4E-08x^5 + 5E-06x^4 - 0,0003x^3 + 0,009x^2 - 0,0929x + 0,3823$ $R^2 = 0,92$
Arc	$y = 1E-10x^6 - 4E-08x^5 + 5E-06x^4 - 0,0004x^3 + 0,0119x^2 - 0,1598x - 0,0248$ $R^2 = 0,89$
Spirale	$y = 4E-10x^6 - 1E-07x^5 + 2E-05x^4 - 0,001x^3 + 0,0298x^2 - 0,3646x + 1,7726$ $R^2 = 0,72$

c) Concentration totale en surface spécifique de particules fines

La figure 3-6 montre l'évolution de la surface spécifique en fonction du diamètre des particules ultrafines. La concentration de la surface spécifique moyenne des trajectoires spirale et celle de la trajectoire en rectiligne est proche. La trajectoire en arc est celle dont la concentration en surface spécifique des particules ultrafines est la plus faible. La trajectoire spirale est celle dont la concentration en surface spécifique des particules ultrafines est la plus élevée pour une vitesse d'avance de 500 mm/min et une vitesse de coupe de 1000 rpm.

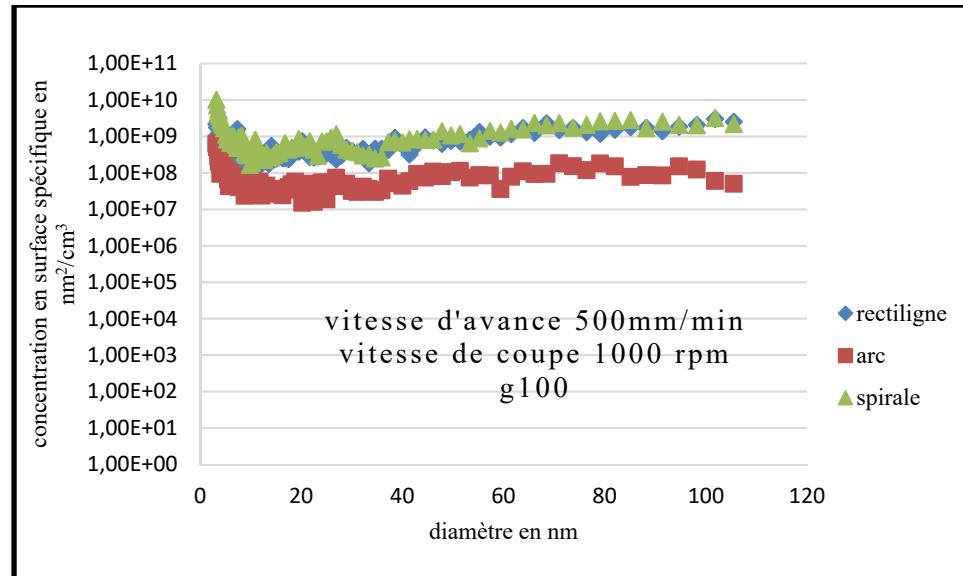


Figure 3-6: Exemple de courbe de comparaison de la concentration en surface spécifique moyenne de particules fines obtenue en ébauche

Le tableau 3-3 suivant donne les équations des courbes tendances issues de la figure 3-6.

Tableau 3-3 : Équations des courbes tendances du logarithme de la concentration en surface spécifique en fonction du diamètre

Trajectoire	Équation tendance
Rectiligne	$y = 2E-10x^6 - 5E-08x^5 + 7E-06x^4 - 0,0004x^3 + 0,014x^2 - 0,2103x$

	+ 9,5148 $R^2 = 0,71$
Arc	$y = 1E-10x^6 - 5E-08x^5 + 7E-06x^4 - 0,0005x^3 + 0,0174x^2 - 0,2818x + 9,1214$ $R^2 = 0,70$
Spirale	$y = 3E-10x^6 - 1E-07x^5 + 1E-05x^4 - 0,0009x^3 + 0,0275x^2 - 0,4033x + 10,666$ $R^2 = 0,77$

3.3 Étude des répétitions

Les figures 3-19 à 3-21 présentent la variation de la concentration en nombre, masse et surface spécifique des particules fines respectivement, en fonction du diamètre. Les amplitudes des

courbes de l'essai numéro 2 sont supérieures à ceux de l'essai numéro 1, mais l'ordre des émissions de particules en terme de trajectoires reste la même. La figure 3-22 est la courbe de variation de la concentration en masse des particules ultrafines en fonction du diamètre. On observe plutôt une baisse d'amplitude des courbes de l'essai 2 par rapport à l'essai 1 ainsi qu'un nouvel ordre d'émissions des particules (la trajectoire en arc émet le plus de particules ultrafines suivie de la trajectoire spirale et de la trajectoire rectiligne). Les particules ultrafines sont très volatiles, ce qui rend difficile la répétition des expériences en termes de concentrations mais néanmoins l'allure des courbes est maintenue.

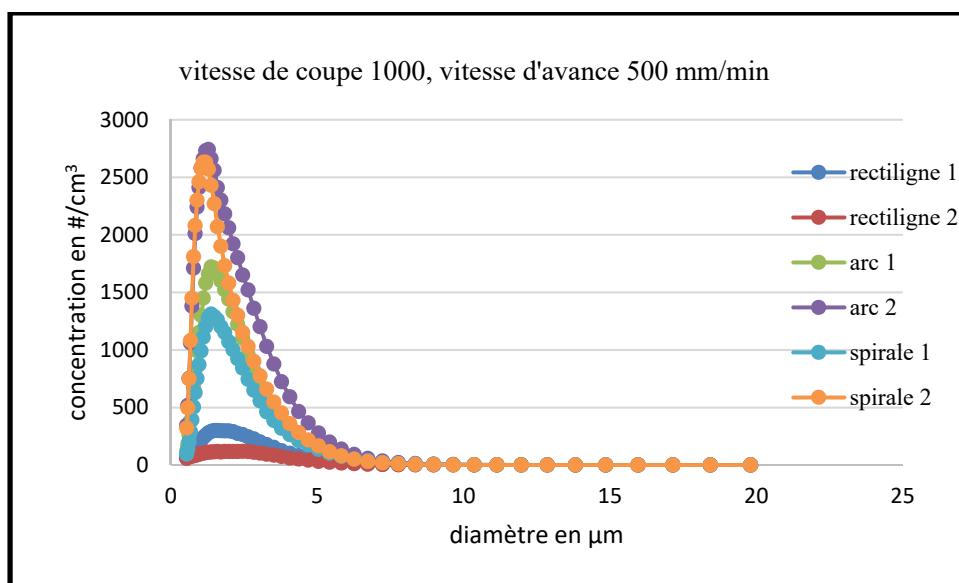


Figure 3-7: Exemple de courbe des variations de la concentration en nombre des particules fines en fonction du diamètre

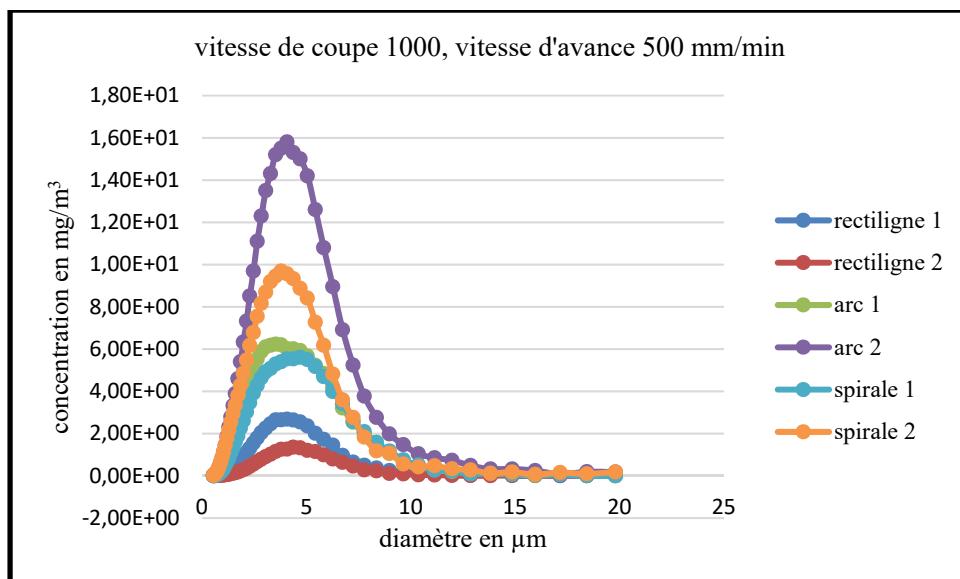


Figure 3-8 : Exemple de courbe des variations de la concentration en masse des particules fines en fonction du diamètre

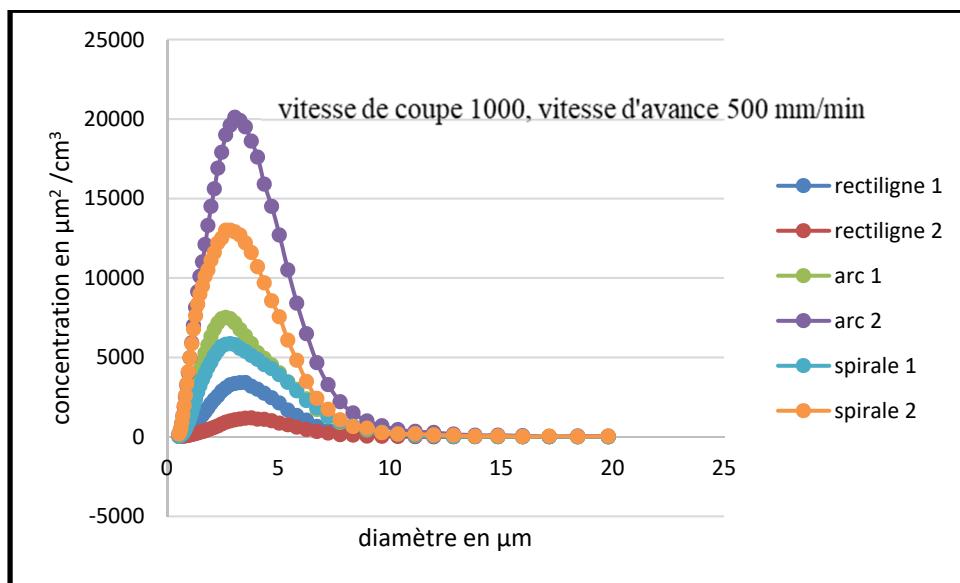


Figure 3-9: Exemple de courbe des variations de la concentration en surface spécifique des particules fines en fonction du diamètre

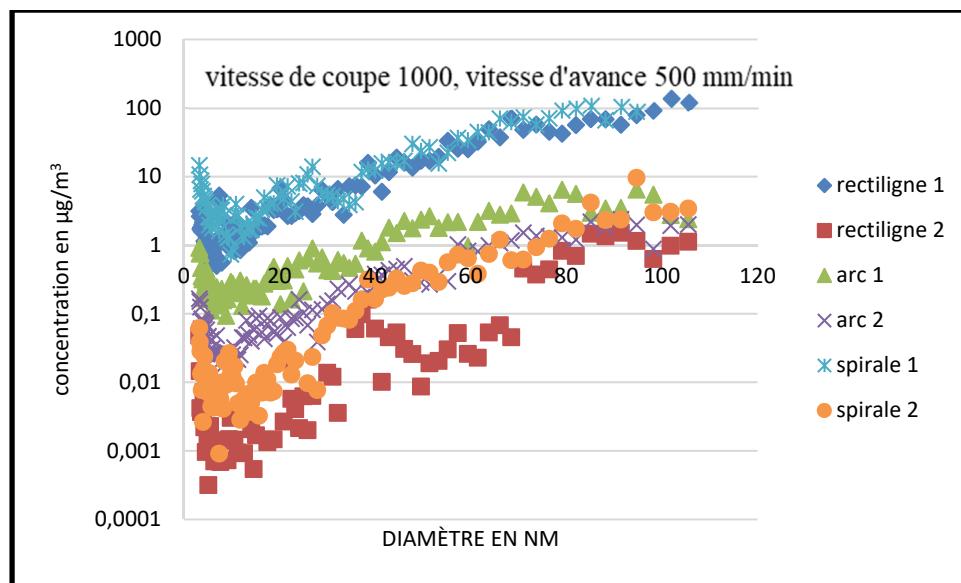
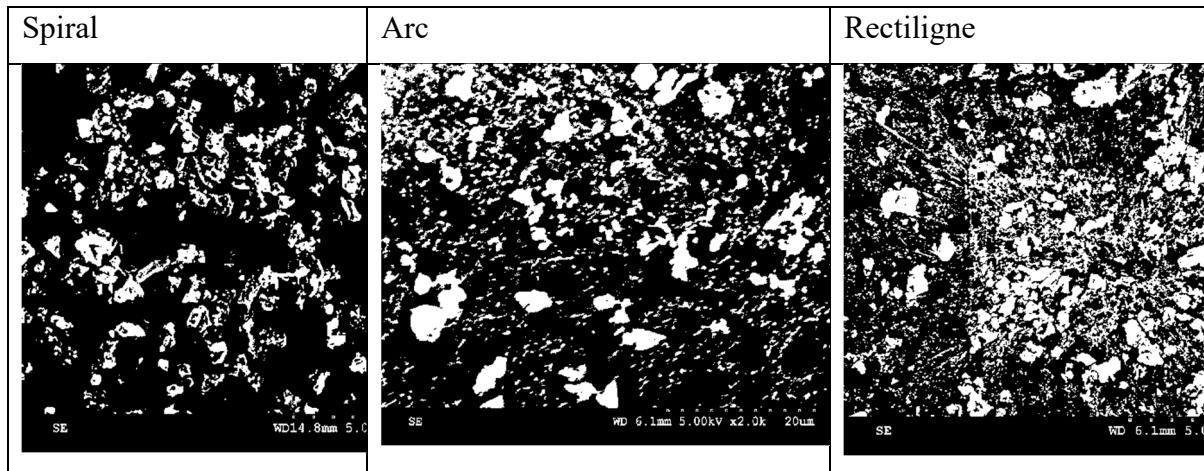


Figure 3-10 : Exemple de courbe des variations de la concentration en masse des particules ultrafines en fonction du diamètre

3.4 Étude de la poussière de granit

Le microscope électronique à balayage permet de caractériser la surface et de déterminer la composition chimique d'un matériau à l'étude. Le microscope électronique à balayage (MEB) est une technique d'imagerie visant à visualiser la morphologie (forme, dimension, arrangement de particules, etc.), la topologie de surface (relief, texture, etc.) et la composition chimique. Elle permet aussi le recueil des cristallographiques (structure atomique). Cette technique permet d'analyser une multitude d'échantillons de toutes formes, compositions et tailles. Le tableau 3-4 présente les différentes morphologies des copeaux en fonction des trajectoires obtenu lors du polissage du granit blanc à sec et avec une taille de grain G80. La trajectoire spirale présente des copeaux en bâtonnets tandis que la trajectoire en arc admet des copeaux de forme trapézoïdale et la trajectoire rectiligne les copeaux fins de forme prismatique.

Tableau 3-4: Morphologie des copeaux en fonction des trajectoires Morphologie (X 1000)



La spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX) couplée au MEB permet la détermination de la composition chimique de la surface examinée. Elle consiste à analyser les rayons X générés par un échantillon placé sous le faisceau d'électrons du microscope électronique à balayage (MEB). Le rayonnement émis lors de l'interaction entre les rayons et la matière de l'échantillon est retranscrit sous forme de spectre, où apparaissent des pics d'intensité variable (figure 3-23), caractéristiques des éléments métalliques ou minéraux en présence. La répartition des teneurs en silices des copeaux données par l'EDX (tableau 3-5) révèle que la trajectoire spirale est celle qui produit le plus grand pourcentage massique de silice (30,78%).

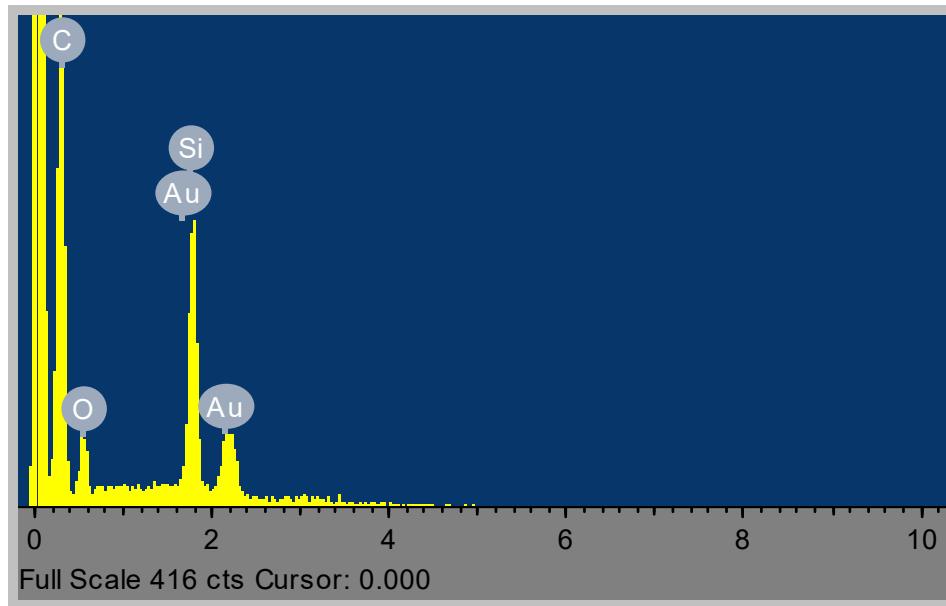


Figure 3-11:Exemple de Spectre EDX

Tableau 3-5:Répartition des pourcentages en silice en fonction des trajectoires

Trajettoire	% massique en Si
Spirale	30.78
Arc	26.97
Rectiligne	19.93

3.5 Conclusion

Le polissage du granit blanc à sec lors de l'ébauche (taille de grain G100) permet de voir que le procédé rectiligne est celui qui semble produire moins de particules fines, mais par contre est celui qui émet le plus de particules ultrafines. Le procédé en arc conduit à une forte émission des particules fines, mais une émission moindre des particules ultrafines. Les essais semblent se répéter pour les particules fines malgré une différence d'amplitudes des concentrations des particules tandis que les courbes des particules ultrafines ne se répètent pas. Les études

statistiques seront faites au chapitre suivant. Les courbes des logarithmes des concentrations des particules ultrafines en fonction du diamètre peuvent être approchées avec une assez bonne corrélation (R^2 supérieure à 70%) par les fonctions puissance (pour la concentration en nombre) et polynomiale (pour les concentrations en masse et en surface spécifique) permettant une comparaison plus aisées des trajectoires. Le chapitre suivant étudie le polissage de finition.

CHAPITRE 4

POLISSAGE DE FINITION

4.1 Introduction

Les techniques de réduction de contamination des travailleurs aux poussières issues des procédés d’usinage rencontrés aujourd’hui sont soit coûteux ou inconfortables pour les travailleurs. L’étude de nouveaux moyens de réduction des poussières à la source permet de limiter l’exposition des travailleurs. Les travaux menés en ébauche (chapitre 3) nous ont permis d’investiguer pour comprendre si le comportement observé est le même que lors de la finition. Les travaux de Saïdi et al., (2018) ont permis de ressortir les paramètres de polissage qui influent sur les émissions de particules. Les paramètres d’usinage ainsi que les trajectoires feront l’objet d’une attention particulière tout au long de ce chapitre qui est consacré à la finition avec des abrasifs de taille 100, 400 et 800. Ce chapitre traite de l’influence qu’ont la vitesse de coupe, la vitesse d’avance, la taille des grains et les trajectoires de l’outil (rectiligne, arc et spirale) sur les poussières obtenues lors du polissage à sec du granit blanc.

4.2 Résultats et analyse

4.2.1 Influence des paramètres de coupe et des trajectoires

L’influence des paramètres de coupe tels que l’avance, la vitesse de coupe et la taille des grains sur les émissions de particules et le fini de surface a déjà eu à faire l’objet d’une étude. L’aspect combiné de ces paramètres de coupe et des trajectoires sur les émissions de particules et le fini de surface fera l’objet de cette partie.

Les concentrations présentées dans la suite sont des concentrations totales enregistrées par l’APS et le SMPS pendant chaque essai. Quant aux paramètres de rugosité, il s’agira de la moyenne des mesures (3) effectuées sur la surface du granit après chaque essai, les conditions de coupes étant celles du tableau 2-3.

4.2.1.1 Particules fines

La distribution des particules fines est généralement lognormale comme présenté à la figure 4-1b et c. Pour quelques valeurs correspondantes à une vitesse d'avance de 1000 mm/min pour un grit 400, on observe des distributions bimodales indépendamment des trajectoires et de la vitesse de coupe. La distribution bimodale peut résulter d'un processus impliquant la rupture de grosses particules, de multiples sources de particules ou des mécanismes de croissance variables dans le système.

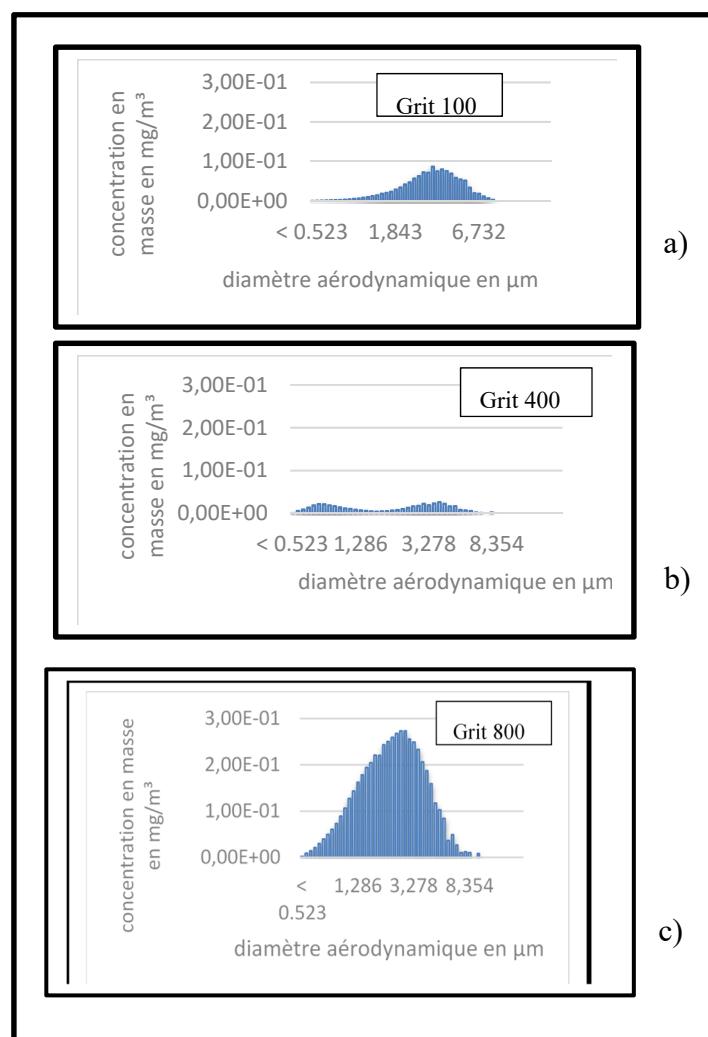


Figure 4-1: Concentration en masse des particules fines suivant la trajectoire rectiligne pour une vitesse d'avance de 1000mm/min et une vitesse de coupe de 1000rpm : a) grit 100, b) grit 400 et c) grit 800

La figure 4-2 renseigne sur les facteurs significatifs qui influencent la variable de réponse ici CnbrePF, ces facteurs sont repérés sur le graphique par les barres dépassant la valeur de $p=0,05$ (ligne rouge). Les facteurs significatifs donnés par le diagramme de Pareto sont donc : les variables Vc, Grit, Vc x Grit, f x Grit², Grit², Vc x f, Vc x Grit², Vc², Grit x Tr², Vc x Grit, Tr², f², Vc² x Grit². Dans cette expérience on observe que tous les facteurs principaux sont significatifs, car ils se retrouvent soit parmi les facteurs principaux ou alors dans les interactions. Ainsi les facteurs significatifs retenus sont : Vc, Grit, Vc x Grit, f, Tr, f x Grit², Grit², Vc x f, Vc x Grit², Vc², Grit x Tr², Vc x Grit, Tr², Vc², Vc² x Grit².

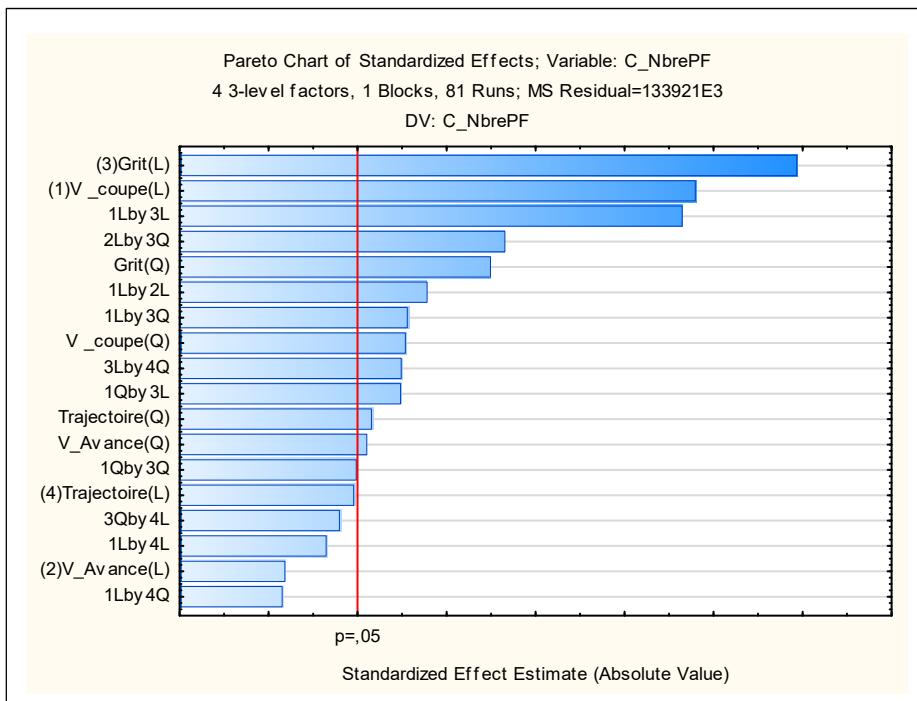


Figure 4-2:Diagramme Pareto de la concentration totale en nombre

La variance est constante entre les facteurs au vu. Le tableau 4-1 de l'ANOVA permet d'obtenir le coefficient R² de 0,85 pour un R² ajusté de 0,82 ce qui consolide le modèle choisi.

Tableau 4-1 Tableau d'analyse de la variance de CnbrePF

ANOVA; Var.:C_NbrePF; R-sqr=.8514; Adj.:.81988 (Import Excel) 4 3-level factors, 1 Blocks, 81 Runs; MS Residual=428491E2 DV: C_NbrePF

Facteurs	SS	df	MS	F	p
(1)Vc (L)	3,46E+09	1	3,46E+09	80,72	0,00
Vc (Q)	3,55E+08	1	3,55E+08	8,28	0,01
(2)f (L)	4,92E+06	1	4,92E+06	0,11	0,74
f (Q)	1,82E+08	1	1,82E+08	4,26	0,04
(3)Grit (L)	5,30E+09	1	5,30E+09	123,70	0,00
Grit (Q)	9,35E+08	1	9,35E+08	21,82	0,00
(4)Tr (L)	1,37E+08	1	1,37E+08	3,19	0,08
	ANOVA; Var.:C_NbrePF; R-sqr=.8514; Adj.: .81988 (Import Excel) 4 3-level factors, 1 Blocks, 81 Runs; MS Residual=428491E2 DV: C NbrePF				
Facteurs	SS	df	MS	F	p
Tr (Q)	2,00E+08	1	2,00E+08	4,67	0,03
1L by 2L	4,76E+08	1	4,76E+08	11,12	0,00
1L by 3L	3,25E+09	1	3,25E+09	75,85	0,00
1L by 3Q	3,65E+08	1	3,65E+08	8,51	0,00
1Q by 3Q	1,46E+08	1	1,46E+08	3,40	0,07
2L by 3Q	1,06E+09	1	1,06E+09	24,72	0,00
3L by 4Q	3,34E+08	1	3,34E+08	7,80	0,01
Error	2,83E+09	66	4,28E+07		
Total SS	1,90E+10	80			

L'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la concentration en nombre de particules fines (graphe 4-3a)), ce qui est en accord avec l'étude de (M. Saidi et al., 2015) tandis que l'augmentation de la vitesse d'avance n'a pas de grand effet sur la concentration en nombre ainsi que les différentes trajectoires. L'augmentation de la taille des grains réduit l'émission des particules fines (graphe 4-3c)). La figure 4-4 montre l'influence des interactions des facteurs sur la concentration totale en nombre de particules fines. La taille des grains est le

facteur qui influence le plus la concentration totale en nombre de particules fines comme vu sur le diagramme de Pareto (figure 4-2).

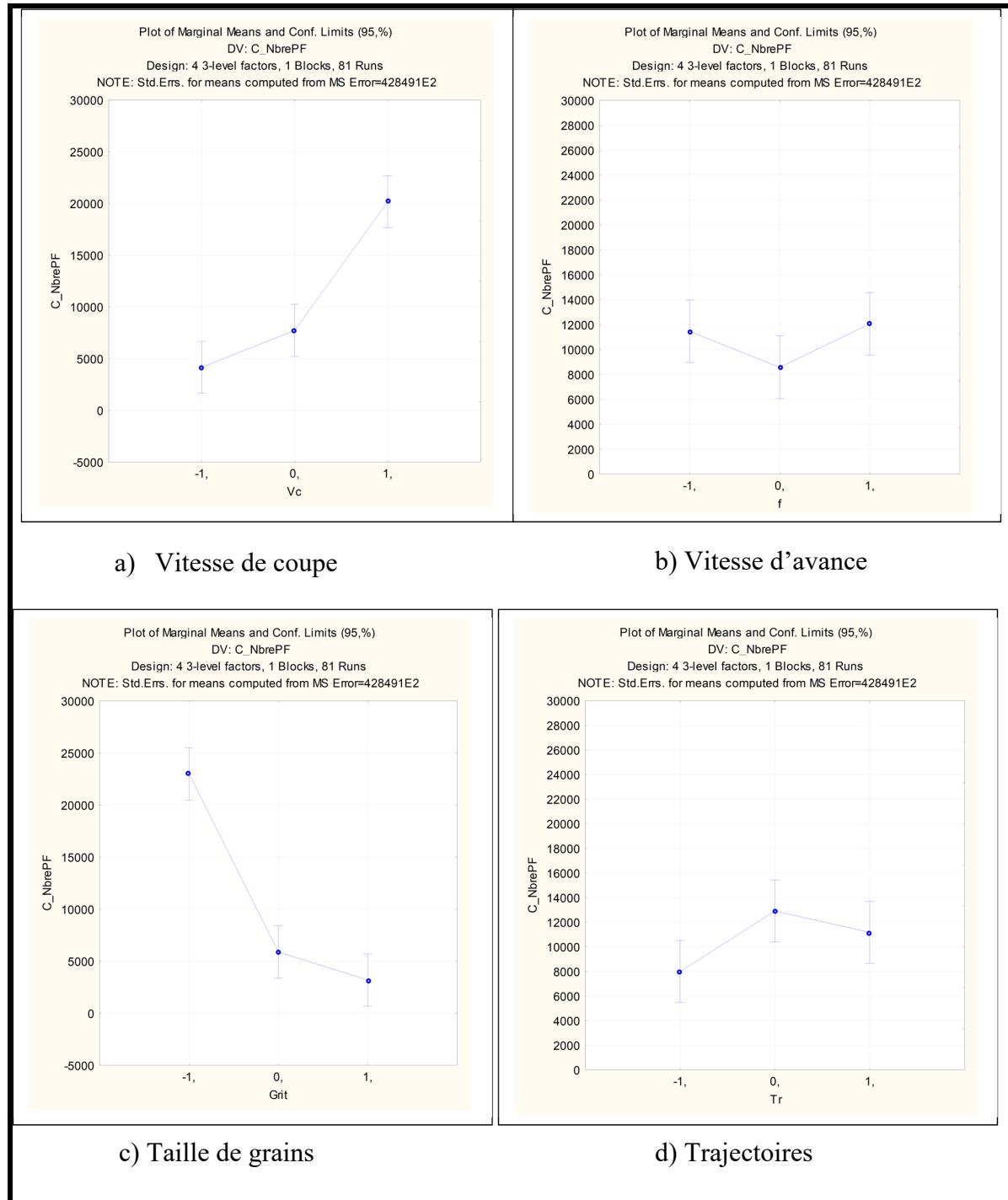


Figure 4-3 : Influence des facteurs principaux sur CnbrePF

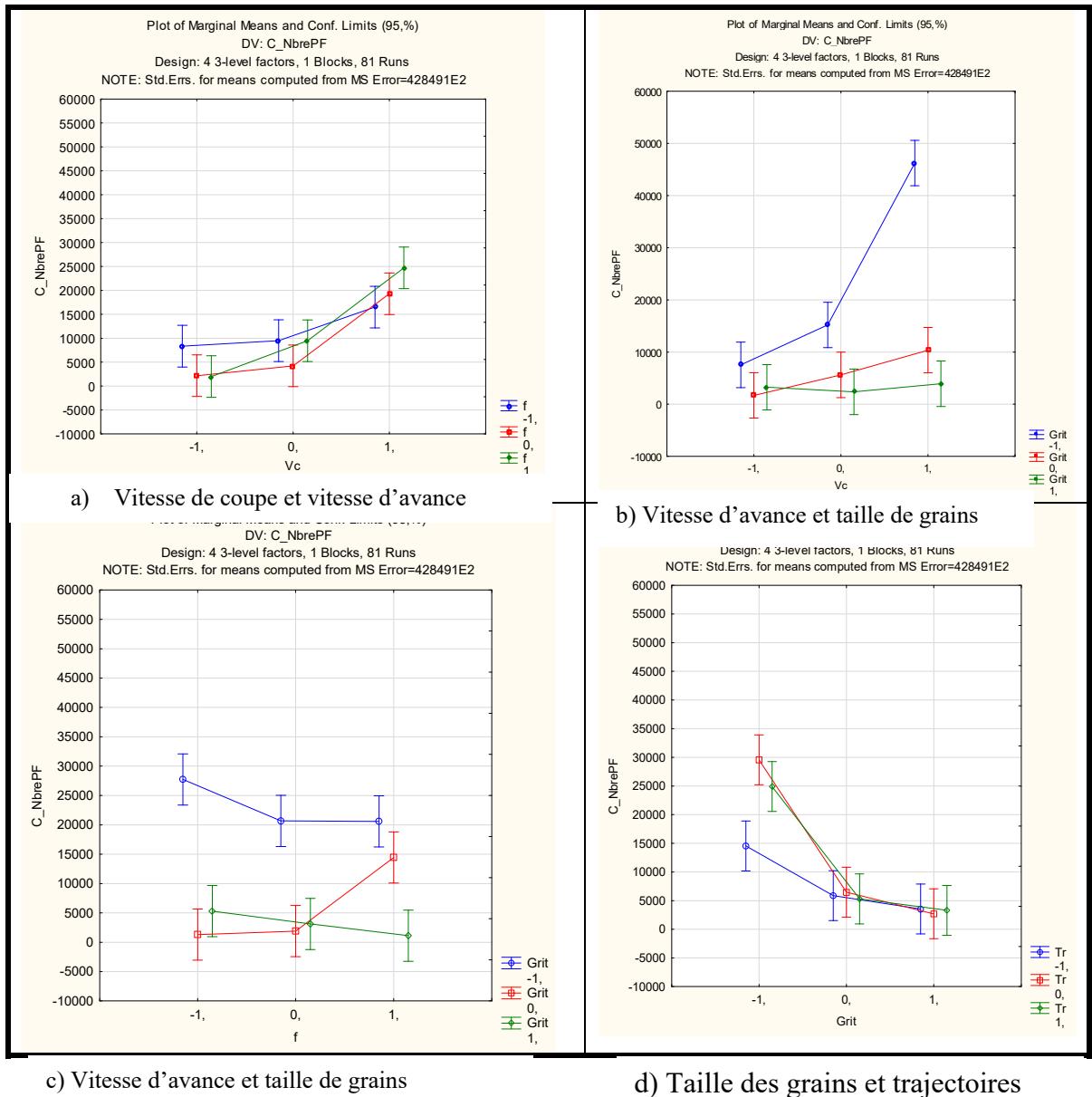


Figure 4-4: Influence des interactions sur la concentration totale en nombre de particules fines

4.2.1.2 Particules ultrafines

La figure 4-5 présente les concentrations en nombres de particules ultrafines en fonction du diamètre et suivant les trajectoires rectilignes, arc et spirale. L'évolution des concentrations dépend de la phase de polissage, lors de l'ébauche (grit 100) la trajectoire spirale produit plus de particules ultrafines suivies de la trajectoire rectiligne et de la trajectoire en arc. Lors de la phase de finition (grit 400 et 800) les courbes des trajectoires rectiligne, arc et spirale sont quasiment confondues malgré une légère domination des trajectoires en arc et spirale qui pourrait s'expliquer par le nombre de passages de l'outil sur la surface de la pièce favorisant l'écrasement des particules.

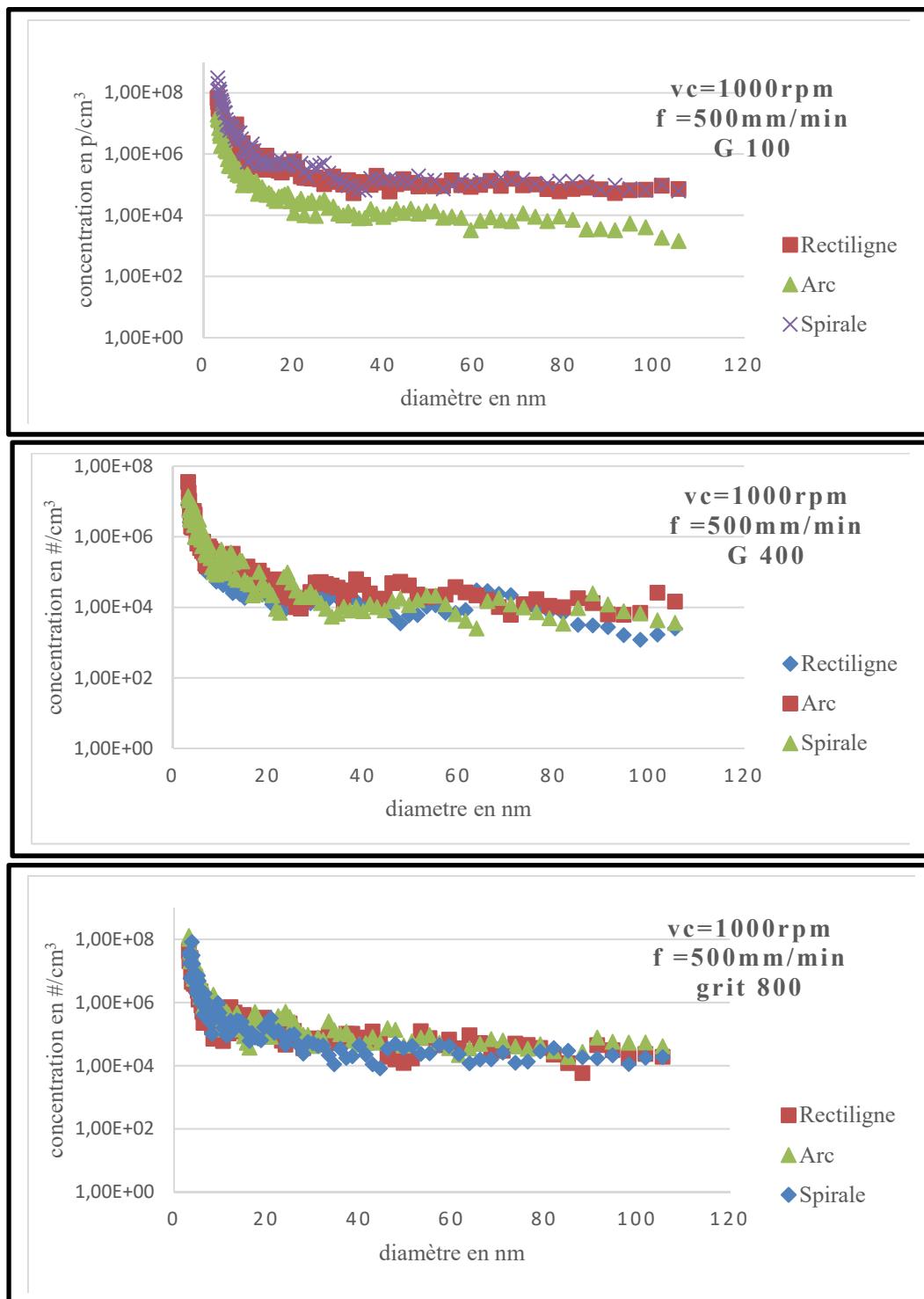


Figure 4-5: Graphe des concentrations totales en nombres de particules en fonction du diamètre suivant les trajectoires

Le test de signification permet de dégager les paramètres significatifs qui influent sur la variable de réponse. Les facteurs non significatifs pourront être considérés comme les paramètres de bruits ou d'erreurs dans notre analyse statistique.

Le diagramme de Pareto présenté à la figure 4-6 permet de dégager les facteurs significatifs suivant : f, Grit x f², Grit x Tr², Grit². Le tableau 4-2 donnant les résultats de l'analyse de la variance de la concentration moyenne en nombre de particules ultrafines révèle un coefficient de détermination R² égale à 0,33 qui traduit une faible explication de la variabilité par les facteurs, de plus l'analyse des résidus révèle une inconstance de la variance. Une transformation de la réponse à l'aide du log permet d'obtenir un R² de 0,36 (tableau 4-3) avec un meilleur résidu, puis un R² de 0,31 (tableau 4-4) avec les facteurs significatifs f, Grit, Tr, Grit x f², Grit x Tr², Grit². Néanmoins cette valeur de R² est typique des expériences avec plusieurs facteurs. Dans cette analyse la réduction des paramètres aux facteurs significatifs ne ferait que réduire encore plus le R² ce qui suggère l'existence d'autres facteurs non pris dans cette étude et qui influencent significativement les particules ultrafines.

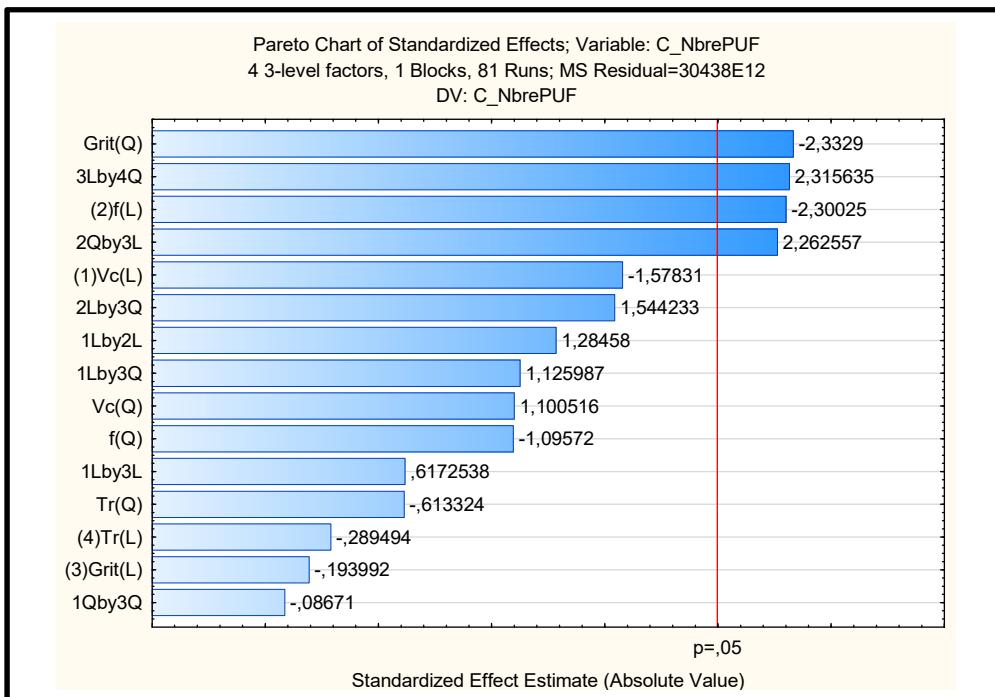


Figure 4-6: Diagramme de Pareto de la concentration totale en nombre

Tableau 4-2: Tableau d'analyse de la variance de la réponse C_nbrePUF

	ANOVA; Var.:C_NbrePUF; R-sqr=,33201; Adj:,17786 (Import Excel) 4 3-level factors, 1 Blocks, 81 Runs; MS Residual=30438E12 DV: C_NbrePUF				
Facteurs	SS	df	MS	F	p
(1)Vc (L)	7,58E+16	1	7,58E+16	2,49	0,12
Vc (Q)	3,69E+16	1	3,69E+16	1,21	0,28
(2)f (L)	1,61E+17	1	1,61E+17	5,29	0,02
f (Q)	3,65E+16	1	3,65E+16	1,20	0,28
(3)Grit (L)	1,15E+15	1	1,15E+15	0,04	0,85
Grit (Q)	1,66E+17	1	1,66E+17	5,44	0,02
(4)Tr (L)	2,55E+15	1	2,55E+15	0,08	0,77
Tr (Q)	1,14E+16	1	1,14E+16	0,38	0,54
1L by 2L	5,02E+16	1	5,02E+16	1,65	0,20
1L by 3L	1,16E+16	1	1,16E+16	0,38	0,54
1L by 3Q	3,86E+16	1	3,86E+16	1,27	0,26
1Q by 3Q	2,29E+14	1	2,29E+14	0,01	0,93
2L by 3Q	7,26E+16	1	7,26E+16	2,38	0,13
2Q by 3L	1,56E+17	1	1,56E+17	5,12	0,03
3L by 4Q	1,63E+17	1	1,63E+17	5,36	0,02
Error	1,98E+18	65	3,04E+16		
Total SS	2,96E+18	80			

Tableau 4-3: Tableau d'analyse de la variance de la réponse LogC_nbrePUF

ANOVA; Var.:LogC_NbrePUF; R-sqr=,36589; Adj:,2753 (Import Excel) 4 3-level factors, 1 Blocks, 81 Runs; MS Residual=,3101012 DV: LogC_NbrePUF: =Abs(Log(C_NbrePUF))					
Facteurs	SS	df	MS	F	p
(1)Vc (L)	0,49	1,00	0,49	1,58	0,21
Vc (Q)	1,31	1,00	1,31	4,21	0,04
(2)f (L)	0,86	1,00	0,86	2,77	0,10
f (Q)	0,25	1,00	0,25	0,80	0,37
(3)Grit (L)	1,15	1,00	1,15	3,71	0,06
Grit (Q)	3,23	1,00	3,23	10,42	0,00
(4)Tr (L)	0,08	1,00	0,08	0,27	0,61
Tr (Q)	0,34	1,00	0,34	1,11	0,30
2Q by 3L	3,07	1,00	3,07	9,91	0,00
3L by 4Q	1,74	1,00	1,74	5,62	0,02
Error	21,71	70,00	0,31		
Total SS	34,23217	80			

Tableau 4-4: Tableau d'analyse de la variance des facteurs significatifs de la réponse LogC_nbre PUF

ANOVA; Var.:LogCnbrePUF; R-sqr=,31345; Adj:,23716 (Import Excel) 4 3-level factors, 1 Blocks, 81 Runs; MS Residual=,3264191 DV: LogCnbrePUF: =Abs(Log(C_NbrePUF))					
Facteurs	SS	df	MS	F	p
(2)f (L)	0,86	1,00	0,86	2,63	0,11
f (Q)	0,25	1,00	0,25	0,76	0,39
(3)Grit (L)	1,15	1,00	1,15	3,52	0,06
Grit (Q)	3,23	1,00	3,23	9,89	0,00
(4)Tr (L)	0,08	1,00	0,08	0,25	0,62
Tr (Q)	0,34	1,00	0,34	1,05	0,31
2Q by 3L	3,07	1,00	3,07	9,42	0,00
3L by 4Q	1,74	1,00	1,74	5,34	0,02
Error	23,50	72,00	0,33		
Total SS	34,23	80,00			

L'observation de l'influence de chacun des facteurs sur la concentration totale en nombre de particules ultrafines ne permet pas de dissocier le comportement de la variation de chaque facteur dû au chevauchement des intervalles de confiance des courbes de la figure 4-7.

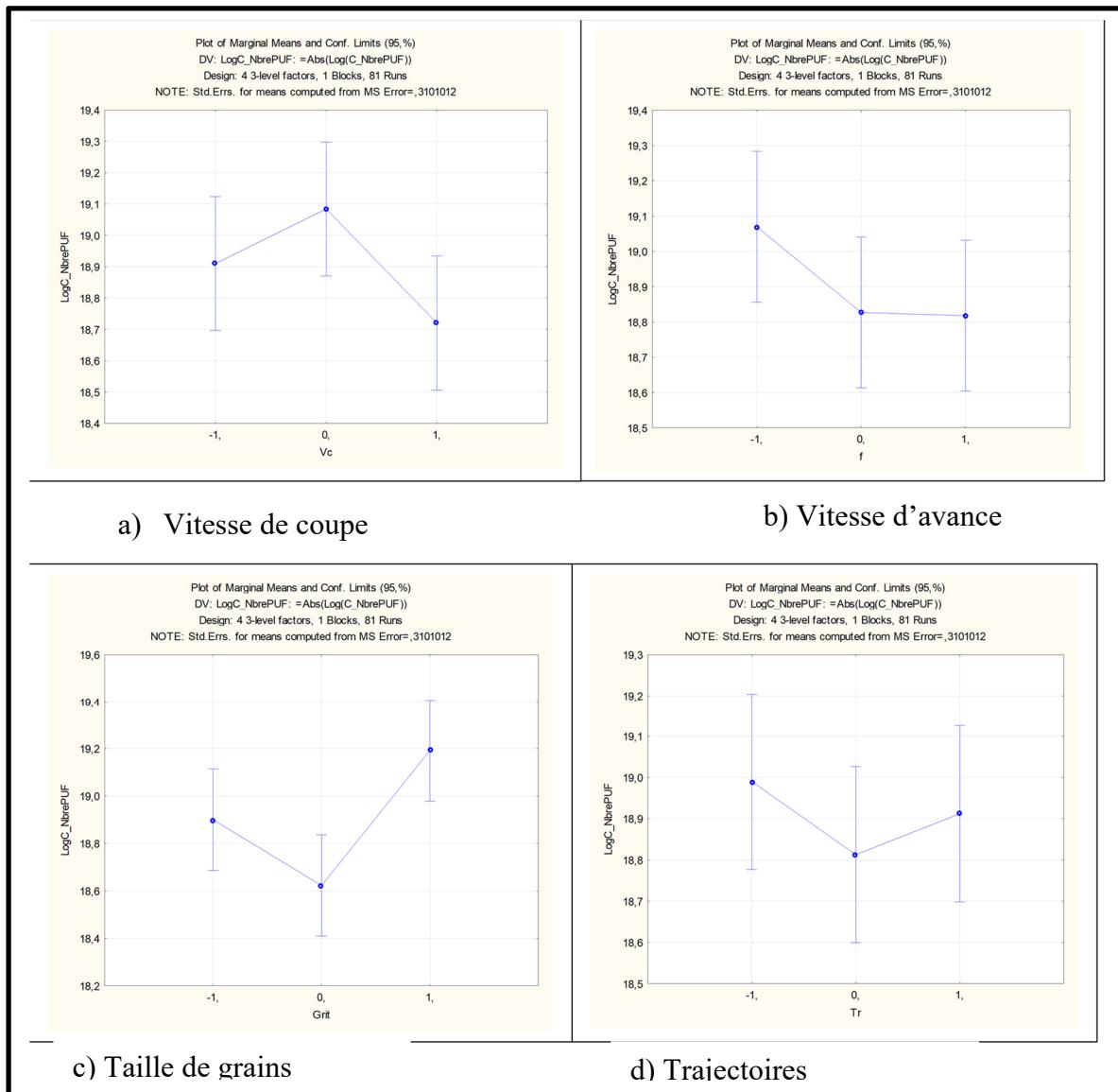


Figure 4-7: Influence des facteurs principaux sur la réponse LogC_NumPUF

4.2.1.3 La rugosité arithmétique de surface Ra

Le paramètre de rugosité de surface étudiée ici est la rugosité arithmétique de surface la rugosité quadratique et la hauteur totale des éléments du profil seront vues plus loin. Les trajectoires en arc et spirale présentent les valeurs de rugosité arithmétique les plus faibles (figure 4-8a, b et c).. L'augmentation de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance et la taille des grains améliore le fini de surface (figure 4-10 a, b et c) ceci est en accord avec l'étude de Songmene et al. (2018a).

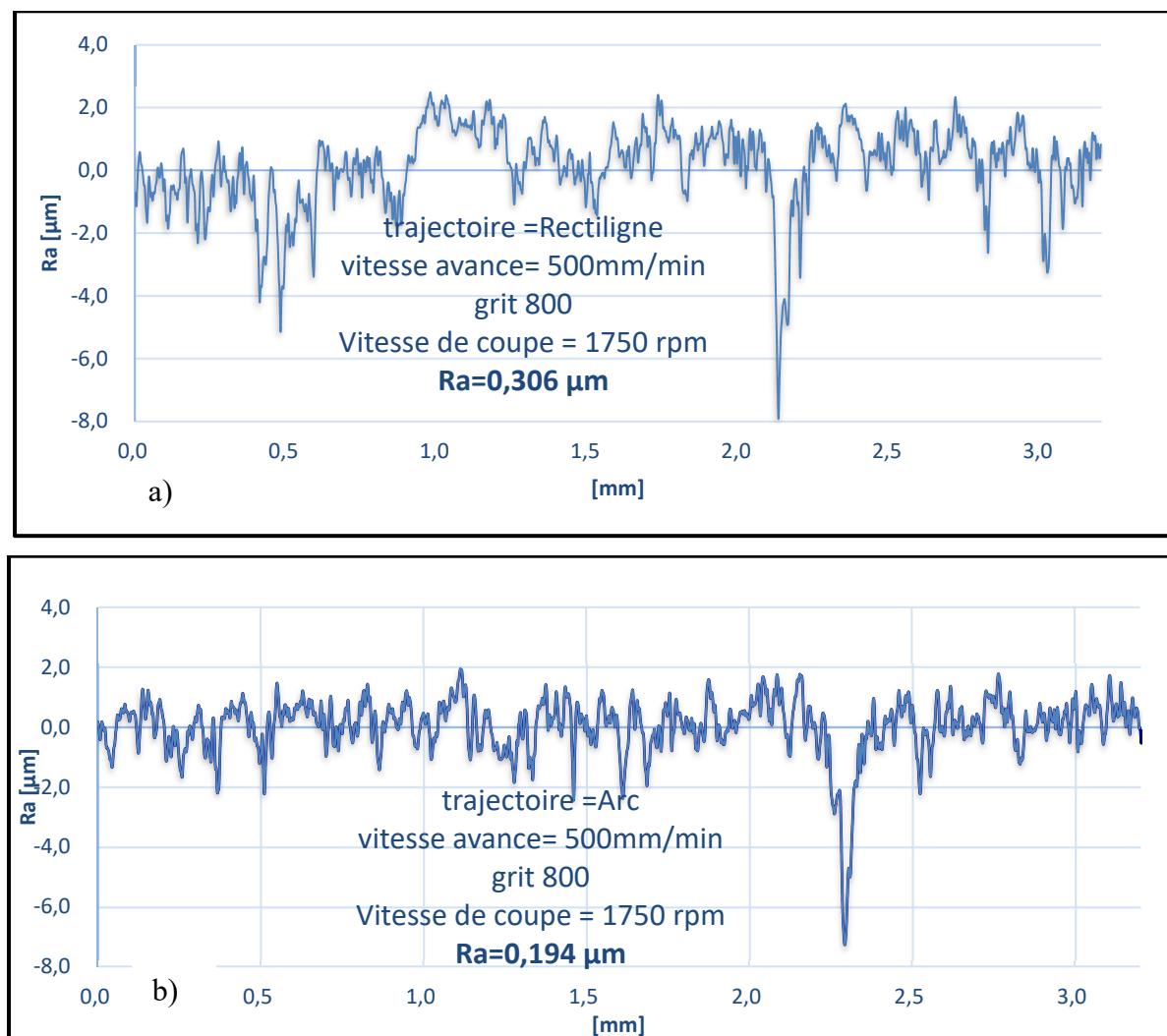


Figure 4-8: Rugosité de surface suivant les trajectoires a) rectiligne, b) arc et c) spirale

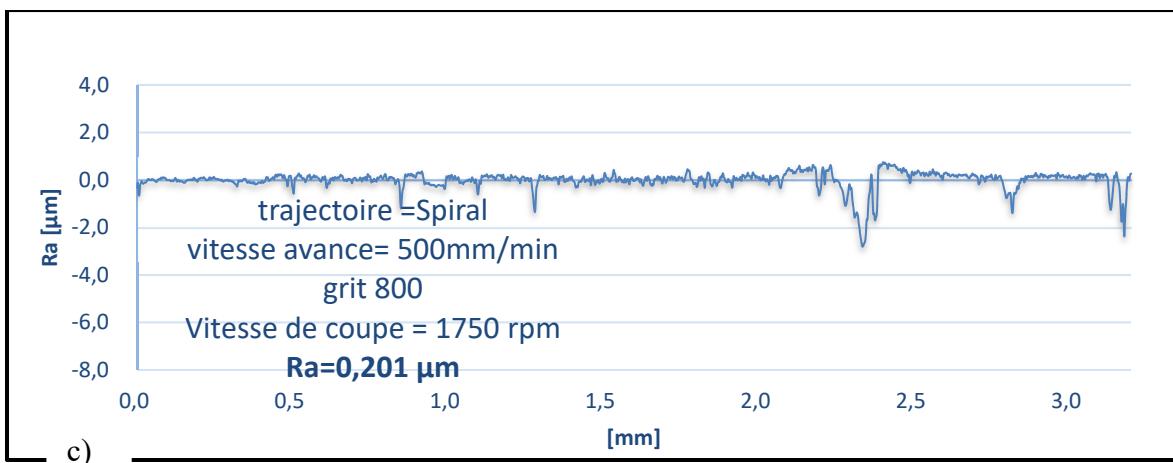


Figure 4-8 : Suite

La figure 4-9 illustre le diagramme de Pareto de la variable de réponse Ra, elle permet d'obtenir les facteurs significatifs suivants : Vc, f, Grit, fxGrit, Grit², fxGrit², f²Grit², f²xGrit. Dans cette expérience on observe que tous les facteurs principaux sont significatifs, car ils se retrouvent soit parmi les facteurs significatifs principaux ou alors dans les interactions.

Le tableau 4-5 présente l'analyse de la variance permettant d'avoir le coefficient de corrélation R² qui est de 0,9 pour un coefficient de corrélation R²_{ajusté} à 0,83. Les facteurs significatifs retenus pour l'analyse sont : Vc, f, Grit, fxGrit, Grit², fxGrit², f²xGrit².

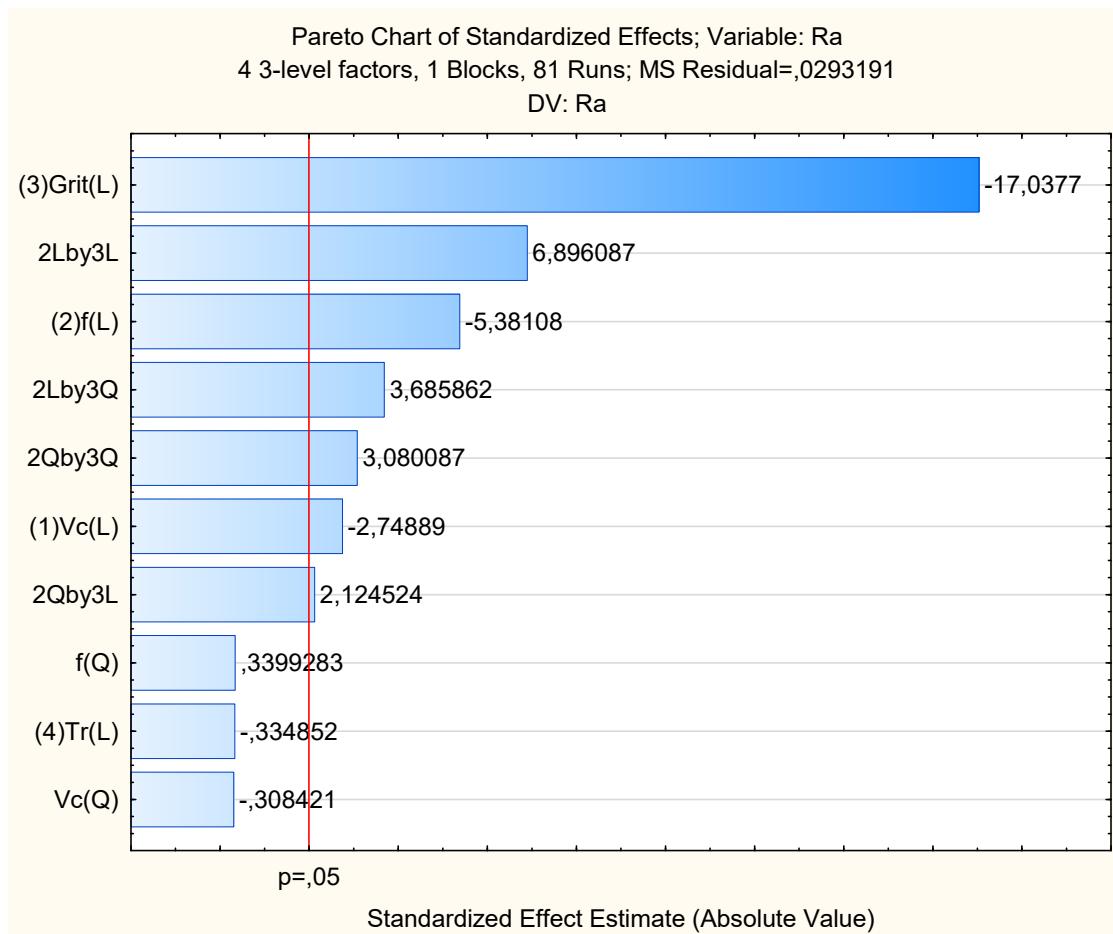


Figure 4-9: Diagramme de Pareto de Ra

Tableau 4-5: Tableau d'analyse de la variance de Ra

Facteurs	ANOVA; Var.:Ra; R-sqr=.85178; Adj.,8306 (memoire) 4 3-level factors, 1 Blocks, 81 Runs; MS Residual=.0293191 DV: Ra					
	SS	C	I	I	p	
(1)Vc (L)	0,22	1	0	7		0,01
		,	,	,		
		0	2	5		
		0	2	6		
Vc (Q)	0,00	1	0	0		0,76
		,	,	,		
		0	0	1		
		0	0	0		
(2)f (L)	0,85	1	0	2		0,00
		,	,	,		
		0	8	9		
		0	5	6		

$f(Q)$	0,00	1 0 0 , , , 0 0 1 0 0 2	0,73
(3)Grit (L)	8,51	2 1 8 9 , , 0 0 5 , 0 1 2 8	0,00
(4)Tr (L)	0,00	1 0 0 , , , 0 0 1 0 0 1	0,74
2L by 3L	1,39	4 1 1 7 , , , 0 3 5 0 9 6	0,00
2L by 3Q	0,40	1 0 1 , , 3 0 4 , 0 0 9	0,00
2Q by 3L	0,13	1 0 4 , , , 0 1 5 0 3 1	0,04
2Q by 3Q	0,28	1 0 9 , , , 0 2 4 0 8 9	0,00

La figure 4-10 montre l'influence des facteurs principaux sur la rugosité arithmétique Ra. L'augmentation des vitesses de coupe choisies semblent n'avoir pas grand effet sur le fini de surface (intervalle de confiance de la figure 4-10a). La réduction de la taille des grains (figure 4-10 b)) et l'augmentation de la vitesse d'avance (figure 4-10 c)) conduisent à une amélioration du fini de surface tandis que. La figure 4-10 d ne permet pas de conclure quant à la trajectoire permettant d'avoir le meilleur fini de surface du au chevauchement des intervalles de confiance.

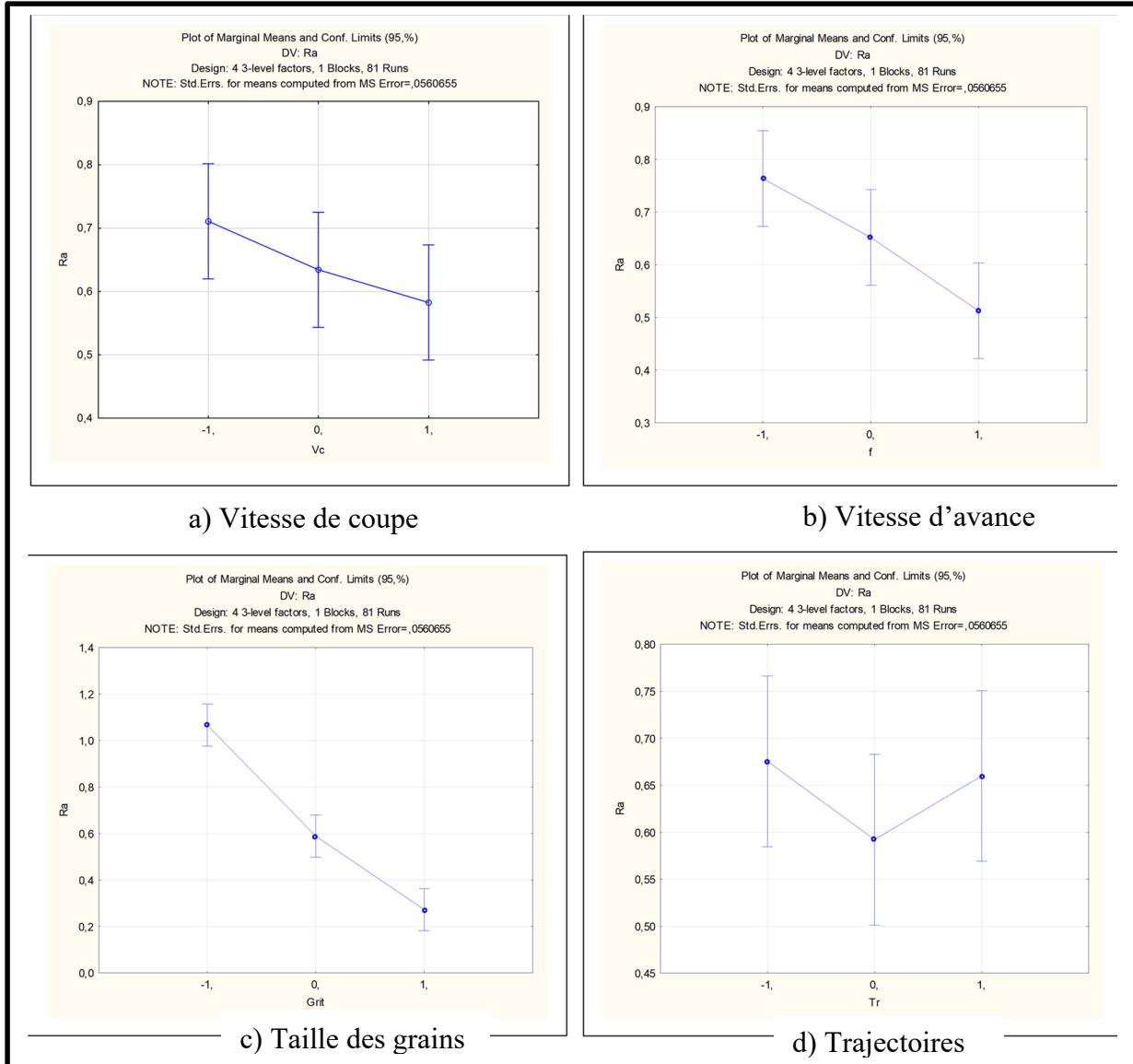


Figure 4-10: Influence des facteurs principaux sur Ra

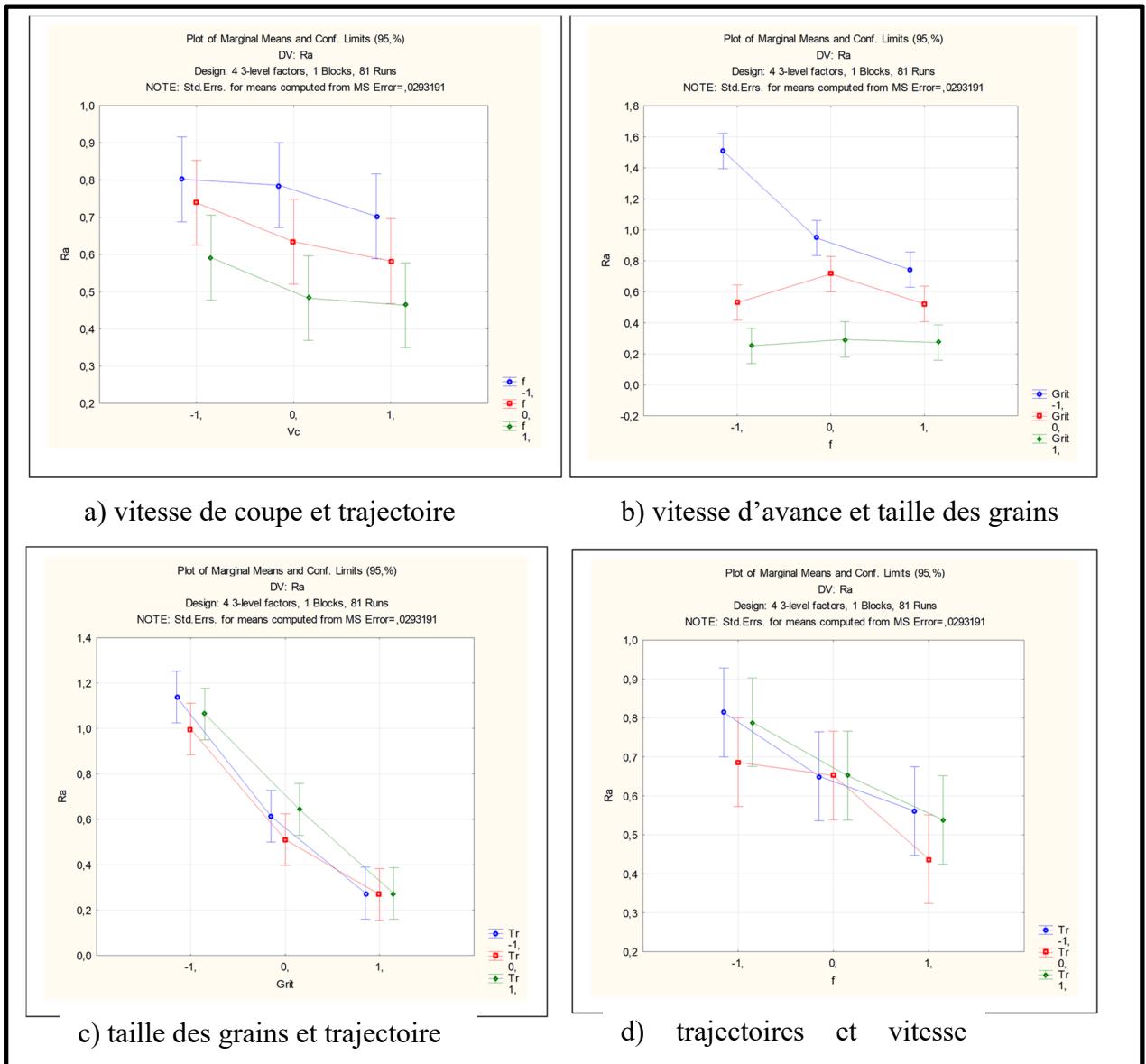


Figure 4-11: Influence des interactions sur le fini de surface Ra

La figure 4-11 présente l'influence des interactions des facteurs sur le Ra, ainsi seule la combinaison de l'avance et de la taille des grains a un effet négatif sur le fini de surface Ra.

4.2.2 Modélisation des équations et optimisation des variables de réponses

4.2.2.1 Modélisation des équations de prédictions

Les modèles statistiques de prédition tiennent compte des facteurs significatifs de chaque variable de réponse ainsi que l'étude des résidus. Les résultats des particules ultrafines ne sont pas présents à cause de leurs faibles coefficients de détermination (33%) Les différentes équations sont ainsi présentées dans le tableau 4-6.

Tableau 4-6: Équations de prédictions des concentrations totales des particules fines, ultrafines et des paramètres de rugosité de surface

Variable de réponse	Équation (pour la trajectoire en arc et la taille des grains G800)	R ² (%)
CnbréPF	4999,74f -2746,32Vc-1591,89f ² +3637,41Vc x f +399,45 Vc ² -2817,68	88,2
LogC_MassPF	6,9f -12,86Vc-7Vc ² -4,48f ² +8,8Vc x f +9,6Vc ² +8,91	89,96
LogC_SurfPF	0,38Vc-0,31f +0,78Vc ² -0,28f ² +0,51Vc x f+7,62	88,39

Paramètres de rugosité de surface		
Ra	-0,064 Vc+0,16f+0,07 f ² +1,04	83,94
Rq	-0,08 Vc +0,38 f +0,1 f ² +0,4	82,39
Rz	-0,21 Vc +1,43 f +0,28 f ² +4	75,84

Les graphiques détaillés des résultats de l'analyse statistique sont présentés en annexe de ce mémoire. L'analyse de la rugosité arithmétique Ra ainsi que les concentrations en nombres des particules fines et ultrafines ont été présentées ici. Les autres variables de réponses ont suivi les mêmes démarches pour aboutir à des modèles de prédictions logiques. La détermination des facteurs significatifs, l'influence de ces facteurs sur la réponse, l'homogénéité de la variance et la normalité des résidus ont été vérifiées. Néanmoins les résultats de l'optimisation de toutes les variables de réponses seront présentés ensemble.

L'ANNEXE I présente le graphique de Pareto, l'influence de la variation des facteurs principaux, l'homogénéité de la variance au travers des courbes des résidus pour la concentration totale en masse des particules fines.

L'ANNEXE II présente le graphique de Pareto, l'influence de la variation des facteurs principaux, l'homogénéité de la variance au travers des courbes des résidus pour la concentration totale en masse des particules ultrafines.

L'ANNEXE III présente le graphique de Pareto, l'influence de la variation des facteurs principaux, l'homogénéité de la variance au travers des courbes des résidus pour la concentration totale en surface spécifique des particules fines.

L'ANNEXE IV présente le graphique de Pareto, l'influence de la variation des facteurs principaux, l'homogénéité de la variance au travers des courbes des résidus pour la concentration totale en surface spécifique des particules ultrafines.

L'ANNEXE V présente le graphique de Pareto, l'influence de la variation des facteurs principaux, l'homogénéité de la variance au travers des courbes des résidus pour la rugosité quadratique.

L'ANNEXE V présente le graphique de Pareto, l'influence de la variation des facteurs principaux, l'homogénéité de la variance aux travers des courbes des résidus pour la hauteur des éléments du profil.

L'analyse de la variance et les graphiques de Pareto ont mis en évidence la contribution des facteurs sur chaque réponse en les classant par ordre décroissant dans leur contribution dans les réponses. Tous les facteurs principaux n'étaient pas toujours significatifs pour les réponses, une similarité des facteurs significatifs peut être observée pour chaque catégorie de réponse. En effet, pour les concentrations totales des particules fines, tous les facteurs sont significatifs

(soient directement au travers des facteurs principaux ou indirectement au travers des interactions). Les concentrations totales des particules ultrafines, la taille des grains et l'avance étaient les facteurs significatifs communs des trois concentrations dont il fallait ajouter la trajectoire pour la concentration en nombre. Les paramètres de rugosité quant à eux présentaient comme facteurs significatifs la vitesse de coupe, l'avance et la taille des grains. L'analyse des résidus a permis de revoir les modèles de bases et dans certains cas une transformation logarithmique était nécessaire. Ainsi, les modèles issus des facteurs significatifs uniquement présentaient un coefficient R^2 variant entre 75 et 89%. Les concentrations totales des particules ultrafines présentaient un très faible coefficient R^2 variant entre 32 et 34% après l'élimination de certains facteurs. La présence des points de part et d'autre de la ligne médiane horizontale, laissant apparaître deux zones d'accumulation des points a été observé, l'alignement des points sur la droite oblique a également été observé malgré l'existence des points aberrants dus aux facteurs bruits. Ainsi Il a été constaté que l'homogénéité de la variance est assurée pour les modèles choisis. Afin de s'assurer de la validité des modèles proposés, la normalité des résidus a été vérifiée.

4.2.2.2 Optimisation des variables de réponses

La fonction de désirabilité définit le degré de satisfaction par rapport au comportement d'une variable de réponse. Elle permet ainsi en fonction de la situation de ressortir les conditions des paramètres permettant d'atteindre la satisfaction recherchée. Les valeurs 0 et 1 désignant respectivement le plus bas et le plus haut niveau de satisfaction (Tahan, 2012). L'objectif étant d'obtenir le meilleur fini de surface tout en émettant le moins de particules fines et ultrafines, nos fonctions de désirabilités rechercheront les valeurs minimales des variables de réponses. L'équation 4-1 suivante est l'expression de la fonction de désirabilité et la figure 4-12 est la courbe caractéristique de cette fonction dans le cas où c'est le minimum de la variable de réponse qui est satisfaisante.

$$d = \begin{cases} 1 & \text{si } Y \leq L \\ \frac{(Y - L)^t}{(U - L)^t} & \text{si } L < Y < U \\ 0 & \text{si } Y \geq U \end{cases} \quad (4-1)$$

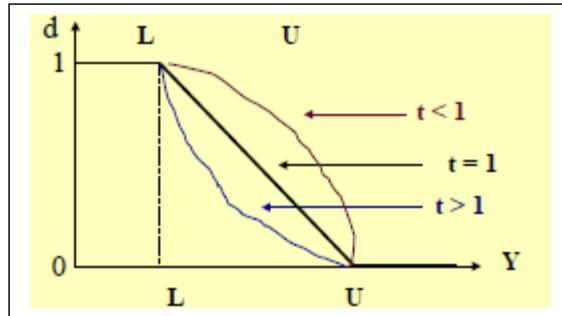


Figure 4-12 :Courbe de la fonction de désirabilité dans le cas minimal

Les valeurs L et U sont à spécifier par l'utilisateur, néanmoins le logiciel Statistica propose ces valeurs en se basant sur l'intervalle de variation des données de la variable de réponse. L'optimisation multicritère est utile lorsqu'il existe plusieurs variables de réponses à optimiser simultanément. Dans ce cas il est judicieux d'affecter un poids à chacune des variables de réponse et enfin obtenir la désirabilité globale (équation 4-2).

$$D = \sum_{i=1}^{i=n} w_i d_i \quad (4-2)$$

Avec w_i ($\sum_i^n w_i = 1$) représentant le poids associé à l'importance de la variable Y_i sur le comportement global du procédé, D la désirabilité globale, n le nombre de variables de réponses et d_i la désirabilité de chaque variable de réponse Y_i . La désirabilité peut être calculée aussi comme produit de toutes les fonctions d_i , celle-ci étant affectées de leur poids respectif en exposant (équation 4-3).

$$D = \prod_{i=1}^n (d_i^{w_i}) \quad (4-3)$$

Dans le cas particulier où $w_i = w_j$, D devient la moyenne géométrique globale de toutes les fonctions d_i . Le logiciel Statistica considérant que l'on se trouve dans le cas poids égaux il est judicieux de transformer chaque désirabilité avant de l'introduire dans le logiciel. Cette étude suppose que l'obtention d'un bon fini de surface (principal but recherché par les industriels lors du polissage du granit) est d'égale importance que la réduction de l'émission des particules. Les particules ultrafines étant plus nocives que les particules fines, celles-ci ont

donc un poids plus élevé. Le tableau 4-7 suivant donne les poids des désirabilités de chaque variable de réponse.

Tableau 4-7 :Répartition du poids des désirabilités en fonction des variables de réponses

Variables de réponses	Poids
Ra	50%
Concentrations totales des particules fines	20%
Concentrations totales des particules ultrafines	30%

L'optimisation prendra en compte uniquement la rugosité arithmétique comme paramètre de rugosité, car c'est celui le plus utilisé dans la littérature et en industrie. Trois optimisations seront présentées suivant les trois types de concentrations des particules étudiées.

➤ Concentration totale en nombre de particules

La figure 4-16 montre la désirabilité globale des variables de la rugosité arithmétique, des concentrations totales en nombres des particules fines et ultrafines. Elle permet d'obtenir les conditions optimales qui permettront de réduire les émissions de particules tout en garantissant un bon état de surface. Le tableau 4-8 montre les valeurs des facteurs résultant de l'optimisation.

Tableau 4-8: Valeurs des facteurs optimisés pour la concentration en nombre

Facteurs	Vitesse de coupe en rpm	Vitesse d'avance en mm/min	Grit	Trajectoire
valeur	2500	750	800	Arc

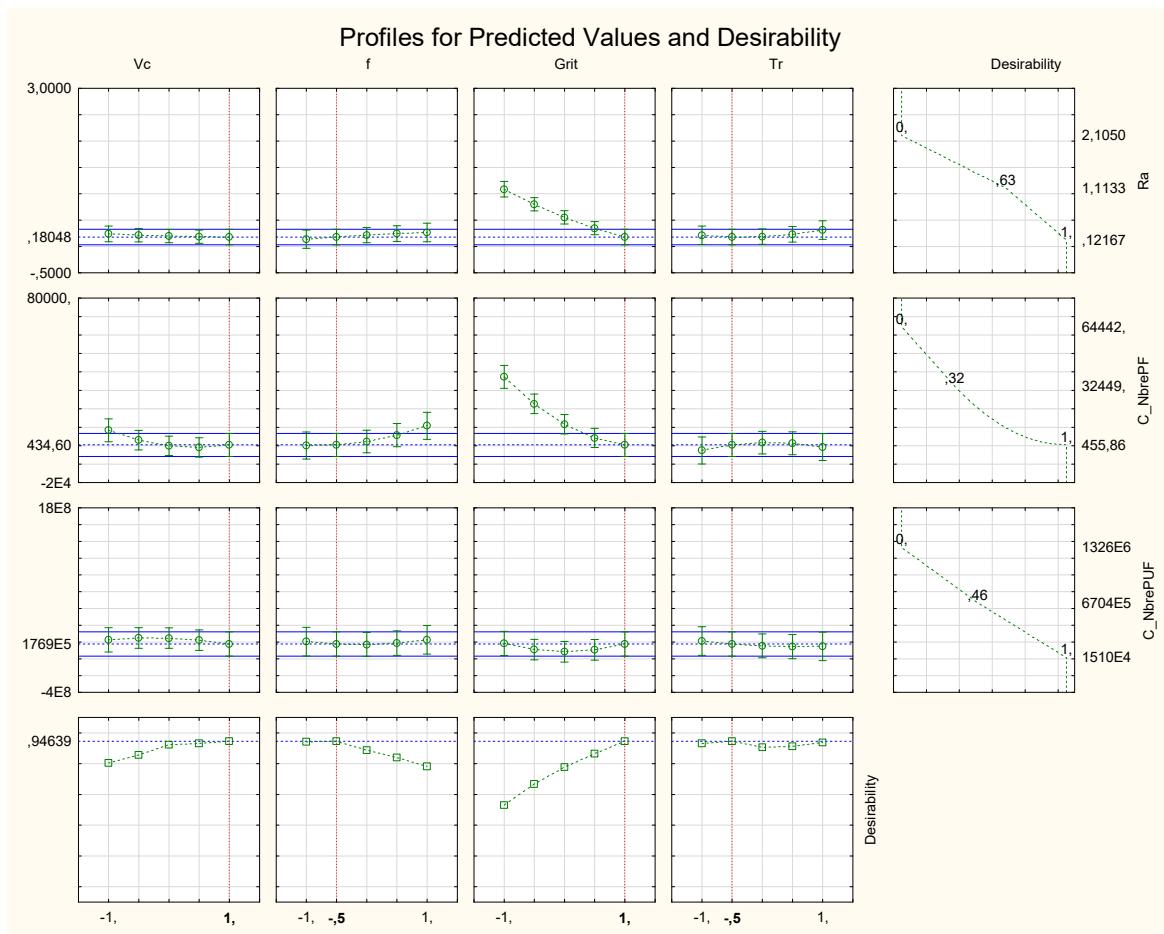


Figure 4-13: Courbes des désirabilités Ra, C_NbrePF et C_NbrePUF

La figure 4-13 révèle les zones fortes homogénéités de la solution correspondants aux zones rouges foncées. Cette courbe est plus générale que celle de la figure 4-14, elle fournit des zones solutions de l'optimisation et permet quelquefois lorsque nous sommes en présence d'une variable catégorique de trouver la valeur correspondante.

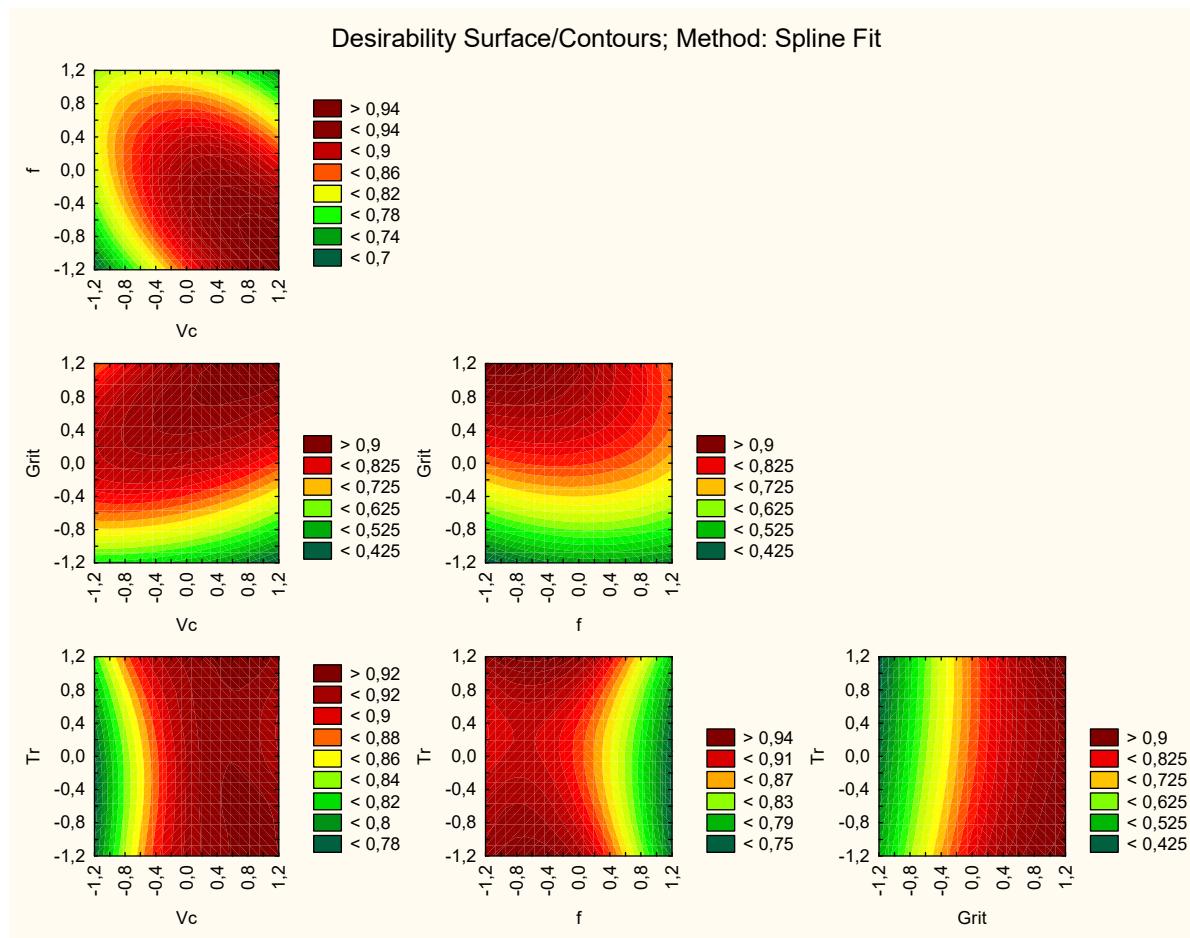


Figure 4-14: Courbes de surface et contours de la concentration totale en nombre

➤ Les concentrations totales en masse des particules fines

La figure 4-15 montre la désirabilité globale des variables de la rugosité arithmétique, des concentrations totales en masse des particules fines et ultrafines. Elle permet d'obtenir les conditions optimales qui permettront de réduire les émissions de particules tout en garantissant un bon état de surface. La figure 4-16 montrant les courbes de surface et contour de la désirabilité permet d'obtenir, en combinant aux résultats de la figure 4-18, les valeurs des facteurs résultant de l'optimisation présente dans le tableau 4-9.

Tableau 4-9: Valeurs des facteurs optimisés pour la concentration en masse

Facteurs	Vitesse de coupe en rpm	Vitesse d'avance en mm/min	Grit	Trajectoire
valeur	1000	1250	400	Arc

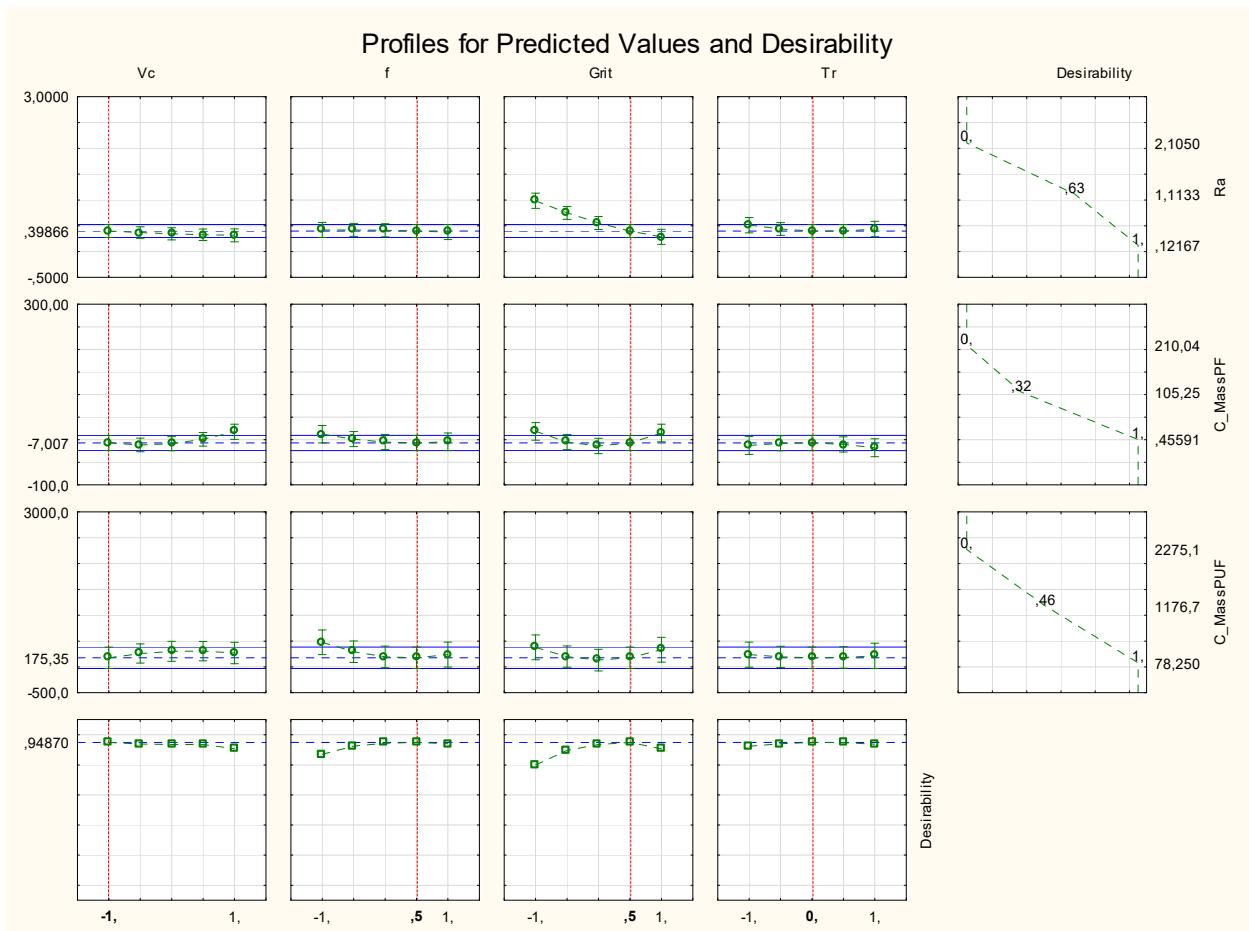


Figure 4-15: Courbes des désirabilités Ra, C_MassPF et C_MassPUF

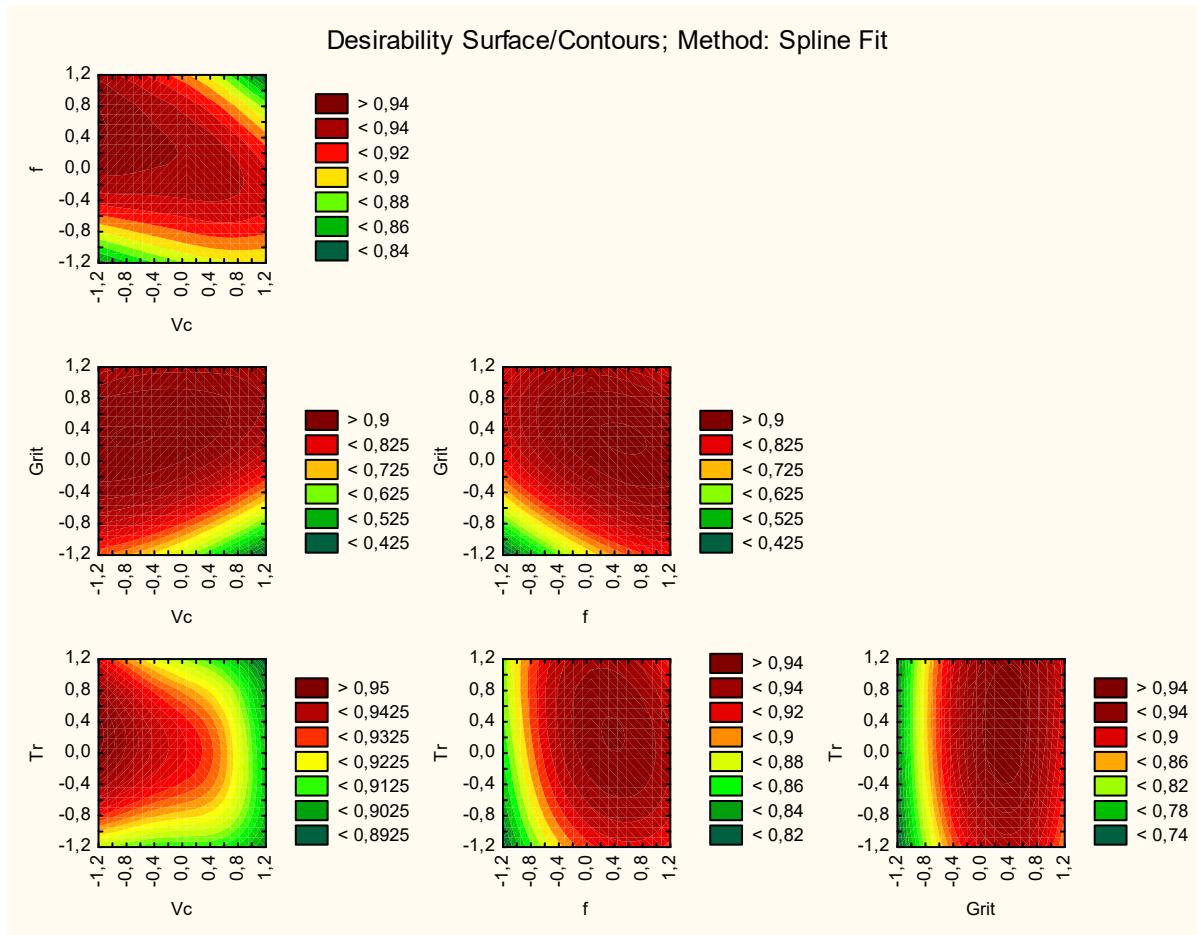


Figure 4-16: Courbes de surface et contours de la concentration totale en masse

➤ Les concentrations totales en surfaces spécifiques des particules fines

La figure 4-17 montre la désirabilité globale des variables de la rugosité arithmétique, des concentrations totales en surface spécifique des particules fines et ultrafines. Elle permet d'obtenir les conditions optimales qui permettront de réduire les émissions de particules tout en garantissant un bon état de surface. Combiné à la figure 4-18 qui montre les surfaces et contours de la désirabilité, le tableau 4-10 ressort les valeurs des facteurs résultant de l'optimisation.

Tableau 4-10: Valeurs des facteurs optimisés pour la concentration en surface spécifique

Facteurs	Vitesse de coupe en rpm	Vitesse d'avance en mm/min	Grit	Trajectoire
valeur	1000	1250	800	Arc

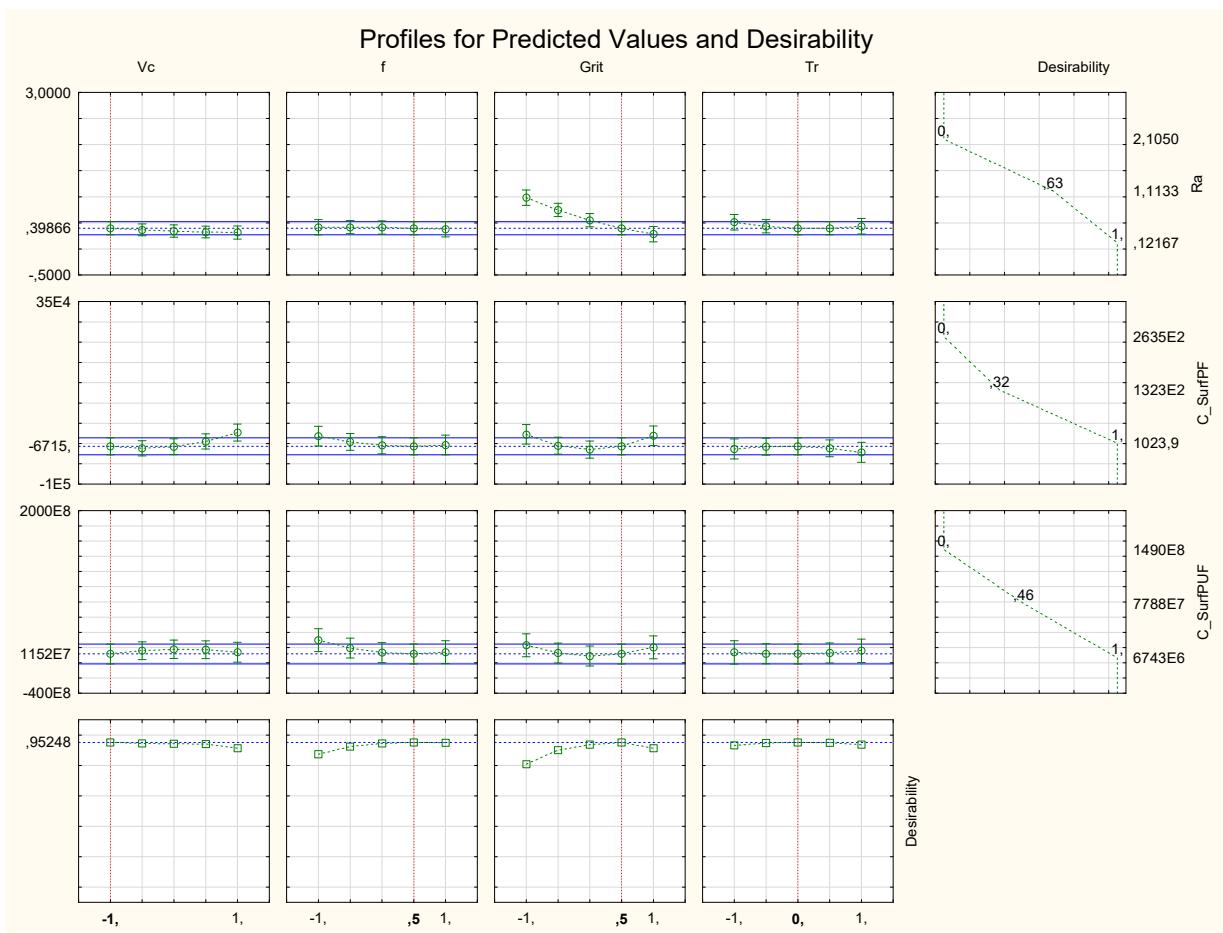


Figure 4-17:Courbes des désirabilités Ra, C_SurfPF et C_SurfPUF

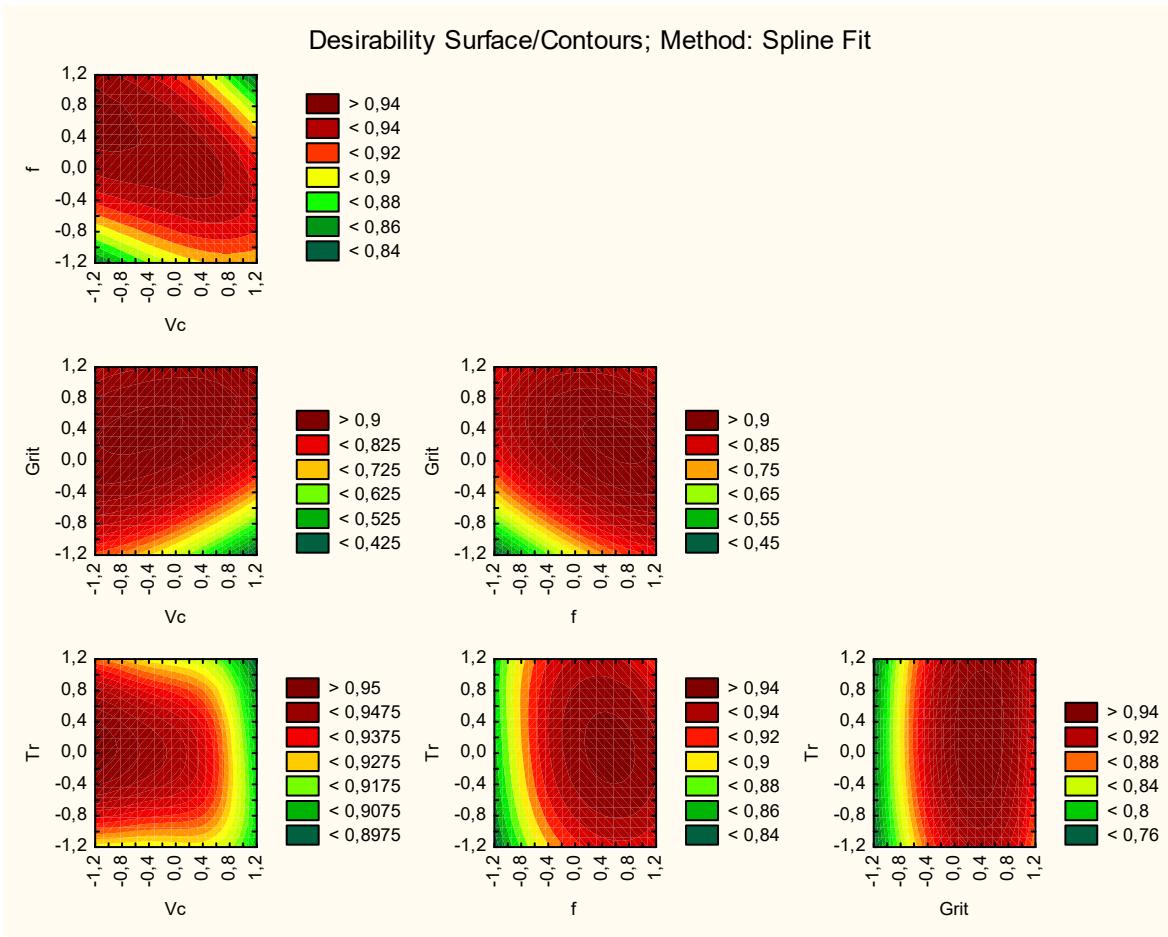


Figure 4-18: Courbes de surface et contours de la concentration totale en surface spécifique

4.3 Conclusion

Parvenu au terme de chapitre où il était question d'étudier les effets combinés des paramètres de coupe et de la trajectoire de l'outil sur les émissions de particules et le fini de surface, il a été constaté que la trajectoire influence de façon significative les particules fines et la concentration en nombre des particules ultrafines. L'augmentation des vitesses de coupe choisies semblent n'avoir pas grand effet sur le fini de surface. L'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la concentration en nombre de particules fines tandis que l'augmentation de la vitesse d'avance n'a pas de grand effet sur la concentration en nombre ainsi que les différentes trajectoires. L'augmentation de la taille des grains réduit l'émission

des particules fines. La réduction de la taille des grains et l'augmentation de la vitesse d'avance conduisent à une amélioration du fini de surface tandis que. L'augmentation de l'avance réduit les émissions de particules ultrafines; par contre, la réduction de la taille des grains augmentent les émissions de particules. La trajectoire en arc est celle qui conduit à un meilleur état de surface et une moindre émission de particules. L'optimisation des paramètres a permis d'obtenir des résultats différents en fonction des concentrations étudiées ici à savoir la concentration en nombre (trajectoire en arc, vitesse de coupe 2500 rpm, vitesse d'avance 750 mm/min, G800), en masse (trajectoire en arc, vitesse de coupe 1000 rpm, vitesse d'avance 1250 mm/min, G400), et en surface spécifique (trajectoire en arc, vitesse de coupe 1000 rpm, vitesse d'avance 1250 mm/min, G800).

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 INTRODUCTION

Les particules émises lors du polissage sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la vitesse de coupe, l'avance, la taille de grains et la trajectoire de l'outil. Ces facteurs influences différemment suivant les phases d'ébauche et finition pendant le polissage, ce qui entraîne une augmentation ou une réduction selon le cas des particules émises. Le comportement des particules fines diffère de ceux des particules ultrafines, ce qui impose une analyse séparée de ces particules. Le fini de surface, principal objectif visé par les industriels lorsqu'ils font recours au polissage, se voit influencer par les paramètres d'usinage, mais aussi au travers de la trajectoire de l'outil. Tout au long de ce chapitre, nous discuterons des différents résultats des émissions de particules et du fini de surface obtenus lors du polissage de granit blanc à sec pendant l'ébauche et la finition.

5.2 Émissions de particules

Lors des expériences sur le granit, deux types de particules sont enregistrés, à savoir les particules fines et les particules ultrafines.

5.2.1 Particules fines

La figure 4-5 permet de voir que l'augmentation de la vitesse de coupe fait augmenter la concentration en nombre de particules fines (graphe 4-5a)) ce qui est en accord avec l'étude de Saidi et al.(2015). L'augmentation de la vitesse de rotation favorise l'élimination de la matière, ce qui entraîne la génération de plus de particules. La vitesse de coupe est le second paramètre le plus influent dans la génération des particules fines après la taille des grains. L'augmentation de la taille des grains réduit ainsi l'émission des particules fines (graphe 4-5c)) dû à la réduction de la surface de contact avec les grains abrasifs (M. Saidi et al., 2015). Le pic des particules

fines est observé suivant la taille de grains, pour le grit 100 il se situe autour de 1,1 µm, entre 0,533-0,673 µm pour le grit 400 et entre 0,583 et 0,777 µm pour le grit 800. La variation de pic dans les courbes des particules fines est due aux autres paramètres de coupes. Le pic observé pour le grit 800 est similaire au résultat obtenu par Saïdi (2018). Le coefficient de détermination est assez bon et varie entre 88% et 89%, néanmoins assez faible comparativement au résultat Saïdi (2018) qui variait entre 86% et 98%, ceci étant dû à la différence des paramètres pris en compte pendant l'étude.

5.2.2 Particules ultrafines

L'étude statistique faite au chapitre 4 montre que les facteurs significatifs sont la taille des grains, la vitesse d'avance et la trajectoire, excluant ainsi la vitesse de coupe comme facteur significatif. La vitesse d'avance réduit la concentration en nombres de particules fines (figure 4-10b) dus à l'augmentation du phénomène de dilution des particules, ce qui est en accord avec l'étude faite par (Songmene, 2018). La réduction de la concentration en nombre (figure 4-10c) entre le grit 100 et le grit 400 est dû au polissage fragile (grit 100) ou le matériau se s'arrache brutalement comparativement au polissage ductile (grit 400) ce qui est en accord avec l'étude faite par (M. Saidi et al., 2015). Le pic des particules ultrafines se situe autour de 3,22 nm et 3,72nm ce qui est de loin inférieur à l'intervalle de 14,1 nm à 82 nm trouvé par Saïdi (2018). Ces graphiques confirment la présence des particules PM2,5 qui sont nocives pour la santé. Le coefficient de détermination est faible, car varie entre 32% et 34%, ceci peut être due au choix des paramètres indépendants de l'étude.

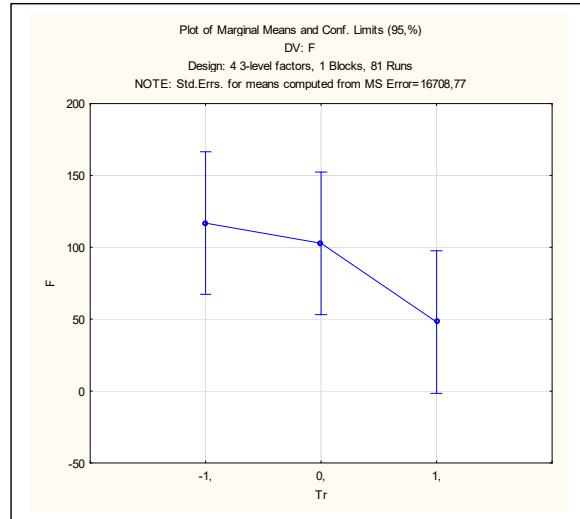


Figure 5-1: Influence de la trajectoire sur les forces

5.3 Fini de surface

La trajectoire en arc ($0,194\mu\text{m}$) conduit à un meilleur fini de surface suivi de près par la trajectoire spirale ($0,201\mu\text{m}$) et enfin la trajectoire rectiligne ($0,301\mu\text{m}$). Ceci est lié au nombre de passage par points de la surface de la pièce qu'offrent les trajectoires spirale et arc. Nous obtenons bien un fini de surface appartenant à l'intervalle de variation du fini de surface du polissage mécanique (tableau 1-4). Le fini de surface est influencé significativement par la taille des grains, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance. L'augmentation de la taille des grains, de la vitesse de coupe et d'avance améliore le fini de surface ce qui est en accord avec l'étude faite par Songmene (2018). Les modèles de prédictions choisis ont un coefficient de détermination variant entre 75% et 85%.

5.4 Situation de la concentration massique des particules par rapport à la VEMP

La connaissance de la valeur de la concentration moyenne pondérée sur une période de 8h/jour et sur une semaine de 40h de travail nous permettra de la comparer à la VEMP des particules de quartz. La détermination de la cette concentration est faite ici en choisissant les conditions des paramètres qui donnent lieu à la concentration totale (Vinches, 2019) minimale en sommant les concentrations totales obtenues durant l'ébauche au grit 100 et la finition aux grit 400 et 800. Le calcul se fait grâce à l'équation 5-1 pour déterminer les concentrations suivant chaque trajectoire.

$$C_{mp} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (5-1)$$

Avec

C_{mp} = Concentration moyenne pondérée ;

C_i = Concentration mesurée à la période i ;

T_i = Durée d'échantillonnage de la période i.

La figure 5-2 montre les différentes concentrations totales massiques obtenues suivant les trajectoires rectilignes, arc et spirale à vitesse de coupe égale à 1000 rpm et la vitesse d'avance valant 1000 mm/min. La concentration massique des particules fines ainsi obtenues est largement supérieure à la VEMP (de plus de 20 fois) ainsi qu'à la limite d'excursion qui est de 5 fois la VEMP. Il est à noter que ce résultat est obtenu sans processus d'aspiration d'air. La concentration massique des particules ultrafines est supérieure à la VEMP, mais inférieure à la limite d'excursion. Ce résultat est similaire à celui trouvé par Saidi(2018), et rappelle la nécessité de la mise en place des techniques de réductions de l'émission des particules. La combinaison optimale de la trajectoire et des paramètres de coupe tels la vitesse de coupe, l'avance et la taille de grit permettent certes de réduire les émissions de particules, mais ne permettent pas de ramener la concentration de particules en dessous de la VEMP.

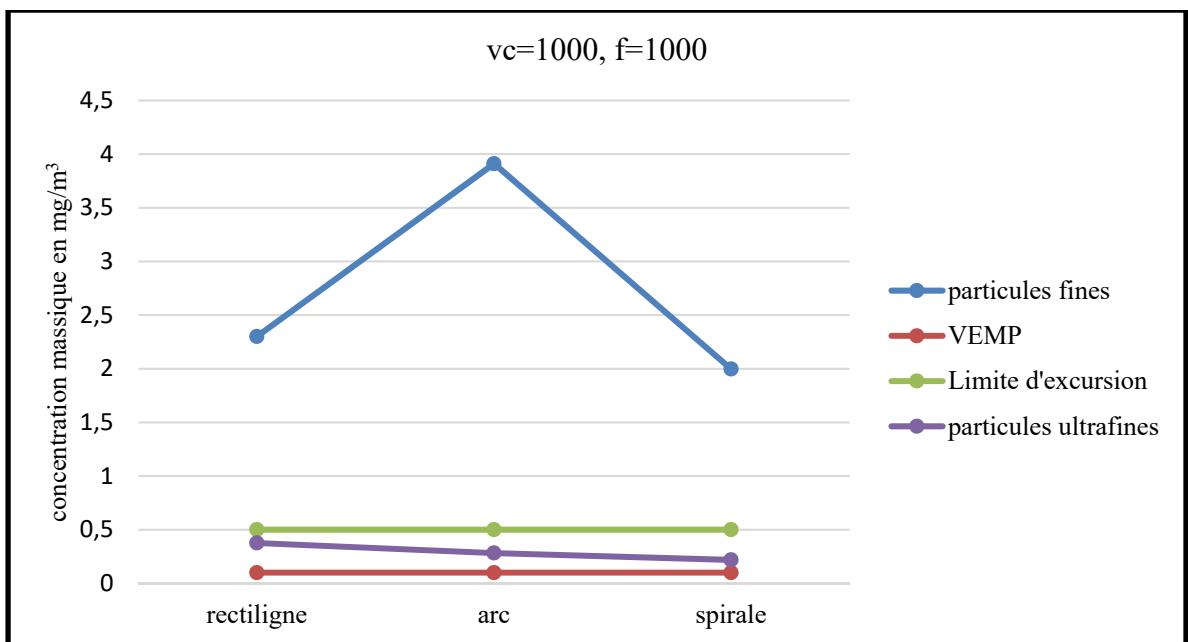


Figure 5-2: Courbes des concentrations massiques en fonction des trajectoires

5.5 Conclusion

Les trajectoires de l'outil influencent les émissions de particules, mais aussi le fini de surface. La bonne combinaison des paramètres de coupe et des trajectoires peut réduire de façon significative les émissions de particules, mais celle-ci n'est malheureusement pas suffisante pour ramener la concentration en masse à une valeur inférieure à celle de la VEMP. La trajectoire en arc est celle qui permet d'obtenir un bon état de surface tout en permettant de réduire les émissions de particules.

CONCLUSION

Le polissage est l'un des procédés de finition les plus utilisés en usinage lorsque les pièces à usiner nécessitent un bon fini de surface. Lors du polissage du granit contenant du quartz, les particules émises causent des dommages à la santé des travailleurs en cas d'exposition prolongée. La recherche des moyens de réduction à la source a conduit à l'étude de l'influence de la trajectoire de l'outil dans les émissions des particules fines et ultrafines lors du polissage à sec du granit blanc. De ce fait, la revue de la littérature dans un premier temps a permis de déterminer les paramètres pouvant influencer les émissions des particules et le fini de surface les plus pertinents, de ressortir les conditions défavorables d'expositions des travailleurs ainsi que les conditions expérimentales pour la réalisation du polissage industriel. L'étude du polissage du granit blanc à sec a permis de ressortir :

- Lors de l'ébauche au grit 100, la trajectoire en arc produit plus de particules fines avec un pic autour de $1700\#/cm^3$ suivi de la trajectoire spirale avec un pic autour de $1300\#/cm^3$ et la trajectoire rectiligne dont le pic se situe autour de $116\#/cm^3$ le tout correspondant à un diamètre aérodynamique de $1,382 \mu\text{m}$ (avec un pic pour la concentration en nombre de $50\#/cm^3$ pour un diamètre de $1,2 \mu\text{m}$);
- La trajectoire spirale produit le plus grand nombre de particules ultrafines avec un max atteignant 3×10^8 particules / cm^3 correspondant aux particules de diamètre d'environ 3 nm. La trajectoire en rectiligne atteint son max à 5×10^7 particules / cm^3 correspondant aux particules de diamètre aérodynamiques d'environ 3 nm , tandis que la trajectoire en arc a son max à $1,5 \times 10^7$ particules / cm^3 correspondant aux particules de diamètre aérodynamiques d'environ 3 nm. La trajectoire spirale émet beaucoup plus de particules ultrafines que les trajectoires rectilignes et en arc ;
- La plupart des particules fines émises ont un diamètre aérodynamique inférieure à $2,5 \mu\text{m}$ avec un maximum situé entre 1 et 2 μm comme relevé par (M. Saidi et al., 2015)
- Lors de l'ébauche, la plus grande proportion de silice est observée sur la trajectoire spirale (30,8%) tandis que la trajectoire rectiligne produisait la plus faible valeur (19,9%) ;

- La trajectoire en arc est celle qui permet d'avoir un résultat optimal du point de vue réduction de l'émission des particules et du bon fini de surface pendant tout le protocole de polissage (ébauche et finition). Celle-ci correspondant à une vitesse d'avance de 750 mm/min, une vitesse de coupe de 2500 rpm et le grit 800 pour la concentration totale en nombre de particules ;
- Les concentrations des particules fines sont largement au-dessus de la VEMP et de la valeur d'excursion et ceux qu'importent les trajectoires utilisées ici.

Ainsi, la combinaison optimale des paramètres de coupe (vitesse d'avance, vitesse de coupe et taille des grains) et des trajectoires (rectiligne, arc et spirale), permettront de réduire les émissions de poussière, mais ne permettra pas de ramener la concentration des poussières à une valeur inférieure à celle de la VEMP. Les modèles de prédiction des particules ultrafines sont très peu fiables (moins de 40%). Les modèles de prédiction n'ont pas pu être validés lors de nos expérimentations.

RECOMMANDATIONS

L'étude menée jusqu'ici donne lieu à des orientations à approfondir :

- Le polissage du granit s'étant déroulé dans un environnement sec et avec un outil sans ressort, il serait judicieux d'analyser l'influence de la lubrification et de l'outil sur les émissions de particules tout en préservant les paramètres ;
- Les essais de validation des solutions optimales proposées ;
- Le polissage de granit à sec avec de grandes vitesses de coupe fait apparaître des traces de brûlures sur la surface de la pièce tel qu'illustré dans la figure suivante. Ce constat avait été fait par M. N. Saidi, Songmene, Kouam, & Bahloul (2019). La lubrification serait un choix judicieux pour palier cela et ainsi préserver l'intégrité de la surface de la pièce et de l'outil

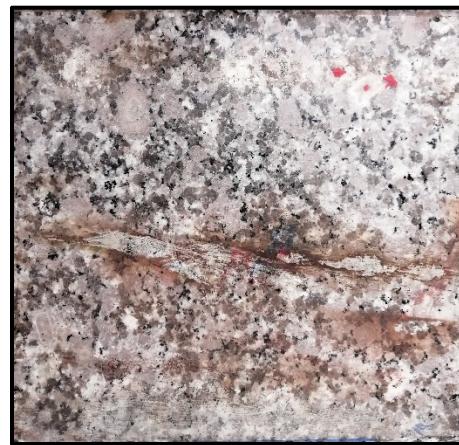


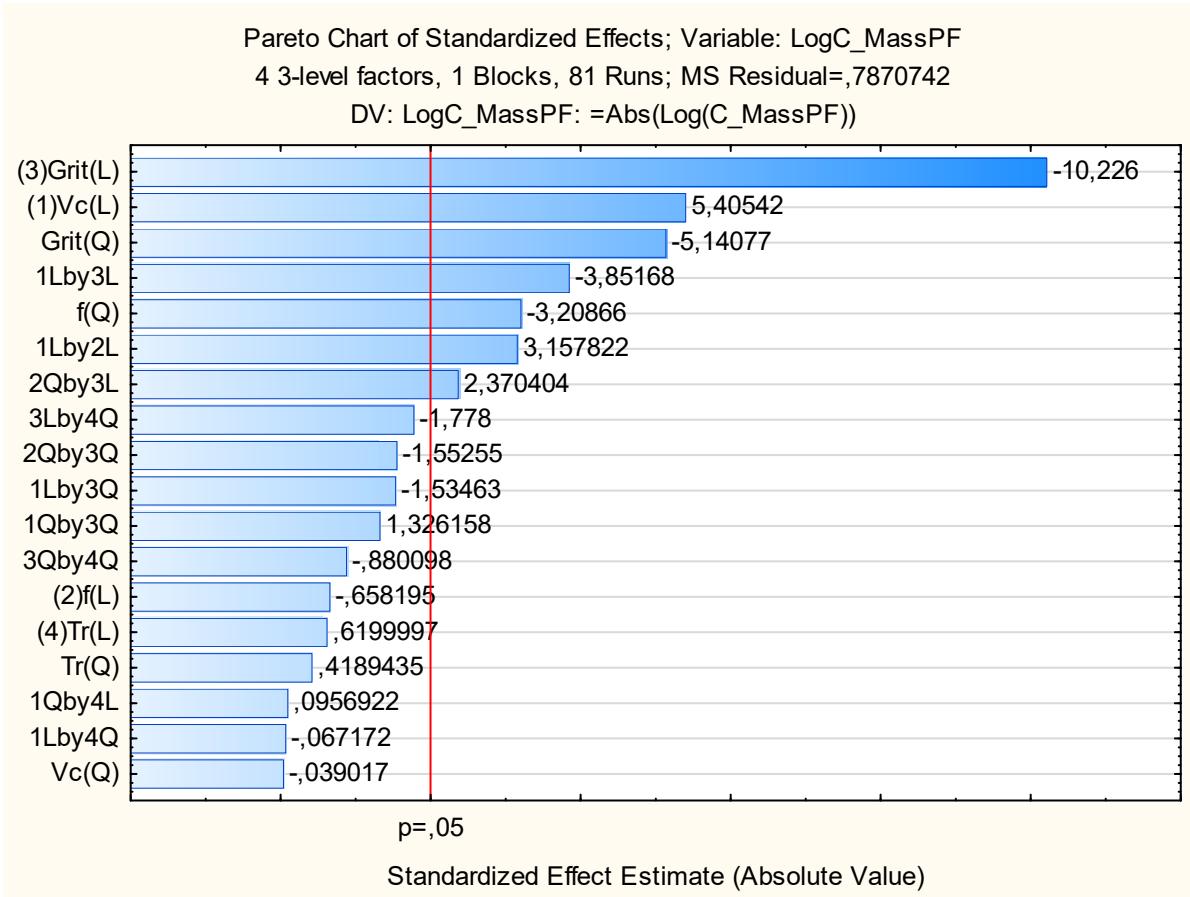
Figure : Brûlure observée à la surface
du granit blanc

- La mise en place des mesures de captation des particules étant parfois coûteuse pour les industriels, l'étude de l'influence de la ventilation locale ou globale combinée aux trajectoires d'outils pourrait améliorer l'efficacité ou donner suite à la conception de nouveaux moyens de captations des particules.

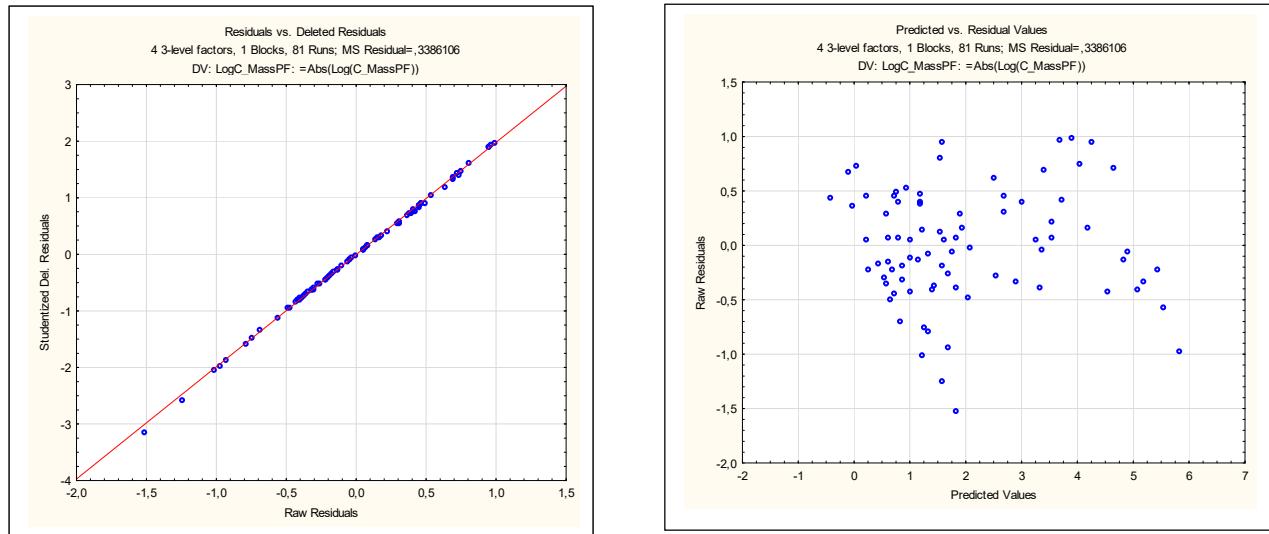
ANNEXE I

ANALYSE DE LA CONCENTRATION MOYENNE EN MASSE DES PF

➤ Diagramme de Pareto

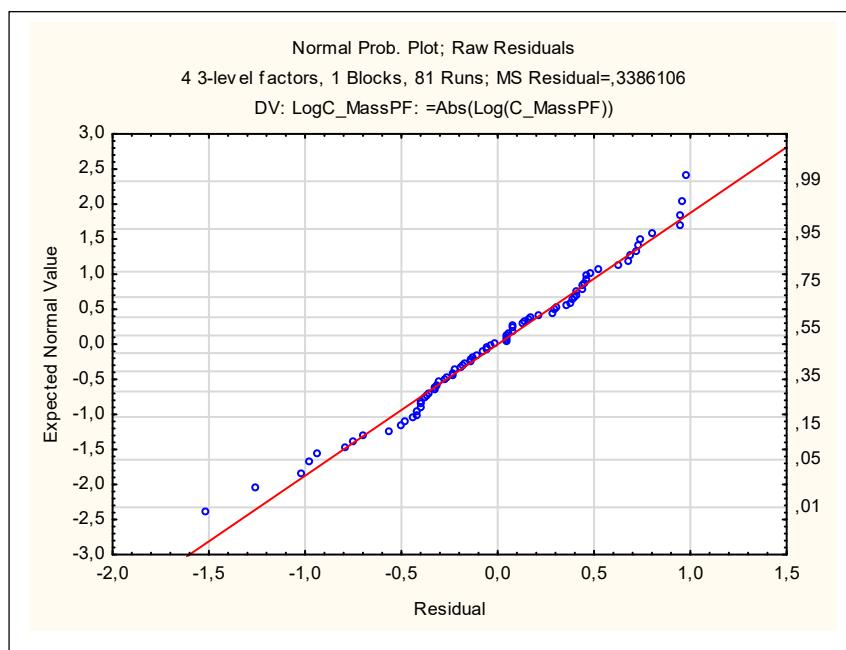


➤ GRAPHIQUE DES RÉSIDUS



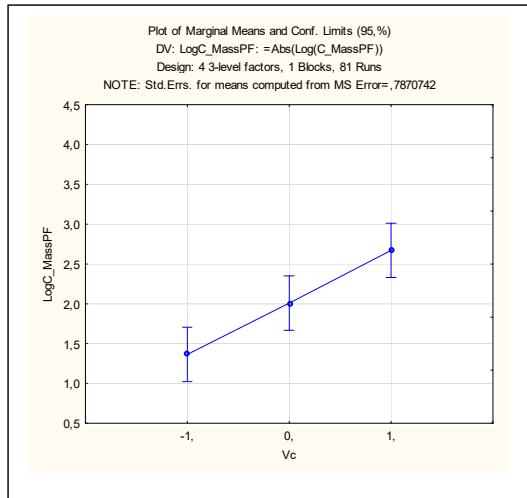
Graphe des résidus prédicts vs résidus observés

Graphe des valeurs prédictes vs normales prédictes

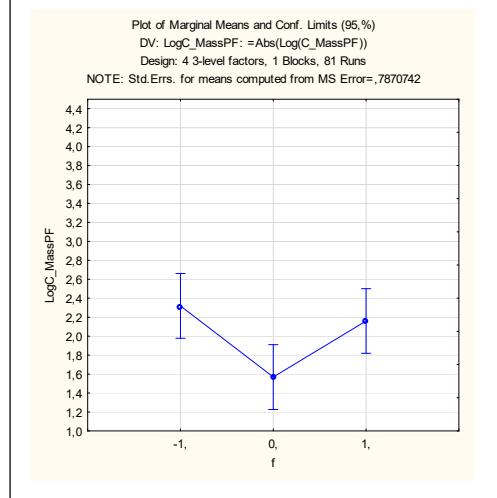


Graphe des résidus vs valeurs normales prédictes

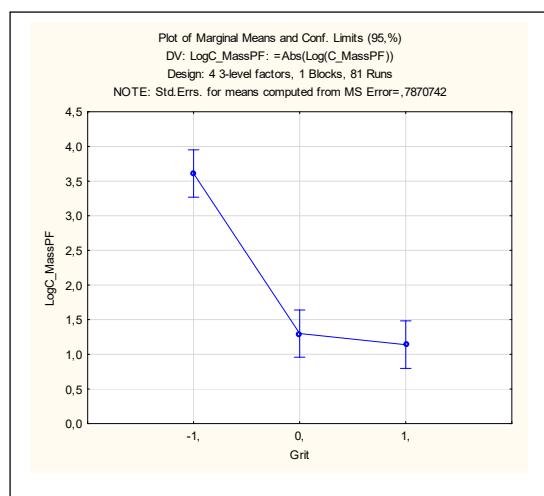
- Influence des facteurs principaux sur LogC_MassPF : a) Vitesse de coupe, b) vitesse d'avance, c) taille du grit, d) trajectoire



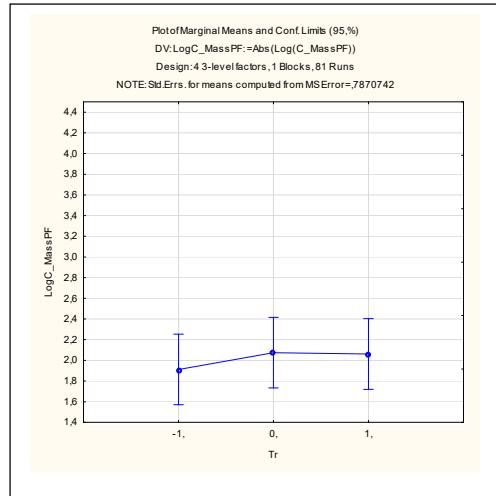
a)



b)

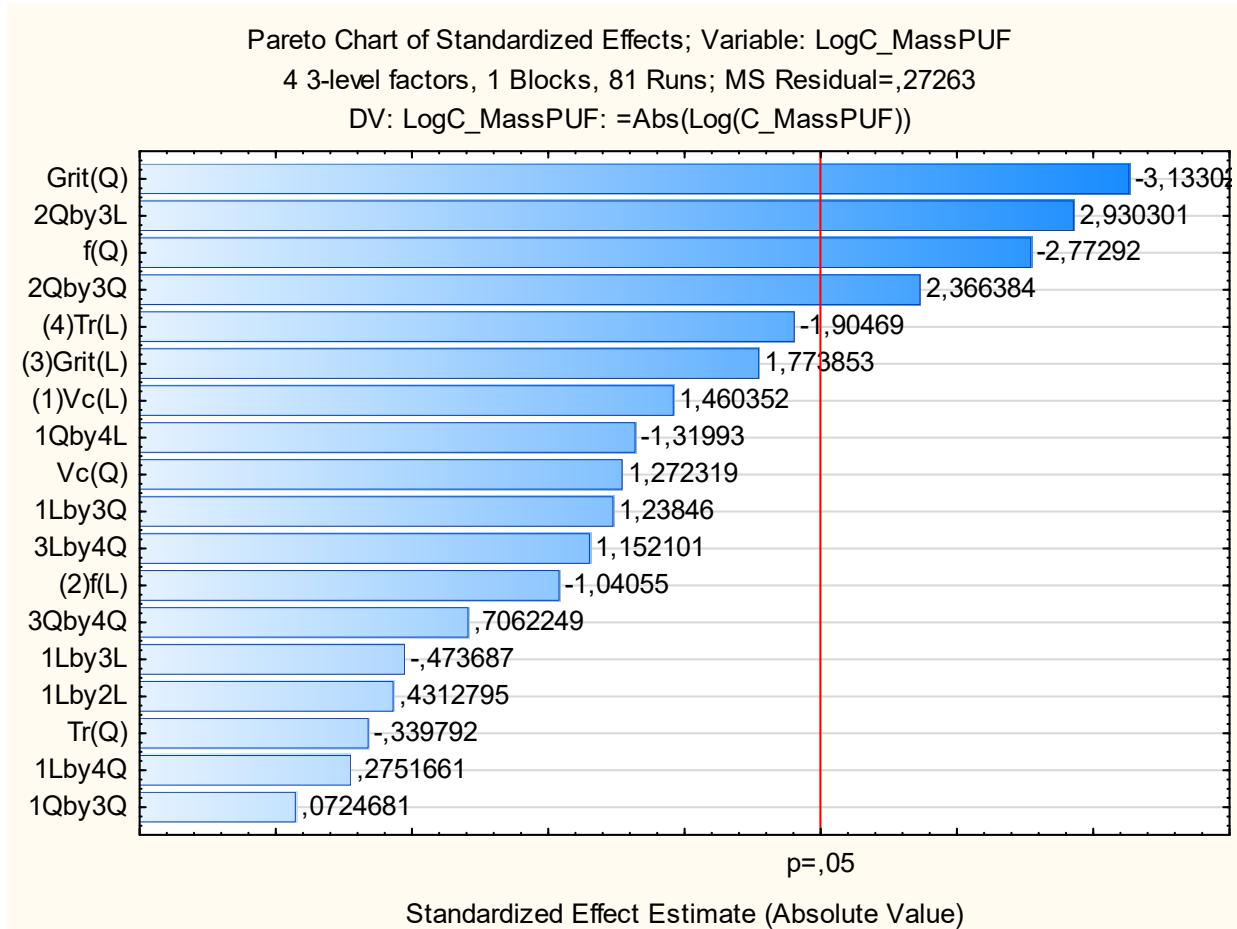


c)

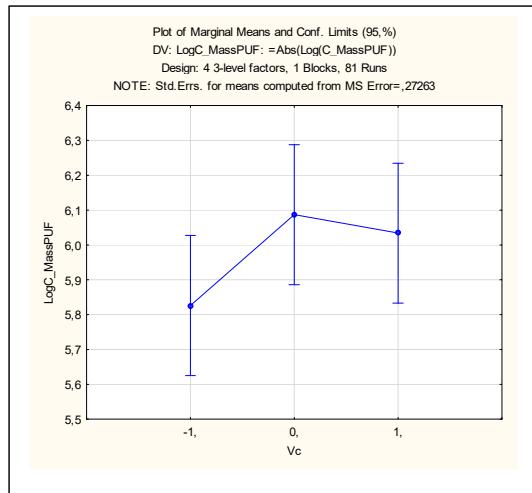


d)

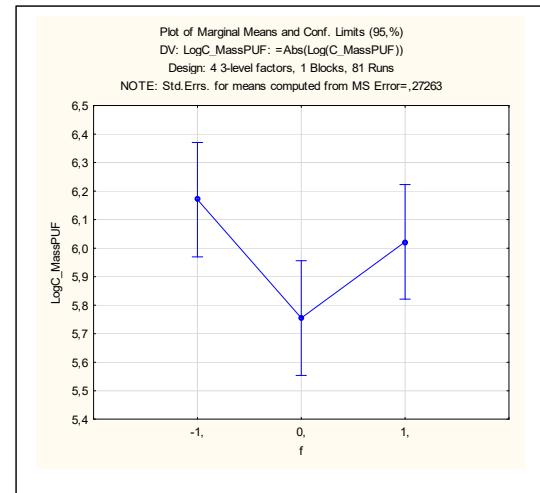
➤ Diagramme Pareto de la masse des particules ultrafines



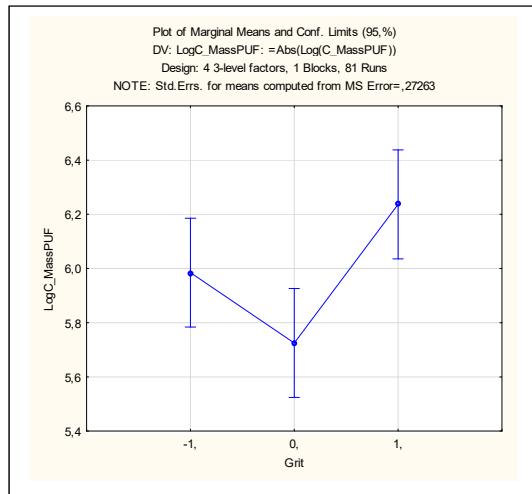
- Influence des facteurs principaux sur la concentration en masse des particules ultrafines a) Vitesse de coupe, b) vitesse d'avance, c) taille du grit, d) trajectoire



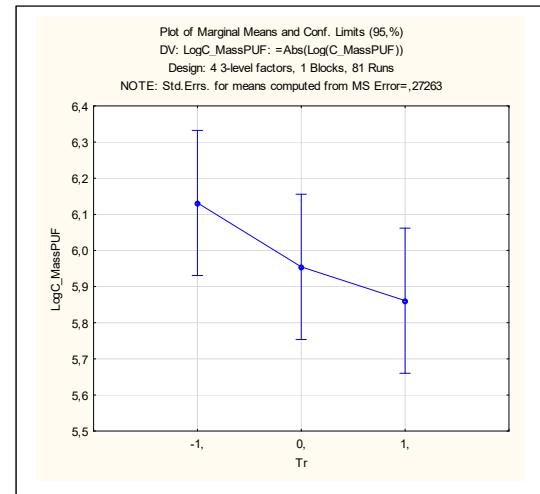
a)



b)

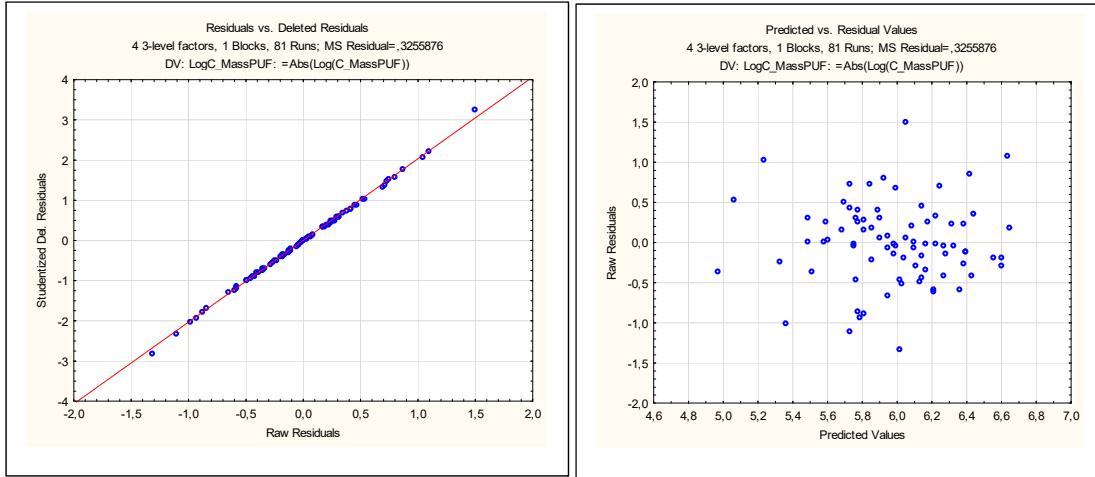


c)



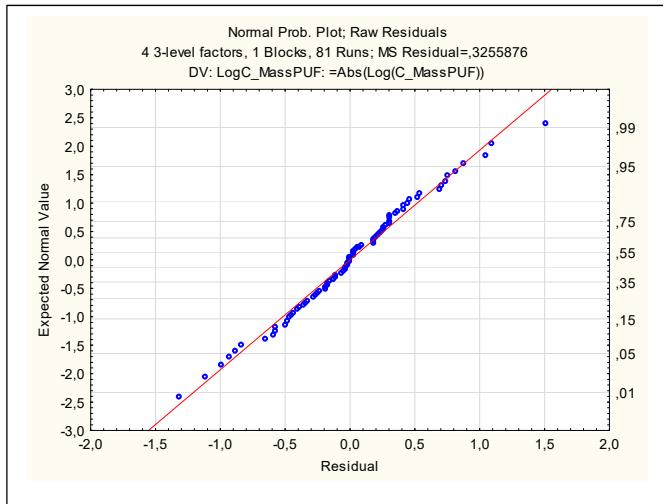
d)

➤ Analyse des résidus



Graphe des résidus prédictes vs résidus observés

Graphe des résidus prédictes vs résidus observés

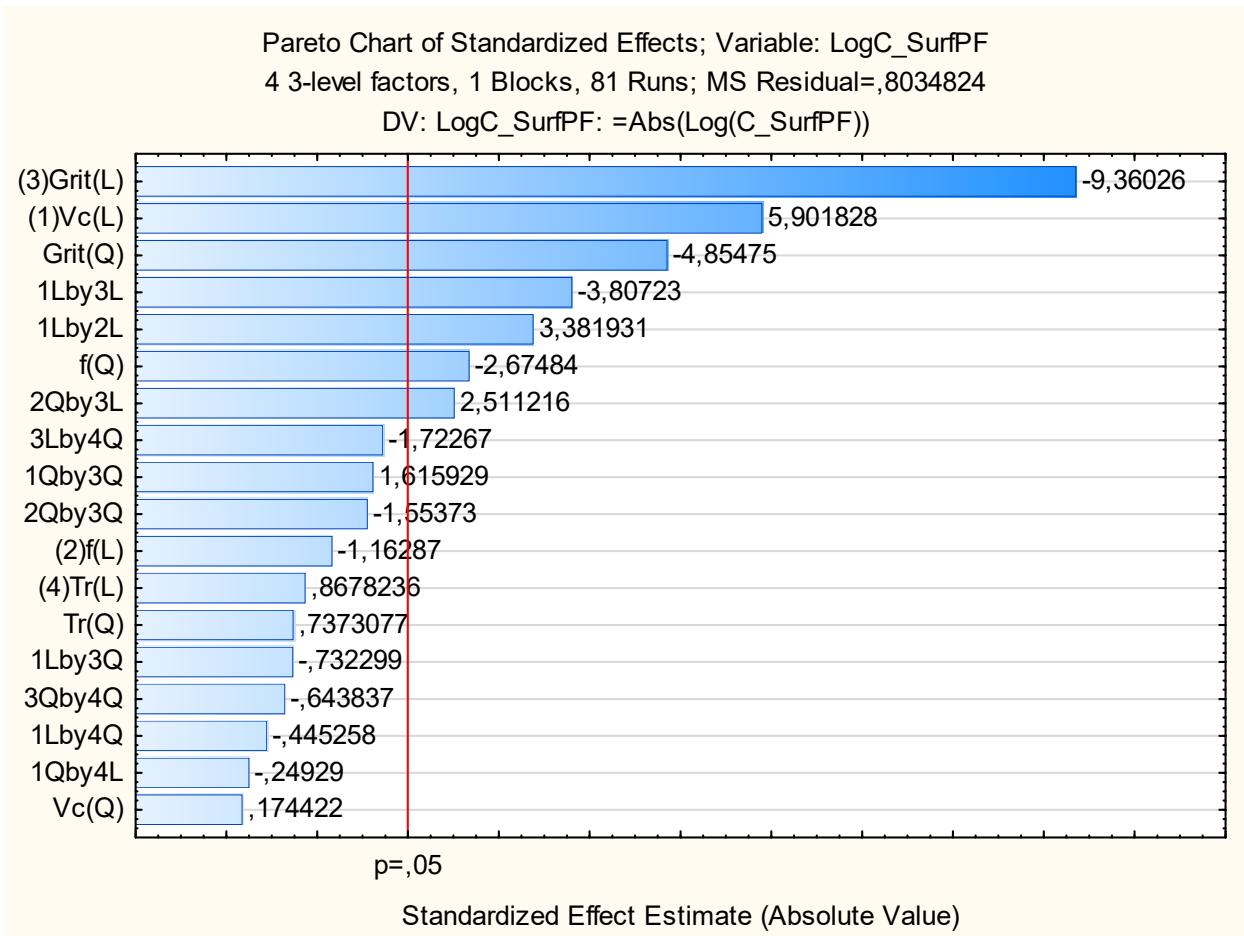


Graphe des résidus vs valeurs normales observées

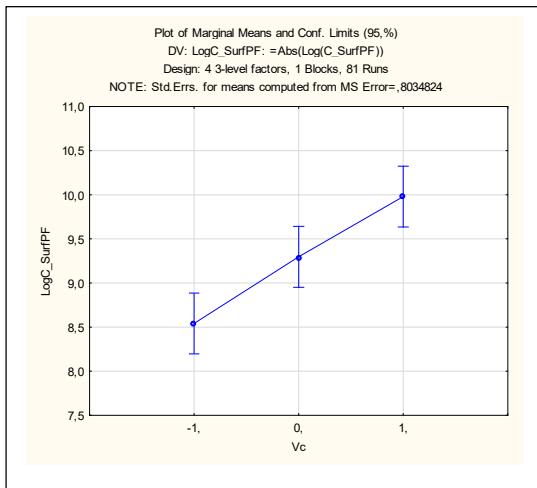
ANNEXE II

ANALYSE DE LA CONCENTRATION EN SURFACE SPÉCIFIQUE DES PARTICULES FINES

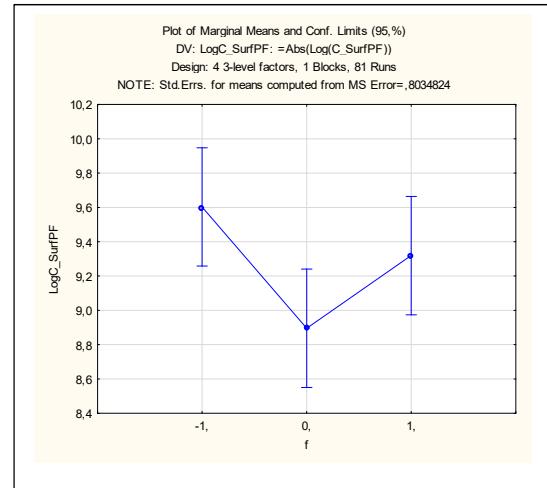
➤ Diagramme de Pareto



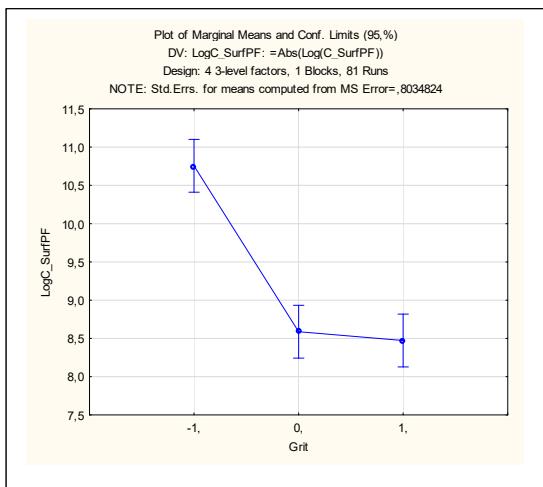
- Influence des facteurs principaux sur la concentration en surface spécifique des particules fines : a) Vitesse de coupe, b) vitesse d'avance, c) taille du grit, d) trajectoire



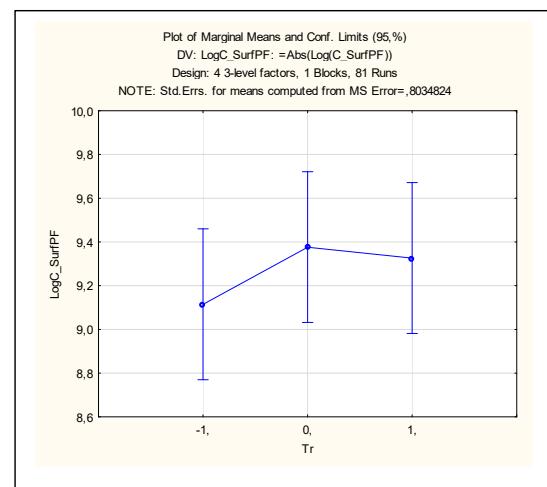
a)



b)

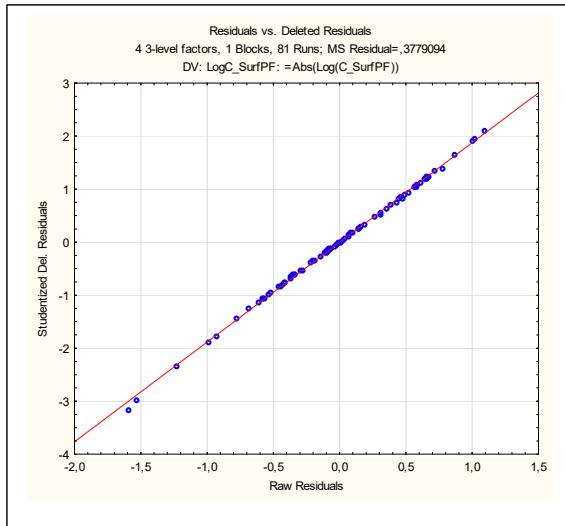


c)

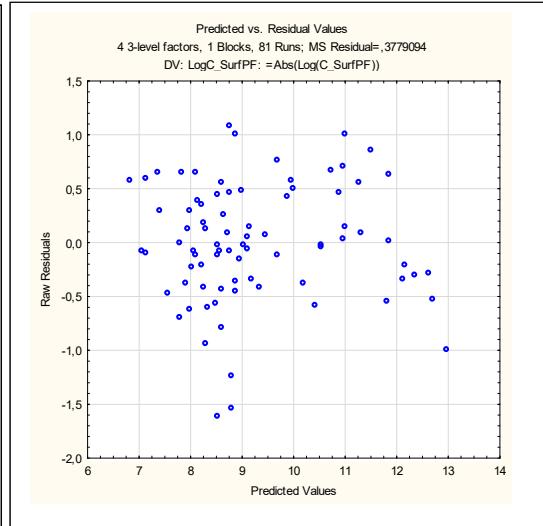


d)

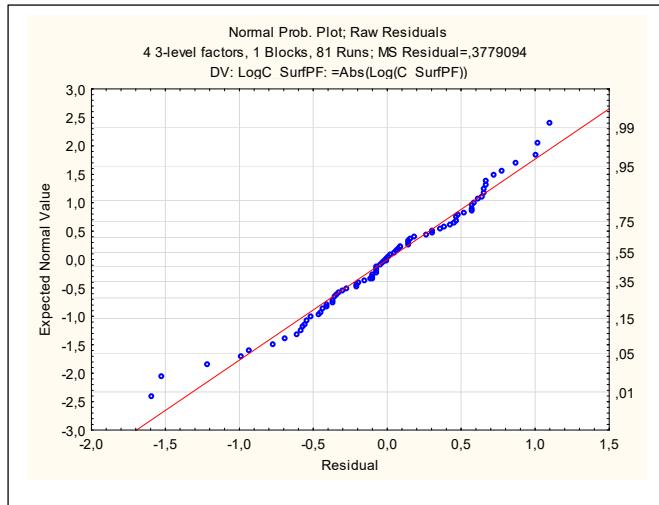
➤ Analyse des résidus



Graphe des résidus prédictes vs résidus observés



Graphe des résidus prédictes vs résidus prédictes

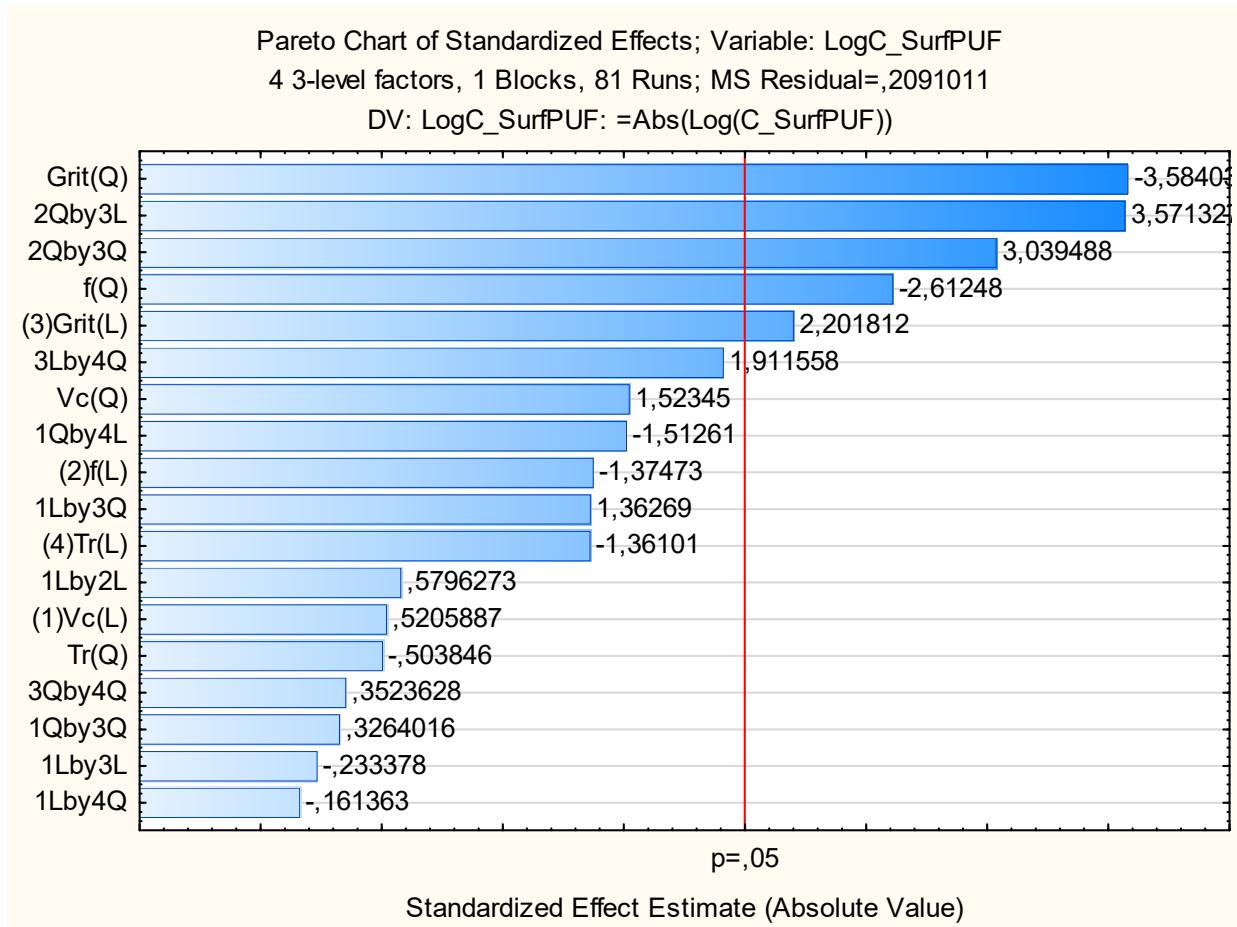


Graphe des résidus vs valeurs normales observées

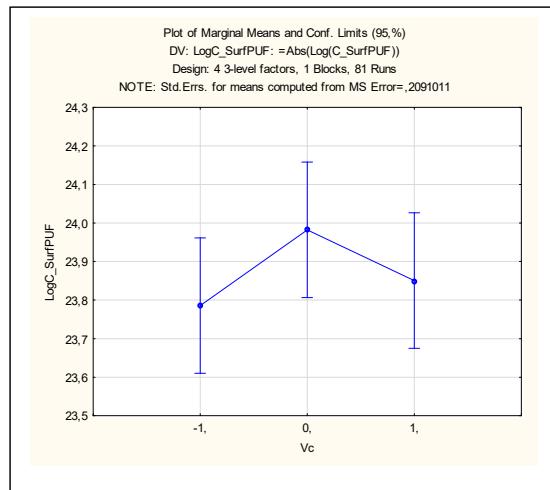
ANNEXE III

ANALYSE DE LA CONCENTRATION EN SURFACE SPÉCIFIQUE DES PARTICULES ULTRAFINES

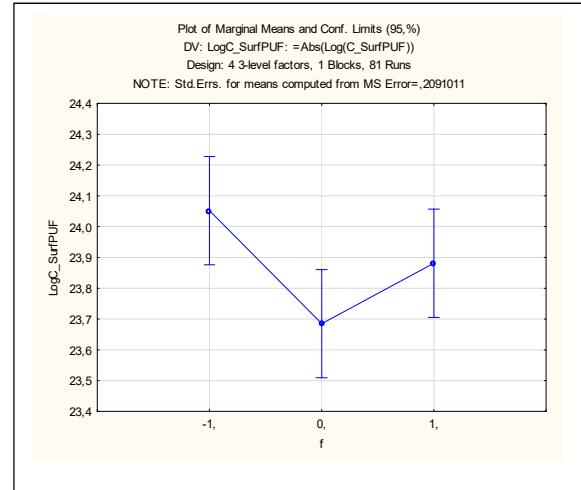
➤ Diagramme Pareto



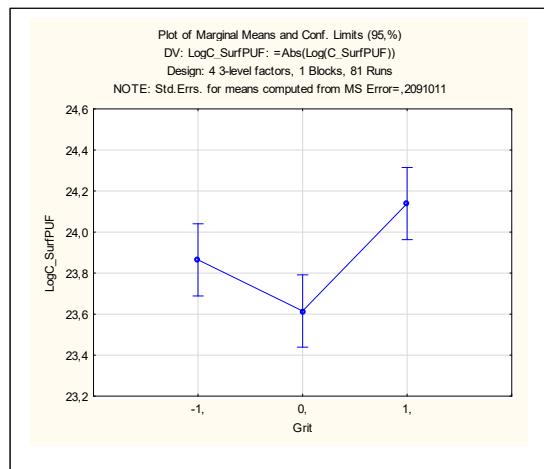
- Influence des facteurs principaux sur la concentration en surface spécifique des particules ultrafines : a) Vitesse de coupe, b) vitesse d'avance, c) taille des grains, d) trajectoire



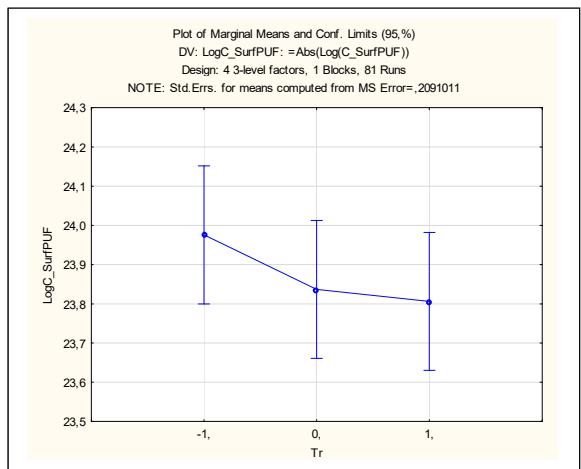
a)



b)

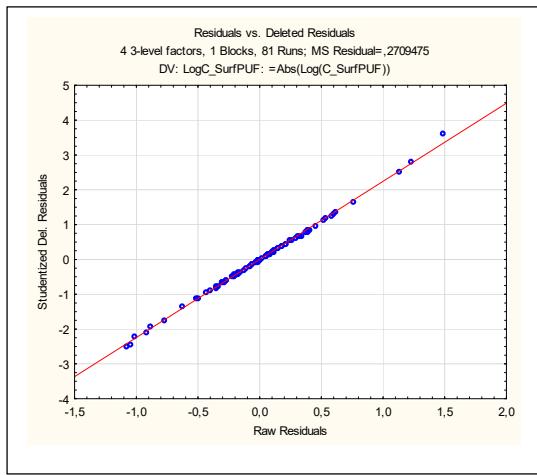


c)

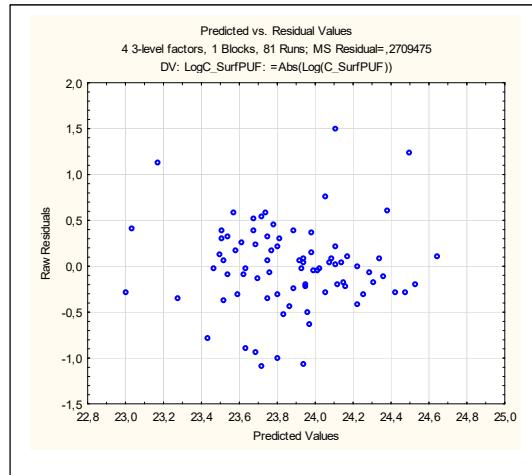


d)

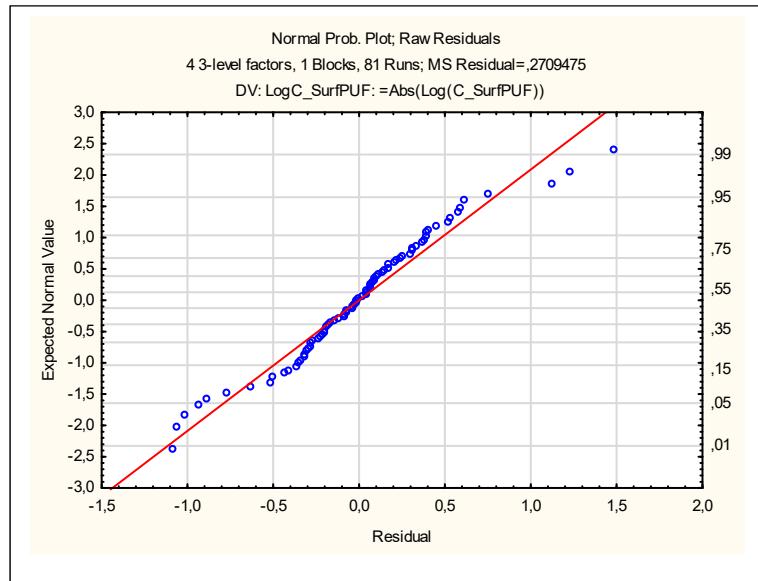
➤ Analyse des résidus



Graphe des résidus prédictes vs
résidus observés



Graphe des résidus prédictes vs
résidus observés

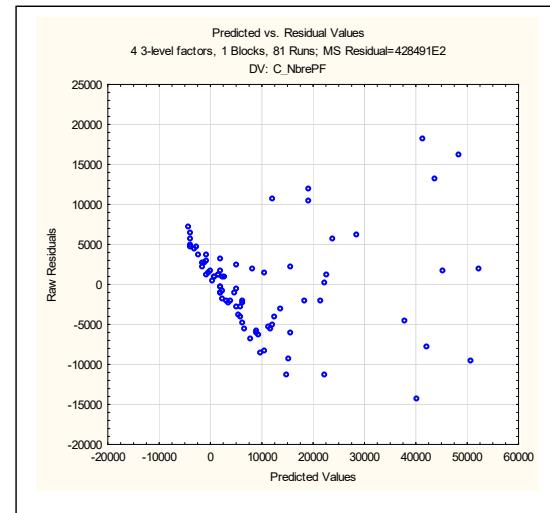
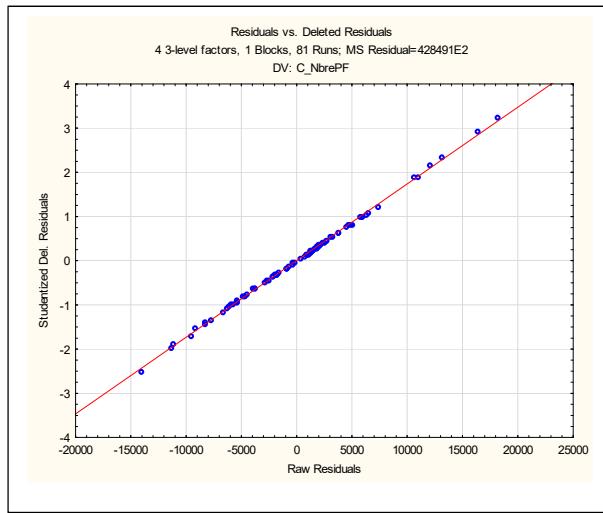


Graphe des résidus vs valeurs normales observées

ANNEXE IV

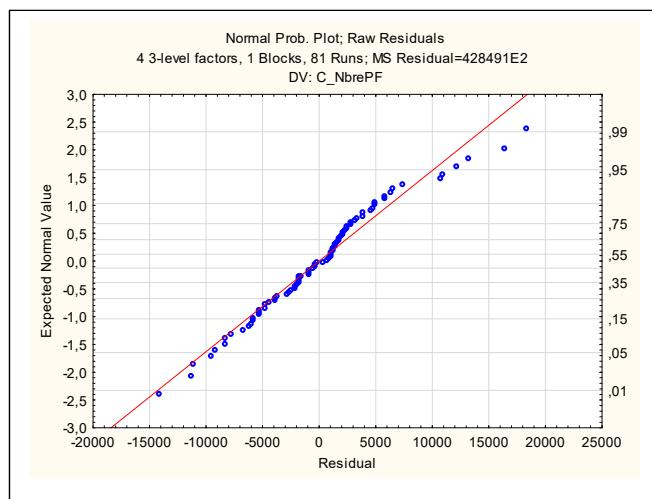
ANALYSE DES RÉSIDUS DE LA CONCENTRATION EN NOMBRE DES PARTICULES FINES ET ULTRAFINES

➤ Particules fines



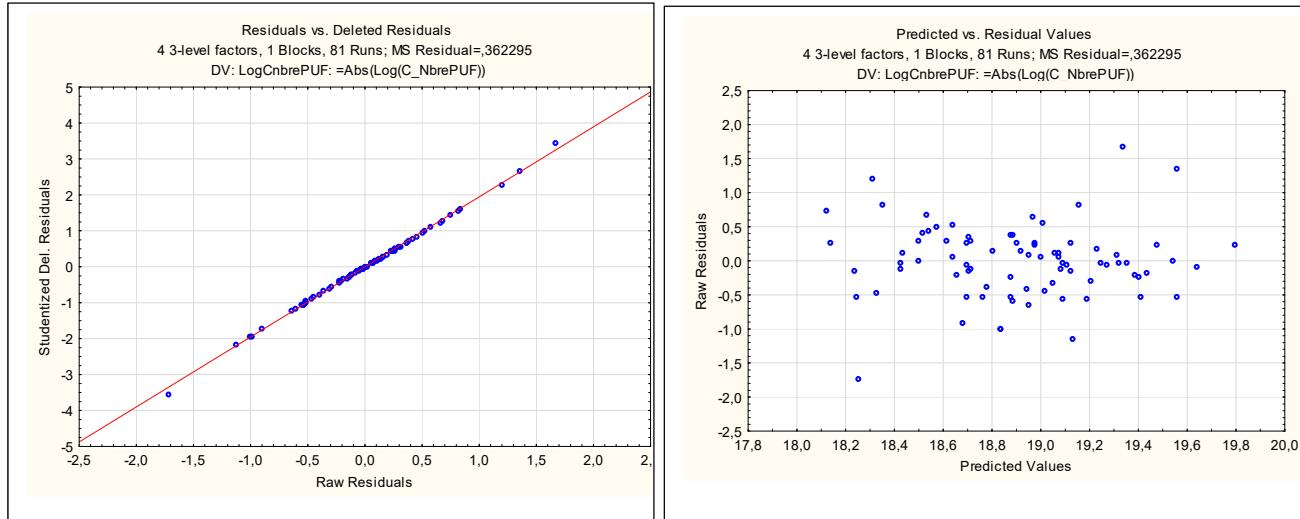
Graphe des résidus prédictes vs résidus observés

Graphe des résidus prédictes vs résidus observés



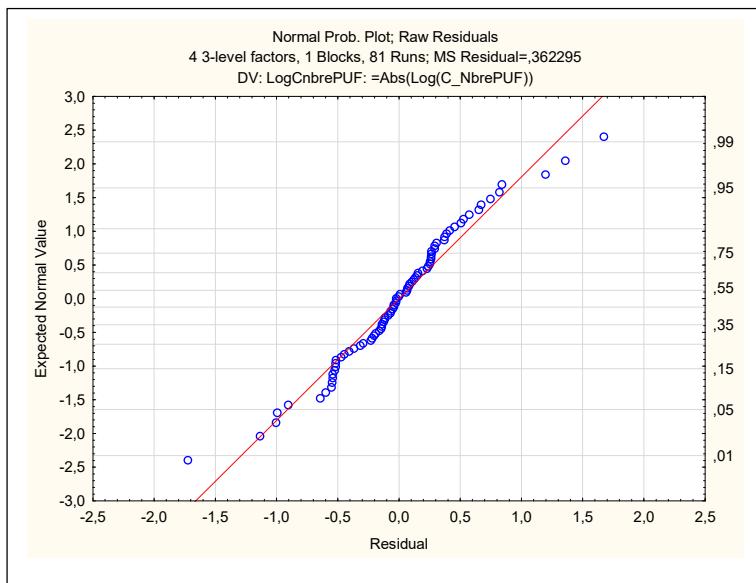
Graphe des résidus vs valeurs normales observées

➤ Particules ultrafines



Graphe des résidus prédictes vs
résidus observés

Graphe des résidus prédictes vs résidus
observés

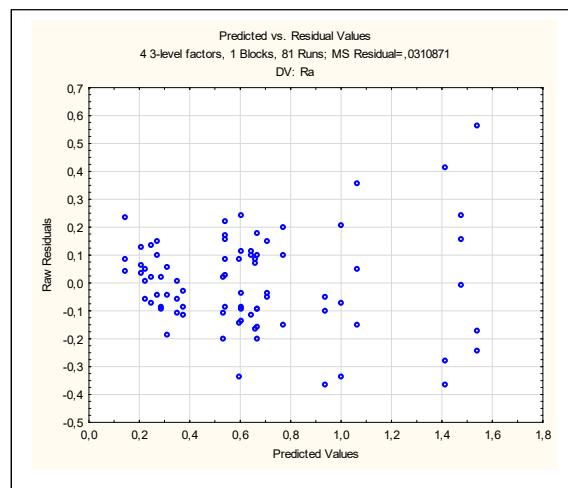
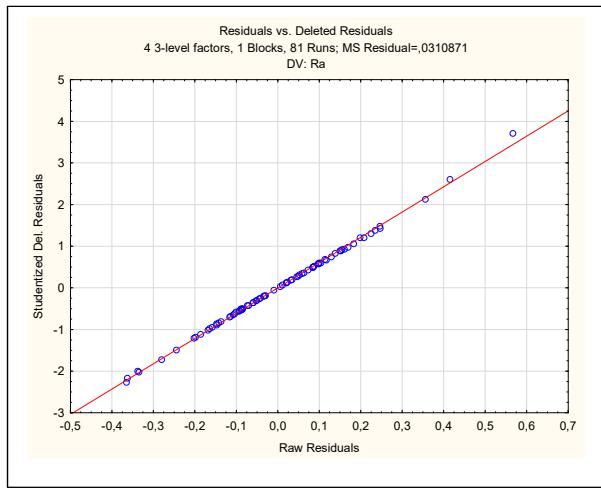


Graphe des résidus vs valeurs normales observées

ANNEXE V

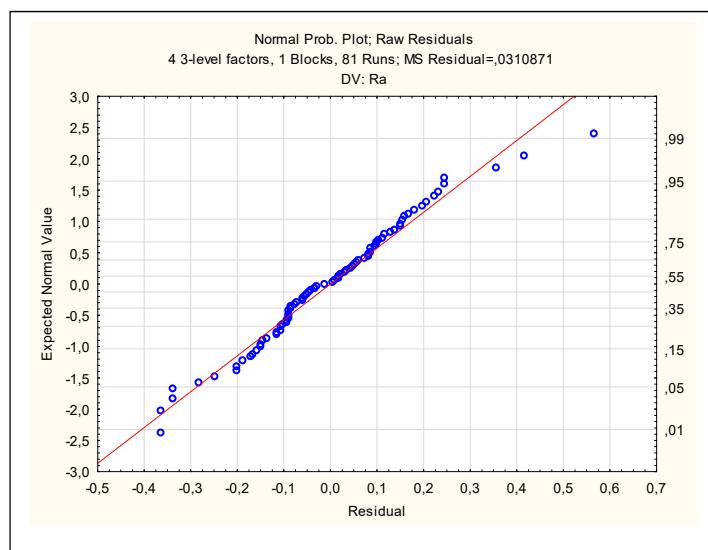
RÉSIDUS DU FINI DE SURFACE

RÉSIDUS DE LA RÉPONSE RA



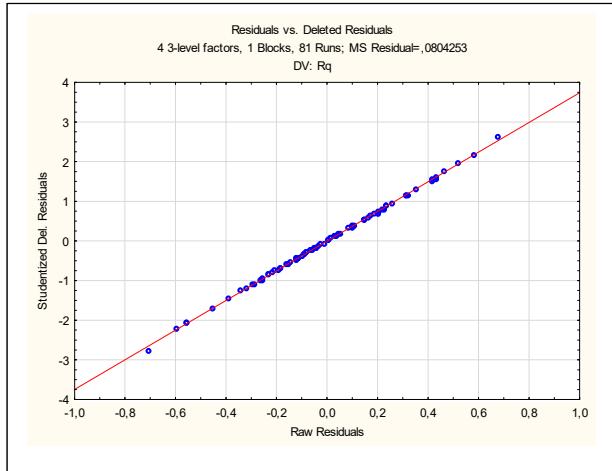
Graphe des résidus prédictes vs résidus observés

Graphe des valeurs prédictes vs normales prédictes

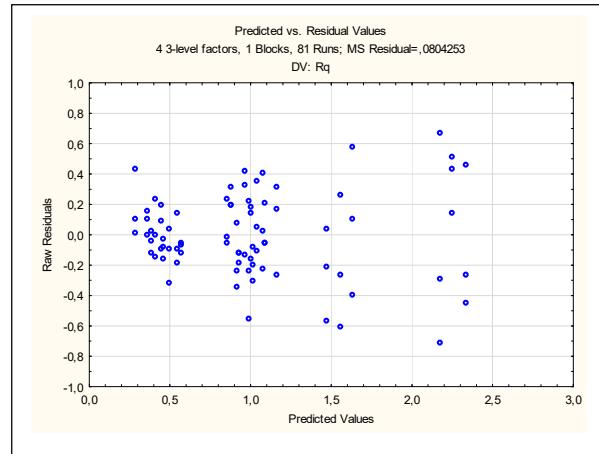


Graphe des résidus vs valeurs normales

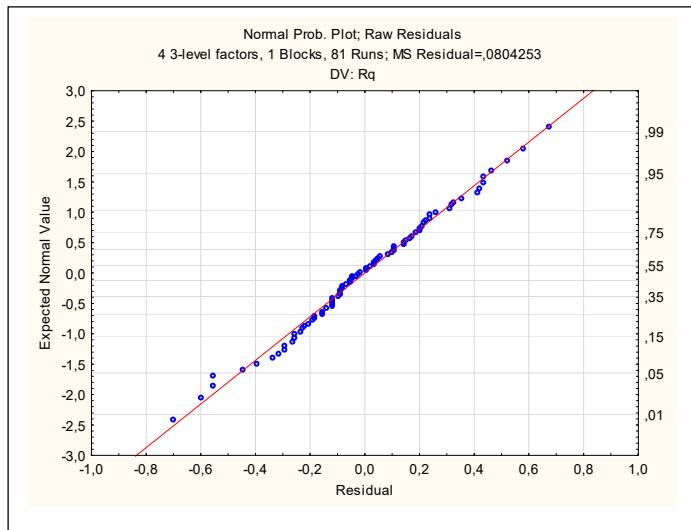
➤ Analyse des résidus de Rq



Graphe des résidus prédictes vs résidus observés

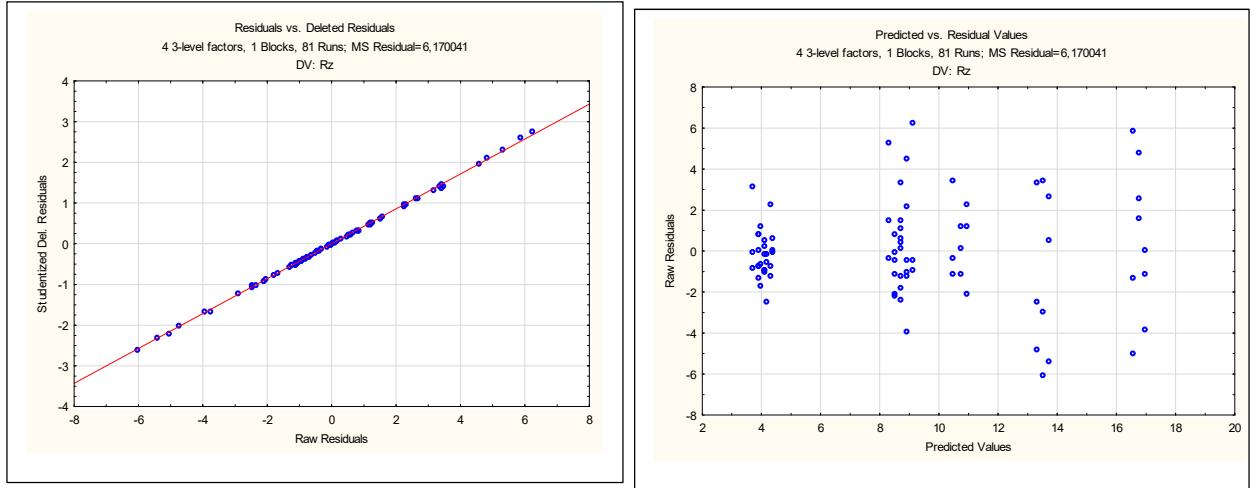


Graphe des valeurs prédictes vs normales prédictes



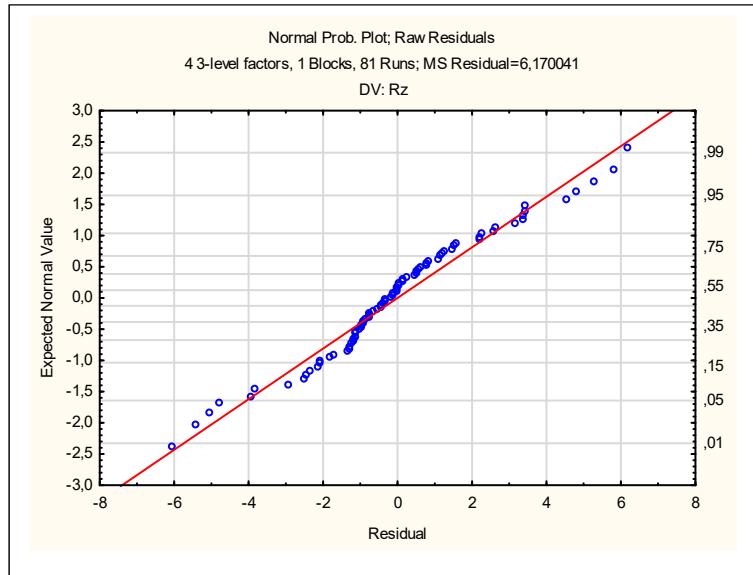
Graphe des résidus vs valeurs normales observés

➤ Analyse des résidus de Rz



Graphe des résidus prédictes vs résidus observés

Graphe des valeurs prédictes vs normales prédictes



Graphe des résidus vs valeurs normales observées

ANNEXE VI

TABLEAUX DES RÉSULTATS BRUTS

vitesse de coupe (rpm)	vitesse d'avance (mm/min)	vitesse d'avance (po/min)	grit	trajectoire	# TEST
1000	500	19,69	100	rectiligne	1
1750	500	19,69	100	rectiligne	4
2500	500	19,69	100	rectiligne	7
1000	1000	39,37	100	rectiligne	10
1750	1000	39,37	100	rectiligne	13
2500	1000	39,37	100	rectiligne	16
1000	1500	59,06	100	rectiligne	19
1750	1500	59,06	100	rectiligne	22
2500	1500	59,06	100	rectiligne	25
1000	500	19,69	100	arc	2
1750	500	19,69	100	arc	5
2500	500	19,69	100	arc	8
1000	1000	39,37	100	arc	11
1750	1000	39,37	100	arc	14
2500	1000	39,37	100	arc	17
1000	1500	59,06	100	arc	20
1750	1500	59,06	100	arc	23
2500	1500	59,06	100	arc	26
1000	500	19,69	100	spiral	3
1750	500	19,69	100	spiral	6
2500	500	19,69	100	spiral	9
1000	1000	39,37	100	spiral	12
1750	1000	39,37	100	spiral	15
2500	1000	39,37	100	spiral	18
1000	1500	59,06	100	spiral	21
1750	1500	59,06	100	spiral	24
2500	1500	59,06	100	spiral	27
1000	500	19,69	400	rectiligne	28
1750	500	19,69	400	rectiligne	31
2500	500	19,69	400	rectiligne	34
1000	1000	39,37	400	rectiligne	37

1750	1000	39,37	400	rectiligne	40
2500	1000	39,37	400	rectiligne	43
1000	1500	59,06	400	rectiligne	46
1750	1500	59,06	400	rectiligne	49
2500	1500	59,06	400	rectiligne	52
1000	500	19,69	400	arc	29
1750	500	19,69	400	arc	32
2500	500	19,69	400	arc	35
1000	1000	39,37	400	arc	38
1750	1000	39,37	400	arc	41
2500	1000	39,37	400	arc	44
1000	1500	59,06	400	arc	47
1750	1500	59,06	400	arc	50
2500	1500	59,06	400	arc	53
1000	500	19,69	400	spiral	30
1750	500	19,69	400	spiral	33
2500	500	19,69	400	spiral	36
1000	1000	39,37	400	spiral	39
1750	1000	39,37	400	spiral	42
2500	1000	39,37	400	spiral	45
1000	1500	59,06	400	spiral	48
1750	1500	59,06	400	spiral	51
2500	1500	59,06	400	spiral	54
1000	500	19,69	800	rectiligne	55
1750	500	19,69	800	rectiligne	58
2500	500	19,69	800	rectiligne	61
1000	1000	39,37	800	rectiligne	64
1750	1000	39,37	800	rectiligne	67
2500	1000	39,37	800	rectiligne	70
1000	1500	59,06	800	rectiligne	73
1750	1500	59,06	800	rectiligne	76
2500	1500	59,06	800	rectiligne	79
1000	500	19,69	800	arc	56
1750	500	19,69	800	arc	59
2500	500	19,69	800	arc	62
1000	1000	39,37	800	arc	65
1750	1000	39,37	800	arc	68
2500	1000	39,37	800	arc	71
1000	1500	59,06	800	arc	74

1750	1500	59,06	800	arc	77
2500	1500	59,06	800	arc	80
1000	500	19,69	800	spiral	57
1750	500	19,69	800	spiral	60
2500	500	19,69	800	spiral	63
1000	1000	39,37	800	spiral	66
1750	1000	39,37	800	spiral	69
2500	1000	39,37	800	spiral	72
1000	1500	59,06	800	spiral	75
1750	1500	59,06	800	spiral	78
2500	1500	59,06	800	spiral	81

RÉSULTATS DES ÉMISSIONS DE PARTICULES

C_MassPF	C_SurfPF	C_NbrePF	C_NbrePUF	C_SurfPUF	C_MassPUF	# TEST
18,499303	18630,16	3045,838	364581100	71328000000	1457,567	1
78,30274	88035,91	16122,56	1210794300	1,4901E+11	2275,12	4
108,1269	128490,17	26170,572	116250782	31954551685	740,914355	7
1,200132	1548,71	455,862	56051359,5	6742945000	100,1172	10
9,70614	14004,44	7237,788	219385900	29924200000	623,146	13
132,91076	160193,48	33447,208	113343440	15571400000	302,2881	16
4,925719	6400,38	1760,846	175015870	26037620000	455,8613	19
29,750161	36857,76	8535,25	271249790	33224100000	536,3725	22
109,49524	138566,3	34127,676	179419220	20325300000	273,2832	25
118,41106	138966,77	29727,338	87318010	8639200000	109,8931	2
128,37508	154822,2	34557,964	330729600	59320000000	1033,78	5
125,02273	158406,4	40931,86	89663170	17004780000	345,2234	8
8,040374	10782,59	3169,36	48845960	9096940000	161,0986	11
27,4739	36530,89	11169,564	52682740	7544100000	137,9365	14
210,0436	263491,1	64442,122	108432320	17468000000	301,3824	17
9,008181	12741,68	4001,354	217780200	31212950000	502,1494	20

62,44318	83591,07	23939,96	209913620	33168900000	793,8645	23
146,20131	192446,5	54083,662	156487480	23732000000	447,78331	26
102,79231	114534,4	22947,908	1325740100	1,3033E+11	1896,909	3
62,03615	78503,38	19453,81	161118710	21916300000	355,714	6
184,08136	229136,5	56667,822	93264730	14995201000	255,373821	9
1,359804	1946,68	688,19	76348647,5	6979450000	78,25032	12
13,19137	18289,41	6098,94	65396090	7906100000	136,705	15
183,80356	235912,02	59346,732	183979850	24825100000	484,3968	18
5,326594	7256,07	2211,362	219291020	36313800000	647,8354	21
27,77292	36088,47	9754,342	172773810	20795600000	250,8734	24
129,19757	170283,25	46957,222	192320400	32063980000	715,1108	27
3,204827	4741,83	1786,012	55510440	7630200000	127,6187	28
2,0045	3192,003	1190,364	136765300	25973600000	537,874	31
0,783468	1590,833	895,828	147629020	19485300000	347,819	34
0,455907	1144,193	1437,94	296963500	35686500000	528,61	37
1,306121	2375,76	1763,1257	234100640	28211900000	430,419	40
1,150361	2293,22	1763,6939	170955700	21998500000	363,996	43
0,478302	1023,88	1089,1078	118533300	17898600000	313,0324	46
23,27836	34269,95	11969,3725	89539660	13826840000	279,6924	49
59,21159	89151,24	30997,16	115453830	18886900000	338,228	52
1,981773	2879,86	1134,216	103560360	15517200000	284,6559	29
3,269571	5162,66	1679,278	228015300	26634300000	394,099	32
1,31236	2522,772	1296,372	56626280	16835900000	417,8172	35
1,301991	2227,25	1629,782	97953070	15119200000	268,3408	38
1,582225	2848,46	1840,1637	192677590	23187500000	349,434	41
1,793754	3473,02	2189,6427	166688540	23055300000	416,869	44
0,727659	1423,86	1200,6844	176841770	18368600000	269,3727	47
22,86776	36559,82	17664,752	98693920	13409700000	199,748	50

43,13546	69397,89	29688,3358	15100740	14486623000	394,20941	53
1,710903	2458,33	958,612	83376500	11309400000	174,1685	30
3,494731	5087,88	1537,474	225826770	25001000000	394,341	33
1,619833	2987,85	1347,134	96398880	12946800000	203,138	36
1,922189	3014,73	1786,4769	72182657,2	7451180000	99,1789	39
2,422128	3957,89	2078,9326	171682110	21701000000	328,016	42
2,404225	4715,59	2665,5278	162739120	20700900000	346,482	45
6,582	9954,36	4276,9413	132641790	15206100000	245,681	48
19,69739	29872,69	10765,4275	125184020	15970800000	286,1659	51
37,08935	58667,1	22355,9037	211988140	34219000000	541,897	54
7,97295	13486,86	6215,4389	185529460	32054100000	607,618	55
4,25344	6951,32	3509,5983	214198600	34032100000	590,007	58
12,55879	19411,18	7404,8862	320471210	34754000000	535,943	61
5,24614	9642,07	5215,7879	190767570	29924300000	498,88	64
2,71043	4460,28	2361,4749	259213520	27338400000	413,875	67
5,30132	8267,48	3516,1907	190129610	25270000000	473,9278	70
1,378673	2310,59	1408,0424	162987350	24318600000	467,016	73
1,14953	1847,84	1124,5335	213071280	31829000000	701,902	76
1,710648	2438,78	1206,3229	115075990	30146100000	709,617	79
4,17484	8544,3	5897,7323	506197100	56970300000	937,837	56
2,90438	4874,54	2772,8558	309671360	36715200000	557,829	59
4,76894	7848,34	3729,1823	223441300	40008800000	906,747	62
2,39022	4482,37	2761,5772	481383670	37583100000	418,021	65
2,87045	4925,41	2806,0894	248507640	36705100000	735,384	68
3,93625	6518,05	3185,3847	236905970	25224100000	277,8093	71
1,00984	1594,16	1046,7847	235324570	32855100000	542,243	74
1,010791	1202	675,7238	264791790	25305600000	322,6382	77
4,30332	4537,43	1506,6817	112214500	25793100000	513,866	80
4,70314998	7527,28	3447,591	309695460	30256500000	412,4997	57

5,57317	9379,57	4560,4282	217323490	30304100000	460,019	60
10,30021	19047,38	10216,156	190767570	29924300000	498,88	63
2,71043	4460,28	2361,4749	210228800	28458100000	479,05	66
3,5509	5884,67	2789,5636	188449720	34930500000	830,751	69
3,93625	6518,05	3185,3847	203386280	24334200000	381,1684	72
0,556073	1058,7	914,1863	124214380	21078600000	335,0649	75
0,795433	1219,09	813,4235	213262300	26671000000	393,1289	78
1,68406	2736,62	1432,1676	122260150	26234400000	451,701	81

RÉSULTATS DU FINI DE SURFACE

Ra	Rq	Rz	# TEST
2,105	2,78966667	17,00266667	1
1,72033333	2,67966667	18,3253333	4
1,1295	1,879	15,291	7
0,915	1,24	8,308	10
0,92433333	1,29833333	10,586	13
0,88166667	1,51166667	16,667	16
0,97066667	1,474	13,1523333	19
0,85766667	1,29933333	11,889	22
0,744	1,188	13,91966667	25
1,293	1,879	13,176	2
1,62833333	2,76666667	21,597	5
1,045	1,466	11,52266667	8
1,418	2,21366667	16,369	11
1,20566667	1,81533333	16,9485	14
0,572	0,91566667	8,53733333	17
0,62466667	0,90233333	8,81666667	20
0,65733333	1,038	10,886	23
0,53066667	0,84333333	9,39466667	26
1,36966667	2,06733333	15,813	3
1,46433333	2,39533333	19,34866667	6
1,825	2,84266667	22,4003333	9

1,111	1,737	14,24	12
0,6605	0,956	7,4585	15
0,833	1,2685	10,845	18
0,86933333	1,33266667	12,1173333	21
0,676	1,03166667	9,606	24
0,75733333	1,1503	10,188	27
0,46733333	0,71066667	7,47733333	28
0,518	0,80966667	8,49566667	31
0,62866667	1,08333333	13,58	34
0,848	1,394	11,1216667	37
0,51266667	0,83633333	9,30566667	40
0,698	1,085	8,10266667	43
0,734	1,48366667	15,30666667	46
0,68166667	1,21466667	13,4403333	49
0,42866667	0,68266667	6,33633333	52
0,57533333	0,92733333	9,182	29
0,468	0,74066667	6,457	32
0,456	0,79933333	9,78133333	35
0,576	0,94066667	7,93266667	38
0,718	1,378	12,0773333	41
0,706	1,193	9,331	44
0,49733333	0,853	8,17333333	47
0,26233333	0,43833333	4,96066667	50
0,335	0,572	6,873	53
0,51066667	0,81166667	8,88333333	30
0,571	0,809	6,37933333	33
0,57233333	0,83233333	7,97633333	36
0,76866667	1,09466667	8,46133333	39
0,84833333	1,28366667	9,816	42
0,762	1,079	7,366	45
0,74666667	1,10333333	8,65466667	48
0,455	0,759	7,63566667	51
0,556	0,99733333	10,19566667	54
0,29166667	0,45033333	3,52766667	55
0,30633333	0,437	3,15566667	58
0,16266667	0,26	3,12	61
0,367	0,54433333	4,36966667	64
0,333	0,529	4,68733333	67
0,375	0,71466667	6,859	70
0,34166667	0,515	4,26533333	73

0,12166667	0,17166667	1,65533333	76
0,17333333	0,26566667	2,26633333	79
0,24266667	0,35266667	3,13	56
0,19433333	0,307	3,08966667	59
0,274	0,41466667	3,959	62
0,22333333	0,35466667	3,18466667	65
0,267	0,47133333	4,68433333	68
0,186	0,30033333	2,84366667	71
0,28433333	0,50433333	4,37466667	74
0,366	0,53466667	3,96766667	77
0,38166667	0,64466667	5,19733333	80
0,36133333	0,68366667	6,58033333	57
0,201	0,37966667	3,985	60
0,22766667	0,34633333	2,55633333	63
0,42066667	0,64233333	4,605	66
0,23833333	0,36833333	3,15433333	69
0,225	0,38766667	3,67066667	72
0,25566667	0,44833333	4,98133333	75
0,266	0,401	3,60933333	78
0,26366667	0,414	3,283	81

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.
- Ali, B. A. (2007). Influence de l'état de surface et du serrage sur les outils assemblés par frettage. *Génie Mécanique. Ph. D. Montréal: École Polytechnique*, 134.
- Andujar, P., Lanone, S., Brochard, P., & Boczkowski, J. (2009). Effets respiratoires des nanoparticules manufacturées. *Revue des maladies respiratoires*, 26(6), 625-637.
- AT, A. T. (2015). Retrieved from <http://assets.abrasive-tech.com/literature/> StoneBrochure.pdf
- Balazinski. (2013). MEC4530 : Fabrication mécanique avancée : notes de cours MEC-4530. Programme de baccalauréat en génie mécanique. (Montréal : École Polytechnique de Montréal,), 143.
- CNESST, C. d. n., de l'équité, de la santé et sécurité au travail. (2016a). Retrieved from <https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/toxicologie/notions-toxicologie/Pages/05-effet-toxique.aspx>. consulté le 20 mars 2020.
- CNESST, C. d. n., de l'équité, de la santé et sécurité au travail. (2016b). Retrieved from <https://www.csst.qc.ca/prevention/tolerance-zero/Pages/silice-cristalline.aspx>. consulté le 20 mars 2020
- Croteau, G. A., Guffey, S. E., Flanagan, M. E., & Seixas, N. S. (2002). The effect of local exhaust ventilation controls on dust exposures during concrete cutting and grinding activities. *AIHA Journal*, 63(4), 458-467.
- Dubus, J., Bosdure, E., David, M., & Stremler-Lebel, N. (2010). Nanoparticles and health. *Archives de pediatrie: organe officiel de la Societe francaise de pediatrie*, 17(6), 600-601.
- El-Hofy, H. A.-G. (2013). *Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes*: CRC press.
- FEPA, F. E. d. F. d. P. A. (2015). Retrieved from <https://www.fepa-abrasives.com/abrasive-products/grains>

- Goossens, F. o. (2015). *Modélisation du processus de polissage: identification des effets et des phénoménologies induits par l'usinage abrasif* (Thèse de doctorat). Université de Bordeaux,
- Goyer, N., Bahloul, A., & Veillette, C. (2010). Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice. *Guide des bonnes pratiques. IRSST*, 16.
- GPP, G. p. p. (2015). Dry Polishing Pads User Guide. Retrieved from http://granitepolishingpads.com/Dry_Pads_User_Guide.pdf. Consulté le 20 mars 2020.
- Haydon, B., & Eng, P. (2012). *Nanomaterials and their applications in textiles, standards: domestic standardization for Canadian Manufacturers and Importers and International Standardization Developments*: Industry Canada.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*: John Wiley & Sons.
- Homand, F., & Duffaut, P. (2000). *Manuel de mécanique des roches* (Vol. 1): Presses des MINES.
- I. Ahmad, M. I. K. a. G. P. (2011). Nanotoxicity of Occupational Dust Generated in Granite Stone Saw Mill. *International Conference on Nanoscience, Technology and Societal Implications, Bhubaneswar*, , pp. 1-6.
- 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.
- Khettabi, R. (2009). *Modélisation des émissions de particules microniques et nanométriques en usinage* (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure).
- Khettabi, R., Songmene, V., & Masounave, J. (2007). Effect of tool lead angle and chip formation mode on dust emission in dry cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 194(1-3), 100-109.
- Kusaka, T., Nakayama, M., Nakamura, K., Ishimiya, M., Furusawa, E., & Ogasawara, K. (2014). Effect of silica particle size on macrophage inflammatory responses. *PloS one*, 9(3).
- Martínez, C., Prieto, A., García, L., Quero, A., González, S., & Casan, P. (2010). Silicosis: a disease with an active present. *Archivos de Bronconeumología ((English Edition))*, 46(2), 97-100.

- McDONALD, J. C., McDONALD, A. D., Hughes, J. M., Rando, R. J., & Weill, H. (2005). Mortality from lung and kidney disease in a cohort of North American industrial sand workers: an update. *Annals of occupational hygiene*, 49(5), 367-373.
- Migan, E. (2015). *Étude du polissage des granits: pratiques industrielles, fini de surface et émission des poussières*. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure).
- Ostiguy, C., Lapointe, G., Trottier, M., Ménard, L., Cloutier, Y., Michel, B., Normand, C. (2008). Les effets sur la santé reliés aux nanoparticules. 120.
- Phillips, M. L., Johnson, D. L., & Johnson, A. C. (2013). Determinants of respirable silica exposure in stone countertop fabrication: a preliminary study. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 10(7), 368-373.
- Pozzi, R., De Berardis, B., Paoletti, L., & Guastadisegni, C. (2003). Inflammatory mediators induced by coarse (PM_{2.5-10}) and fine (PM_{2.5}) urban air particles in RAW 264.7 cells. *Toxicology*, 183(1-3), 243-254.
- Preston, J. (1929). The reflection factor of magnesium oxide. *Transactions of the Optical Society*, 31(1), 15.
- Ricaud, M., & Witschger, O. (2012). Les nanomatériaux. *Définitions, risques toxicologiques*.
- ROHS. (2020). *Regulation respecting occupational health and safety*. Légis Québec Retrieved from <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>. Consulté le 20 mars 2020
- Rosenberg, D. M. (2000). Silica exposure and silicosis. *American Ceramic Society Bulletin*, 79(8), 60-62.
- Rushton, L. (2007). Chronic obstructive pulmonary disease and occupational exposure to silica. *Reviews on environmental health*, 22(4), 255-272.
- Sabourin, G. (2012). *Silice cristalline La poussière invisible qu'on a à l'œil!* Retrieved from <http://www.irsst.qc.ca/>, consulté le 20 mars 2020
- Saidi, M., Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2015). Experimental investigation on fine particle emission during granite polishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 2109-2121.
- Saidi, M., Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2018a). Rotational and translation-free polishing of granite: surface quality and dust particles emission and dispersion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-15.

- Saidi, M., Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2018b). Rotational and translation-free polishing of granite: surface quality and dust particles emission and dispersion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1-4), 289-303.
- Saïdi, M. N. (2018). *Polissage du granit: qualité, émission et dispersion des poussières et moyens de contrôle à la source*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure).
- Saidi, M. N., Songmene, V., Kouam, J., & Bahloul, A. (2019). Study of surface quality and dust particles emission and dispersion during dry polishing of granite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9), 4675-4684. doi:10.1007/s00170-019-04166-3
- Sánchez Delgado, N., Rodríguez-Rey, A., Suarez del Rio, L., Díez Sarriá, I., & Calleja, L. (2005). The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain). *International journal of rock mechanics and mining sciences* (1997), 42(1), 161-166.
- Simcox, N. J., Lofgren, D., Leons, J., & Camp, J. (1999). Silica exposure during granite countertop fabrication. *Applied occupational and environmental hygiene*, 14(9), 577-582.
- Songmene, V., Miazza, A., Hechmi, M. A., Olufayo, O. A., & Kouam, J. (2018a). Granite polishing: Effects of polishing parameters and tool paths on part quality and dust emission. *Procedia CIRP*, 77, 139-142.
- Songmene, V., Kouam, J., & Balhoul, A. (2018b). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on fine and ultrafine particle emission and distribution during polishing of granite. *Measurement*, 114, 398-408.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-science reviews*, 12(1), 1-33.
- Tahan, S. A. (2012). *Methodologies expérimentales pour ingénieur*. SYS862. Ecole de technologie Supérieure.
- Urlea, V. (2017). *Amélioration du fini de surface par électropolissage des composants en alliage de titane (Ti64) et nickel (IN625) fabriqués par FSL*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure).
- Vacek, P. M., Verma, D. K., Graham, W. G., Callas, P. W., & Gibbs, G. W. (2011). Mortality in Vermont granite workers and its association with silica exposure. *Occupational and environmental medicine*, 68(5), 312-318.

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.

Vinches, L. (2019). *GPO 602: Évaluation et contrôle de l'environnement industriel.* (Notes de cours, École de Technologie Supérieure).

Washington Mills, A. (2015). Grit size to micron comparison chart.

Xu, X. P., Huang, H., & Li, Y. (2003). *Material removal mechanisms in diamond grinding of granite, part 1: the morphological changes of granite from sawing to grinding.* Paper presented at the Key Engineering Materials.