

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Polissage des granits	5
1.2.1 But du polissage.....	5
1.2.2 Polissage manuel.....	6
1.2.3 Polissage mécanique.....	6
1.2.4 Outils de polissage.....	8
1.2.5 Catégorie d'abrasifs de polissage.....	10
1.2.6 Choix de granulométrie et du type de liants	10
1.2.7 Quelques études expérimentales sur le polissage des granits	12
1.3 Caractéristiques des matériaux à polir	15
1.3.1 Le granit.....	15
1.3.2 Le marbre.....	20
1.3.3 Le quartz	20
1.3.4 Comparaison entre le granit, le quartz et le marbre	21
1.4 États de surface	22
1.4.1 Défauts de surface.....	23
1.4.2 Quelques paramètres de rugosité de surface.....	24
1.4.3 Rugosités de surface obtenues par procédés de fabrication.....	27
1.4.4 Autres facteurs affectant la rugosité de surface	28
1.5 Émissions de poussières.....	29
1.5.1 Exposition aux poussières de granits.....	29
1.5.2 Émission de particules PM 2.5 lors du polissage du granit	30
1.5.3 Instruments de mesure pour la captation des particules générées.....	31
1.6 Normes de sécurité en milieu de travail.....	32
1.7 Conclusion	33
CHAPITRE 2 ANALYSE DES PRATIQUES INDUSTRIELLES.....	35
2.1 Introduction.....	35
2.2 Obtention des bruts de granit pour polissage.....	36
2.2.1 Extraction du granit.....	36
2.2.2 Débitage du bloc de granit en tranches	38
2.3 Polissage mécanique des granits.....	45
2.3.1 Polissage sur machines conventionnelles	45
2.3.2 Polissage sur machine à commande numérique.....	51
2.4 Polissage manuel des granits	57
2.5 Finis de surface	61
2.6 Discussions et conclusion	65

CHAPITRE 3	PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....	69
3.1	Introduction.....	69
3.2	Environnement expérimental.....	69
3.3	Matériel.....	70
3.4	Conditions expérimentales.....	71
3.5	Variables réponses et modèle correspond à l'étude.....	72
CHAPITRE 4	ANALYSE DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES LORS DU POLISSAGE.....	73
4.1	Analyse des effets.....	73
4.1.1	Diagrammes de Pareto des émissions de poussières.....	74
4.1.2	Tableaux des effets.....	76
4.1.3	Graphiques des effets sur échelle demi gaussienne.....	78
4.2	Analyse de variance (Anova).....	80
4.2.1	Tableaux de l'Anova.....	80
4.2.2	Modèles de prédiction proposés.....	83
4.3	Surface de réponse des émissions de poussières.....	84
4.4	Surface de réponse simultanée des émissions de poussières.....	87
4.5	Discussions et conclusion.....	88
CHAPITRE 5	ANALYSE DU FINI DE SURFACE APRÈS POLISSAGE.....	91
5.1	Profils de rugosité.....	91
5.1.1	Profil du fini de surface de l'essai no.1 : grit 60.....	93
5.1.2	Profil de la surface de l'essai no.10 : grit 80.....	93
5.1.3	Profil de la surface de l'essai no.19 : grit 100.....	93
5.1.4	Profil de la surface de l'essai no.9.....	94
5.2	Analyse statistique.....	94
5.2.1	Analyse des effets.....	95
5.2.2	Analyse de variance.....	102
5.3	Surface de réponse simultanée du fini de surface.....	106
5.4	Discussions et conclusion.....	107
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		109
RECOMMANDATIONS.....		111
ANNEXE I	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES.....	113
ANNEXE II	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES FINIS DE SURFACE.....	115
ANNEXE III	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES FORCES DE COUPE.....	117
ANNEXE IV	PROFILS DE RUGOSITÉ OBTENUS PAR SURFEST SJ 400.....	119

ANNEXE V	COURBE DE CALIBRATION DU PORTE-OUTIL AVEC RESSORTS.....	123
ANNEXE VI	IMAGES DES ROCHES DE GRANIT, MARBRE ET QUARTZ EXPOSÉES À L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL	125
ANNEXE VII	PRÉSENTATION GRAPHIQUE DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES.....	127
ANNEXE VIII	PRÉSENTATION GRAPHIQUE DES FINIS DE SURFACE.....	129
BIBLIOGRAPHIE.....		133

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Teneurs massiques pondérées des minéraux constituant les granits.....18
Tableau 1.2	Procédés de fabrication versus rugosité de surface.....28
Tableau 2.1	Résumé des conditions, paramètres et outils utilisés lors du polissage66
Tableau 2.2	Résumé des moyens de protection contre les poussières lors du polissage67
Tableau 3.1	Valeurs codées et valeurs réelles des niveaux des facteurs71
Tableau 4.1	Effets des facteurs sur la variable C^P76
Tableau 4.2	Effets des facteurs sur la variable C^S76
Tableau 4.3	Effets des facteurs sur la variable C^M77
Tableau 4.4	Analyse de variance de C^P80
Tableau 4.5	Analyse de variance de C^S81
Tableau 4.6	Analyse de variance de C^M81
Tableau 5.1	Effets des facteurs sur R_a98
Tableau 5.2	Effets des facteurs sur R_t98
Tableau 5.3	Effets des facteurs sur R_{pk}99
Tableau 5.4	Effets des facteurs sur R_{vk}99
Tableau 5.5	Analyse de variance de R_a103
Tableau 5.6	Analyse de variance de R_t103
Tableau 5.7	Analyse de variance de R_{pk}104
Tableau 5.8	Analyse de variance de R_{vk}104

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Structure d'un outil abrasif de polissage.....	8
Figure 1.2	Fracture des grains abrasifs.....	9
Figure 1.3	Meule diamantée.....	10
Figure 1.4	La relation entre la rugosité et la brillance.....	13
Figure 1.5	Micrographie SEM des surfaces polies de granit noir.....	13
Figure 1.6	La brillance en fonction de différentes étapes.....	14
Figure 1.7	Composition du granit.....	17
Figure 1.8	Minéraux composant le granit.....	19
Figure 1.9	Trois différentes sortes de granits.....	20
Figure 1.10	Échantillons d'aspects et de couleurs de granit, quartz et marbre.....	22
Figure 1.11	Défauts de surface.....	24
Figure 1.12	Paramètres d'état de surface.....	25
Figure 1.13	Rugosité moyenne Ra versus la vitesse de coupe.....	26
Figure 1.14	Paramètres Rk, Rpk et Rvk (ISO.13565-2, 1998).....	27
Figure 1.15	Aspects des granits blanc et noir.....	31
Figure 2.1	Scie à haveuse pour l'extraction des blocs calcaires.....	37
Figure 2.2	Bloc de granit extrait.....	37
Figure 2.3	Sciage au châssis.....	39
Figure 2.4	Débitage au disque diamanté.....	40
Figure 2.5	Débitage au disque diamanté géant.....	41
Figure 2.6	Débitage au fil diamanté.....	42

Figure 2.7	Position de travail du fil diamanté	43
Figure 2.8	Aspect du fil diamanté	43
Figure 2.9	Position des fils pour débitage multi-fils	44
Figure 2.10	Débitage multi-fils	44
Figure 2.11	Polisseuses à têtes multiples	45
Figure 2.12	Polisseuse Breton	46
Figure 2.13	Polissage mécanique sur la polisseuse Breton	47
Figure 2.14	Polisseuse à broche unique	48
Figure 2.15	Outils de polissage pour polisseuse à broche unique	49
Figure 2.16	Polisseuse Polimatic OMSP-72	49
Figure 2.17	Outils de polissage pour polisseuse Polimatic	50
Figure 2.18	Polisseuse Ordway	50
Figure 2.19	Polissage des contours intérieurs et extérieurs d'un comptoir	51
Figure 2.20	Outils de polissage pour contours intérieurs et extérieurs	51
Figure 2.21	Machine à commande numérique Titan 1000	52
Figure 2.22	Machine à commande numérique Intermac Master	53
Figure 2.23	Fraise en bout diamantée pour le surfacage	53
Figure 2.24	Unité de contrôle de l'Intermac Master	54
Figure 2.25	Dispositifs de mise en position	55
Figure 2.26	Dispositifs d'alignement	55
Figure 2.27	Étapes d'exécution de polissage sur CNC	56
Figure 2.28	Polissage du contour extérieur	57
Figure 2.29	Polissage manuel du contour intérieur	57
Figure 2.30	Disques abrasifs pour le polissage manuel	58

Figure 2.31	Polissage manuel sur une grande surface.....	58
Figure 2.32	Types d'outils rotatifs et d'abrasifs utilisés	59
Figure 2.33	Outil pneumatique pour le polissage manuel.....	59
Figure 2.34	Types de disques abrasifs utilisés	60
Figure 2.35	Outils pour polissage manuel.....	60
Figure 2.36	Les dix finis de surface de A.Lacroix Granit.....	61
Figure 2.37	Brosses pour polisseuse Breton	62
Figure 2.38	Finis polis de A. Lacroix Granit	62
Figure 2.39	Finis polis de Granit Orford.....	63
Figure 2.40	Obtention du fini flammé.....	64
Figure 2.41	Obtention du fini grenailé.....	64
Figure 3.1	Montage expérimental	70
Figure 3.2	Matériel utilisé	71
Figure 4.1	Diagramme de Pareto de C ^P	74
Figure 4.2	Diagramme de Pareto de C ^S	74
Figure 4.3	Diagramme de Pareto de C ^M	75
Figure 4.4	Effets sur échelle demi gaussienne de C ^P	78
Figure 4.5	Effets sur échelle demi gaussienne de C ^S	78
Figure 4.6	Effets sur échelle demi gaussienne de C ^M	79
Figure 4.7	Surface de réponse de C ^S avec grit 60	84
Figure 4.8	Surface de réponse de C ^S avec grit 80	85
Figure 4.9	Surface de réponse de C ^S avec grit 100	85
Figure 4.10	Surface de réponse de C ^M avec grit 60	86
Figure 4.11	Surface de réponse de C ^M avec grit 80	86

Figure 4.12	Surface de réponse de C^M avec grit 100	87
Figure 4.13	Surface de réponse simultanée des émissions de poussières	88
Figure 5.1	Profil de la surface de départ	91
Figure 5.2	Profil de rugosité avec le grit 60	92
Figure 5.3	Profil de rugosité avec le grit 80	92
Figure 5.4	Profil de rugosité avec le grit 100	92
Figure 5.5	Profil de la plus faible rugosité obtenue	94
Figure 5.6	Diagramme de Pareto de R_a	95
Figure 5.7	Diagramme de Pareto de R_t	96
Figure 5.8	Diagramme de Pareto de R_{pk}	96
Figure 5.9	Diagramme de Pareto de R_{vk}	97
Figure 5.10	Effets sur échelle demi gaussienne de R_a	100
Figure 5.11	Effets sur échelle demi gaussienne de R_t	101
Figure 5.12	Effets sur échelle demi gaussienne de R_{pk}	101
Figure 5.13	Effets sur échelle demi gaussienne de R_{vk}	102
Figure 5.14	Surface de réponse simultanée du fini de surface	106

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

APS	Spectromètre de mesure du diamètre aérodynamique des particules (Aerodynamic Particle Sizer)
CFAO	Conception et fabrication assistée par ordinateur
CNC	Commande numérique par ordinateur (Computer numerical control)
CSST	Commission de santé et sécurité au travail du Québec
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
LIPPS	Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes; un laboratoire accrédité de l'ÉTS.
SEM	Microscope électronique à balayage (Scanning electronic microscope)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

R^2	Coefficient de détermination
R^{2aj}	Coefficient de détermination ajusté
ε	Erreur expérimentale
R_a	Écart moyen arithmétique du profil de surface d'une pièce, μm
R_q	Écart moyen quadratique du profil de surface d'une pièce, μm
R_t	Hauteur totale du profil de surface d'une pièce, μm
R_z	Hauteur maximale du profil de surface d'une pièce, μm
R_p	Hauteur maximale de saillie du profil de surface d'une pièce, μm
R_k	Profondeur du profil écrêté de surface d'une pièce, μm
R_{pk}	Hauteur des pics éliminés de surface d'une pièce, μm
R_{vk}	Hauteur des creux éliminés de surface d'une pièce, μm
Mr_1	Taux de longueur portante
Mr_2	Taux de longueur portante
C^P	Concentration en nombre des particules dans l'air, $\#/cm^3$
C^S	Concentration en surface des particules dans l'air, $\mu\text{m}^2/cm^3$ ou nm^2/cm^3
C^M	Concentration en masse des particules dans l'air, mg/m^3 ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$
X1	Variable codée du facteur grosseur des grains lors de l'expérimentation
X2	Variable codée du facteur vitesse de rotation lors de l'expérimentation
X3	Variable codée du facteur avance lors de l'expérimentation

INTRODUCTION

De nos jours, diverses industries manufacturières utilisent le granit dans de nombreuses applications tant au niveau commercial que résidentiel. C'est ainsi qu'on retrouve le granit dans la fabrication des monuments, des comptoirs de cuisine ou de salle de bain, des murs des édifices (Huang *et al.*, 2002) et des objets constituant les installations urbaines. Au Québec, on compte plus de deux cents établissements de transformation de granit. Et, il faut dire que le plus souvent, les exigences d'obtention du fini de surface amènent à procéder au polissage pour atteindre le standard requis.

Mentionnons que le polissage, tout comme les autres procédés de mise en forme de granit, génère des particules suspendues dans l'air ambiant sous forme de poussière. Étant donné que le granit contient de la «silice cristalline», son usinage présente un danger potentiel pour la santé et l'environnement. Ainsi, l'inhalation de la poussière de granit peut être dommageable pour le système respiratoire et peut causer, entre autres, la silicose qui est une maladie pulmonaire irréversible.

Précisons que la silice est le constituant majeur de la croûte terrestre (Brasseur, 2012). Elle représente en effet plus de 60% en masse de l'écorce terrestre (Ricaud, 2007). C'est un minéral présent dans la plupart des roches et dans le sable. Elle constitue la forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO_2) et qui entre dans la composition de nombreux minéraux. La silice pure se présente sous la forme d'un minéral dur et existe sous différentes variétés naturelles et synthétiques. On la retrouve donc à l'état libre sous forme cristalline ou amorphe et à l'état combiné sous forme de silicates (Brasseur, 2012 ; Ricaud, 2007). La silice sert aussi de matière première à l'obtention de silicium (Si).

Les principales variétés de la silice cristalline sont : le quartz, la cristobalite et la tridymite. L'inhalation des poussières de silice cristalline survient, en général, après une exposition longue et peut être à l'origine d'effets particulièrement graves et invalidants sur la santé, comme la silicose, une atteinte pulmonaire irréversible. Les activités dans lesquelles on

retrouve les travailleurs exposés à la silice sont les suivantes : extraction des roches, fabrication des prothèses dentaires, taille de pierre, verreries, fonderie, industries de la céramique et de la porcelaine, travaux publics, etc. Les poussières de silice cristalline peuvent induire une irritation des yeux et des voies respiratoires, des bronchites chroniques et une pneumoconiose fibrogène à caractère irréversible nommée silicose (Brasseur, 2012). Il est important de souligner que le quartz est la silice cristallisée que l'on trouve dans de nombreuses roches (granit, marbre, sable, grès, etc.). Sa dureté et sa résistance s'apparentent à celles du granit.

Bien que l'environnement atmosphérique intérieur en lui-même, est caractérisé par un grand nombre de polluants chimiques gazeux ou particulaires, d'allergènes et de biocontaminants dont les concentrations varient dans le temps et dans l'espace, le polissage des matériaux contenant la silice, tels que le granit, le marbre, le quartz, etc., pourrait émettre des particules fines et ultra-fines.

En plus de l'attention particulière portée aux différentes pratiques industrielles en matière de polissage des granits, l'exposition des travailleurs aux particules de poussières micrométriques et nanométriques devient la préoccupation majeure des gestionnaires soucieux de la santé et sécurité de leurs employés. La voie respiratoire étant la principale voie d'absorption de ces microparticules et nanoparticules en milieu du travail, il est alors très important de protéger les travailleurs et les chercheurs de toutes maladies professionnelles de quelque nature que ce soit.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le polissage des granits afin d'identifier les différences entre les pratiques industrielles dans les industries locales partenaires du projet et la littérature scientifique dans ce domaine. Il s'agit de collecter des informations sur les pratiques industrielles actuelles et de les comparer avec ce qui se passe ailleurs dans le monde. Cette étude vise aussi à étudier le fini de surface et la génération des particules de poussière lors des opérations de polissage.

Ce travail est organisé de manière que l'on retrouve dans le premier chapitre intitulé revue de la littérature les diverses informations pertinentes se rattachant au polissage des granits, à l'état de surface et à l'émission de poussières. Le deuxième chapitre contient les détails concernant les pratiques industrielles dans les entreprises du Québec et ailleurs dans le monde. Dans le troisième chapitre, il est question de la procédure expérimentale. Le quatrième chapitre porte sur l'analyse statistique des émissions de poussières et dans le cinquième chapitre nous retrouvons l'analyse statistique du fini de surface.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Le polissage des granits occupe une place prépondérante dans les diverses activités réalisées au sein des industries contemporaines de transformation de granit compte tenu des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de ces matériaux. Nous allons aborder dans cette revue de littérature les différents aspects de polissage des granits, tout en tentant de mettre en relief les caractéristiques des matériaux à polir et noter les détails pertinents au niveau des émissions de poussières générées et du fini de surface. Nos raisonnements vont donc s'appuyer sur les différents travaux antérieurement réalisés.

1.2 Polissage des granits

Le polissage des granits se fait par abrasion contrairement au polissage par écouissage qui se fait par utilisation d'un brunissoir, c'est-à-dire polissage par vibration avec médias brunissant (billes et aiguilles d'acier). Le polissage par abrasion, comme c'est le cas dans notre étude, peut être manuel ou mécanique (polisseuse automatique ou semi-automatique). Ces deux types de polissage peuvent se réaliser à sec ou humide selon les besoins.

1.2.1 But du polissage

Le polissage a pour but d'améliorer un état de surface (enlèvement des rugosités) par abrasion. C'est une composante du parachèvement (ou finition) des pièces (métalliques, plastiques, bois, granits, etc.) visant à obtenir un bel aspect, un fini ou un état de surface de haute qualité. Cette qualité de surface est caractérisée par la rugosité, la brillance et l'éclat. Il est important de mentionner que le polissage est destiné à supprimer les défauts et à mettre en valeur des produits en augmentant leur pouvoir réflecteur et en leur conférant un beau fini. Dans de nombreux cas, la désignation polissage dans les activités de fabrication d'objets

dont au moins un des buts est d'être décoratif, correspondra à l'obtention d'un état de surface lisse et brillant.

1.2.2 Polissage manuel

Les opérations de polissage manuel sont des opérations coûteuses, qui nécessitent une main-d'œuvre hautement spécialisée. C'est pour cette raison que les objets généralement polis manuellement ne sont que des articles dont les formes géométriques compliquées ou la fragilité interdisent d'autres types de polissage. C'est-à-dire ceux dont la précision fine ou le faible échauffement sont nécessaires, de même que ceux requérant une finition de très haute qualité. Le polissage manuel combine plusieurs opérations successives. La pièce est polie avec des abrasifs de plus en plus fins, en croisant à chaque étape afin d'effacer les sillons laissés par l'opération précédente. Mentionnons que lors de la réalisation du polissage manuel, il faut d'abord commencer par le meulage, l'ébavurage ou l'émerisage, qui sont des opérations de dégrossissage et de préparation de la pièce. Ensuite, on procède au feutrage, opération minutieuse et plus fine de préparation de la pièce, qui permet d'user la pièce tout en gardant sa géométrie. Le tamponnage (ou polissage) manuel est exécuté par la suite afin de passer de l'état mat à l'état brillant. Cette opération délicate consiste à transformer la pièce préparée en pièce brillante, en conservant les cotes identiques et en évitant la déformation. Mentionnons que la toute dernière phase est l'avivage, qui permet de passer de l'état brillant à l'éclat. Il est important de souligner que selon le résultat désiré, d'autres opérations peuvent également être réalisées sur la pièce, comme le satinage, pour donner un aspect semi-brillant, doux et lisse.

1.2.3 Polissage mécanique

C'est la méthode de polissage la plus répandue. L'enlèvement de matière se fait par usure contrôlée (frottement) afin d'obtenir une surface brillante et réfléchissante. Comme nous l'avons mentionné un peu plus haut, le polissage mécanique peut être automatique ou semi-automatique. Les pièces sont présentées automatiquement devant la tête de polissage qui est animée d'un mouvement préprogrammé, continu et régulier.

A. Types de machines

Les machines permettant ce type d'opération sont essentiellement de deux sortes:

- la machine à postes multiples : les pièces se déplacent par rapport aux têtes de polissage, qui ont des positions et des réglages spécifiques afin de réaliser une ou plusieurs opérations sur des pièces;
- le robot de polissage : pourvu d'un nombre d'axes variables, il ne permet de faire qu'une seule opération, mais peut la réaliser avec une certaine précision.

Les deux types de machines sont susceptibles de gérer la distribution de la pâte, la compensation d'usure du tampon, la pression de la pièce sur le tampon et, dans une certaine mesure, les mouvements relatifs. Cependant, les pièces réalisées par ce moyen, surtout s'il s'agit de pièces délicates, de forme complexe et de finition soignée, doivent systématiquement être contrôlées individuellement et retouchées par un polissage manuel pour effacer les défauts résiduels et conférer l'aspect définitif. Les irrégularités que le polisseur corrige sans même en avoir conscience au fur et à mesure de l'avancement de son travail ne le seront pas par la machine qui, avec le meilleur réglage possible, ne saura pas donner un résultat de très haut niveau de manière régulière. C'est pourquoi, dans le cas de certains produits dont le niveau de qualité le justifie, on préfère souvent faire toutes les opérations de polissage grossier et fin sur machine, et terminer la pièce sur un poste manuel.

B. Choix de machines à polir

Pour le polisseur, le choix d'une machine à polir doit tenir compte de nombreux paramètres parmi lesquels l'on retrouve les quantités à polir, la nature des pièces (matière, forme, fragilité, usage.), et les gammes de polissage retenues. Une alimentation automatique ou manuelle est envisageable, selon les circonstances de la production. Cependant, la productivité croissante des machines par multiplication des postes et des axes de travail se fait au détriment de la souplesse d'utilisation, en particulier pour les séries limitées.

1.2.4 Outils de polissage

Un outil de polissage est un outil portant de nombreux points de coupe. Il est constitué de grains abrasifs représentant les points de coupe et maintenus ensemble par une matrice de liant et séparés par des pores (Voir Figure 1.1). L'abrasif étant une substance capable d'user, de polir par frottement, on peut le définir comme un corps dur cristallisé susceptible, par une action mécanique, de découper des copeaux dans un corps moins dur que lui. Il est ainsi caractérisé par ses propriétés mécaniques, sa stabilité physico-chimique, sa forme et ses dimensions. Il n'y a que les abrasifs et les machines de hautes précisions qui permettent le polissage aux tolérances serrées et l'obtention des états de surface hautement finis, exigés par l'industrie. Il est important de mentionner que la dureté, la taille et la forme des particules, mais aussi la vitesse de rotation, la pression et la nature du liant, sont autant de facteurs qui influencent l'efficacité des abrasifs.

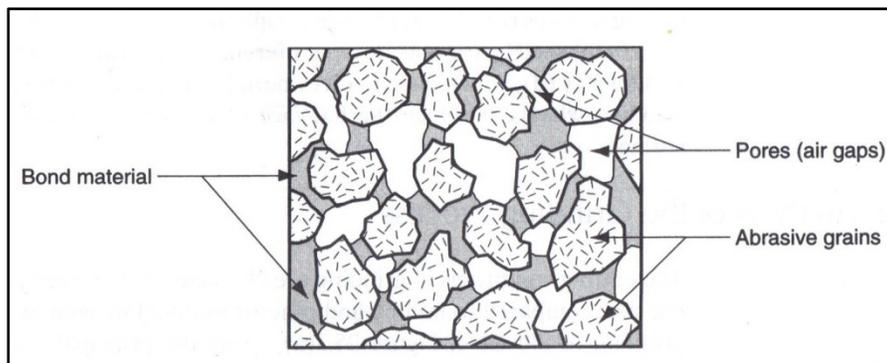


Figure 1.1 Structure d'un outil abrasif de polissage
Tirée de Groover (2007)

Mentionnons que l'orientation des grains individuels est aléatoire et, par conséquent, un grain peut rencontrer la surface de la pièce avec un angle de coupe positif, nul, ou, comme cela est plus probable, un angle de coupe négatif. Lorsque l'outil en rotation est mis en contact avec la pièce, les grains abrasifs génèrent de petits copeaux. Sous l'effet des efforts de polissage, les grains abrasifs s'usent et s'émousent, provoquant un dégagement de chaleur et une augmentation du frottement et de la pression nécessaire sur l'outil. Un abrasif de polissage

idéal conserve son tranchant en s'émoissant le moins possible et, lorsqu'il commence à s'émoisser, il se fracture, révélant de nouvelles arêtes de coupe.

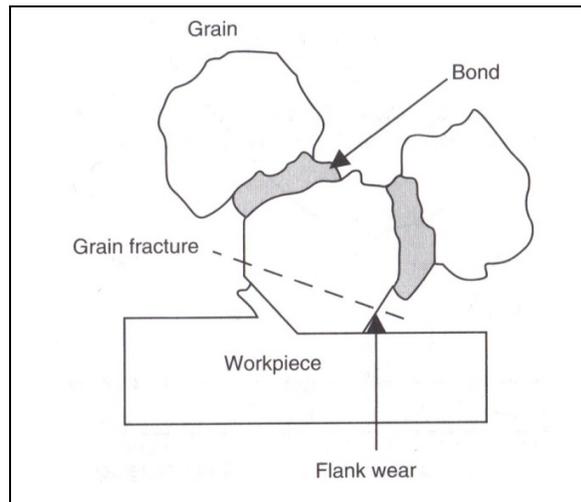


Figure 1.2 Fracture des grains abrasifs
Tirée de El-Hofy (2007)

L'augmentation des forces de coupe de polissage provoque soit la rupture de l'abrasif (Figure 1.2), laquelle expose de nouvelles arêtes de coupe, soit une fracture des ponts de liant maintenant les grains abrasifs. Les pores, espaces vides entre les grains, permettent l'évacuation des copeaux du matériau usiné et la circulation du liquide de refroidissement (Voir Figure 1.1).

Les abrasifs peuvent se présenter sous différentes formes: meules abrasives (Figure 1.3), abrasifs appliqués (sur des bandes, disques ou feuilles), pâtes et liquides à polir utilisés sur des roues ou des brosses de nature variée (en sisal, coton, flanelle, feutre, laine ou drap, tissés selon différents modes).



Figure 1.3 Meule diamantée
Tirée de <http://www.comartex.com>

1.2.5 Catégorie d'abrasifs de polissage

On distingue deux catégories d'abrasifs : abrasifs naturels et abrasifs artificiels.

Parmi les abrasifs naturels, on retrouve : le grenat, l'émeri, le quartz, le corindon naturel et le diamant naturel. La catégorie d'abrasifs artificiels regroupe : l'oxyde d'alumine, le carbure de silicium, le carbure de bore, le nitrure de bore cubique et le diamant synthétique.

Selon Krar *et al.* (1982), le meilleur abrasif naturel est le diamant, mais son emploi se limitait au meulage des carbures et du verre, au sciage du marbre, du béton, de la pierre à chaux et du granit compte tenu de son coût exorbitant. L'avènement du diamant synthétique ou artificiel devrait cependant entraîner la baisse du prix du diamant industriel naturel. Ce qui entraîne le renouveau de son emploi.

1.2.6 Choix de granulométrie et du type de liants

Le polissage utilise des abrasifs qui sont des particules dures, d'une géométrie souvent anguleuse et de granulométrie contrôlée, utilisées comme autant d'outils individuels destinés à enlever de la matière. La granulométrie est d'une grande importance dans l'aptitude d'un

outil abrasif à donner l'enlèvement de matières et la finition voulue. La valeur est indiquée par un nombre qui augmente en proportion inverse de la taille des grains.

Les abrasifs à gros grains sont utilisés pour les applications à fort enlèvement de matière. Les finitions et les tolérances serrées fixées pour les pièces nécessitent des granulométries plus fines. La dernière finition est obtenue par planage. C'est-à-dire qu'on applique plus la profondeur de coupe et on laisse l'outil travailler pendant un certain temps.

Les liants vitrifiés sont plus courants pour les opérations de précision. La porosité et la résistance des outils abrasifs comprenant ce liant assurent un fort enlèvement de matière, leur rigidité permettant d'obtenir une haute précision. Ils ne sont pas sensibles à l'eau, à l'acide, aux huiles ou aux variations de température ordinaires. Les liants organiques s'utilisent sur les meules d'ébarbage et de tronçonnage sur machines fixes ou portatives. Le polissage à sec avec des abrasifs à liants vitrifiés nécessite des abrasifs plus tendres d'un ou de deux grades que le polissage sous arrosage

Il convient de signaler que la dimension des abrasifs utilisés constitue une variable qui n'est pas négligeable surtout vis-à-vis de la structure de la roche. Le type de matériau influe donc sur le choix de l'abrasif, la taille des grains et le grade. Le degré de pénétration de l'abrasif dépend de la dureté du matériau. Pour ce faire, il faut des abrasifs à granulométrie plus fine pour les matériaux durs, et à granulométrie plus grossière pour les matériaux plus tendres. Le grade indique la résistance du liant, qui retient les grains abrasifs d'un outil. Plus le matériau est dur, plus le grade de l'abrasif est tendre. Soulignons que les roches tendres (calcaires) se polissent plus vite que les roches dures (granits).

La sévérité est un paramètre qui peut affecter le choix du type d'abrasif et du grade, voire du type de liant. De façon générale, plus l'opération est sévère, plus l'abrasif doit être dur et résistant. Précisons que la sévérité de l'opération peut être due à la rapidité de la vitesse de rotation, de l'avance ou des mouvements transversaux, ou encore à un contact intermittent.

Afin de donner le rendement escompté, l'abrasif doit posséder les qualités suivantes :

1. Être plus dur que la matière à polir;
2. Être suffisamment robuste pour résister aux efforts de polissage;
3. Résister à la chaleur afin de ne pas s'émousser sous l'effet de hautes températures engendrées par le polissage;
4. Être friable (se cliver), de manière que lorsque leurs arêtes s'émousent, les cristaux se brisent laissant de nouvelles arêtes vives pour poursuivre le travail.

1.2.7 Quelques études expérimentales sur le polissage des granits

Huang *et al.* (2002) ont mené une étude sur la détection de la microstructure d'une surface de granit brillante obtenue par le processus de polissage. Cette détection de la microstructure a été effectuée en six étapes distinctes partant du sciage au polissage sur deux types de granits (noir et rouge). L'expérimentation a été réalisée sur une machine spécialement conçue sur laquelle un disque abrasif diamanté de 80 mm de diamètre a été monté sur une broche verticale tournant à 4000 rpm. Précisons que les échantillons de pierres ont été montés sur une table horizontale. Six outils abrasifs en diamant de différentes grosseurs de grains (gros à fin) ont été utilisés afin de permettre l'obtention des finis de surface variant de rugueuse à lisse. Les grits utilisés sont les suivants : 150, 300, 500, 1000, 2000, 3000. L'eau du robinet a été utilisée comme liquide de refroidissement lors de cette expérimentation.

Selon Huang *et al.* (2002), les mécanismes en vigueur lors du polissage du granit varient du mode d'enlèvement fragile au mode d'enlèvement ductile avec la réduction de la taille de grain de diamant (Voir Figure 1.4). Ainsi, la surface brillante la plus élevée est la surface ayant une faible rugosité obtenue par procédé de meulage avec un disque abrasif diamanté dans le mode ductile (Huang *et al.*, 2004 ; Xie *et al.*, 2009). Les auteurs ont révélé qu'il y a une très forte corrélation entre la rugosité et la brillance.

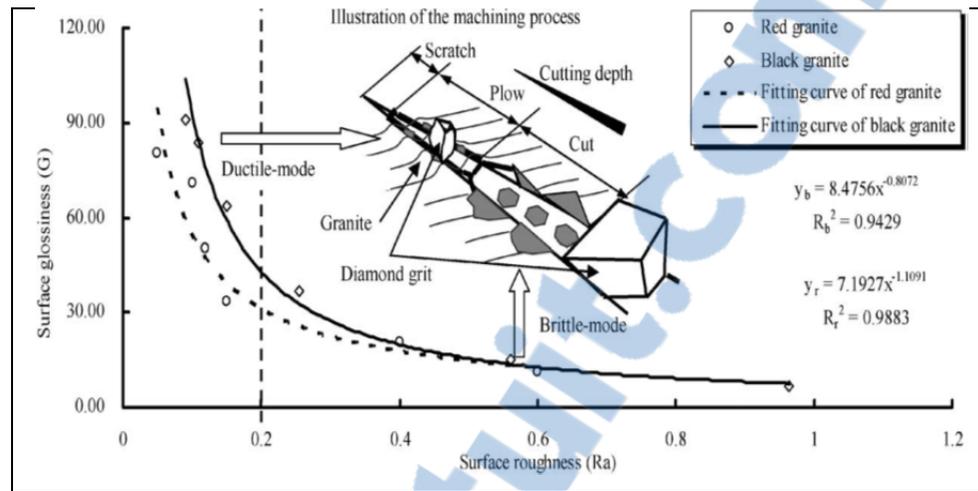


Figure 1.4 La relation entre la rugosité et la brillance
Tirée de Huang *et al.* (2002)

Les deux types de granits de dimensions 400 mm x 400 mm x 20 mm d'épaisseur n'ont pas la même composition minérale. Il est alors important de préciser que le granit noir contient : 5% de quartz, 45% de feldspath et 50% de mica tandis que dans le granit rouge, on retrouve : 25% de quartz, 70% de feldspath et 5% de mica. La figure 1.5 présente la micrographie SEM des six étapes correspondant aux surfaces polies de granit noir.

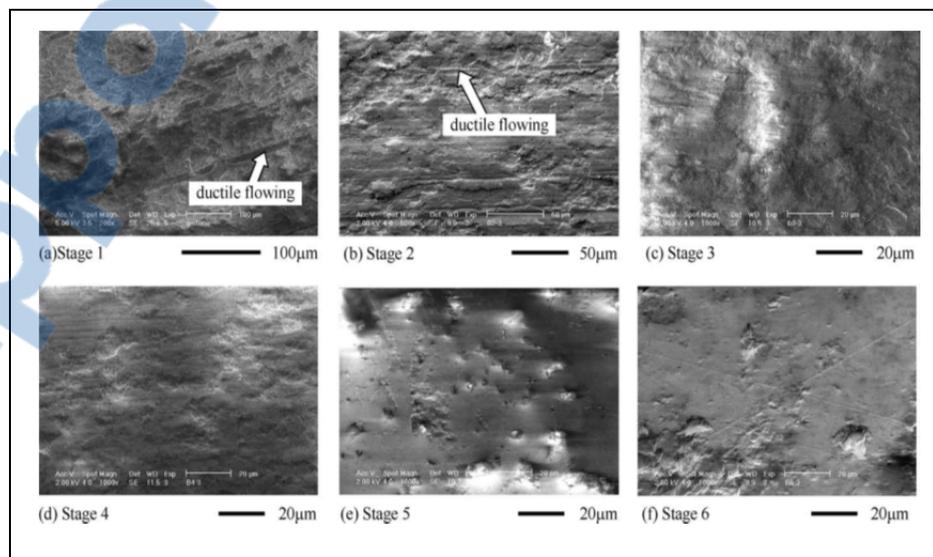


Figure 1.5 Micrographie SEM des surfaces polies de granit noir
Tirée de Huang *et al.* (2002)

La figure 1.6 montre qu'à partir de l'étape 3 jusqu'à 6, la brillance de granit noir est plus élevée que celle du granit rouge. Selon Huang *et al.* (2002), cet état de choses peut être attribuable à la structure plus compacte et fine du granit noir par rapport à celle du granit rouge.

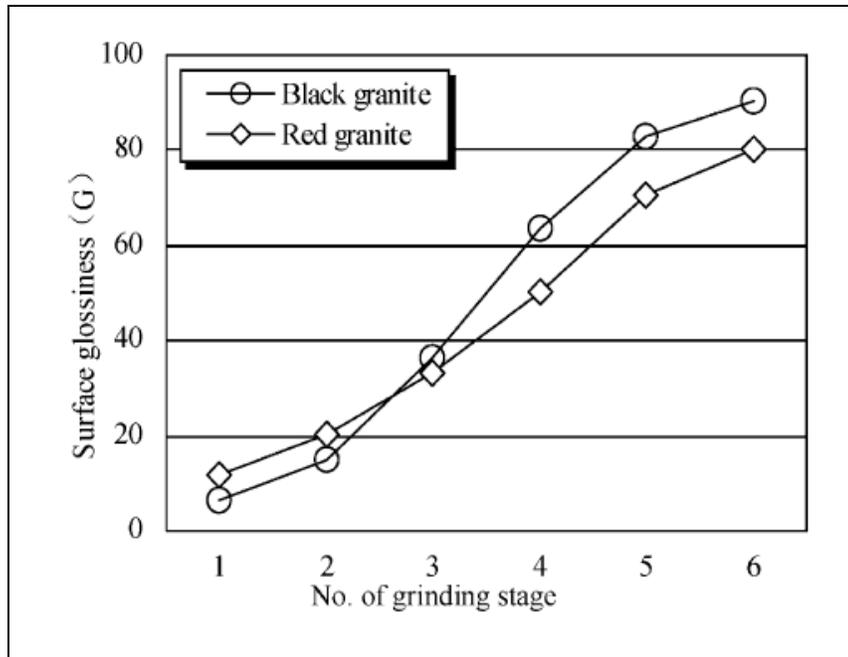


Figure 1.6 La brillance en fonction de différentes étapes
Tirée de Huang *et al.* (2002)

Soulignons que la brillance, considérée comme étant l'un des plus importants critères de qualité des matériaux, dépend principalement de leur fini de surface. Huang *et al.* (2004) mentionnent que dans les processus d'usinage de précision qui sont généralement utilisés pour la fabrication de pierre nécessitant des tolérances serrées et des surfaces lisses, le meulage vertical et le polissage de surface sont exécutés dans la phase finale afin d'obtenir un fini de surface de qualité élevée.

L'étude de Huang *et al.* (2004) ont révélé que les interactions interfaciales entre le disque de diamant et le granit doivent être soigneusement étudiées afin d'obtenir le rapport coût-efficacité. L'expérimentation consiste en un meulage à pression constante réalisé sur une

machine spécialement conçue, où un disque diamanté de 80 mm de diamètre extérieur et 10 mm de diamètre intérieur a été installé sur la broche verticale tournant 4000 rpm. L'échantillon de granit est monté sur une table horizontale. La charge normale exercée sur le disque de diamant est 80 N. Les six outils abrasifs diamantés utilisés ont les mêmes grosseurs de grains que dans l'étude précédente, soit les grits: 150, 300, 500, 1000, 2000, et 3000. L'eau du robinet est utilisée comme liquide de refroidissement lors des essais. Dans ce cas, trois types de granits (noir, blanc et rouge) de dimensions 100 x 50 x 20 mm ont été utilisés pour l'expérimentation. La réponse de la température sur la surface de granit a été mesurée en utilisant un thermocouple en feuille rectifiée, constitué par une paire de fer-constantan de 100 µm d'épaisseur, isolé par 20 µm de feuilles de mica prises en sandwich entre deux morceaux de granit. L'étude a démontré que la brillance augmente quand la rugosité diminue.

1.3 Caractéristiques des matériaux à polir

Les matériaux couramment polis par les industries de transformation de granit sont les suivants : le granit, le marbre et le quartz.

1.3.1 Le granit

Le granit, étant une roche non calcaire et d'aspect cristallin, offre une grande résistance et prend un beau poli. Sa densité est comprise entre 2.6 et 2.8. Sa résistance à la traction est faible et se situe entre 7 et 25 MPa. Sa résistance à la compression uniaxiale est meilleure que celle des bétons à haute performance et varie entre 100 et 300 MPa. Il est incombustible et ne fond qu'à une température de 1500°C. Il résiste bien aux environnements agressifs sans qu'il ait un changement de sa couleur. Cette propriété est due au quartz et au feldspath qui sont inaltérables. Il est très résistant aux chocs, aux égratignures et à l'usure. C'est un matériau non conducteur et amagnétique. Les acides, sauf l'acide fluorhydrique, n'ont que très peu d'action sur lui. Le granit ne se détériore pas contrairement aux bois et à d'autres matériaux. De plus, il a une bonne résistance à l'érosion. La chaleur des plats ou les tâches de nourriture n'endommagent pas une table en granit d'aucune manière. Aussi, le granit

possède de bonnes qualités esthétiques et une excellente stabilité dimensionnelle. Les applications de granits se retrouvent dans les domaines suivants : pavés, bordures de trottoirs, dalles, ballasts, comptoirs de cuisine et de salle de bain, tours de bain, manteaux de foyer, escaliers intérieurs et extérieurs, monuments, revêtements muraux, vanités de salle de bain, etc.

A. Composition minérale du granit

Le granit est essentiellement composé de minéraux (Figure 1.7) dont les grains sont tous visibles à l'œil nu. Ces grains ne possèdent pas toujours une forme assez nette, mais possèdent presque la même taille et sont emboîtés les uns sur les autres. Huang *et al.* (2002) mentionnent que la brillance d'une pierre polie dépend principalement de sa composition minérale et du fini de surface. D'où l'importance de mettre en relief les constituants minéraux du granit.

La composition minérale du granit se présente comme suit:

- le quartz qui est un minéral composé de dioxyde de silicium de formule SiO_2 (silice). Il se présente soit sous la forme de grands cristaux incolores, colorés ou fumés, soit sous la forme de cristaux microscopiques d'aspect translucide. Il renferme constamment des inclusions liquides qui le rendent souvent laiteux, enfumé, bleuâtre, jaunâtre (inclusion d'oxyde de fer hydraté) ou rougeâtre (oligiste). C'est le minéral qui s'est consolidé le dernier;
- le feldspath qui constitue la plus grande partie de la roche. Nous avons le feldspath potassique dominant qui est l'orthose. C'est le plus important groupe des minéraux de la croûte terrestre. Il est le plus souvent opaque, blanc, gris, rose clair. Il est hautement cristallisé et a la propriété de former des macles et de rayer le verre. On peut le distinguer du feldspath alcalin qui est souvent translucide, blanchâtre ou rose;

- le mica qui est caractérisé par sa structure feuilletée. Il se présente en paillettes irrégulières, déchiquetées, rarement hexagonales. Il est généralement de couleur noir, brun ou vert noirâtre (biotite) ou blanchâtre (muscovite).

Outre ces trois minéraux de base, le granit contient d'autres minéraux (grenat, zircon, magnétite, etc.) qui permettent d'obtenir une variété importante de granits. Il existe plus de 500 couleurs de granit.

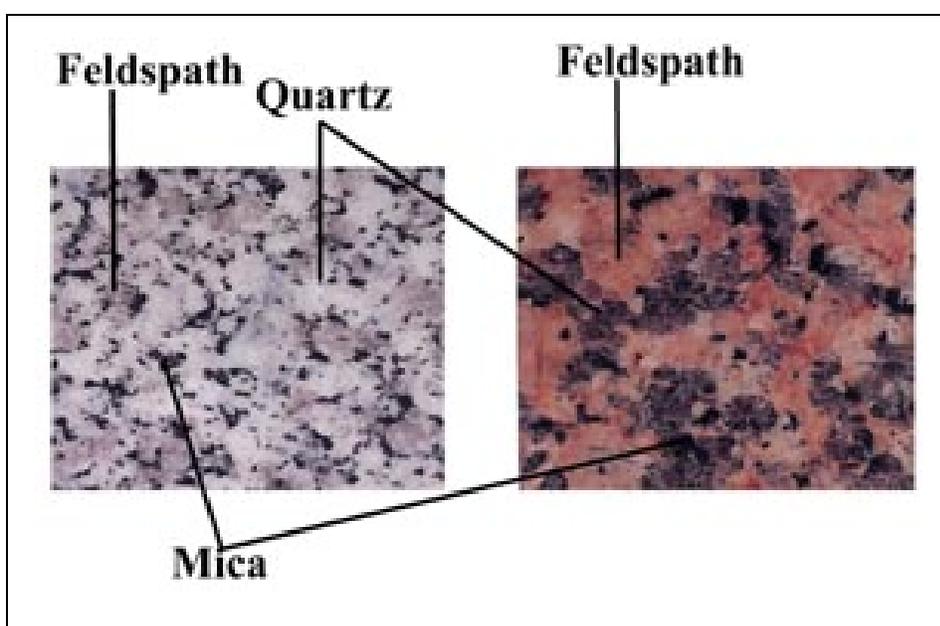


Figure 1.7 Composition du granit
Tirée de <http://www.societemp.fr>

Le tableau 1.1 présente les coefficients pondérés des minéraux constituant les quatre types de granit sélectionnés. Plus le granit contient du quartz, plus la structure est cristalline. L'analyse descriptive de la roche provient des observations faites à l'œil nu, à la loupe ou au microscope, à savoir: l'identification des matériaux présents, la taille et arrangement des minéraux et des vides associés (texture), la proportion des différents composants, les défauts et les différentes fissures et l'état d'altération. L'analyse minéralogique, par diffraction de rayon-X par exemple, permet alors d'avoir un œil sur l'altérabilité de la roche et son aptitude au collage, éventuellement son abrasivité.

Tableau 1.1 Teneurs massiques pondérées des minéraux constituant les granits
Adapté de Xie et al. (2007)

	Granite A IndiaRed	Granite B DawuRed	Granite C Neimon Black	Granite D Shinan Gray
Quartz	42 %	19 %	65 %	29%
Orthoclase	55 %	58 %		
Plagioclase		19 %		66%
Pyroxène			30 %	
Hornblende			5 %	
Mica	3 %	4 %		5%

Les minéraux cristallisent dans un certain ordre (Voir Figure 1.8): d'abord les micas, puis les feldspaths, et enfin le quartz. Notons que certains granits naissent de la fusion de la croûte continentale lors d'une collision entre deux plaques tectoniques.

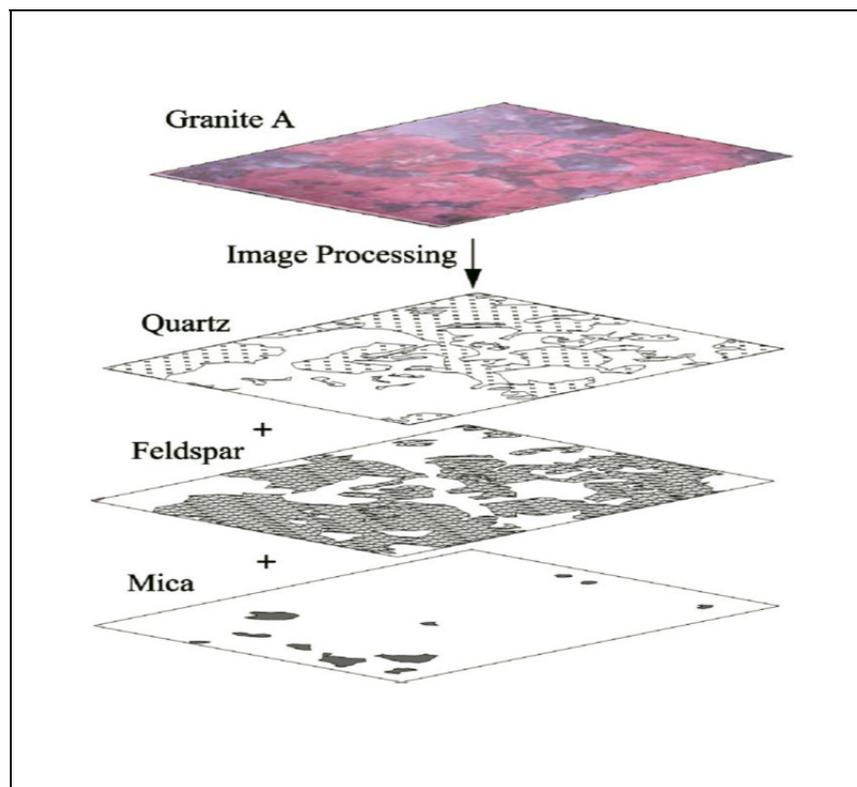


Figure 1.8 Minéraux composant le granit
Tirée de Xie et al. (2007)

B. Quelques variétés de granits

Les couleurs des granits sont multiples et variées. C'est ainsi qu'on retrouve des couleurs douces et unies (gris sarde, porrino, blanc sarde, etc.) qui reculent face aux couleurs plus chaleureuses telles que tropical Gold, Madura Gold, Fantasy Gold et Shivaqui. La figure 1.9 présente trois types de granits provenant de différents endroits tels que Québec, Inde, Brésil, Norvège, Finlande, etc. Précisons que les granits noirs viennent d'Afrique, d'Inde ou encore de Chine. Ils sont toujours préférés en finition brillante (poli brillant).

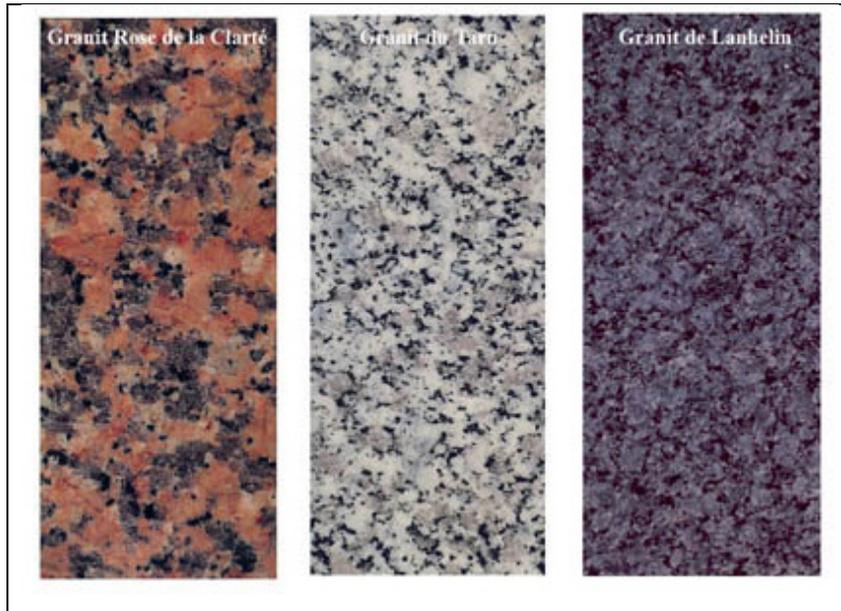


Figure 1.9 Trois différentes sortes de granits
Tirée de <http://www.societemcp.fr>

1.3.2 Le marbre

Le marbre, roche métamorphique calcaire de haute densité et bien cristallisée, est formé par la liquéfaction et la cristallisation de roches sédimentaires et résiste à de hautes températures. C'est une pierre naturelle dont les couleurs proviennent souvent de la présence d'oxydes métalliques. On peut aussi dire que le marbre est une matière rare, lourde, dure, fragile, noble et prestigieuse utilisée depuis l'antiquité. Il se prête parfaitement au polissage grâce à leur contenance en calcite et dolomite. Les marbres proviennent du monde entier. Il existe une infinité de coloris de marbre en fonction de leur région ou pays d'extraction. On les retrouve dans les applications suivantes: comptoirs de cuisine et de salle de bain, seuils de douche, manteaux du foyer, vanités de salle de bain, escaliers intérieurs, planchers, etc.

1.3.3 Le quartz

Le quartz, considéré comme un produit synthétique de haute technologie, combine résistance et durabilité. Il est composé de véritables minéraux mélangés (93%), de la résine acrylique

(7%) et des colorants. Il est non poreux, résistant aux taches, de couleur uniforme et antibactérien. C'est une matière hygiénique et facile à nettoyer. Il est disponible dans une multitude de couleurs qui s'intègrent facilement à tous les types de décors. Le quartz offre une luminosité et une originalité qui séduisent. Résistant à la chaleur, aux égratignures et aux tâches, il offre un lustre naturel qui dure toujours (pas besoin d'utiliser un scellant ou un vernis). Grâce à sa solidité, on peut cuisiner directement sur le comptoir de quartz sans craindre de l'abîmer. Tout comme le granit, le quartz ne se détériore pas contrairement aux bois et tout autre matériau. Le quartz est plus dispendieux que le granit. On le retrouve dans les applications suivantes : comptoirs de cuisines et de salles de bain, vanités de salle de bain, revêtements muraux, seuils de douche, planchers, etc.

1.3.4 Comparaison entre le granit, le quartz et le marbre

Une fois les caractéristiques des trois matériaux présentés, on peut maintenant observer les différents aspects et couleurs de ces matériaux afin de mieux les distinguer. De plus, on peut mentionner que le granit présente une très large marge de prix pouvant répondre à différents budgets. Le quartz étant plus dispendieux que le granit, le marbre, quant à lui, dépendamment de sa rareté, son prix peut varier de abordable à très dispendieux. Les aspects et couleurs des trois matériaux sont présentés sur la figure 1.10.



Figure 1.10 Échantillons d'aspects et de couleurs de granit, quartz et marbre
Tirée de <http://www.granitevolution.com>

1.4 États de surface

L'état de surface d'une pièce influence considérablement les propriétés comme la résistance à la fatigue, la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure, les comportements en frottement, l'esthétique, etc. Mentionnons que l'état de surface influence aussi grandement le bon fonctionnement des organes de machine. Palanikumar (2012) souligne que l'apparence esthétique, la capacité de charge, la lubrification, la résistance à la corrosion et à l'usure dépendent de l'état de surface. Il est à noter que les produits d'ingénierie exigent de plus en plus un bon état de surface et une bonne précision dimensionnelle, bien qu'il soit pratiquement impossible d'obtenir une surface parfaite. Soulignons que les surfaces obtenues lors des opérations de fabrication ont toujours des irrégularités et des imperfections.

L'état de surface obtenu par polissage dépend fortement de la granulométrie de l'outil abrasif. Notons que d'autres paramètres pouvant affecter l'état de surface sont : le débit de matière, la méthode de polissage et le type de matériau.

1.4.1 Défauts de surface

L'état de surface est un terme général qui englobe d'une part, l'état géométrique de la surface réalisée et d'autre part, l'état physico-chimique de cette surface définie par différentes caractéristiques de la couche superficielle (Balazinsky, 2013). Précisons que 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. Balazinski (2013) et Ben Mhenni (2007) classent les imperfections de surface selon les ordres suivants :

- 1) les défauts de 1^{er} ordre : écarts de forme et de position tels que : la triangulation, la conicité;
- 2) 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);
- 3) 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.

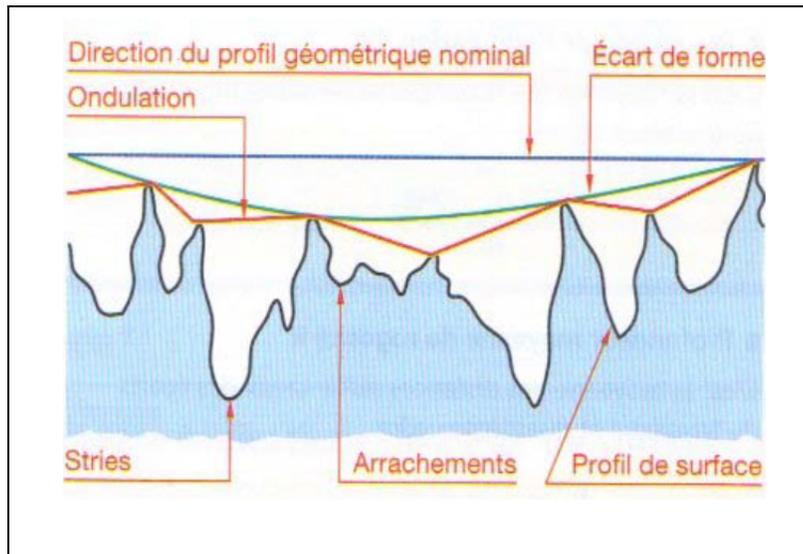


Figure 1.11 Défauts de surface
Tirée de <http://sti-beziers.fr>

Selon Balazinski (2013), la qualité de surface des pièces mécaniques est caractérisée par la somme des écarts du 1^{er} au 4^e ordre. Les défauts de surface liés à la structure et le réseau cristallin du matériau sont des défauts du 5^e et 6^e ordre. Ils sont aussi importants parce qu'ils déterminent le comportement superficiel des métaux.

1.4.2 Quelques paramètres de rugosité de surface

La qualité de surface d'une pièce est caractérisée par une variété de paramètres parmi lesquels on retrouve:

- la rugosité moyenne arithmétique (R_a) qui est la moyenne des valeurs absolues des ordonnées de profil de rugosité;
- la rugosité moyenne quadratique (R_q) qui est la moyenne des moyennes de racine carrée des ordonnées de profil de rugosité;
- la hauteur des crêtes du profil (R_p) qui est la hauteur la plus élevée du profil de rugosité d'une longueur de base;

- la profondeur maximale de vallée du profil (R_v) qui est la valeur du plus profond creux de rugosité d'une longueur de base;
- la hauteur moyenne du profil (R_z) qui est la somme de R_p et R_v ;
- la hauteur totale du profil (R_t).

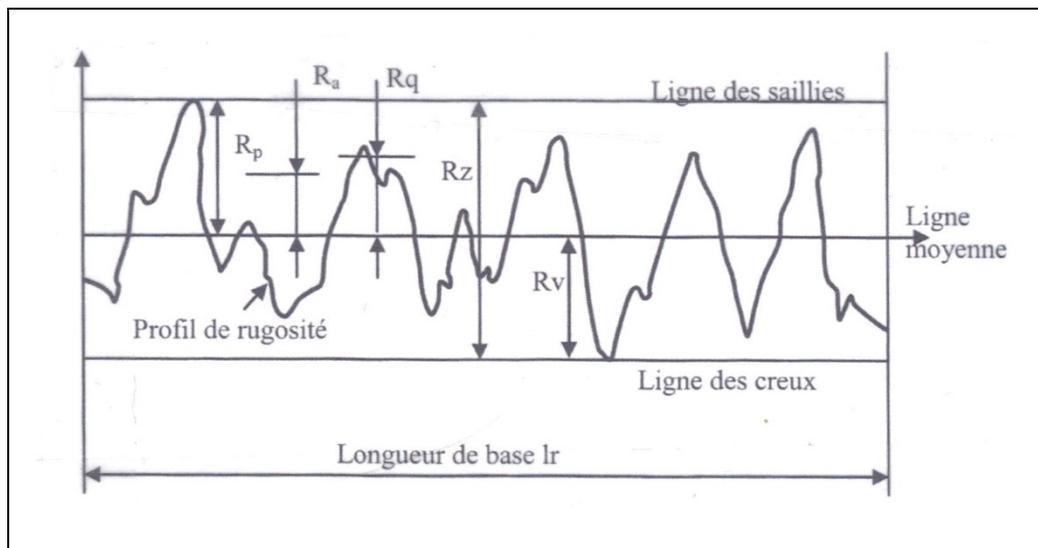


Figure 1.12 Paramètres d'état de surface
Tirée de Ben Mhenni (2007)

L'étude de Kouam *et al.* (2013) sur les granits noir et blanc ont révélé que la rugosité diminue lorsque la vitesse de coupe augmente. Ce phénomène s'observe sur les deux types de matériaux en étude. Ainsi, le fini de surface s'améliore lorsque la vitesse de coupe augmente (Voir Figure 1.13).

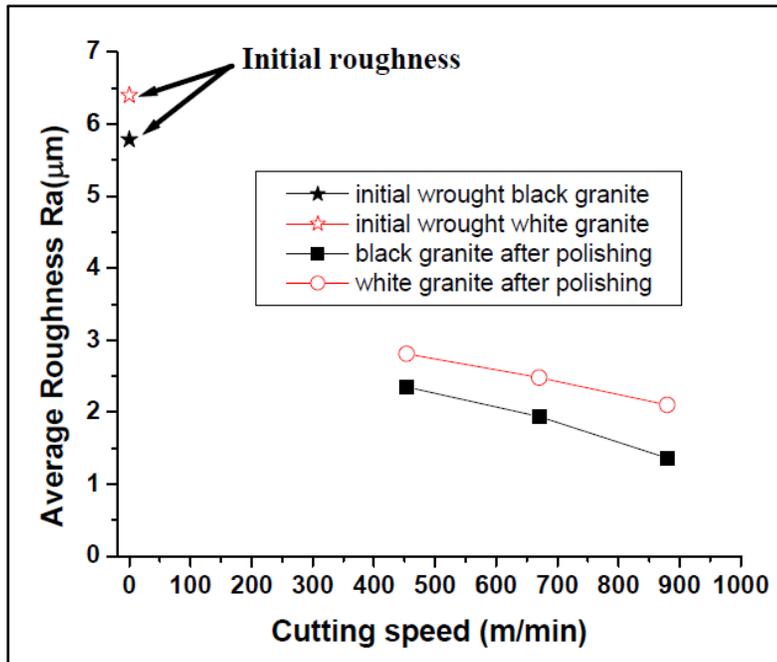


Figure 1.13 Rugosité moyenne Ra versus la vitesse de coupe
Tirée de Kouam *et al.* (2013)

Les paramètres associés au taux de portance (Voir Figure 1.14), quant à eux, définissent précisément la forme du profil de rugosité en calculant le pourcentage de matière que l'on observe à différents niveaux. La courbe d'Abbott-Firestone définit la forme réelle du profil. Les paramètres ci-dessous permettent de décrire cette courbe selon la norme ISO 13565 (Kanguem, 2013). Il s'agit de :

- R_k : profondeur de la partie centrale du profil de rugosité (profondeur du profil écrêté);
- R_{pk} : hauteur moyenne des pics saillants situés au-dessus du profil écrêté (hauteur des pics éliminés);
- R_{vk} : hauteur moyenne des creux situés en dessous du profil écrêté (hauteur des creux éliminés);
- Mr_1 : taux (%), déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les pics saillants du profil écrêté (taux de longueur portante);
- Mr_2 : taux (%), déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les creux profonds du profil écrêté (taux de longueur portante).

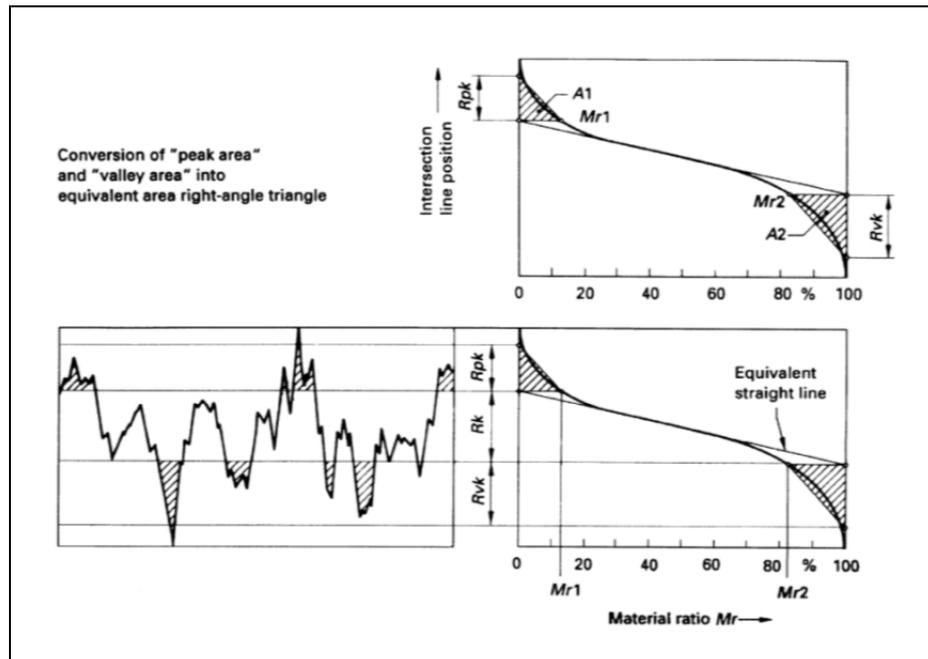


Figure 1.14 Paramètres R_k , R_{pk} et R_{vk} (ISO.13565-2, 1998)
Tirée de Kanguem (2013)

1.4.3 Rugosités de surface obtenues par procédés de fabrication

La rugosité est l'ensemble des irrégularités de surface, de pas relativement petit, correspondant aux empreintes laissées sur la surface réelle par le procédé d'élaboration. Généralement, il existe une relation entre la rugosité et la précision de la fabrication des pièces. Autrement dit : « une pièce avec un bon fini de surface n'est pas nécessairement précise, tandis qu'une pièce précise doit forcément avoir un bon fini de surface » (Balazinski, 2013). Les spécifications de la rugosité de surface doivent être déterminées à partir de l'application fonctionnelle de la surface, afin de garantir aux produits la qualité demandée. Selon Palanikumar (2012), les facteurs majeurs affectant la rugosité de surface sont : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe, Le tableau 1.2 présente les indices de rugosité en fonction des procédés de fabrication. Nous constatons que les valeurs économiques de rugosité que le polissage mécanique nous permet d'obtenir varient de $0,025 \mu\text{m}$ à $0,4 \mu\text{m}$ comparativement à la rectification de précision dont les valeurs économiques varient de $0,1 \mu\text{m}$ à $0,8 \mu\text{m}$.

Tableau 1.2 Procédés de fabrication versus rugosité de surface
Adapté de <http://sti-beziers.fr>

Procédé d'obtention	Rugosité moyenne Arithmétique : Ra												
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	
Moulage en sable	■	■	■	■									
Moulage en cire perdue				■	■	■	■	■					
Moulage en moule métallique				■	■	■	■	■					
Moulage sous pression				■	■	■	■	■	■				
Matriçage à chaud		■	■	■	■	■	■	■	■				
Fraisage carbure					■	■	■	■	■	■			
Tournage ébauche	■	■	■	■									
Tournage finition				■	■	■	■	■	■				
Tournage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■			
Perçage au foret			■	■	■	■	■	■	■				
Alésage à l'outil				■	■	■	■	■	■				
Alésage à l'alésoir				■	■	■	■	■	■	■			
Alésage outil diamant carbure					■	■	■	■	■	■			
Brochage				■	■	■	■	■	■	■			
Rectification de production					■	■	■	■	■	■			
Rectification de précision							■	■	■	■	■	■	
Rodage au rodoir								■	■	■	■	■	■
Polissage mécanique								■	■	■	■	■	■
Superfinition										■	■	■	■
Galetage								■	■	■	■	■	■

Mentionnons que tous les accidents de la surface participent à la rugosité et diminuent la qualité du polissage. Les particules arrachées du granit au cours du polissage interviennent à leur tour comme agent autodestructeur. La qualité de la surface polie limite obtenue avec les abrasifs les plus fins est liée à la densité des éléments capables de rompre l'uniformité de la surface.

1.4.4 Autres facteurs affectant la rugosité de surface

Selon Palanikumar (2012), la rugosité est aussi influencée par:

- La précision et la rigidité de la machine-outil;
- Le matériau constituant la pièce à usiner;
- La méthode de formation de copeau;
- La géométrie de l'outil de coupe et la condition dans laquelle l'outil opère;

- Les conditions de coupe telles que vitesse de coupe, vitesse d'avance et la profondeur de coupe;
- Le type de fluide de coupe utilisé;
- Le fini requis sur la pièce à usiner.

1.5 Émissions de poussières

La quantité de poussières générées est influencée par des facteurs tels que le type de matériau, la température et le mode de formation de copeau associée. Balout, Songmene et Masounave (2007) mentionnent que les matériaux fragiles génèrent moins de particules fines (diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 μm) que les matériaux ductiles pendant l'usinage. Cette influence est attribuable à la différence entre la longueur de contact d'outil (zone de déformation et de friction secondaire) et la déformation plastique élevée qui ait lieu au cours de l'usinage des matériaux ductiles.

1.5.1 Exposition aux poussières de granits

Le risque d'exposition aux particules de granit en milieu de travail existe pendant l'extraction, le sciage et dans l'environnement des travaux de construction (Ahmad *et al.*, 2011 ; Kouam *et al.*, 2013). Des millions de travailleurs sont à risque d'exposition à des particules de granit qui contiennent principalement de la silice. Ces particules sont connues comme ayant principalement des tailles micrométriques, aussi bien que nanométriques (Khettabi, 2009).

Même si les travailleurs sont exposés à de bas niveaux de poussières de granit sur une longue période de temps, il existe un risque potentiel de différents types de maladies respiratoires graves. Selon Ahmad *et al.* (2011), l'omniprésence du granit dans l'industrie de la construction fait en sorte que des millions et des millions de travailleurs sont grandement exposés à la silice cristalline. Les particules respirables de granit ont été observées dans l'environnement de travail lié au granit, mais on ne sait pas la prévalence de nanoparticules.

Il n'y a pas d'informations sur le rôle des microparticules et des nanoparticules dans l'étiologie des maladies pulmonaires causées par les poussières de granit.

La poussière générée par le granit contenait des fibres minérales qui semblaient morphologiquement être amphiboles. La nature physico-chimique des nanoparticules pourrait être responsable de la cytotoxicité accrue par rapport à celle des microparticules de granit. La fibrose a été bien découverte chez les travailleurs de granit exposés professionnellement aux poussières générées à partir de granit connu pour être riche en silice (Ahmad *et al.*, 2011).

Mentionnons que dans l'industrie de construction l'exposition à la silice continue d'être un danger important et reste une préoccupation pour la santé des travailleurs de la construction. Des expositions élevées au quartz ont été signalées dans plusieurs activités de construction, bien que les échantillons soient souvent relativement petits et dispersés à travers un large éventail d'activités de construction.

1.5.2 Émission de particules PM 2.5 lors du polissage du granit

L'étude de Kouam *et al.* (2013), a permis de comparer l'émission de particules (PM_{2.5}) en polissant deux granites (noir et blanc). Mentionnons que le granit blanc contient une concentration en Si (environ 50%) tandis que le granit noir n'en contient qu'une faible concentration (environ 10%).

Il est important de préciser que l'objectif principal de cette étude est d'examiner l'influence des conditions d'usinage sur les émissions de poussières pendant le polissage à sec de granits noirs et blancs (Voir Figure 1.15). L'utilisation de DUST TRAK II, muni d'un impacteur (filtre) de 2,5 µm, a permis de mesurer ces émissions de poussières. La taille des grains des particules a été évaluée en utilisant la technique de diffraction des rayons-X (Kouam *et al.*, 2013).

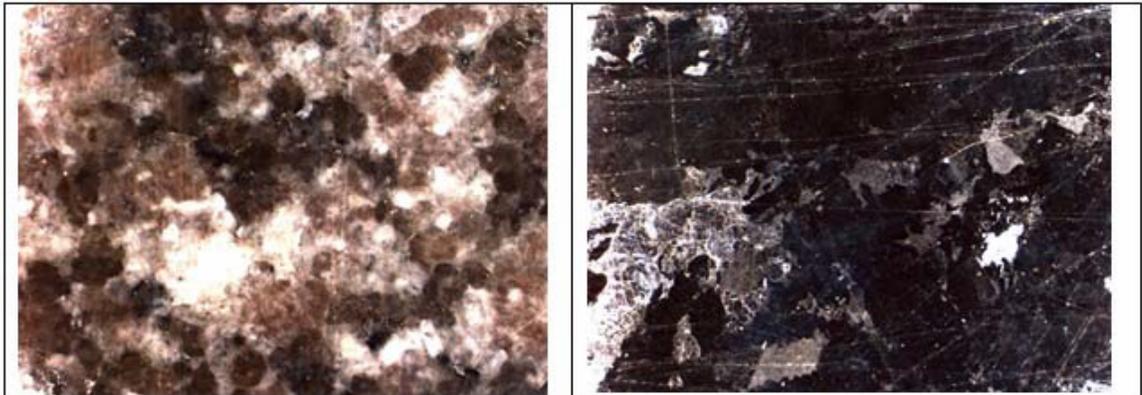


Figure 1.15 Aspects des granits blanc et noir
Tirée de Kouam *et al.* (2013)

L'étude de Kouam *et al.* (2013) a été effectuée dans les conditions suivantes : trois différentes vitesses de coupe (880, 670 et 450 m/min), une charge de 2,5 kg, un grit de 60 (grains abrasifs), un temps de polissage de 1 min. Il a été constaté que le granit noir génère plus de particules que le granit blanc.

1.5.3 Instruments de mesure pour la captation des particules générées

Selon Khettabi (2009), la mesure de la concentration de poussière consiste à la captation, la collecte, la caractérisation et l'analyse des particules. Afin de mieux étudier les particules de poussières générées en usinage, il est important d'isoler l'environnement pour ne capter que les particules de poussières produites par le procédé de coupe. Les différents appareils de mesure utilisés pour la captation de poussières se présentent comme suit:

- le photomètre laser (TSI 8520 Dustrack), a été longtemps utilisé comme instrument à lecture directe pour mesurer la concentration massique moyenne de poussières. Cet appareil est équipé avec des impacteurs qui permettent de sélectionner la taille maximale des particules à étudier. Soulignons que le Dustrack est très efficace, mais ne donne que la concentration massique et ne permet pas de connaître la distribution de taille des particules;

- le spectromètre APS (aerosol particle sizer), quant à lui, mesure la distribution en taille de particule de 0,5 μm à 20 μm . Il accélère les aérosols échantillonnés à travers un orifice accélérateur. La taille aérodynamique détermine le taux d'accélération de la particule. L'accélération est plus élevée pour les particules les plus petites à cause de la diminution de l'inertie;
- pour ce qui est du SMPS (scanning mobility particle sizer), il est important de préciser que cet instrument permet de mesurer la distribution de taille de 2,5 nm à 1000 nm en utilisant la technique de détection de la mobilité électrique des particules.

1.6 Normes de sécurité en milieu de travail

Le polissage des granits, qu'il soit mécanique ou manuel, exige une certaine précaution afin de permettre aux travailleurs d'effectuer leurs ouvrages dans de bonnes conditions. Les normes de sécurité doivent être établies de manière à assurer une protection aussi bien individuelle que collective.

La protection individuelle lors du polissage amène les travailleurs à porter des lunettes de sécurité, des protections auditives (coquilles ou bouchons), des gants de sécurité, des masques anti-poussières et, si on juge que les conditions de polissage sont sévères, une protection faciale supplémentaire. Il est aussi important de porter un tablier de cuir et des chaussures de sécurité, car comme le souligne Désautels (2010), «le travail en atelier avec des machines-outils fixes exige le respect d'un certain nombre de consignes de sécurité relativement à la tenue vestimentaire et au comportement». Aussi, le personnel chargé des opérations de polissage doit être formé à l'utilisation de toutes les machines et s'assurer de ne jamais dépasser la vitesse périphérique maximum (en m/sec) spécifiée sur les outils abrasifs.

Mentionnons que la priorité en matière de prévention des risques professionnels doit être donnée à la protection collective, afin de réduire au maximum les émissions de poussières. Il doit exister au sein de la structure une véritable culture de la prévention des risques

professionnels. Les postes de travail générant de la poussière doivent être tous connectés à des dispositifs d'aspiration rejetant l'air à l'extérieur après filtration. La conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO) permettent en effet de supprimer certaines phases d'exposition à la silice (Brasseur, 2012).

Il est important de préciser qu'au Québec et en France, pour ce qui a trait à la silice cristalline, les valeurs limites d'exposition professionnelle réglementaires contraignantes sont fixées par le Code du travail. Elles sont de $0,1 \text{ mg/m}^3$ pour le quartz et de $0,05 \text{ mg/m}^3$ pour la cristobalite et la tridymite pour une exposition de 8 heures par jour (Brasseur et CSST, 2012).

En définitive, pour mieux protéger les travailleurs, la priorité doit être donnée à la mise en place de protections collectives (captage des poussières à la source, isolement des tâches exposant aux poussières de silice) et, enfin, aux protections individuelles (masques).

1.7 Conclusion

Nous avons constaté que le choix des méthodes de polissage dépend du type d'opérations à réaliser. Même si le polissage a été placé au centre de cette étude, il n'en demeure pas moins important de signaler que d'autres travaux d'usinage tels que le sciage, le perçage, etc. sont aussi importants et constituent, par le fait même, des activités préalables aux opérations de polissage.

Les études présentées dans cette revue de littérature ont permis de mettre en relief les différents critères qui régissent les états de surfaces et d'avoir des connaissances appropriées sur les mécanismes des émissions de poussières.

Bien que le granit soit un matériau prestigieux, possédant une durabilité et une résistance à l'usure exceptionnelles, son usinage mérite une attention particulière. Des études ont montré que l'exposition longue et régulière de poussière au travail peut provoquer la toxicité et

l'inflammation des poumons chez les opérateurs de granit. Pour que le travail puisse se dérouler dans de bonnes conditions, il est alors très important de respecter les valeurs limites fixées par les normes et d'assurer avec vigueur la protection individuelle et collective des travailleurs.

Dans le prochain chapitre, nous allons procéder à une analyse plus approfondie des pratiques industrielles dans les industries transformant du granit ici au Québec et ailleurs dans le monde.

CHAPITRE 2

ANALYSE DES PRATIQUES INDUSTRIELLES

2.1 Introduction

De nos jours, de nombreuses entreprises s'orientent de plus en plus dans la transformation des granits. Les technologies utilisées pour réaliser efficacement les différents travaux dépendent des besoins de chaque compagnie. Bien que le polissage soit au cœur des activités réalisées, il n'en demeure pas moins important de mettre en relief les diverses opérations telles que l'extraction, le débitage, le sciage, etc. effectuées au préalable. Il faut tout de même préciser que les travaux courants que la plupart des entreprises réalisent sont : l'extraction, le débitage au fil, le sciage, le polissage mécanique, le polissage manuel, etc. L'ensemble des opérations réalisées dépend de la taille de chaque entreprise. C'est ainsi qu'on peut noter qu'il y a des industries comme A. Lacroix Granit, qui procède à l'extraction de leur propre granit tandis que d'autres, comme Granit Plus achètent des tranches déjà polies. Il faut aussi noter que les domaines d'activités des industries de transformation de granit sont nombreux et diversifiés. Ces activités peuvent aller de la simple réalisation des comptoirs de cuisine et de salle de bain à la fabrication des tuiles et des monuments.

A. Lacroix Granit est une entreprise bien équipée pour réaliser les travaux complexes comme des aménagements paysagers, des monuments de toutes sortes, des tuiles et bien d'autres. Granite Montérégie 2000 est une entreprise de petite taille, spécialisée dans la fabrication des monuments et des comptoirs. Il faut dire qu'en général, toutes ces compagnies sont assez bien outillées pour réaliser le polissage, tant manuel que mécanique. Il va sans dire que l'utilisation du granit pour la cuisine et la salle de bain rehausse la valeur de la maison. Elle assure pour ainsi dire une bonne durée de vie à ces endroits stratégiques. Donc, un bon choix de granit pour le podium de la salle de bain permet d'agencer les textures et couleurs avec la céramique, l'ardoise, ou le revêtement en briquettes ou en pierres naturelles. À la lumière de

tout ça, dans ce chapitre il sera question d'analyser et documenter les pratiques industrielles dans les industries transformant du granit en Estrie, au Québec et ailleurs dans le monde.

2.2 Obtention des bruts de granit pour polissage

Les granits bruts étant un amalgame d'une multitude de minéraux (quartz, feldspath et mica), offrent une beauté exceptionnelle après le polissage. Ils sont d'abord extraits des carrières (souterraines ou à ciel ouvert) pour être ensuite débités afin d'en faire des produits finis.

2.2.1 Extraction du granit

Dans la Marbrerie Charles & Tocchi, l'extraction du granit s'est effectuée pendant des millénaires à l'aide de coins en bois mouillés, remplacés ensuite par des coins en fer enfoncés progressivement à la masse pour faire éclater la roche. De nos jours, on procède à l'abattage des bancs à l'explosif: des trous sont percés à la foreuse pneumatique (leur profondeur peut atteindre 3 à 4 mètres) et bourrés de poudre noire qui, en explosant, détache le bloc de la masse. Le bloc de granit est conduit ensuite à l'atelier pour façonnage. La méthode utilisée par Mochal Granit diffère de celle utilisée par la marbrerie Charles & Tocchi. Elle consiste à l'utilisation d'une scie à haveuse pour l'extraction des blocs calcaires (Voir les figures 2.1a et 2.1b). Précisons que la haveuse est une sorte de scie à chaîne équipée de couteaux tranchants qui fonctionne comme une tronçonneuse à bois. Elle permet de découper une carrière par sciage propre en blocs primaires afin de faciliter l'extraction des pierres calcaires.



Figure 2.1 Scie à haveuse pour l'extraction des blocs calcaires
Tirée de <http://www.mochalgranit.com>

A.Lacroix Granit utilise toutes les techniques d'extraction les plus modernes dans ses dix carrières afin de maximiser la productivité et minimiser les pertes. Son usine de transformation se situant à Saint-Sébastien en Estrie occupe une superficie de 150 000 pi². Elle fait des réalisations de qualité exceptionnelles sur le granit, le marbre et le calcaire avec ses machines de production modernes. Les pierres sont extraites au Saguenay et en Mauricie. La figure 2.2 présente l'aspect d'un bloc de granit brut de forme prismatique extrait du massif.



Figure 2.2 Bloc de granit extrait

2.2.2 Débitage du bloc de granit en tranches

Le bloc de granit présenté à la figure 2.2 est transporté en atelier pour être ensuite débité selon des dimensions bien déterminées. Parmi les techniques de débitage utilisées par la plupart des industries, nous retrouvons : le sciage au châssis, le sciage au fil diamanté, le sciage au disque diamanté, etc. La compagnie A. Lacroix Granit utilise les techniques de débitage les plus modernes pour découper en tranches les blocs de granit. Avant le débitage, le positionnement du granit se fait sur des morceaux de bois de manière à assurer la stabilité de celui-ci. La masse du bloc est assez suffisante pour assurer le maintien en position. Aucun autre dispositif de maintien en position n'est nécessaire. Il est important de s'assurer que les valves d'eau de refroidissement soient ouvertes avant de débiter le débitage.

A. Sciage au châssis

Mochal Granit utilise un châssis pour trancher le granit. Précisons qu'un châssis est une machine complexe d'installation très onéreuse à forte technologie qui transforme le mouvement rotatif d'un moteur en un mouvement transversal de va-et-vient. Les lames d'acier placées dans un cadre de mouvement alternatif dit aussi armure découpent le bloc de pierre en tranches de 2, 3, 4 cm, etc. par réglage d'écartement des lames. Chez Mochal Granit, le châssis est conçu pour scier jour et nuit des blocs en tranches qui servent ensuite au polissage et à la décoration. Le principe est d'utiliser des lames d'acier parallèles qui ressemblent à des peignes géants dont la descente lente et régulière est assurée par un moteur électrique et d'un mécanisme bielle-manivelle qui transforme le mouvement circulaire du moteur en mouvement alternatif horizontal au niveau du peigne. Comme, on peut observer sur la figure 2.3, les lames utilisées pour les châssis sont en acier et la coupe est facilitée par la lubrification eau + carborundum abrasif. Les lames pour les calcaires et marbres ont des pastilles diamantées et sont lubrifiées à l'eau.

À Marbrerie Charles & Tocchi, un châssis multi-lames découpe des tranches. Ces tranches sont ensuite redécoupées aux dimensions voulues à l'aide d'une débiteuse à disque diamanté

plus petite. Puis elles sont disposées sous une polisseuse, le plus souvent automatique pour polir la surface.



Figure 2.3 Sciage au châssis
Tirée de <http://www.mochalgranit.com>

B. Sciage au disque diamanté

Pour ce qui est du sciage au disque diamanté, Mochal Granit réalise ce type de sciage par l'intermédiaire d'un disque en acier ou en carbone, sur lequel on vient souder des pastilles de diamants. C'est ainsi qu'on retrouve deux catégories de débitage, comme le débitage primaire et le débitage secondaire. Le débitage primaire est celui qui permet de réaliser des tranches épaisses à partir d'un bloc de pierre (Figure 2.4 a et b). Ce type de débitage se fait par passe successive pour le granit et en pleine masse pour les calcaires. Quant au débitage secondaire, il permet de découper des tranches pour la réalisation des carreaux ou bandes de toutes épaisseurs (Figure 2.4 c et d).

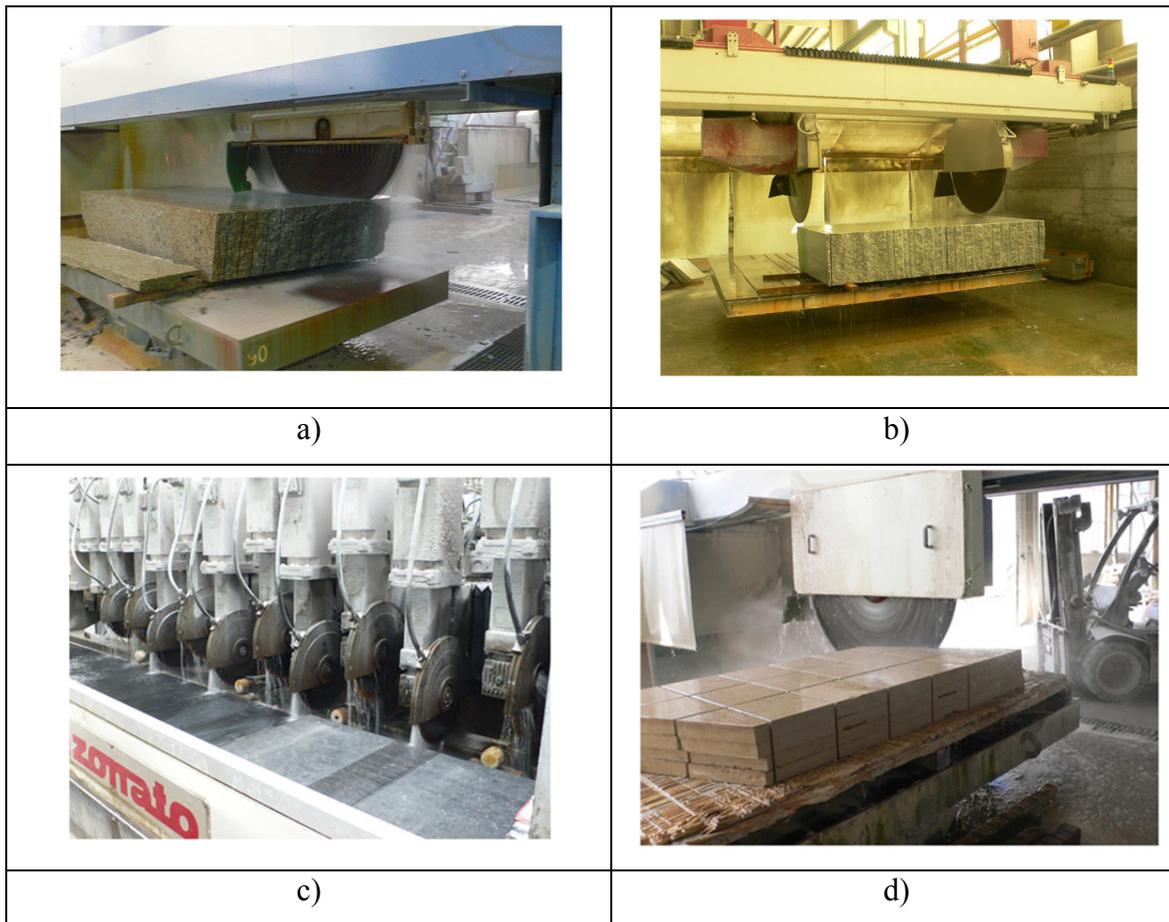


Figure 2.4 Débitage au disque diamanté
Tirée de <http://www.mochalgranit.com>

Marbrerie Charles & Tocchi, A.Lacroix Granit (Figure 2.5 a et b), Granit Plus (Figure 2.5c) et Granit Orfort (Figure 2.5d) utilisent des disques diamantés géants dont le diamètre peut atteindre 3,50 m pour trancher les blocs de granit.

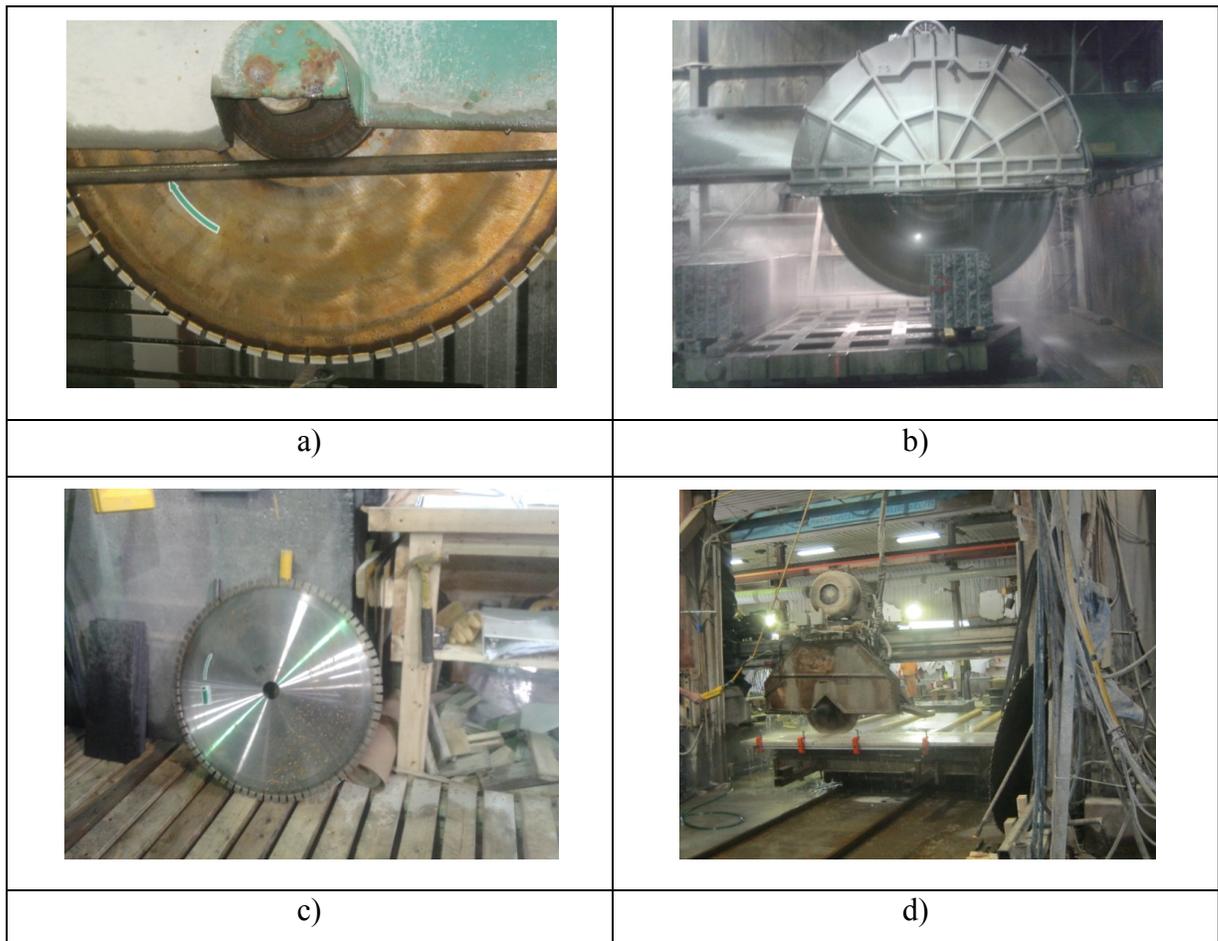


Figure 2.5 Débitage au disque diamanté géant

C. Débitage au fil hélicoïdal

Marbrerie Charles & Tocchi utilise la technique de débitage au fil hélicoïdal. Mentionnons que le bloc de granit est placé sur un châssis pour sa découpe en tranche à l'aide de fil hélicoïdal. L'exécution est basée sur le principe suivant : le fil hélicoïdal entraîne un abrasif qui use le granit; et tout le travail se fait sous un jet d'eau pour refroidir l'ensemble. Le fil est tendu à l'aide d'une série de poulies.

D. Débitage au fil diamanté

Un fil avec des éclats de diamant (Figure 2.8b) est utilisé à la place du fil hélicoïdal. Le débitage se fait sous un jet d'eau pour assurer le refroidissement. Mochal Granit considère le sciage au fil comme étant un procédé qui date de plus d'une vingtaine d'années. Il permet, selon elle, de découper des pans entiers d'une montagne de granits, de pierres calcaires, ou de marbres. Depuis quelques années, ce procédé s'est étendu en application de sciage en usine pour le débitage, l'équarrissage de blocs ou même encore la production de tranches par des machines multifils.



Figure 2.6 Débitage au fil diamanté

Chez A. Lacroix Granit, le bloc de granit est découpé en tranches par un fil diamanté bien tendu, guidé par deux poulies de chaque côté (Figure 2.6a). L'arrosage à l'eau de robinet permet le refroidissement de la pièce et du fil afin d'augmenter la performance de la coupe (Figure 2.7a). Le processus est long parce que le fil descend doucement jusqu'à la fin de sa course.



Figure 2.7 Position de travail du fil diamanté

Les poulies sont positionnées de manière à assurer le bon alignement du fil (Figure 2.8a). Le fil diamanté est présenté à la figure 2.8b. Il est constitué de perles de diamant de bonne qualité insérées sur un câble en acier.

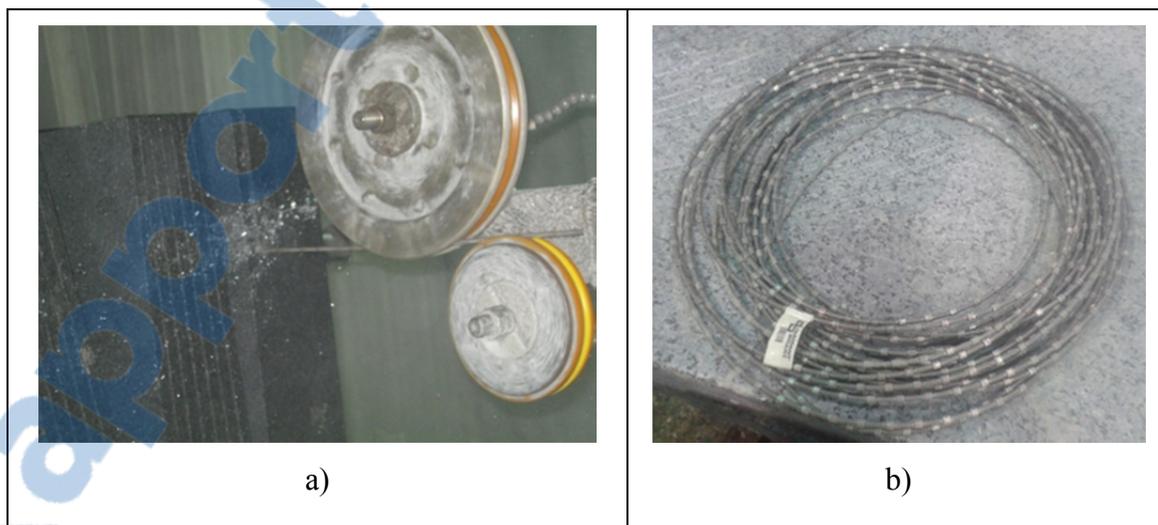


Figure 2.8 Aspect du fil diamanté

E. Débitage multifils

Ce procédé permet de couper plusieurs tranches à la fois contrairement au procédé précédent. On note une certaine augmentation de la productivité. Le principe est le même que le découpage au fil diamanté sauf que dans ce cas, plusieurs fils découpent le bloc de granit afin d'obtenir plusieurs tranches en une opération (Voir Figures 2.9 et 2.10). L'arrosage est nécessaire pour refroidir la zone de coupe.

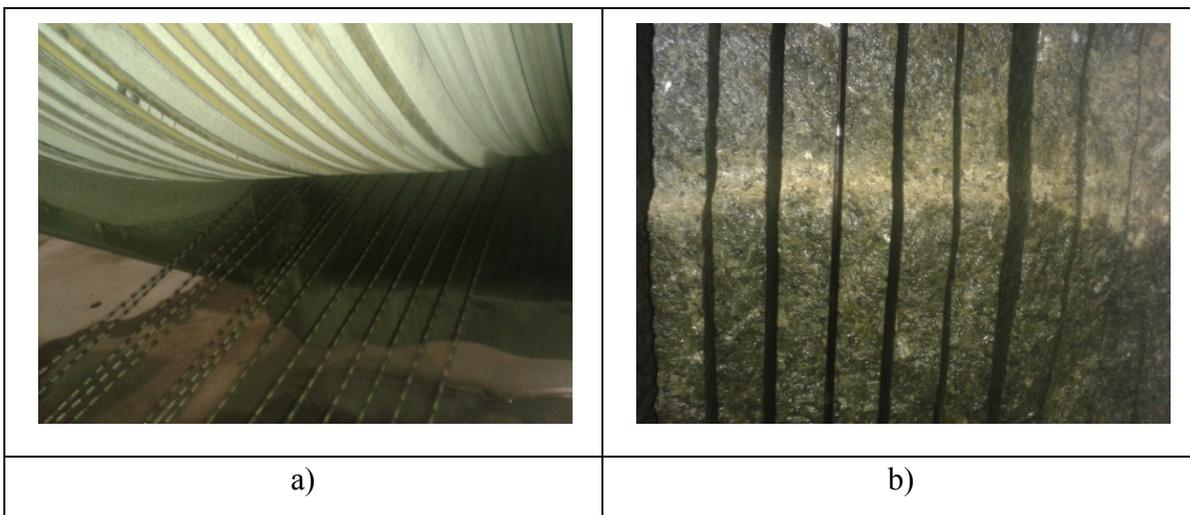


Figure 2.9 Position des fils pour débitage multi-fils

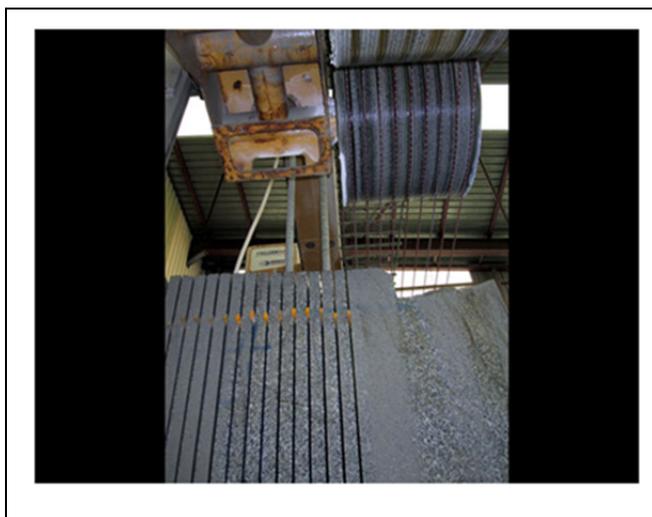


Figure 2.10 Débitage multi-fils
Tirée de <http://www.mochalgranit.com>

La tranche de granit présente un bel aspect une fois l'opération terminée (Figure 2.6). Elle n'est, certes, pas comparable à un fini poli, mais ce type de fini est, tout de même, recherché pour certaines applications.

2.3 Polissage mécanique des granits

La plupart des industries de transformation sont assez bien équipées pour réaliser le polissage mécanique sur le granit. Ce type de polissage, comme présenté dans la revue de la littérature, peut être réalisé autant sur des machines conventionnelles que sur des machines à commandes numériques CNC.

2.3.1 Polissage sur machines conventionnelles

Polissage de grandes surfaces

Marbrerie Charles & Tocchi utilise une machine à têtes multiples pour polir les surfaces de granit. L'entreprise mise sur la productivité en disposant les pièces sur une grande surface de travail (Voir Figure 2.11a). La machine est programmée de manière à réaliser les travaux désirés un après l'autre. Chaque tête est équipée d'un outil abrasif.

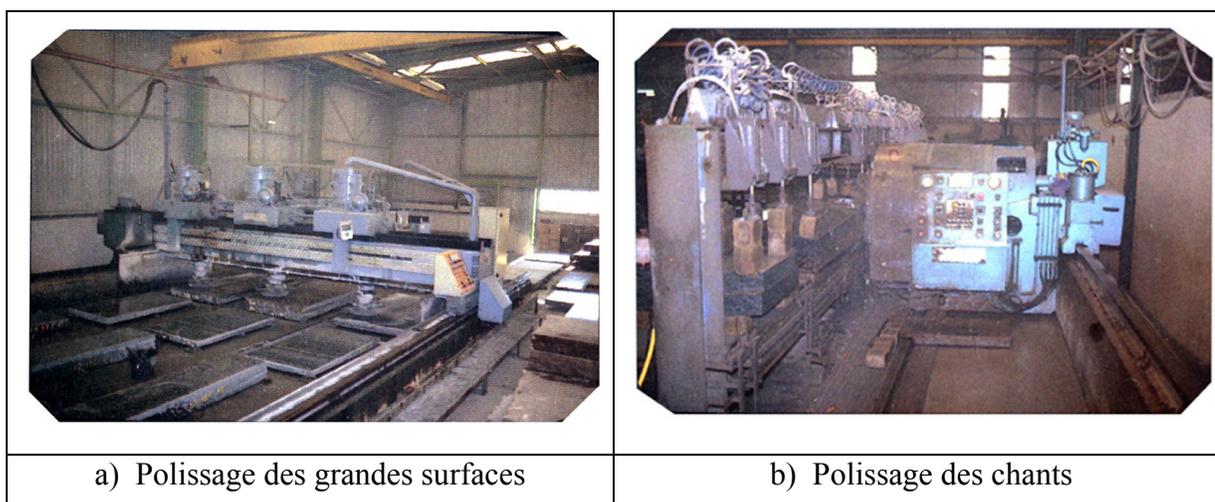


Figure 2.11 Polisseuses à têtes multiples

Tirée de <http://www.Societemcp.com>

Marbrerie Charles & Tocchi utilise une machine dédiée pour le polissage des chants (Voir Figure 2.11b). Cette machine est conçue pour avoir une course moins grande. Ce qui permet de faire une économie de temps et d'espace.

Chez A. Lacroix Granit, les grandes surfaces sont polies sur la polisseuse Breton qui est un train de polisseuses munies de plusieurs têtes (Figure 2.12). Chaque tête est dotée d'une broche assurant le mouvement de rotation simultané de plusieurs outils abrasifs de même grosseur de grain (grit). La pression exercée par les outils abrasifs sur la surface usinée assure le polissage de la pièce. Cette pression est de l'ordre de 1 à 3 bars selon les différentes têtes de la polisseuse et l'état d'usure des outils abrasifs. La vitesse de polissage est en moyenne de 3 m/min.



Figure 2.12 Polisseuse Breton

Les outils abrasifs utilisés (Figure 2.13e et 2.13f) sont conçus de manière à bien épouser la surface usinée dans toutes les directions possible afin d'assurer un bon polissage. La grosseur de grain pour ce type d'abrasifs varie de 30 à 2500. Notons que le plus petit nombre signifie un abrasif à gros grains tandis que le nombre le plus élevé représente un abrasif à grain fin.

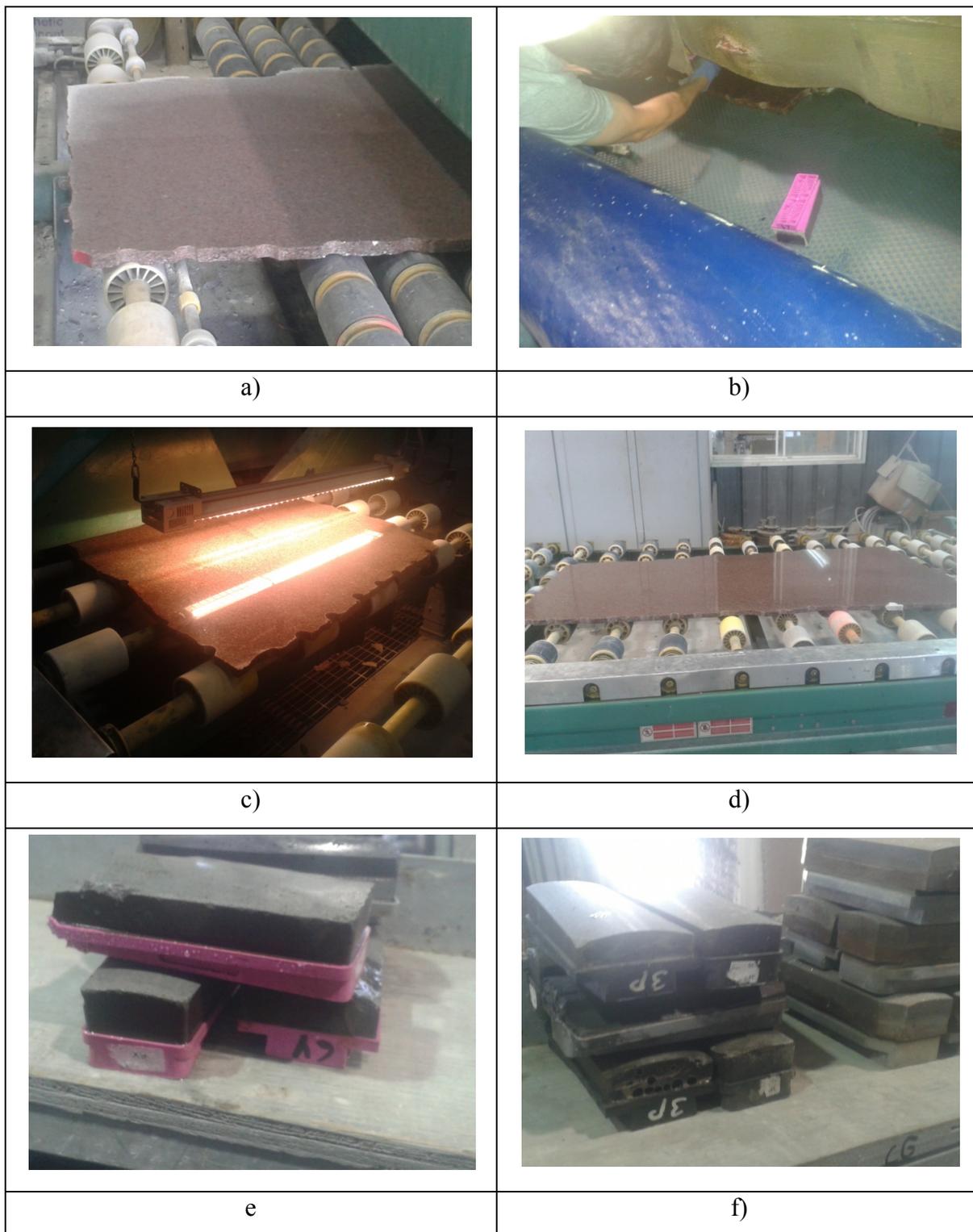


Figure 2.13 Polissage mécanique sur la polisseuse Breton

À la figure 2.13a, on observe le déplacement de la tranche de granit débitée et son entrée dans la polisseuse Breton. Il est important de mentionner que les trois premiers postes (têtes) de la polisseuse sont munis de meules diamantées de gros grains tandis que les trois derniers sont équipés de feutres afin d'obtenir le fini poli désiré. L'opérateur peut arrêter à tout moment la polisseuse pour procéder au remplacement de l'outil abrasif défectueux (Figure 2.13b). On procède à une inspection visuelle à la sortie de la tranche de granit polie de la polisseuse (Figure 2.13 c et d).

Bien que la plupart des tranches utilisées par Granit Plus proviennent de l'extérieur, certains travaux exigeant le polissage sont réalisés sur la polisseuse présentée à la figure 2.14.



Figure 2.14 Polisseuse à broche unique

C'est une polisseuse à broche unique avec un porte-outil muni de cinq outils de polissage. La tranche de granit est déposée sur des poutres de bois. Les outils de polissage utilisés sur ce type de polisseuse sont présentés à la figure 2.15.



Figure 2.15 Outils de polissage pour polisseuse à broche unique

Granit Orford polit les grandes surfaces en disposant plusieurs outils de polissage de manière à couvrir une bonne partie de la surface à polir. La tête de la polisseuse se déplace longitudinalement et latéralement (Figure 2.16). Nous remarquons qu'il y a une certaine ressemblance entre cette technique de polissage et celle utilisée par Granit Plus.

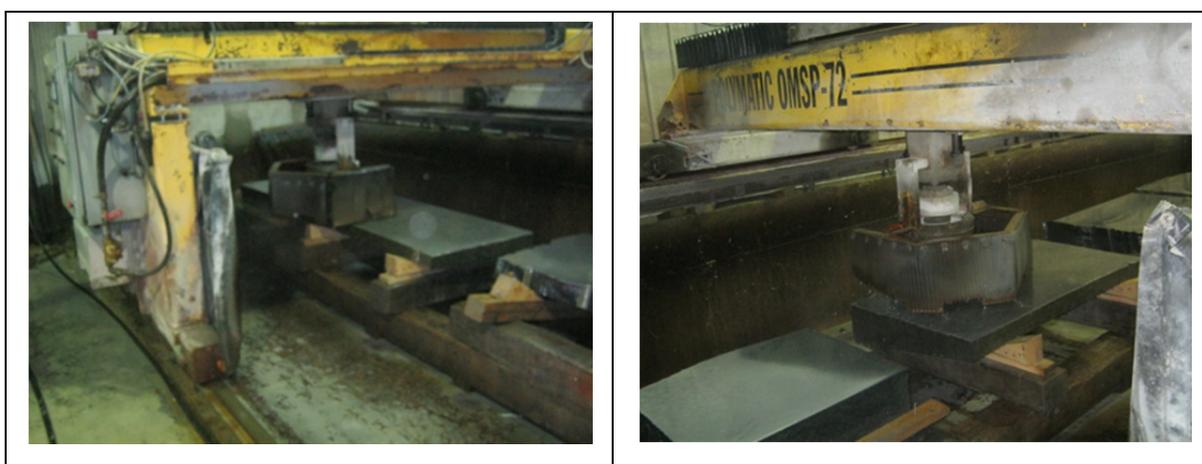


Figure 2.16 Polisseuse Polimatic OMSP-72

Les outils de polissage (abrasifs) utilisés sur la polisseuse Polimatic sont regroupés selon la grosseur des grains retenue (grit) (Voir Figure 2.17). Les grains varient de 30 à 2500.



Figure 2.17 Outils de polissage pour polisseuse Polimatic

Chez Granit Orford, la polisseuse Ordway présentée à la figure 2.18 est dédiée au polissage des chants dans le but d'augmenter la productivité. Cette polisseuse utilise des disques abrasifs contrairement aux outils de polissage de forme rectangulaire vus précédemment. La gamme des grosseurs de grains abrasifs (grit) varient de 30 à 2500.



Figure 2.18 Polisseuse Ordway

2.3.2 Polissage sur machine à commande numérique

Granit Montérégie 2000 est équipée pour réaliser le polissage intérieur et extérieur des chants sur des comptoirs de cuisine (Voir Figure 2.19).



Figure 2.19 Polissage des contours intérieurs et extérieurs d'un comptoir

La figure 2.20 présente l'aspect des porte-outils utilisés pour réaliser ce type de polissage. Ces porte-outils s'adaptent bien sur la broche d'une machine à commande numérique. La vitesse d'avance moyenne de l'outil est de 1m/min avec une vitesse de rotation moyenne de 2500 rpm.



Figure 2.20 Outils de polissage pour contours intérieurs et extérieurs

Chez Granit Plus l'utilisation de machines à contrôle numérique (CNC) assure précision, flexibilité et performance, peu importe la complexité du projet. La machine Titan 1000 de Granit Plus, représentée à la figure 2.21 est une machine spécialement conçue pour réaliser l'usinage et le polissage de granit. Elle est dotée d'équipements nécessaires pour assurer la mise en position sécuritaire du granit durant le polissage. Le refroidissement des outils lors des opérations est assuré par un arrosage abondant d'eau sans additif.

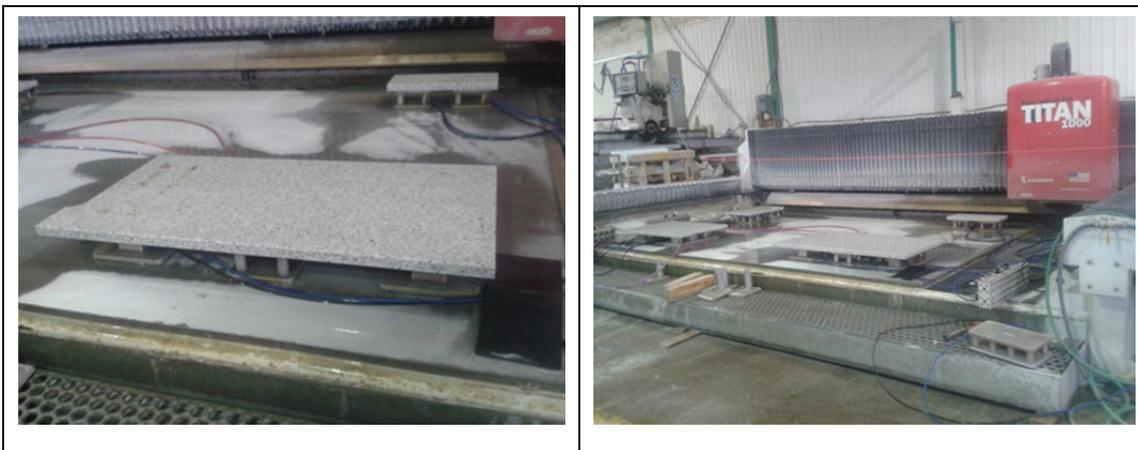


Figure 2.21 Machine à commande numérique Titan 1000

Granite Montérégie 2000 utilise la machine à commande numérique Intermac Master pour polir les comptoirs de cuisine et de salle de bain (Figure 2.22). Cette machine est spécialement conçue, non seulement pour travailler sur les pierres comme le granit, le marbre, le quartz, etc., mais aussi sur le bois. La pièce de granit à polir est mise en position et alignée sur la machine et toutes les opérations peuvent se réaliser à tour de rôle jusqu'à l'obtention de la pièce finie.



Figure 2.22 Machine à commande numérique Intermac Master
Tirée de <http://www.granitmonteregie.com>



Figure 2.23 Fraise en bout diamantée pour le surfacage

La fraise en bout diamantée est utilisée pour dresser la surface de contact du comptoir de cuisine (Figure 2.23).

La figure 2.24 présente l'unité de contrôle de la machine Intermac Master. On observe à l'écran de cette unité un aperçu du comptoir à réaliser avec la représentation des dispositifs de positionnement et d'alignement en bleu.

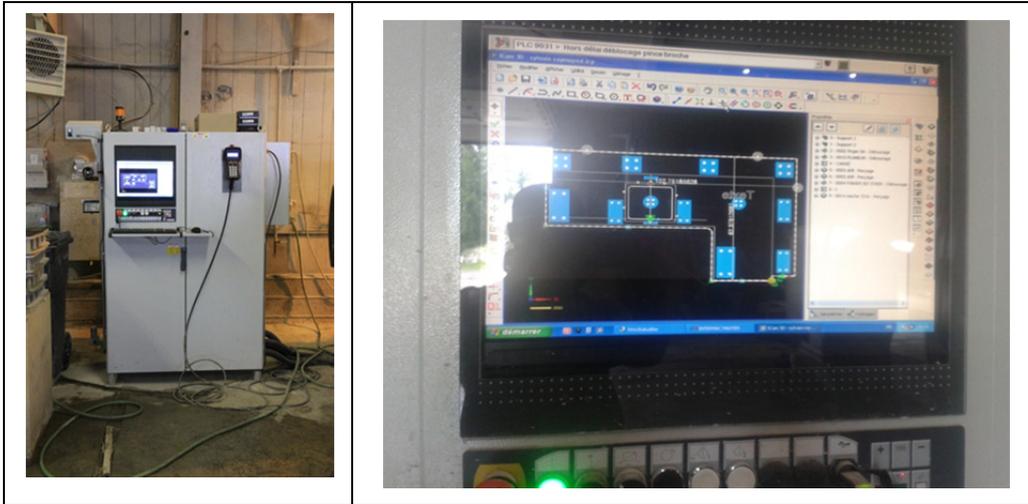


Figure 2.24 Unité de contrôle de l'Intermac Master

La pièce de granit à polir est déposée sur les supports de mise en position (Figure 2.25) servant d'appuis plans. L'alignement est assuré par les dispositifs présentés à la figure 2.26. Une fois l'alignement effectué, la pièce est immobilisée sur ses supports par effet ventouse c'est-à-dire qu'une succion se crée à l'intérieur des tuyaux et les dispositifs d'alignement s'éclipsent avant le début des opérations de polissage.



Figure 2.25 Dispositifs de mise en position

À la fin des opérations de polissage, l'envoi d'air et d'eau facilite le déplacement de la tranche de granit polie.



Figure 2.26 Dispositifs d'alignement

La réalisation du polissage mécanique automatique Chez A. Lacroix Granit est basée sur le même principe que ceux du Granit Montérégie 2000. La figure 2.27 nous présente les différents dispositifs utilisés. On note une certaine similarité dans le principe global de maintien en position.



Figure 2.27 Étapes d'exécution de polissage sur CNC

2.4 Polissage manuel des granits

Le polissage manuel des granits exige une bonne dextérité manuelle. Marbrerie Charles & Tocchi sait bien comment s'y prendre en utilisant la méthode de polissage manuel pour réaliser les surfaces courbes. Selon Granit Évolution, des profils polis à la main assurent une qualité irréprochable. Granit Plus confie le polissage manuel des chants intérieurs et extérieurs à des professionnels expérimentés possédant une bonne dextérité manuelle (Voir Figures 2.28 et 2.29).



Figure 2.28 Polissage du contour extérieur

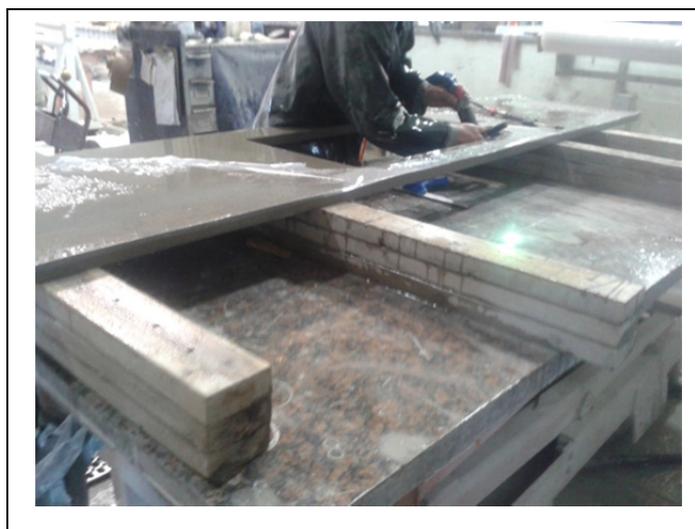


Figure 2.29 Polissage manuel du contour intérieur

Les disques abrasifs utilisés chez Granit Plus sont disponibles dans la grosseur des grains variant de 50 à 3000.

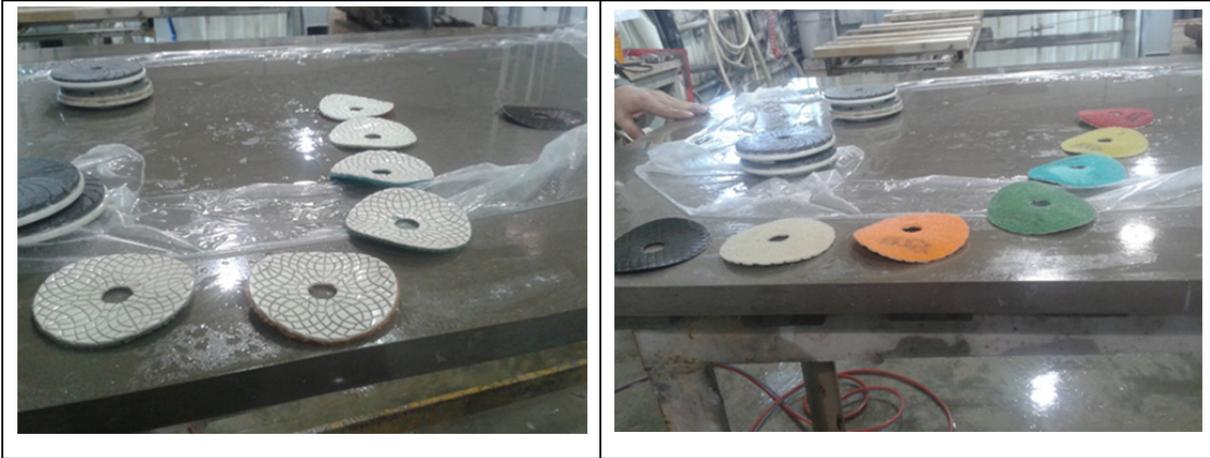


Figure 2.30 Disques abrasifs pour le polissage manuel

Chez Granit Orford, les grandes surfaces sont parfois polies à la main afin d'obtenir une surface brillante et lustrée (Figure 2.31). L'utilisation d'une pâte à polir facilite l'obtention de ce type de surface.



Figure 2.31 Polissage manuel sur une grande surface

La figure 2.32 présente la panoplie d'outils utilisés chez Granit Orford pour réaliser techniquement et efficacement le polissage manuel.



Figure 2.32 Types d'outils rotatifs et d'abrasifs utilisés

Granit Montréal 2000 dispose aussi des outils pneumatiques manuels plus performants et sécuritaires (Voir Figure 2.33).



Figure 2.33 Outil pneumatique pour le polissage manuel

Les disques abrasifs présentés à la figure 2.34 s'adaptent bien sur ces outils. Ils sont munis de velcro pour faciliter leur mise en place. Mentionnons que les disques abrasifs utilisés pour le polissage manuel sont similaires d'une compagnie à l'autre.



Figure 2.34 Types de disques abrasifs utilisés

A.Lacroix Granit dispose d'une large gamme d'outils abrasifs (Voir Figure 2.35) pour réaliser le polissage manuel. Quelques outils abrasifs sont fabriqués à l'intérieur même de la compagnie.

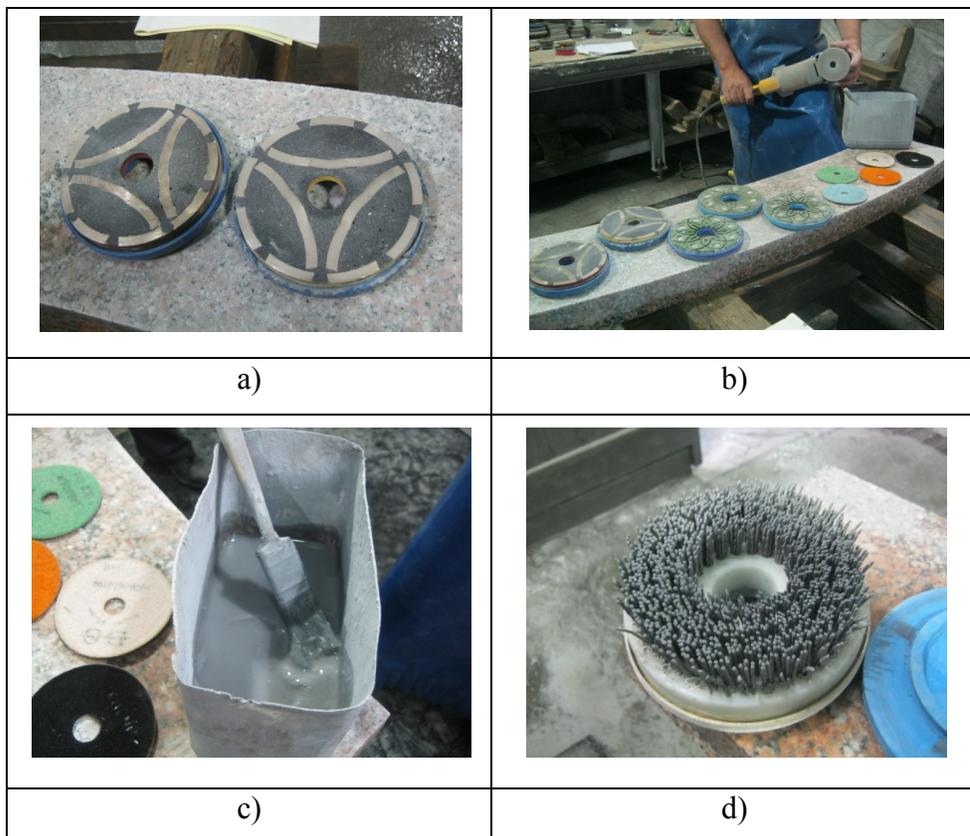


Figure 2.35 Outils pour polissage manuel

2.5 Finis de surface

Les finis de surface qu'offrent les industries de transformation de granit sont nombreux et diffèrent selon les exigences de la clientèle. Chaque compagnie détermine les types de finis que ses moyens technologiques lui permettent d'obtenir. Pour ce qui a trait au polissage, nous retrouvons en général le poli mat, le poli adouci (satiné) et le poli brillant. Étant donné la diversité des activités réalisées, les entreprises sont amenées à fournir une gamme étendue de finis de surface.

Chez Granit Orford, les différents finis obtenus sont les suivants : scié, flammé, poli mat et poli lustré alors que A.Lacroix Granit dispose des technologies lui permettant d'obtenir dix finis , à savoir : guillotiné, bouchardé <point>, bouchardé fin, au jet de sable, brûlé, brûlé lavé, au jet d'eau (waterjet), brossé, poli mat et poli. Soulignons que les finis de surface que nous présente A.Lacroix Granit ont été démontrés sur une même couleur, soit le Atlantic Black pour faciliter la compréhension (Voir Figure 2.36).

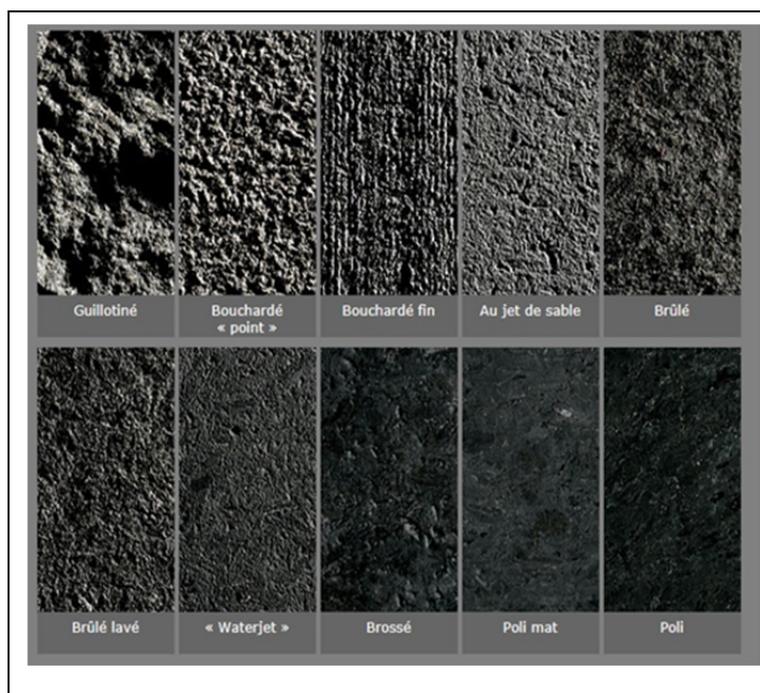


Figure 2.36 Les dix finis de surface de A.Lacroix Granit
Tirée de <http://www.alacroixgranit.com>

Le fini brossé est aussi un fini recherché par certains clients sur le granit. La grosseur des brosses détermine la qualité de surface à obtenir. Ces brosses sont numérotées en fonction de leurs grosseurs (Voir Figure 2.37). Il existe aussi des brosses diamantées destinées pour certains types de finition (fini antique). La grosseur des grains abrasifs varie de 46 à 1000. Notons que le brossage aussi bien que le polissage se fait sous un bon arrosage à l'eau sans additif.



Figure 2.37 Brosses pour polisseuse Breton

Les finis polis comme on peut le voir à la figure 2.38, permettent de mieux apprécier les quelques couleurs exclusives de granit provenant des carrières de A.Lacroix Granit.

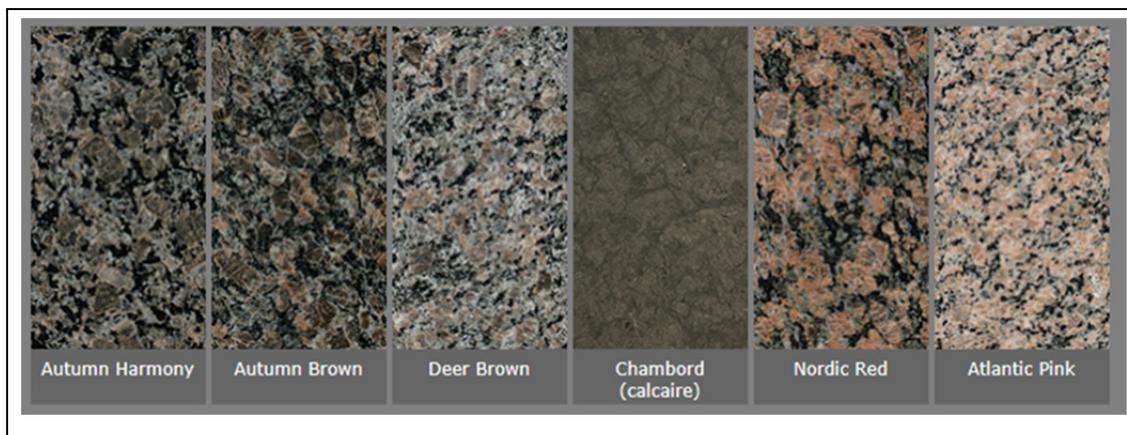


Figure 2.38 Finis polis de A. Lacroix Granit
Tirée de <http://www.alacroixgranit.com>

La figure 2.39 est aussi un exemple de quelques couleurs exclusives de Granit Orford obtenues après polissage.

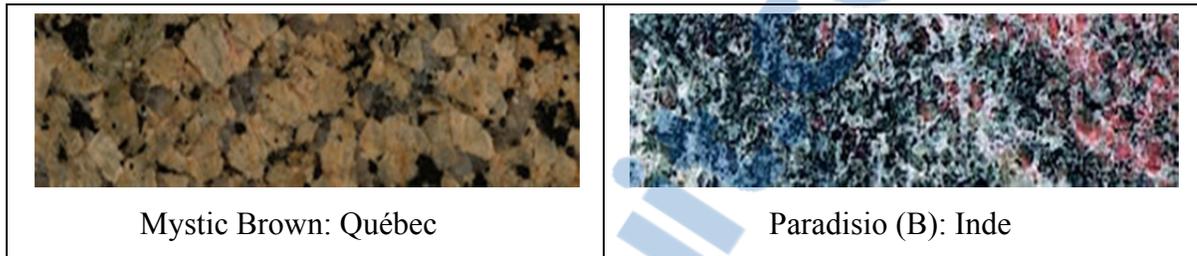


Figure 2.39 Finis polis de Granit Orford
Tirée de <http://www.granitorford.com>

Les finis polis ressortent mieux les couleurs des granits que disposent les différentes compagnies. Nous nous sommes donc limités à la présentation des produits de ces deux industries parce qu'il nous serait difficile de présenter toutes les gammes de couleurs disponibles dans les industries de transformation.

Le fini flammé s'obtient sur le granit ou sur la pierre calcaire dure. Un jet de flamme à très haute température passe sur la pièce de granit de façon régulière. Cette flamme peut être de type oxyacétylénique ou de type propane. Ce type de fini se réalise aussi bien automatiquement que manuellement (Voir Figure 2.40).

Dans le cas du granit, les coefficients de dilatation qui sont différents entre le quartz, le feldspath et le mica provoquent un éclatement superficiel. Cela donne un aspect rugueux, antidérapant qui a avantage de mettre en valeur les couleurs du granit. Tous les granits non veinés sont généralement faciles à flammer. Par exemple, les granits jaunes deviennent roux-orangés après l'opération, par oxydation des pyrites de fer.

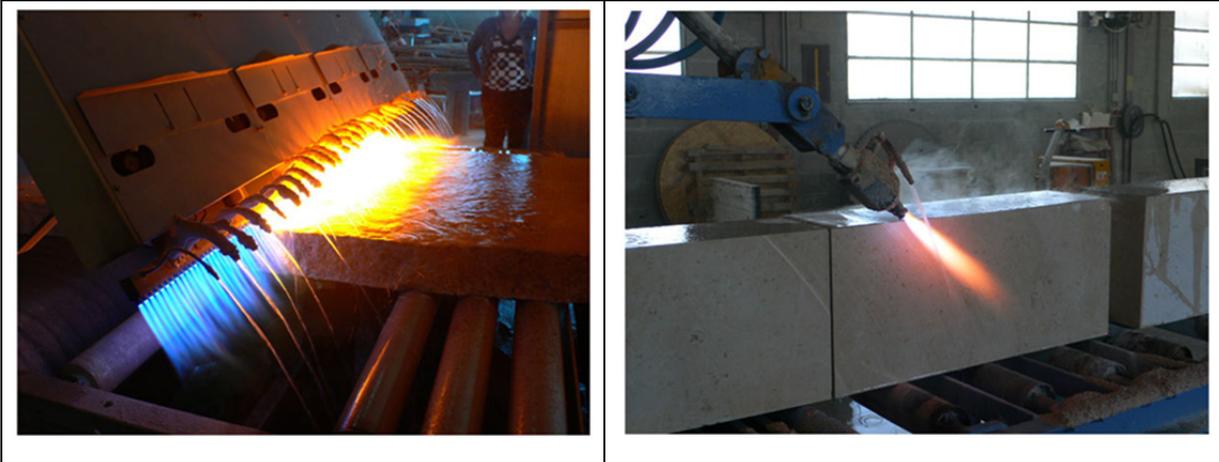


Figure 2.40 Obtention du fini flammé
Tirée de <http://www.mochalgranit.com>

Un autre type de fini que l'on retrouve en industrie est le fini grenailé. Il s'agit de grenailer des tranches, des dalles, des bordures ou des pavés. Cette opération consiste à donner une finition rugueuse et uniforme à la pierre par projection à haute vitesse de billes d'acier sur la pierre (Voir Figure 2.41).



Figure 2.41 Obtention du fini grenailé
Tirée de <http://www.mochalgranit.com>

2.6 Discussions et conclusion

Le polissage est le dénominateur commun de toutes les industries de transformation de granit. À peu de chose près, les activités réalisées sont dans l'ensemble, similaires d'une entreprise à l'autre. Les techniques utilisées diffèrent parfois d'une compagnie à l'autre. Par exemple, certaines compagnies obtiennent des finis flammés de façon automatique tandis que d'autres procèdent autrement en optant pour une pratique manuelle. On a constaté que presque toutes les compagnies possèdent une scie diamantée géante pour le débitage du granit. Par contre ce n'est pas toutes les industries qui ont la capacité de se doter d'équipements de débitage au fil diamanté. Nous pouvons noter que selon la taille des compagnies, il y a des opérations de polissage qui se réalisent sur des machines conventionnelles, d'autres sur des machines à commandes numériques.

Dans le fond, on peut dire qu'il y a une certaine similarité, surtout lorsqu'on fait référence à la réalisation des comptoirs de cuisine et de salles de bain, des tuiles, des monuments, d'aménagements urbains, etc. Les visites industrielles ont permis de voir de près comment se réalisent les différentes opérations de polissage et autres activités connexes au sein de ces industries de transformation. Soulignons qu'une entreprise de grande taille comme A.Lacroix Granit possède les moyens technologiques nécessaires pour réaliser une gamme étendue d'activités, de l'extraction de granit jusqu'aux produits finis. Contrairement à certaines entreprises de petites tailles qui se contentent d'acheter des tranches de granits, voire même des granits déjà polis afin de réaliser diverses opérations leur permettant de répondre aux besoins de leurs clientèles.

Pour ce qui a trait au respect des normes de sécurité en matière des émissions de poussières de granit tel que mentionné dans la littérature, nous avons constaté que toutes les industries de transformation que nous avons visitées ont su mettre en place des mécanismes nécessaires afin d'assurer la protection individuelle et collective de leurs employés.

Le tableau 2.1 résume les conditions, paramètres et outils utilisés lors du polissage.

Tableau 2.1 Résumé des conditions, paramètres et outils utilisés lors du polissage

Industries visitées	Polissage des granits
A.Lacroix Granit	- Polisseuse à têtes multiples Breton : <ul style="list-style-type: none"> • Polisseuse à postes multiples pour des grandes surfaces • vitesse d'avance moyenne (3 m/min) • pression de travail (1 à 3 bars) varie selon les postes • outil de polissage à résine diamantée (grit : 30 à 2500) • refroidissement à l'eau du robinet • fini poli brillant, poli mat, poli brossé
Granit Orford	- Polisseuse conventionnelle Polimatic OMSP-72 <ul style="list-style-type: none"> • polissage des grandes surfaces • outil de polissage à résine diamantée (grit : 30 à 2500) • polissage humide (eau sans additif) - Polisseuse conventionnelle Ordway <ul style="list-style-type: none"> • polissage des chants • disque abrasif diamanté (grit : 30 à 3000) • polissage humide (eau sans additif)
Granit Montérégie 2000	-Polisseuse CNC Intermac Master <ul style="list-style-type: none"> • Polissage des grandes surfaces et des chants • outils de polissage CNC de formes variées • vitesse de rotation moyenne (2500 rpm) • vitesse d'avance moyenne (1 m/min) • polissage sous arrosage à l'eau du robinet
Granit Plus	- Polisseuse CNC Titan 1000 <ul style="list-style-type: none"> • polissage humide (eau sans additif) - Polissage manuel <ul style="list-style-type: none"> • outil utilisé (disque abrasif diamanté de grit 50 à 3000) • le velcro assure la mise en position facile et rapide des disques • utilisation de pâte à polir • fini obtenu (surface brillante et lustrée)

Le tableau 2.2 présente le résumé des différents moyens de protection mis en place par les industries de transformation de granit visitées.

Tableau 2.2 Résumé des moyens de protection contre les poussières lors du polissage

Industries visitées	Moyens de protection contre les poussières
<p>A.Lacroix Granit</p> <p>Granit Orford</p> <p>Granit Montérégie 2000</p>	<p>- Protection individuelle :</p> <ul style="list-style-type: none"> • port des lunettes de sécurité • port des chaussures de sécurité • utilisation des coquilles ou des bouchons d'oreilles • port des gants de sécurité • utilisation des masques anti-poussières • position du travailleur par rapport à la circulation d'air • protection faciale selon le poste de travail • port d'un tablier de cuir selon le poste de travail • utilisation de machine munie de dispositif d'aspiration intégré (captation à la source) • respect de la valeur limite d'exposition
<p>Granit Plus</p>	<p>- Protection collective</p> <ul style="list-style-type: none"> • postes connectés aux dispositifs d'aspiration • rejet de l'air à l'extérieur après filtration • utilisation de l'eau lors du polissage • filtration de l'eau de refroidissement avant sa réutilisation • isolement des tâches exposant aux poussières de silice (utilisation des machines CNC)

Dans le prochain chapitre nous allons analyser statistiquement les résultats obtenus lors de l'expérimentation réalisée sur le polissage du granit blanc dans le laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes (LIPPS) de l'École de technologie supérieure.

CHAPITRE 3

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction

Nous allons procéder à l'expérimentation sur le polissage de granit dans cette partie du travail. Les conditions expérimentales sont déterminées de façon à nous permettre de vérifier l'influence de la grosseur des grains, de la vitesse de rotation et de l'avance sur la qualité du fini de surface et les émissions de poussières générées lors du polissage de ce matériau.

3.2 Environnement expérimental

L'environnement expérimental, tel que présenté sur la figure 3.1, comprend les équipements nécessaires à la réalisation des essais. Nous disposons d'une machine à commande numérique CNC, 3 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 micro-pulvérisation. 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).

La table dynamométrique (Kistler 9255B), reliée à une unité électronique permet de faire l'acquisition et l'analyse des données. Elle permet de mesurer les forces de coupe selon les trois axes (x, y et z).

Après le polissage, les différents paramètres en étude sont mesurés à l'aide d'un profilomètre de type SurfTest SJ400 de Mitutoyo. L'état de l'appareil est vérifié avant de procéder aux prises de mesure à l'aide d'un étalon de $R_a = 2,95 \mu\text{m}$ afin de s'assurer de sa répétabilité..

L'utilisation du spectromètre APS (Aerosol Particle Sizer) permet de prendre la mesure des particules de poussières à l'échelle micrométrique. Notons que la taille des particules captée par cet instrument se situe entre $0,5 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$. L'isolement de la zone de polissage facilite la captation de ces particules.



Figure 3.1 Montage expérimental

3.3 Matériel

Le matériel utilisé pour l'expérimentation comprend : un porte-outil avec ressorts, des disques abrasifs et une pièce de granit blanc de forme prismatique (Voir Figure 3.2). Le porte-outil avec ressorts sert de support aux disques abrasifs. Il est monté verticalement par adhérence directe sur la broche de la machine. Les disques abrasifs de diamètre 130 mm sont choisis selon les grosseurs de grain (grit) retenues pour l'expérimentation. La pièce de granit blanc mesurant 150 mm x 150 mm x 30 mm et contenant 50 % de Si (Kouam *et al.*, 2013) est montée dans un étau standard.

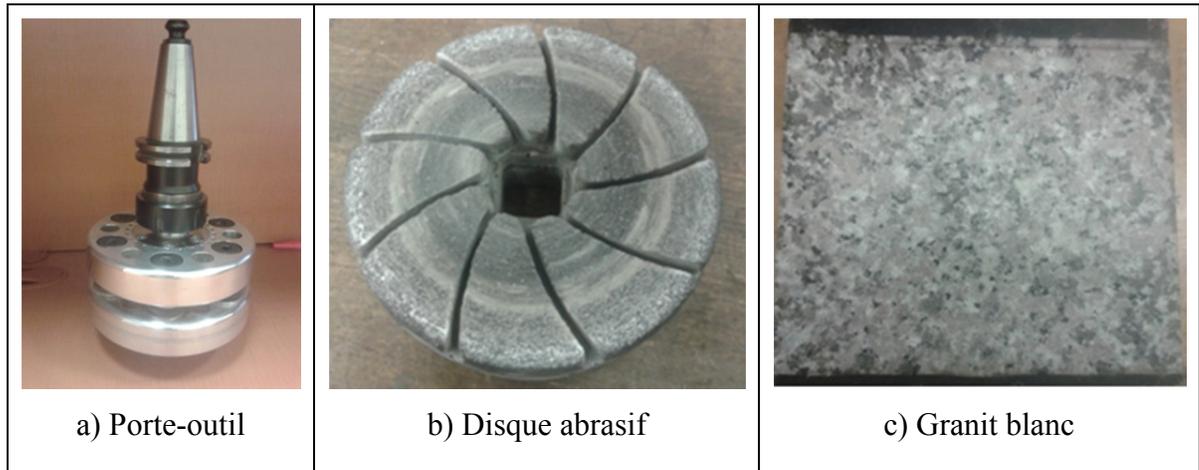


Figure 3.2 Matériel utilisé

3.4 Conditions expérimentales

Le polissage est réalisé à sec avec un temps de coupe de 180 secondes et une profondeur de coupe de 0.001 po (0,0254 mm). Nous avons retenu trois facteurs (variables indépendantes) ayant chacun trois niveaux (modalités). Ainsi, notre choix porte sur un plan factoriel complet 3^3 . L'ajout de trois points additionnels au centre nous amène à réaliser un nombre total de 30 essais. Sur le tableau 3.1 ci-dessous représenté, nous avons les valeurs réelles et codées des niveaux des facteurs.

Tableau 3.1 Valeurs codées et valeurs réelles des niveaux des facteurs

Données utilisées pour l'expérimentation					
Facteurs			Niveaux		
Désignation		Unité	-1	0	1
Grosueur des grains (grit)	X1		60	80	100
Vitesse de rotation	X2	rpm	1500	2000	2500
Avance	X3	po/min	30	40	50
		(m/min)	(0,762)	(1,016)	(1,27)

3.5 Variables réponses et modèle correspond à l'étude

Les variables réponses sont définies comme suit:

- a) Les émissions de poussières de granit
- C^P : concentration en nombre en $\#/cm^3$;
 - C^S : concentration en surface en $\mu m^2/cm^3$;
 - C^M : concentration masse en mg/m^3 .
- b) Les paramètres de fini de surface
- R_a : écart moyen arithmétique du profil évalué en μm ;
 - R_t : hauteur totale du profil en μm ;
 - R_{pk} : hauteur des pics éliminés en μm ;
 - R_{vk} : hauteur des creux éliminés en μm .

c) Le modèle général utilisé

Le modèle général correspondant à cette étude est un modèle avec des termes quadratiques (ordre 2). Il se présente comme suit :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3.1)$$

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.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES LORS DU POLISSAGE

Les différents résultats obtenus suite à l'expérimentation sont présentés à l'annexe I et VII de ce document. Les données portant sur les émissions de poussières vont être statistiquement analysées. Nous allons examiner attentivement ces données afin d'utiliser par la suite des outils statistiques pertinents pour vérifier jusqu'à quel point les paramètres de coupe tels que la grosseur des grains, la vitesse de rotation ainsi que l'avance influencent les concentrations en nombre, en surface et en masse des particules de poussières générées lors du polissage.

4.1 Analyse des effets

Les diagrammes, les tableaux et les graphiques ci-dessous présentés vont nous permettre de mettre en relief les effets des facteurs principaux ainsi que leurs interactions. Ces effets peuvent être soit linéaires (L) ou quadratiques (Q). Mentionnons que la probabilité $P=0.05$ (P value) représente le seuil de signification. À l'aide des trois éléments d'analyse ci-dessous indiqués nous procéderons à l'analyse des effets des facteurs sur les variables réponses. Il s'agit de:

- diagrammes de Pareto des effets;
- tableaux des effets et tests de signification;
- graphiques des effets sur échelle demi gaussienne.

4.1.1 Diagrammes de Pareto des émissions de poussières

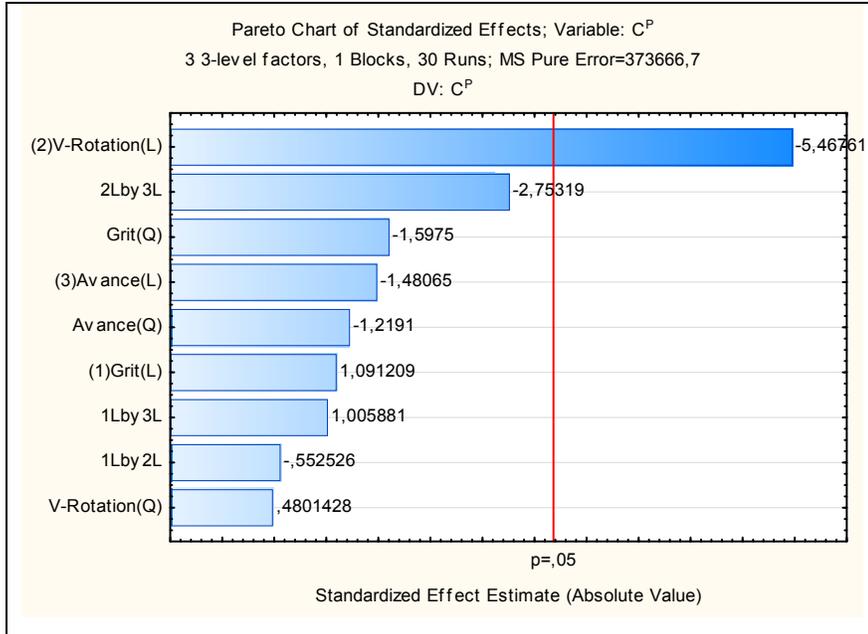


Figure 4.1 Diagramme de Pareto de C^P

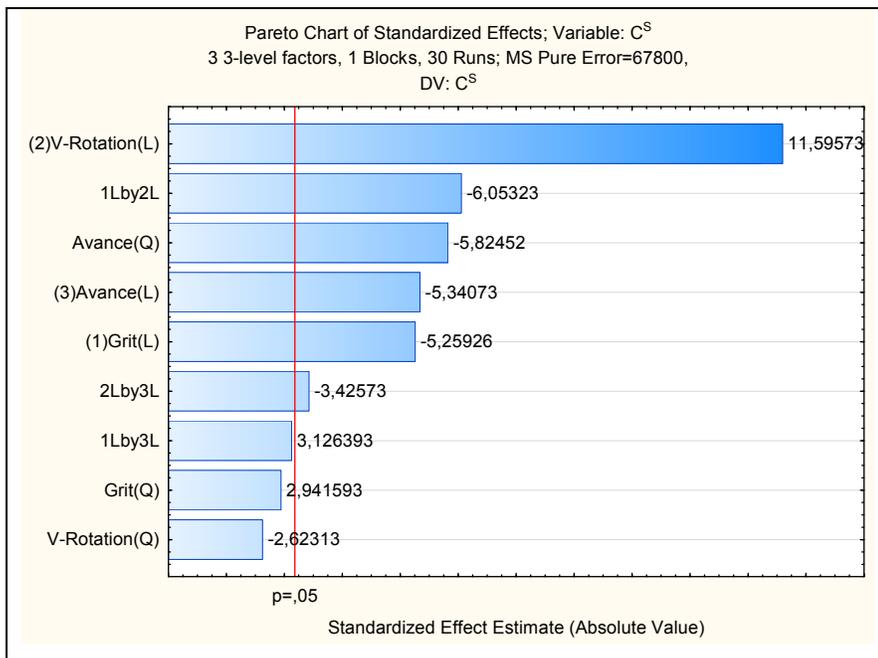


Figure 4.2 Diagramme de Pareto de C^S

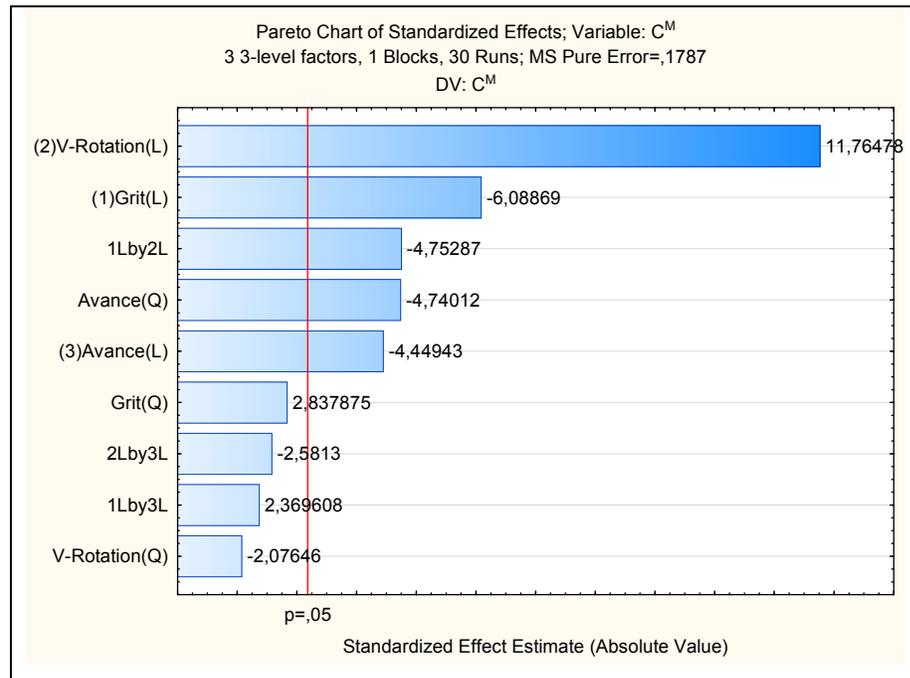


Figure 4.3 Diagramme de Pareto de C^M

Le diagramme de Pareto permet de comparer l'importance relative et la signification statistique des effets des facteurs principaux et de leurs interactions. Il indique le niveau de signification statistique avec un intervalle de confiance de 95%. Il permet également de mettre en relief les facteurs influents par ordre d'importance décroissant.

On remarque sur le diagramme de Pareto de la figure 4.1 que c'est seulement la vitesse de rotation qui a un effet linéaire significatif (X2L) sur la variable réponse concentration en nombre C^P .

Sur le deuxième diagramme de Pareto (Figure 4.2), les trois facteurs principaux ainsi que quelques-unes de leurs interactions ont des effets significatifs sur la concentration en surface C^S . Ces facteurs et interactions sont les suivants : vitesse de rotation (X2L), interaction (X1L*X2L), avance (X3Q), avance (X3L), grit (X1L) et l'interaction (X2L*X3L).

Au niveau du diagramme de Pareto de la concentration en masse (Figure 4.3), les trois facteurs principaux sont aussi influents en plus de quelques interactions. On peut

mentionner dans l'ordre décroissant: la vitesse de rotation (X2L), le grit (X1L), l'interaction le grit * la vitesse de rotation (X1L * X2L), l'avance (X3Q) et l'avance (X3L).

4.1.2 Tableaux des effets

Tableau 4.1 Effets des facteurs sur la variable C^P

Facteur	Concentration en nombre C ^P					
	Effet	Std.Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	4297	113,9	37,73	0,000	4297	113,9
(1)Grit (L)	314	288,2	1,09	0,355	157	144,1
Grit (Q)	-373	233,4	-1,60	0,208	-186	116,7
(2)V-Rotation(L)	-1576	288,2	-5,47	0,012	-788	144,1
V-Rotation(Q)	112	233,4	0,48	0,664	56	116,7
(3)Avance (L)	-427	288,2	-1,48	0,235	-213	144,1
Avance (Q)	-285	233,4	-1,22	0,310	-142	116,7
1L * 2L	-195	352,9	-0,55	0,619	-98	176,5
1L * 3L	355	352,9	1,01	0,389	177	176,5
2L * 3L	-972	352,9	-2,75	0,071	-486	176,5

Tableau 4.2 Effets des facteurs sur la variable C^S

Facteur	Concentration en surface C ^S					
	Effet	Std.Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	4379	48,5	90,26	0,000	4379	48,52
(1)Grit (L)	-646	122,7	-5,26	0,013	-323	61,37
Grit (Q)	293	99,4	2,94	0,060	146	49,72
(2)V-Rotation(L)	1423	122,7	11,60	0,001	712	61,37
V-Rotation(Q)	-261	99,4	-2,62	0,079	-130	49,72
(3)Avance (L)	-656	122,7	-5,34	0,013	-328	61,37
Avance (Q)	-579	99,4	-5,82	0,010	-290	49,72
1L * 2L	-910	150,3	-6,05	0,009	-455	75,17
1L * 3L	470	150,3	3,13	0,052	235	75,17
2L * 3L	-515	150,3	-3,43	0,042	-258	75,17

Tableau 4.3 Effets des facteurs sur la variable C^M

Facteur	Concentration en masse C^M					
	Effet	Std.Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	3,767	0,079	47,82	0,000	3,767	0,079
(1)Grit (L)	-1,213	0,199	-6,09	0,009	-0,607	0,100
Grit (Q)	0,458	0,161	2,84	0,066	0,229	0,081
(2)V-Rotation(L)	2,344	0,199	11,76	0,001	1,172	0,100
V-Rotation(Q)	-0,335	0,161	-2,08	0,129	-0,168	0,081
(3)Avance (L)	-0,887	0,199	-4,45	0,021	-0,443	0,100
Avance (Q)	-0,765	0,161	-4,74	0,018	-0,383	0,081
1L * 2L	-1,160	0,244	-4,75	0,018	-0,580	0,122
1L * 3L	0,578	0,244	2,37	0,099	0,289	0,122
2L * 3L	-0,630	0,244	-2,58	0,082	-0,315	0,122

Les tableaux 4.1 à 4.3 nous donnent les probabilités des facteurs principaux et des interactions. On y retrouve également les coefficients des facteurs et des interactions. Ces tableaux nous fournissent aussi les coefficients de détermination ainsi que les coefficients de détermination ajustés. Les facteurs et les interactions influents sont ceux qui ont la probabilité P inférieure ou égale au seuil de signification «P value» qui est de 0.05. On les remarque très clairement sur les diagrammes de Pareto.

4.1.3 Graphiques des effets sur échelle demi gaussienne

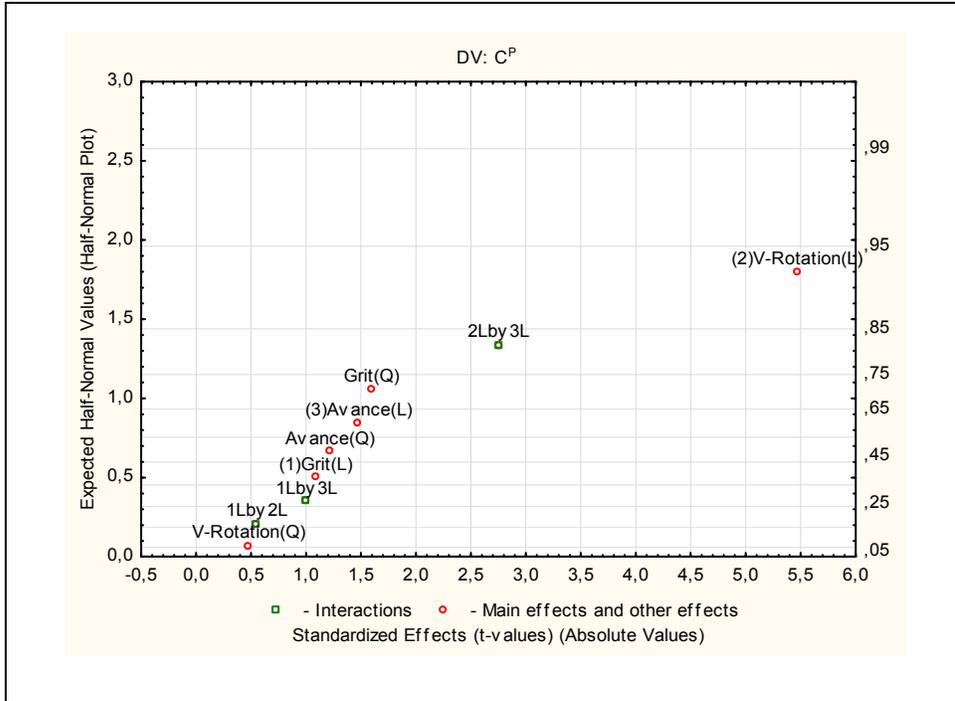


Figure 4.4 Effets sur échelle demi gaussienne de C^P

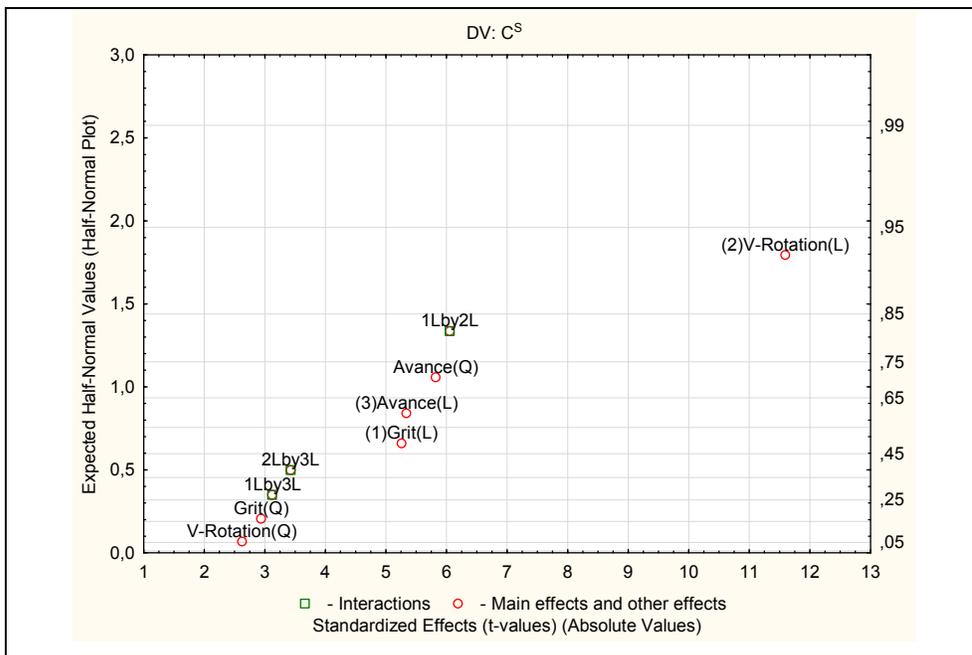


Figure 4.5 Effets sur échelle demi gaussienne de C^S

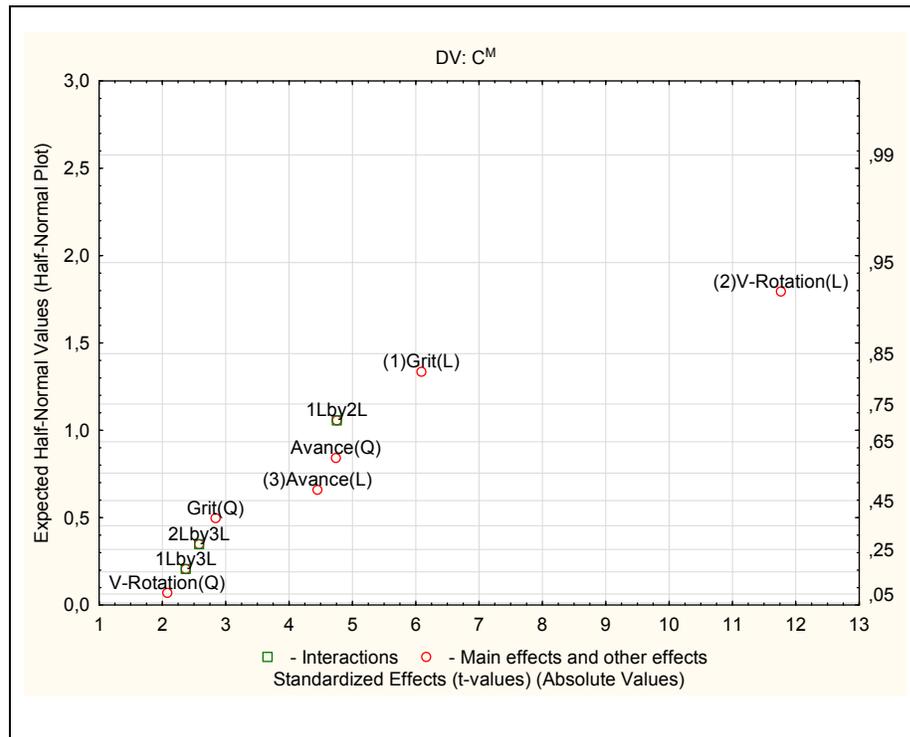


Figure 4.6 Effets sur échelle demi gaussienne de C^M

Le graphique de la figure 4.4 met en relief le facteur qui a un effet significatif sur la variable réponse concentration en nombre C^P . Il s'agit de la vitesse de rotation (X2L) qui n'est pas alignée avec les autres facteurs et interactions.

Sur la figure 4.5 de la concentration en surface, nous pouvons facilement identifier les facteurs influents qui sont : X2L, X1*X2L, X3Q, X3L, X1L et X2L*X3L. Ces facteurs et interactions sont détachés des autres.

Les facteurs et interactions tels que X2L, X1L, X1L*X2L, X3Q et X3L ayant une influence significative sur la variable réponse concentration en masse C^M ne sont pas alignés avec les autres facteurs sur le graphique de la figure 4.6.

4.2 Analyse de variance (Anova)

L'analyse de variance permet de rechercher les sources de variation des réponses afin de savoir si c'est possible d'accepter ou rejeter le modèle de prédiction proposé.

4.2.1 Tableaux de l'Anova

Tableau 4.4 Analyse de variance de C^P

Facteur	ANOVA $R^2 = 0,29$ $R^2_{aj} = 0$ Concentration en nombre C^P				
	SS	df	MS	F	p
(1)Grit (L)	444939	1	444939	1,19	0,355
Grit (Q)	953601	1	953601	2,55	0,208
(2)V-Rotation(L)	11170689	1	11170689	29,89	0,012
V-Rotation(Q)	86144	1	86144	0,23	0,664
(3)Avance (L)	819200	1	819200	2,19	0,235
Avance (Q)	555344	1	555344	1,49	0,310
1L * 2L	114075	1	114075	0,31	0,619
1L * 3L	378075	1	378075	1,01	0,389
2L * 3L	2832408	1	2832408	7,58	0,071
Manque d'ajustement	42597806	17	2505753	6,71	0,071
Erreur pure	1121000	3	373667		
Total SS	61230870	29			

Tableau 4.5 Analyse de variance de C^S

Facteur	ANOVA R ² = 0.85 R ² aj = 0.78 Concentration en surface C ^S				
	SS	df	MS	F	p
(1)Grit (L)	1875338,9	1	1875338,9	27,7	0,013
Grit (Q)	586671,4	1	586671,4	8,7	0,060
(2)V-Rotation(L)	9116450,0	1	9116450,0	134,5	0,001
V-Rotation(Q)	466519,0	1	466519,0	6,9	0,079
(3)Avance (L)	1933888,9	1	1933888,9	28,5	0,013
Avance (Q)	2300119,0	1	2300119,0	33,9	0,010
1L * 2L	2484300,0	1	2484300,0	36,6	0,009
1L * 3L	662700,0	1	662700,0	9,8	0,052
2L * 3L	795675,0	1	795675,0	11,7	0,042
Manque d'ajustement	3400980,6	17	200057,7	3,0	0,203
Erreur pure	203400,0	3	67800,0		
Total SS	23766586,7	29			

Tableau 4.6 Analyse de variance de C^M

Facteur	ANOVA R ² = 0.86 R ² aj = 0.80 Concentration en masse C ^M				
	SS	df	MS	F	p
(1)Grit (L)	6,62	1	6,62	37,1	0,009
Grit (Q)	1,44	1	1,44	8,1	0,066
(2)V-Rotation(L)	24,73	1	24,73	138,4	0,001
V-Rotation(Q)	0,77	1	0,77	4,3	0,129
(3)Avance (L)	3,54	1	3,54	19,8	0,021
Avance (Q)	4,02	1	4,02	22,5	0,018
1L * 2L	4,04	1	4,04	22,6	0,018
1L * 3L	1,00	1	1,00	5,6	0,099
2L * 3L	1,19	1	1,19	6,7	0,082
Manque d'ajustement	6,92	17	0,41	2,3	0,272
Erreur pure	0,54	3	0,18		
Total SS	54,53	29			

Le manque d'ajustement (lack of fit) n'est pas significatif dans aucun des trois tableaux ci-dessus présentés. Les coefficients de détermination et les coefficients de détermination ajustés relevés sur ces tableaux se présentent comme suit :

Sur le tableau 4.4 de la réponse concentration en nombre, $R^2 = 0,29$ et R^2 ajusté = 0;

Sur le tableau 4.5 de la réponse concentration en surface, $R^2 = 0,85$ et R^2 ajusté = 0,78;

Sur le tableau 4.6 de la réponse concentration en masse, $R^2 = 0,86$ et R^2 ajusté = 0,80.

Notons que le coefficient de détermination relie la réponse observée à la réponse estimée par le modèle. Meilleur est l'ajustement, plus les estimations se rapprochent des observations et plus R^2 se rapproche de 1. Le but fondamental est de réduire les écarts entre les observations et les estimations.

Il est important de mentionner que SS est la somme des carrés (sum of square) de la variabilité tandis que MS est le carré moyen (mean square).

$$MS = SS/df \quad (4.1)$$

$$SSY(SS_{total}) = SSM + SSR \quad (4.2)$$

$$SSY = \sum(Y_i - \bar{Y})^2 \quad (4.3)$$

$$SSR = SSE + SSLOF \quad (4.4)$$

SSY : la somme totale des carrés;

SSM : la somme des carrés du modèle;

SSR : la somme des carrés résiduels;

SSE : l'erreur pure;

SSLOF : le manque d'ajustement.

Les autres éléments que nous retrouvons sur le tableau de l'Anova sont les suivants :

Df : le degré de liberté. Soulignons que le degré de liberté total (N-1) est égal à 29 sur les trois tableaux;

N : le nombre total d'essais réalisés (30);

F : le rapport de Fisher-Snedecor qui est le rapport entre MS et l'erreur pure;

P : la valeur de la probabilité (P-valeur) ou «P-value». Elle permet de déterminer le degré de signification des variables.

4.2.2 Modèles de prédiction proposés

$$\hat{C}^P = 4297 - 788X_2 \quad (4.5)$$

$$\hat{C}^S = 4379 - 323X_1 + 712X_2 - 328X_3 - 290X_3^2 - 455X_1X_2 - 258X_2X_3 \quad (4.6)$$

$$\hat{C}^M = 3.767 - 0.607X_1 + 1.172X_2 - 0.443X_3 - 0.383X_3^2 - 0.580X_1X_2 \quad (4.7)$$

Avec :

X_1 variant de -1 à +1 (valeurs codées) : taille des grains de la meule;

X_2 variant de -1 à +1 (valeurs codées) : vitesse de rotation;

X_3 variant de -1 à +1 (valeurs codées) : avance.

Le modèle de la concentration en nombre proposé (Équation 4.5) est rejeté compte tenu de la faiblesse de son coefficient de détermination. Par contre, les deux autres modèles proposés, c'est-à-dire ceux correspondant à la concentration en surface (Équation 4.6) et à la concentration en masse (Équation 4.7) sont acceptés (R^2 élevés).

4.3 Surface de réponse des émissions de poussières

Nous retrouvons sur les surfaces de réponses ci-après représentées, les différentes données expérimentales recueillies au cours de l'expérimentation. Il faut préciser qu'un modèle mathématique permet d'interpoler les réponses inconnues afin d'obtenir la surface de réponse appropriée.

Les figures ci-après présentent les surfaces de réponses des deux variables de sortie dont les modèles sont retenus. Il s'agit de la concentration en surface C^S et de la concentration en masse C^M en fonction du facteur grit.

A. Concentration en surface (C^S)

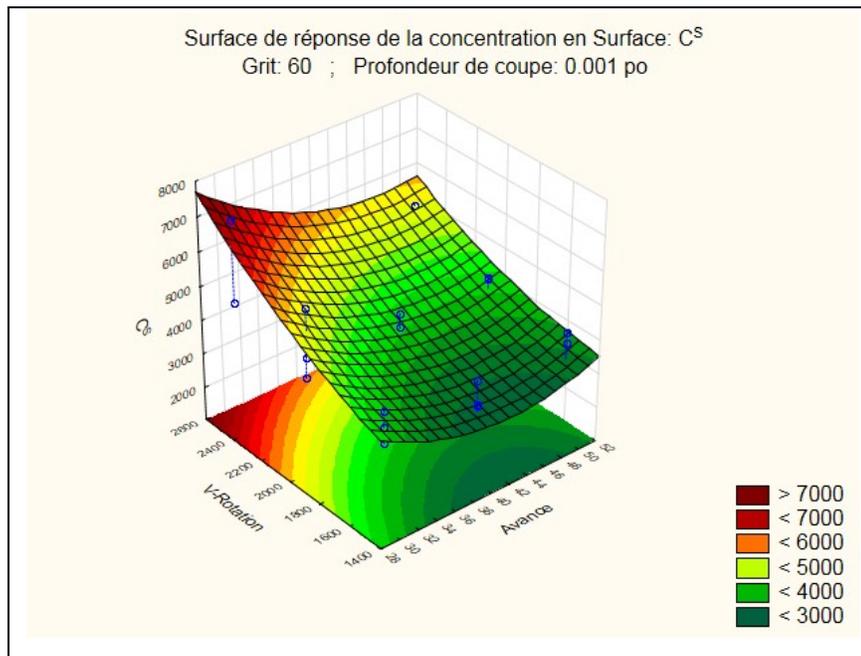
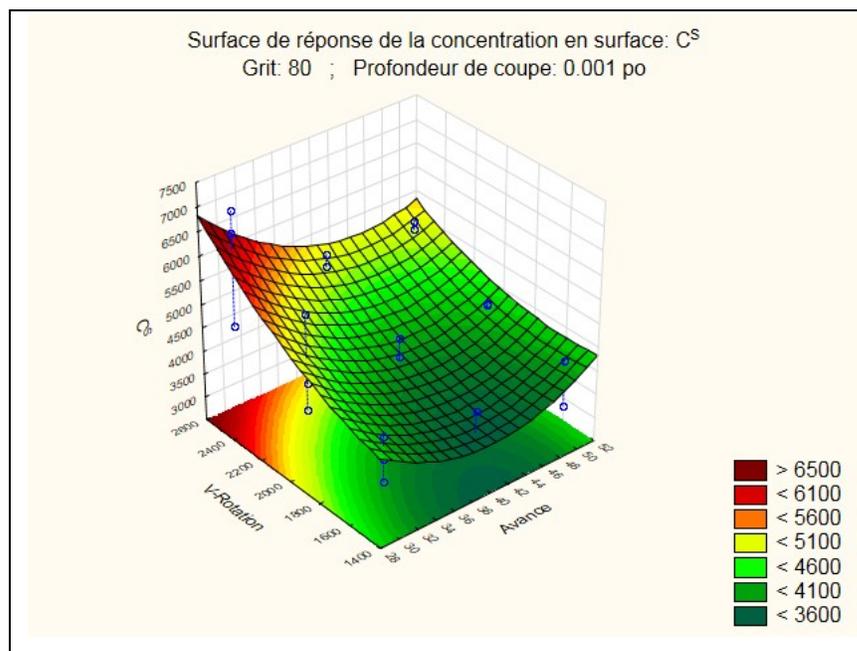
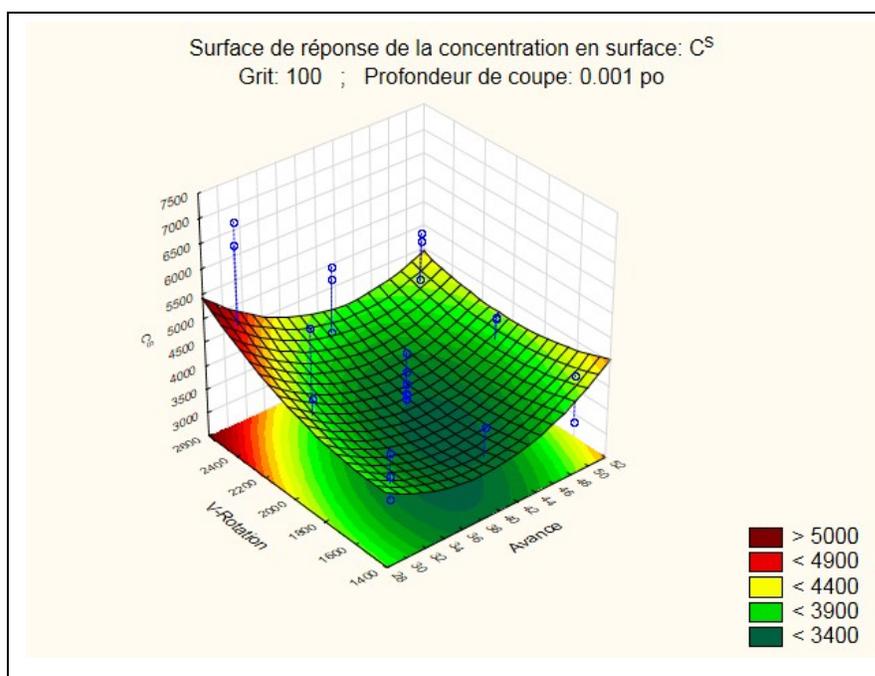


Figure 4.7 Surface de réponse de C^S avec grit 60

Figure 4.8 Surface de réponse de C^S avec grit 80Figure 4.9 Surface de réponse de C^S avec grit 100

B. Concentration en masse (C^M)

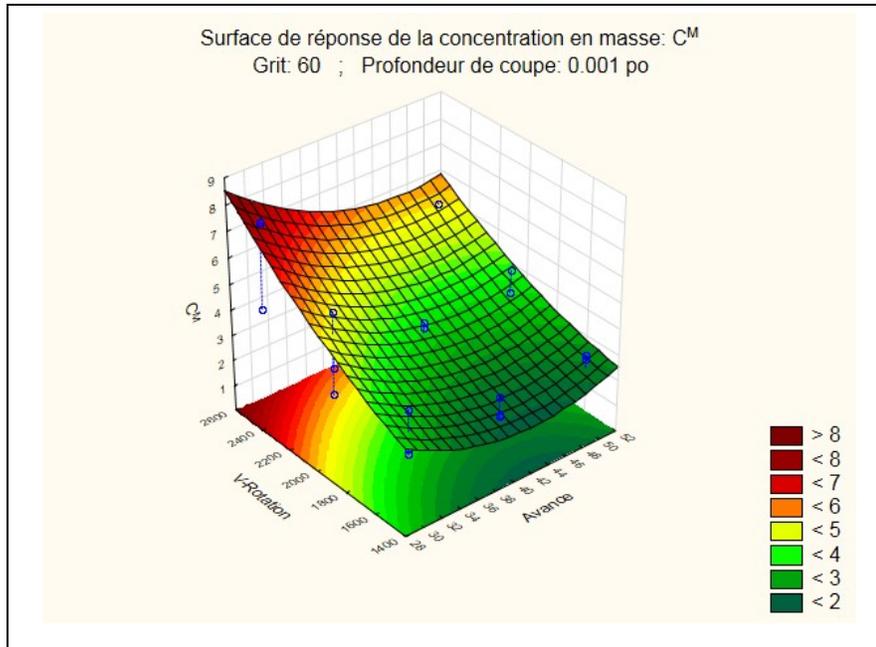


Figure 4.10 Surface de réponse de C^M avec grit 60

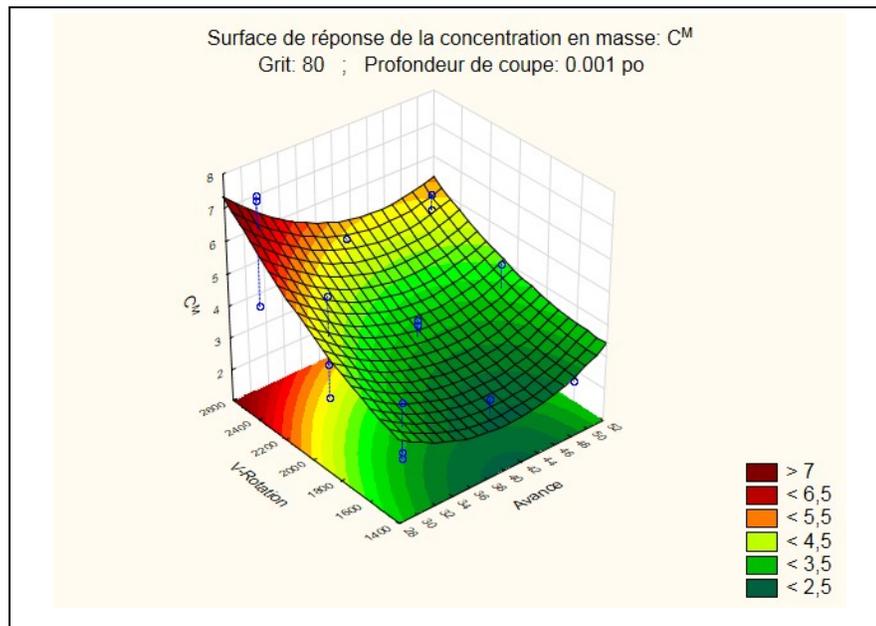


Figure 4.11 Surface de réponse de C^M avec grit 80

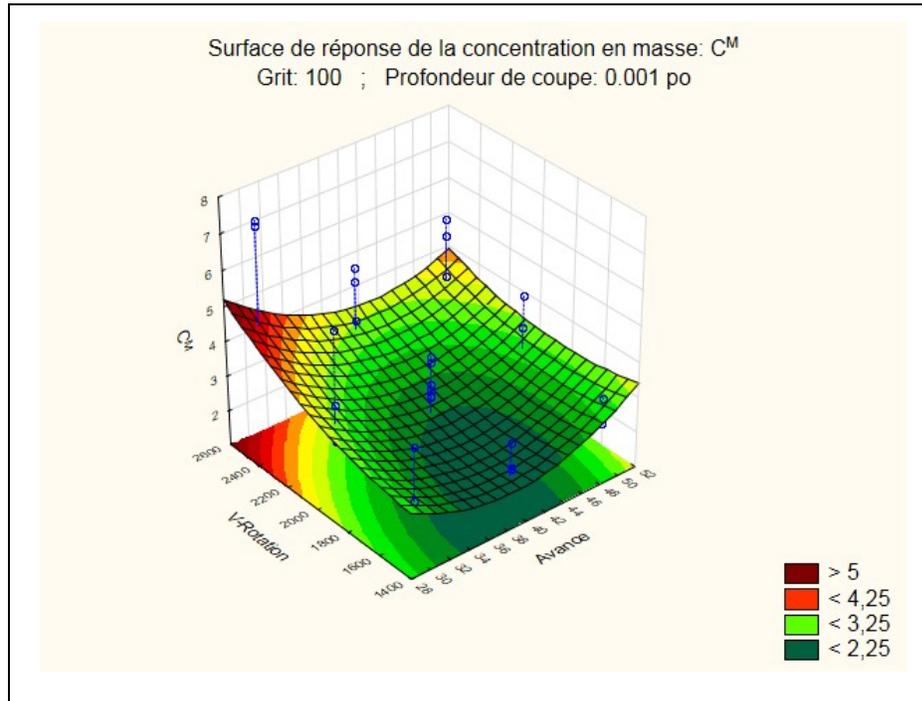


Figure 4.12 Surface de réponse de C^M avec grit 100

Nous remarquons que la concentration des particules de poussières, que ce soit en surface ou en masse, est plus faible dans la zone verte foncée, tandis que la partie rouge foncée est l'endroit où la concentration est plus forte (Voir Figures 4.7 à 4.12).

4.4 Surface de réponse simultanée des émissions de poussières

La figure 4.13 montre la surface de réponse simultanée des trois variables réponses de concentrations de poussières en 2D. C'est une représentation basée sur la fonction de désirabilité qui permet de transformer les réponses en une échelle unique de désirabilité «d» comprise entre 0 et 1. La valeur 0 est utilisée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirable) tandis que la valeur 1 est employée lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés. La partie rouge est la région autour des valeurs critiques où les variables réponses changent peu.

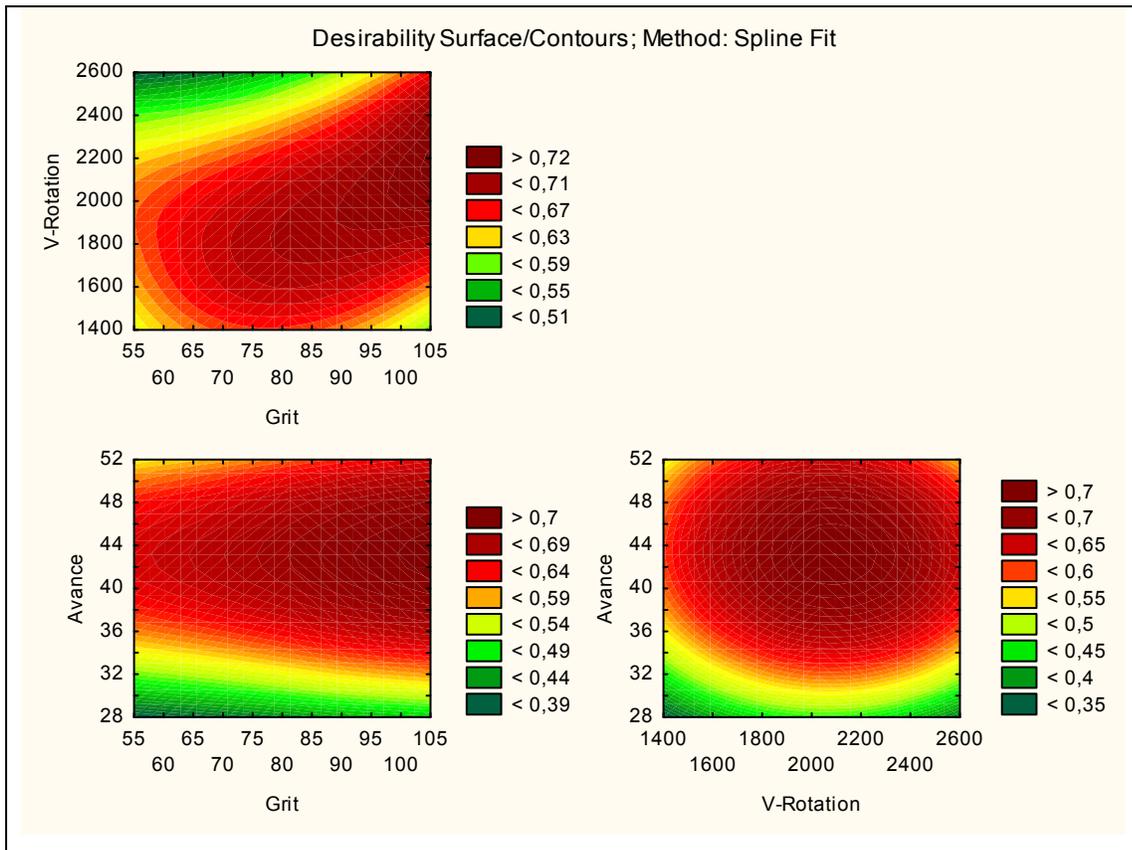


Figure 4.13 Surface de réponse simultanée des émissions de poussières

4.5 Discussions et conclusion

La plupart des auteurs s'entendent pour dire que les conditions de coupe influencent les émissions de poussières. Il est quand même important de préciser que bon nombre de ces études ont été faites sur des matériaux autres que le granit. Les résultats que nous avons obtenus suite à notre expérimentation vont globalement dans le même sens que la littérature et nous permettent de dire que les paramètres de coupe, tels que la grosseur des grains, la vitesse de rotation et l'avance influencent, à bien des égards, les émissions de poussières. Ceci, pour la simple raison que la vitesse de rotation est le seul facteur qui a un effet linéaire significatif sur la concentration en nombre. Au niveau de la concentration en surface, nous avons les effets linéaires significatifs de la vitesse de rotation, de l'avance et grit. Aussi, on peut noter l'effet quadratique de l'avance avec quelques interactions. Dans le cas de la concentration en masse, les résultats sont encore plus évidents. Les trois facteurs principaux

sont influents. Nous avons l'effet linéaire significatif de la vitesse de rotation, du grit et de l'avance. Cet effet est accompagné de l'effet quadratique de l'avance avec l'influence significative de quelques interactions. Nous pouvons donc dire que les paramètres de coupe ont une influence sur les émissions de poussières lors du polissage des granits.

CHAPITRE 5

ANALYSE DU FINI DE SURFACE APRÈS POLISSAGE

Dans cette partie du travail, nous allons tout d'abord analyser quelques profils de surface obtenus lors de l'expérimentation. Nous procéderons, par la suite, à l'analyse statistique du fini de surface en vérifiant l'influence des facteurs sur les variables de sortie telles que la rugosité moyenne arithmétique, la hauteur totale du profil évalué, la hauteur des pics éliminés et la hauteur des creux éliminés. Aux annexes II et VIII, on retrouve la représentation graphique des résultats expérimentaux.

5.1 Profils de rugosité

Les profils de rugosité ci-dessous représentés proviennent des essais de polissage réalisés. L'écart moyen arithmétique R_a est le critère retenu pour l'analyse comparative des profils de surface obtenus après le polissage. Les conditions de coupe retenues pour cette étude sont : la grosseur des grains abrasifs (grit), la vitesse de rotation, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe et la méthode de polissage à sec. Ainsi, nous avons choisi un grit 45 avec une vitesse de rotation de 1000 rpm, une avance de 0,762 m/min et une profondeur de coupe de 0.001 po (0,0254 mm) pour réaliser la surface initiale (surface de départ). La rugosité R_a correspondant à la surface initiale est de 1,612 μm . Le profil de cette surface est présenté ci-dessous (Figure 5.1). On remarque que les irrégularités sont assez prononcées.

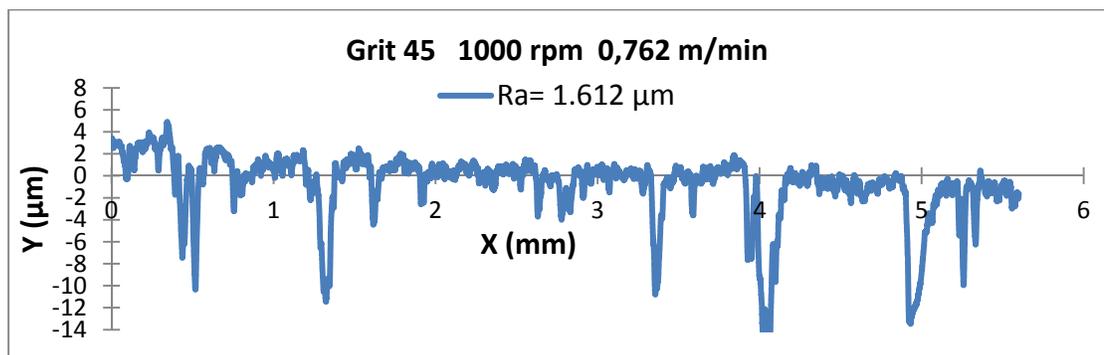


Figure 5.1 Profil de la surface de départ

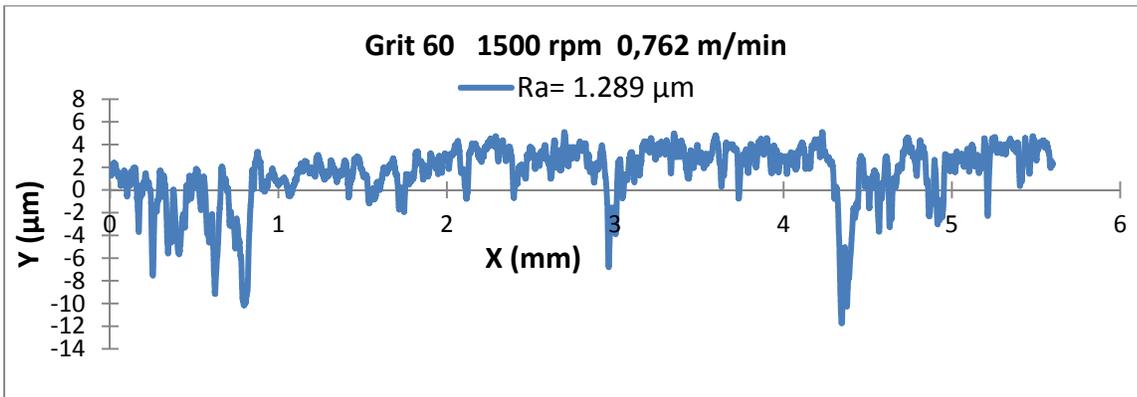


Figure 5.2 Profil de rugosité avec le grit 60

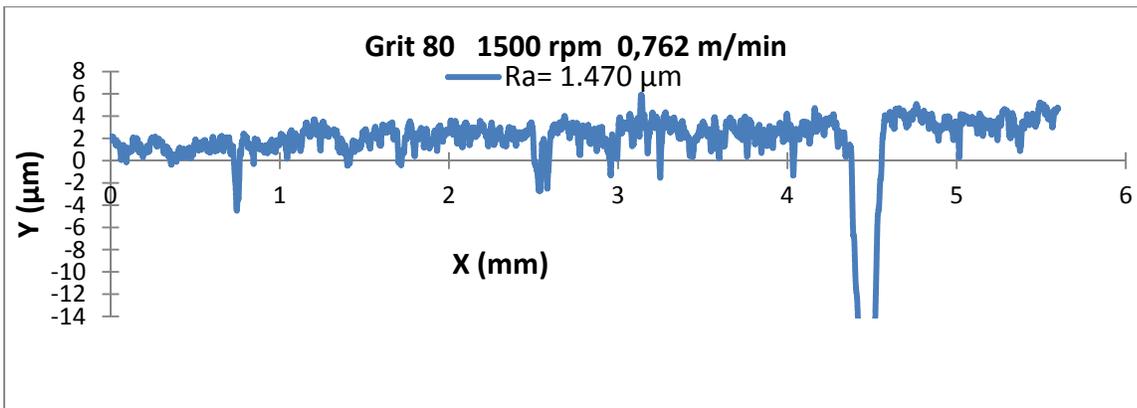


Figure 5.3 Profil de rugosité avec le grit 80

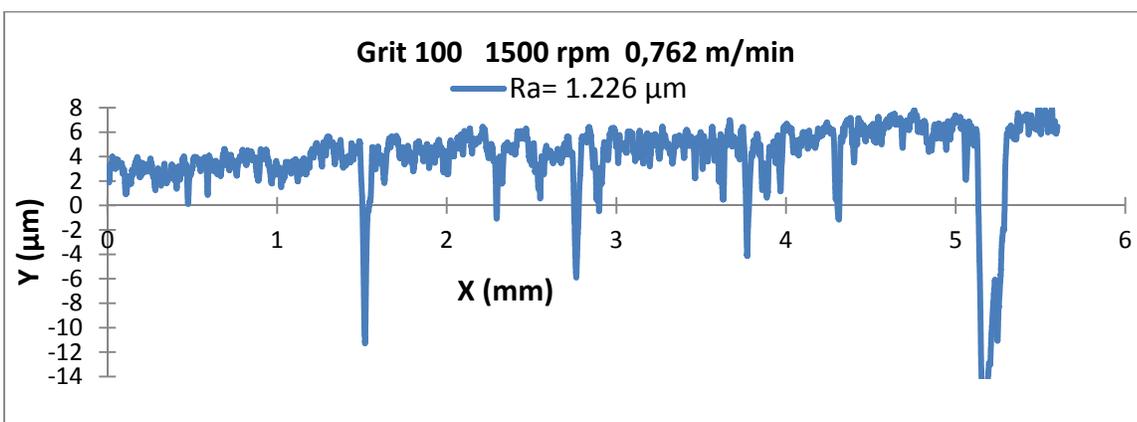


Figure 5.4 Profil de rugosité avec le grit 100

La pièce est toujours ramenée à l'état initial entre les changements de grit (grosneur de grain abrasif). La profondeur de coupe étant constante, on peut dire que les conditions de départ sont les mêmes pour chacun des trois profils se trouvant sur les figures 5.2 à 5.4. Pour fins d'analyse, nous avons conservé la même vitesse de rotation et la même avance afin de vérifier adéquatement l'influence du grit sur le fini de surface.

5.1.1 Profil du fini de surface de l'essai no.1 : grit 60

Le premier essai a été réalisé avec un abrasif de grit 60, une vitesse de rotation de 1500 rpm et une avance de 0,762 m/min. L'écart moyen arithmétique obtenu est de 1,289 μm (Voir Figure 5.2). On constate que le fini de surface s'est amélioré par rapport à la surface précédente. Ce qui se justifie par la grosseur des grains qui est un peu plus fine par rapport à celle utilisée au niveau de la surface de départ. En observant les deux profils, on peut dire qu'il y a un peu moins d'arrachements sur la surface obtenue à la figure 5.2.

5.1.2 Profil de la surface de l'essai no.10 : grit 80

Le grit 80 est utilisé pour réaliser cet essai. La grosseur des grains abrasifs étant plus petite que la précédente, on s'attend à une certaine amélioration de la surface polie. Ce qui n'est, malheureusement, pas le cas. Nous avons donc obtenu une rugosité de 1,470 μm qui est supérieure à la précédente. Ceci est probablement dû aux obstacles rencontrés par le palpeur sur son parcours. Mentionnons que l'observation du profil de surface obtenu montre qu'il y a moins d'irrégularités dans l'ensemble. Rappelons que nous avons opéré avec les mêmes paramètres de coupe que le grit 60. C'est-à-dire, la vitesse de rotation de 1500 rpm et une avance de 0,762m/min (Voir Figure 5.3).

5.1.3 Profil de la surface de l'essai no.19 : grit 100

Dans cet essai, avons conservé aussi les mêmes paramètres de coupe que dans les deux essais précédents, soit : abrasif grit : 100, vitesse de rotation : 1500 rpm, vitesse d'avance :

0,762 m/min (Voir Figure 5.4). La rugosité obtenue est 1,229 μm . C'est la plus faible rugosité obtenue comparativement aux deux premiers cas réalisés dans les mêmes conditions. Le profil obtenu nous a permis de constater qu'il y a autant d'irrégularités que dans le cas précédent.

5.1.4 Profil de la surface de l'essai no.9

C'est à l'essai no.9 que nous avons obtenu la meilleure rugosité (Figure 5.5). Cette rugosité (écart moyen arithmétique) R_a est égale à 0,413 μm . Précisons que les paramètres ne sont pas tout à fait les mêmes, ni les conditions initiales. Les paramètres de coupe utilisés pour cet essai sont : abrasif grit 60, vitesse de rotation 2500 rpm, vitesse d'avance 1,27 m/min. Ce profil nous permet simplement d'observer l'aspect du profil du meilleur fini de surface obtenu au cours de cette expérimentation.

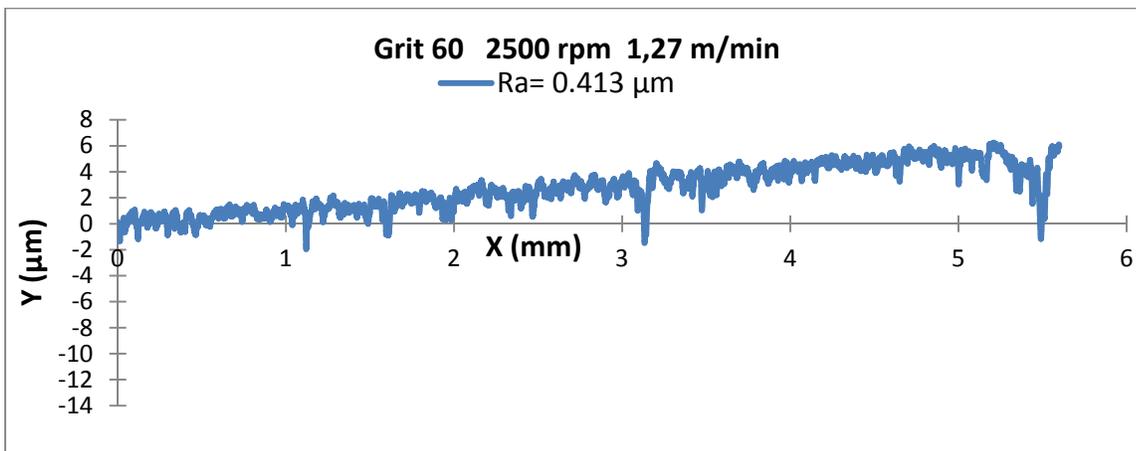


Figure 5.5 Profil de la plus faible rugosité obtenue

5.2 Analyse statistique

Dans cette section, nous allons procéder à l'analyse statistique du fini de surface. Cette analyse concerne les variables réponses R_a , R_t , R_{pk} et R_{vk} .

5.2.1 Analyse des effets

Nous allons utiliser les outils statistiques tels que le diagramme de Pareto, le tableau des effets et le graphique des effets sur échelle demi gaussienne pour analyser les effets des facteurs et de leurs interactions.

A. Diagrammes de Pareto des finis de surface

Les figures suivantes présentent les diagrammes de Pareto des variables réponses fini de surface.

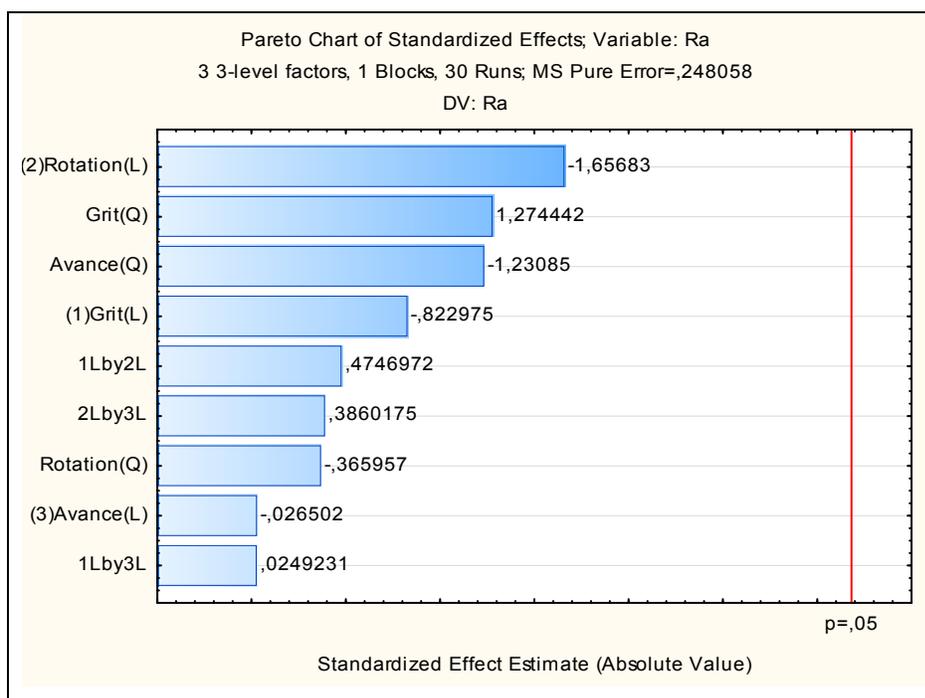


Figure 5.6 Diagramme de Pareto de Ra

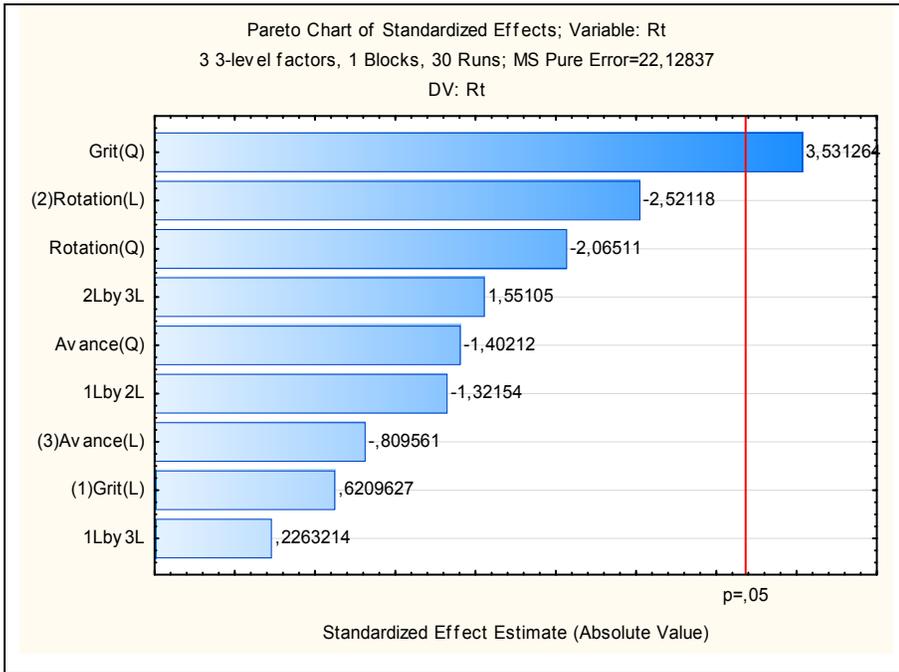


Figure 5.7 Diagramme de Pareto de Rt

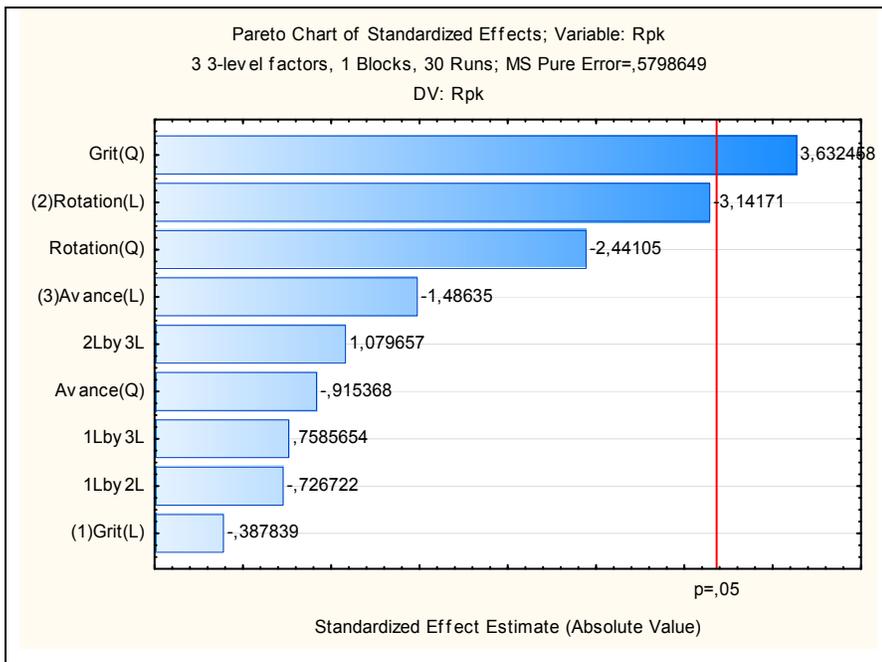


Figure 5.8 Diagramme de Pareto de Rpk

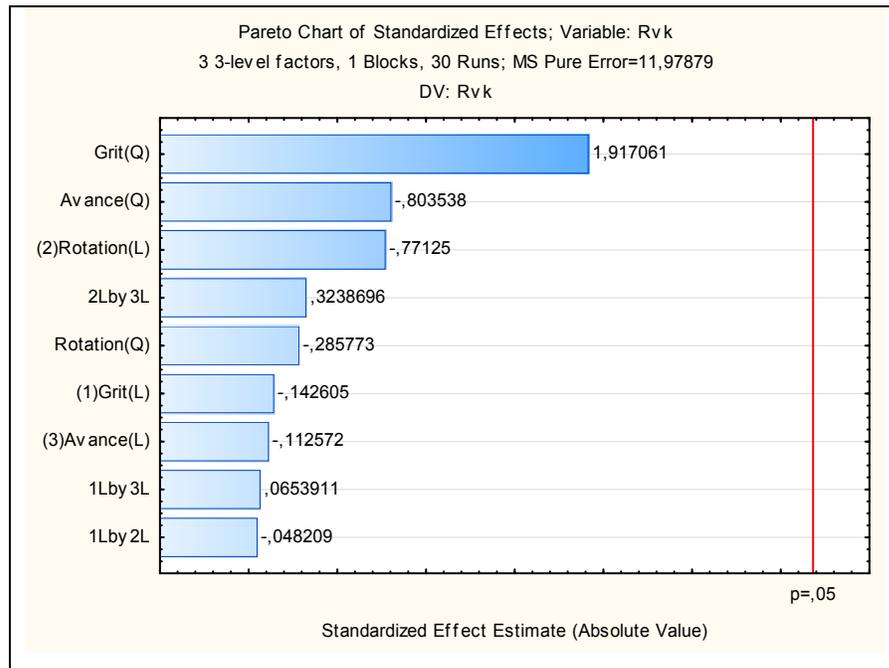


Figure 5.9 Diagramme de Pareto de Rvk

Sur le diagramme de Pareto de la figure 5.6, aucun facteur n'influence la variable réponse Ra de façon significative. Le diagramme de Pareto de Rt à la figure 5.7 montre que seul le facteur grit a un effet significatif sur la réponse Rt. Au niveau du diagramme de Pareto de Rpk, c'est aussi le grit qui a un effet significatif sur la variable de réponse Rpk (Voir Figure 5.8). Le diagramme de Pareto de la figure 5.9 montre qu'il n'y a aucun effet significatif sur la variable de réponse Rvk.

B. Tableaux des effets

Tableau 5.1 Effets des facteurs sur Ra

Facteur	Écart moyen arithmétique Ra					
	Effet	Std.Err. Erreur pure	t(3)	p	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	0,970	0,093	10,45	0,002	0,970	0,093
(1)Grit (L)	-0,193	0,235	-0,82	0,471	-0,097	0,117
Grit (Q)	0,242	0,190	1,27	0,292	0,121	0,095
(2)Rotation(L)	-0,389	0,235	-1,66	0,196	-0,194	0,117
Rotation(Q)	-0,070	0,190	-0,37	0,739	-0,035	0,095
(3)Avance (L)	-0,006	0,235	-0,03	0,981	-0,003	0,117
Avance (Q)	-0,234	0,190	-1,23	0,306	-0,117	0,095
1L * 2L	0,137	0,288	0,47	0,667	0,068	0,144
1L * 3L	0,007	0,288	0,02	0,982	0,004	0,144
2L * 3L	0,111	0,288	0,39	0,725	0,055	0,144

Tableau 5.2 Effets des facteurs sur Rt

Facteur	Hauteur totale du profil Rt					
	Effet	Std.Err. Erreur pure	t(3)	p	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	16,557	0,877	18,89	0,000	16,557	0,877
(1)Grit (L)	1,377	2,218	0,62	0,579	0,688	1,109
Grit (Q)	6,344	1,796	3,53	0,039	3,172	0,898
(2)Rotation(L)	-5,591	2,218	-2,52	0,086	-2,795	1,109
Rotation(Q)	-3,710	1,796	-2,07	0,131	-1,855	0,898
(3)Avance (L)	-1,795	2,218	-0,81	0,477	-0,898	1,109
Avance (Q)	-2,519	1,796	-1,40	0,255	-1,259	0,898
1L * 2L	-3,589	2,716	-1,32	0,278	-1,795	1,358
1L * 3L	0,615	2,716	0,23	0,835	0,307	1,358
2L * 3L	4,213	2,716	1,55	0,219	2,106	1,358

Tableau 5.3 Effets des facteurs sur Rpk

Facteur	Hauteur des pics éliminés Rpk					
	Effet	Std.Err. Erreur pure	t(3)	p	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	1,339	0,142	9,44	0,003	1,339	0,142
(1)Grit (L)	-0,139	0,359	-0,39	0,724	-0,070	0,179
Grit (Q)	1,056	0,291	3,63	0,036	0,528	0,145
(2)Rotation(L)	-1,128	0,359	-3,14	0,052	-0,564	0,179
Rotation(Q)	-0,710	0,291	-2,44	0,092	-0,355	0,145
(3)Avance (L)	-0,534	0,359	-1,49	0,234	-0,267	0,179
Avance (Q)	-0,266	0,291	-0,92	0,427	-0,133	0,145
1L * 2L	-0,319	0,440	-0,73	0,520	-0,160	0,220
1L * 3L	0,334	0,440	0,76	0,503	0,167	0,220
2L * 3L	0,475	0,440	1,08	0,359	0,237	0,220

Tableau 5.4 Effets des facteurs sur Rvk

Facteur	Hauteur des creux éliminés Rvk					
	Effet	Std.Err. Erreur pure	t(3)	p	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	4,196	0,645	6,507	0,007	4,196	0,645
(1)Grit (L)	-0,233	1,632	-0,143	0,896	-0,116	0,816
Grit (Q)	2,534	1,322	1,917	0,151	1,267	0,661
(2)Rotation(L)	-1,258	1,632	-0,771	0,497	-0,629	0,816
Rotation(Q)	-0,378	1,322	-0,286	0,794	-0,189	0,661
(3)Avance (L)	-0,184	1,632	-0,113	0,917	-0,092	0,816
Avance (Q)	-1,062	1,322	-0,804	0,480	-0,531	0,661
1L * 2L	-0,096	1,998	-0,048	0,965	-0,048	0,999
1L * 3L	0,131	1,998	0,065	0,952	0,065	0,999
2L * 3L	0,647	1,998	0,324	0,767	0,324	0,999

Les tableaux 5.1 , 5.2, 5.3 et 5.4 nous permettent d'obtenir les probabilités P de chaque facteur ainsi que leurs interactions afin de pouvoir faire la comparaison avec le seuil de

signification «P-value» qui est de 0.05. Ils nous permettent aussi de connaître les effets des facteurs et leurs coefficients sur les variables de réponses Ra, Rt, Rpk et Rvk.

On remarque sur le tableau 5.1 de la variable réponse Ra, que c'est seulement l'effet général (la moyenne de toutes les réponses) qui est significatif. Sa valeur est de 0.970 avec une probabilité égale à 0.002. Sur le tableau 5.2 nous avons uniquement l'effet quadratique du grit sur la variable de réponse Rt. Sa valeur est de 6.344 avec une probabilité de 0.039. Le tableau 5.3 donne aussi l'effet quadratique du grit sur la variable réponse Rpk. La valeur correspondant à cet effet est de 1.056 avec une probabilité de 0.036. Aucun facteur n'a d'effet significatif sur la variable de réponse Rvk sur le tableau 5.4. Seul l'effet général est significatif et a une valeur de 4.196 avec une probabilité de 0.007.

C. Graphiques des effets sur échelle demi gaussienne

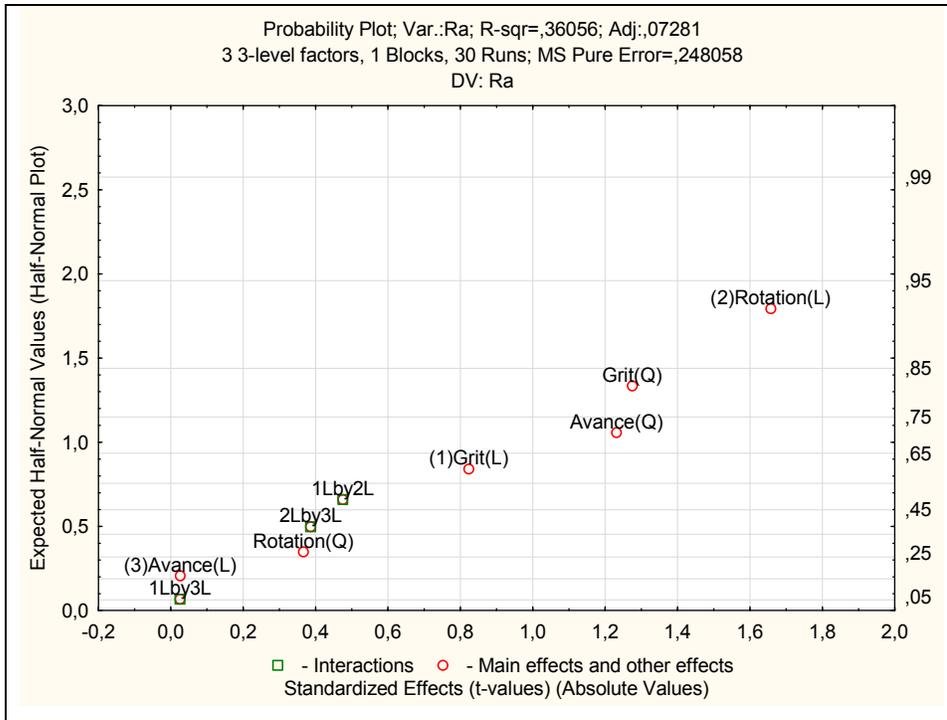


Figure 5.10 Effets sur échelle demi gaussienne de Ra

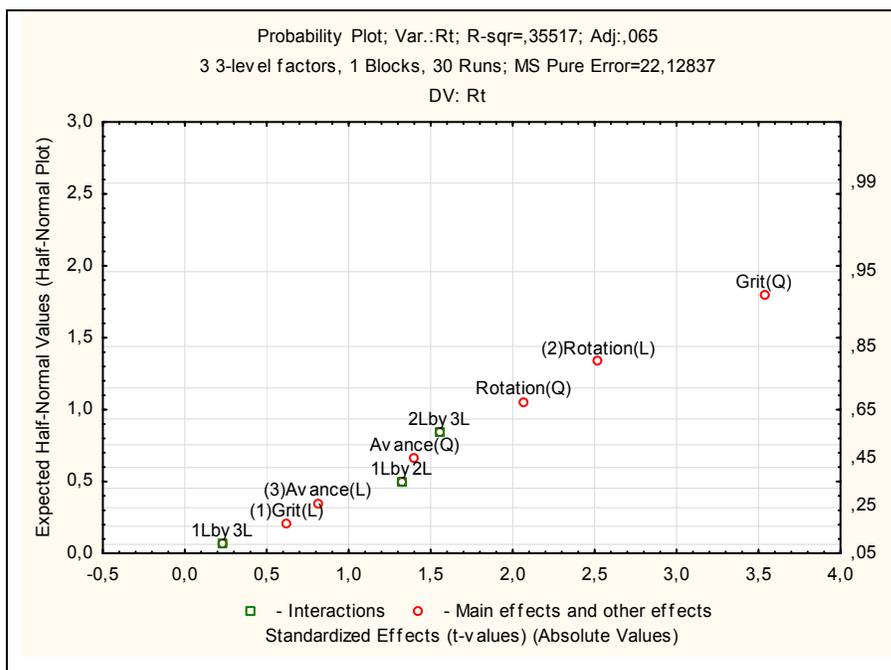


Figure 5.11 Effets sur échelle demi gaussienne de Rt

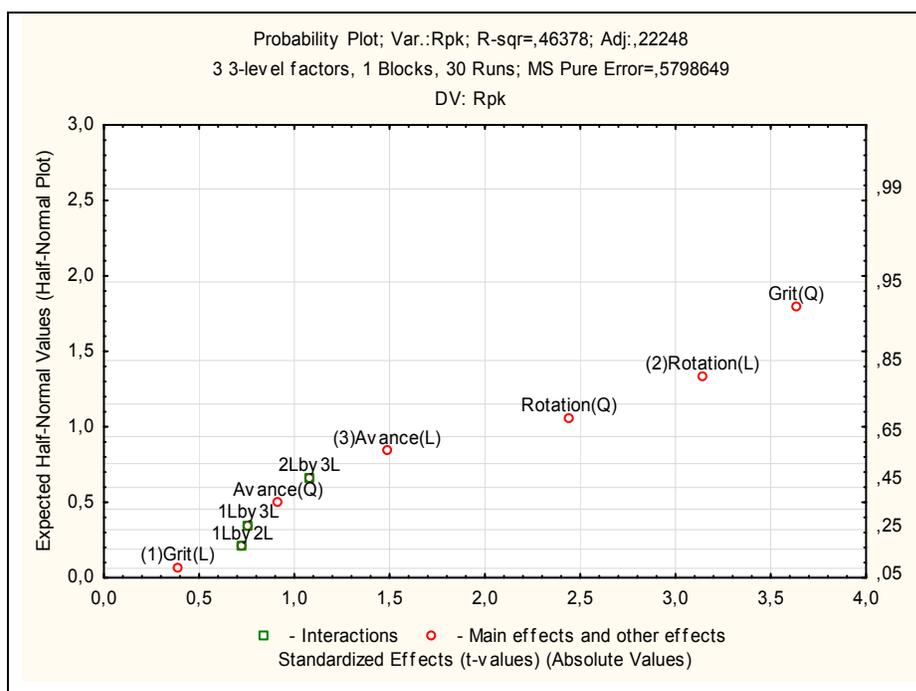


Figure 5.12 Effets sur échelle demi gaussienne de Rpk

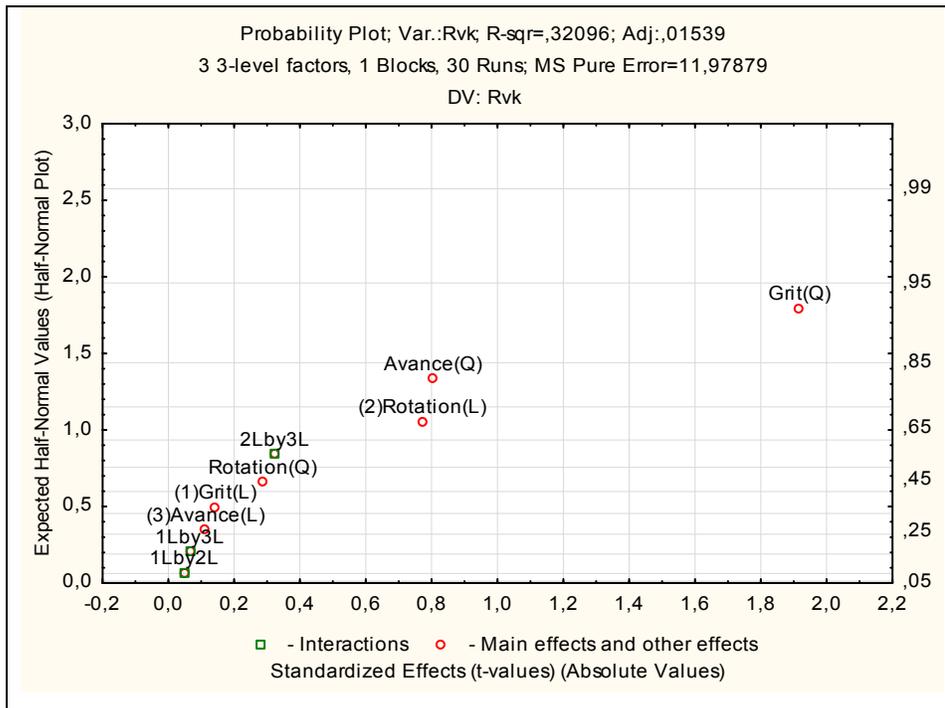


Figure 5.13 Effets sur échelle demi gaussienne de Rvk

Les graphiques des figures 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 mettent en relief les facteurs qui ont des effets significatifs sur la variable de réponse. Ces facteurs et interactions influents ou importants ne sont pas alignés avec les autres.

Sur la figure 5.10, bien qu'aucun facteur n'influence la réponse Ra de façon significative, nous constatons le détachement de l'effet linéaire de la vitesse de rotation par rapport aux autres facteurs. Cette vitesse de rotation linéaire est suivie du grit quadratique et de l'avance quadratique. On note aussi l'influence du grit quadratique sur les figures 5.11 et 5.12. Le grit (Q) n'est pas aligné avec les autres facteurs et interactions. Au niveau de la figure 5.13, on remarque que c'est aussi le grit (Q) qui, compte tenu de son importance, n'est pas aligné avec les autres éléments même si, dans l'ensemble, aucun facteur n'est influent.

5.2.2 Analyse de variance

Les tableaux de l'Anova ci-dessous représentés vont nous permettre de faire notre analyse.

A. Tableaux de l'Anova

Tableau 5.5 Analyse de variance de Ra

Facteur	ANOVA $R^2 = 0.36$ $R^2_{aj} = 0.07$ Écart moyen arithmétique Ra				
	SS	df	MS	F	p
(1)Grit (L)	0,168	1	0,168	0,677	0,471
Grit (Q)	0,403	1	0,403	1,624	0,292
(2)Rotation(L)	0,681	1	0,681	2,745	0,196
Rotation(Q)	0,033	1	0,033	0,134	0,739
(3)Avance (L)	0,000	1	0,000	0,001	0,981
Avance (Q)	0,376	1	0,376	1,515	0,306
1L * 2L	0,056	1	0,056	0,225	0,667
1L * 3L	0,000	1	0,000	0,001	0,982
2L * 3L	0,037	1	0,037	0,149	0,725
Manque d'ajustement	2,195	17	0,129	0,520	0,836
Erreur pure	0,744	3	0,248		
SS Total	4,596	29			

Tableau 5.6 Analyse de variance de Rt

Facteur	ANOVA $R^2 = 0.36$ $R^2_{aj} = 0.07$ Hauteur totale du profil Rt				
	SS	df	MS	F	p
(1)Grit (L)	8,5	1	8,5	0,39	0,579
Grit (Q)	275,9	1	275,9	12,47	0,039
(2)Rotation(L)	140,7	1	140,7	6,36	0,086
Rotation(Q)	94,4	1	94,4	4,26	0,131
(3)Avance (L)	14,5	1	14,5	0,66	0,477
Avance (Q)	43,5	1	43,5	1,97	0,255
1L * 2L	38,6	1	38,6	1,75	0,278
1L * 3L	1,1	1	1,1	0,05	0,835
2L * 3L	53,2	1	53,2	2,41	0,219
Manque d'ajustement	1057,1	17	62,2	2,81	0,214
Erreur pure	66,4	3	22,1		
SS Total	1742,3	29			

Tableau 5.7 Analyse de variance de Rpk

Facteur	ANOVA $R^2 = 0.46$ $R^2_{aj} = 0.22$ Hauteur des pics éliminés Rpk				
	SS	df	MS	F	p
(1)Grit (L)	0,09	1	0,087	0,15	0,724
Grit (Q)	7,65	1	7,651	13,19	0,036
(2)Rotation(L)	5,72	1	5,723	9,87	0,052
Rotation(Q)	3,46	1	3,455	5,96	0,092
(3)Avance (L)	1,28	1	1,281	2,21	0,234
Avance (Q)	0,49	1	0,486	0,84	0,427
1L * 2L	0,31	1	0,306	0,53	0,520
1L * 3L	0,33	1	0,334	0,58	0,503
2L * 3L	0,68	1	0,676	1,17	0,359
Manque d'ajustement	19,72	17	1,160	2,00	0,313
Erreur pure	1,74	3	0,580		
SS Total	40,02	29			

Tableau 5.8 Analyse de variance de Rvk

Facteur	ANOVA $R^2 = 0.32$ $R^2_{aj} = 0.02$ Hauteur des creux éliminés Rvk				
	SS	df	MS	F	p
(1)Grit (L)	0,2	1	0,24	0,020	0,896
Grit (Q)	44,0	1	44,02	3,675	0,151
(2)Rotation(L)	7,1	1	7,13	0,595	0,497
Rotation(Q)	1,0	1	0,98	0,082	0,794
(3)Avance (L)	0,2	1	0,15	0,013	0,917
Avance (Q)	7,7	1	7,73	0,646	0,480
1L * 2L	0,0	1	0,03	0,002	0,965
1L * 3L	0,1	1	0,05	0,004	0,952
2L * 3L	1,3	1	1,26	0,105	0,767
Manque d'ajustement	83,5	17	4,91	0,410	0,900
Erreur pure	35,9	3	11,98		
SS Total	175,8	29			

Le manque d'ajustement (lack of fit) n'est significatif sur aucun des quatre tableaux. Cela montre que le modèle général que nous avons choisi est le bon modèle pour cette étude que nous effectuons. Les coefficients de détermination et les coefficients de détermination ajustés se présentent comme suit :

Sur le tableau 5.5 de la réponse Ra, $R^2 = 0,36$ et R^2 ajusté = 0,07;

Sur le tableau 5.6 de la réponse Rt, $R^2 = 0,36$ et R^2 ajusté = 0,07;

Sur le tableau 5.7 de la réponse Rpk, $R^2 = 0,46$ et R^2 ajusté = 0,22;

Sur le tableau 5.8 de la réponse Rvk, $R^2 = 0,32$ et R^2 ajusté = 0,02.

B. Modèles de prédiction proposés

Le seul facteur qui influence les variables réponses Rt et Rpk selon le diagramme de Pareto est le grit (X_1 : grosseur des grains abrasifs). Voici les modèles correspondant à ces variables réponses :

$$\hat{R}_t = 16,557 + 3,172X_1^2 \quad (5.1)$$

$$\hat{R}_{pk} = 1,339 + 0,528X_1 \quad (5.2)$$

Avec :

X_1 variant de -1 à +1 (valeurs codées) : taille des grains de la meule;

Les coefficients de détermination ajustés de l'analyse de variance (ANOVA) sont très faibles et ne permettent pas d'avoir des modèles de prédiction fiables même si les manques d'ajustement (lack of fit) ne sont pas significatifs. Pour ce faire, les deux modèles ci-dessus présentés sont rejetés.

5.3 Surface de réponse simultanée du fini de surface

Les quatre variables réponse du fini de surface sont représentées simultanément sous forme de fonction de désirabilité sur la figure 5.14 ci-dessous.

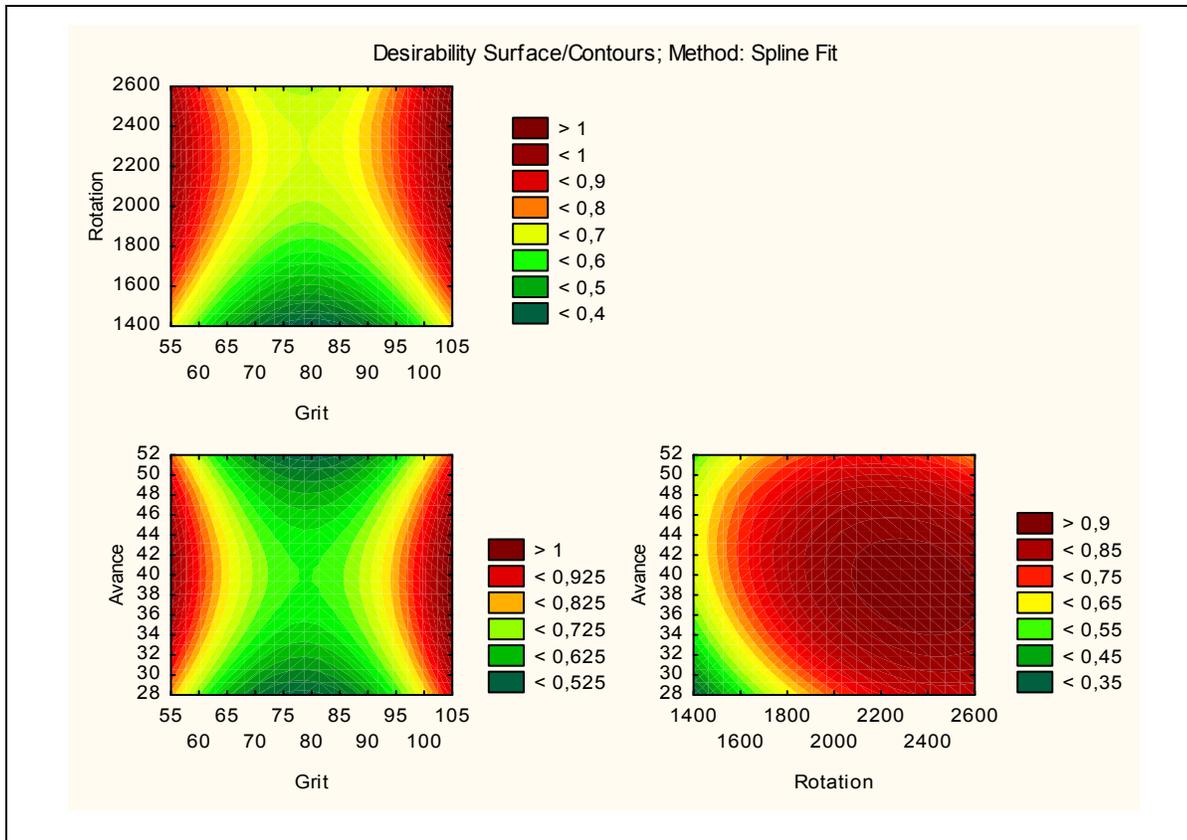


Figure 5.14 Surface de réponse simultanée du fini de surface

Mentionnons que la surface de réponse de la fonction de désirabilité ci-dessus représentée est basée sur la transformation de toutes les quatre variables réponses du fini de surface telles que Ra, Rt, Rpk et Rvk en une échelle unique de désirabilité «d» comprise entre 0 et 1. Rappelons que la valeur 0 est utilisée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirable) tandis que la valeur 1 est employée lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés. La partie rouge est la zone de l'optimalité. C'est-à-dire la région autour des valeurs critiques où les variables réponses changent peu.

5.4 Discussions et conclusion

Les études antérieures ont démontré que les conditions de coupe influencent le fini de surface. Soulignons que la plupart de ces études ont été réalisées sur les métaux. Il demeure important de mentionner que le polissage du granit demande une attention particulière compte tenu de ses caractéristiques. Les résultats que nous avons obtenus suite à notre expérimentation ne nous permettent pas d'un coup d'affirmer l'influence des paramètres de coupe, tels que le grit, la vitesse de rotation et l'avance sur le fini de surface. Ceci dans la mesure où il n'y a que la grosseur des grains (grit) qui influence de façon significative les variables réponses R_t et R_{pk} . Signalons que tous les modèles découlant de l'étude sont rejetés compte tenu de la faiblesse des coefficients de détermination. En observant attentivement les tableaux d'analyse de variance, on peut noter que dans aucun des cas le manque d'ajustement n'est significatif. Ce qui nous permet de dire que le rapprochement des niveaux des facteurs peut être une des causes du manque d'influence des paramètres de coupe. Car, comme le mentionne Djebara (2010) «Il est important de préciser que si les niveaux sont trop près les uns des autres, ils ne peuvent pas mettre en évidence l'effet des facteurs. Par contre s'ils sont trop éloignés les uns des autres, l'hypothèse de linéarité est moins réaliste et elle peut ainsi conduire à des combinaisons de facteurs inapplicables dans la pratique».

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le polissage occupe effectivement une place privilégiée au niveau des diverses activités réalisées par les entreprises de transformation de granits. Les exigences technologiques que connaissent les industries de nos jours amènent à trouver des techniques adéquates pour répondre aux besoins réels de la clientèle. Le choix des méthodes de polissage dépend donc des opérations à réaliser. Bien que le polissage soit le procédé par excellence au sein de ces industries, nous avons constaté qu'au cours de nos visites industrielles que d'autres travaux d'usinage tels que le sciage, le perçage, le chanfreinage, etc. trouvent aussi leur place dans la gamme des opérations effectuées sur les granits.

Les études présentées dans la revue de littérature ont démontré que l'exposition aux poussières de granit peut effectivement entraîner des problèmes de santé. Aussi, on a constaté que l'exposition régulière de poussière au travail peut provoquer la toxicité et l'inflammation chez les opérateurs de granit.

Mentionnons que les recherches que nous avons menées, combinées avec les visites industrielles effectuées, nous ont permis de noter que la plupart des industries ont mis en place des moyens nécessaires pour réduire les émissions de poussières à la source afin de permettre à leurs employés de travailler dans de bonnes conditions.

L'analyse sur les pratiques industrielles nous a aussi permis de mettre en exergue la similarité ou la différence en matière de pratiques dans les industries de transformation du granit ici, au Québec et ailleurs dans le monde. Nous avons constaté, suite à cette analyse, que chaque compagnie a sa saveur locale, même si à première vue il y a de fortes ressemblances au niveau des travaux réalisés, des techniques employées et des machineries utilisées. Il est important de rappeler que la plupart des industries procèdent à l'extraction, au débitage, au sciage, à l'usinage, au polissage, etc. La différence notée réside donc dans la capacité et la taille des entreprises, voire même dans les techniques individuelles utilisées.

L'expérimentation sur le polissage du granit nous a permis d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur les émissions de poussières et la qualité du fini de surface. Nous avons constaté que les paramètres de coupe tels que la grosseur des grains abrasifs (grit), la vitesse de rotation et la vitesse d'avance ont effectivement une influence significative sur la concentration en surface et sur la concentration en masse des particules de poussières générées. Au niveau de la concentration en nombre, le seul facteur influent est la vitesse de rotation. Cependant, le modèle de prédiction qui s'y rattache ne présente aucune fiabilité compte tenu du fait que son coefficient de détermination est très faible. La désirabilité obtenue par la combinaison des trois variables de réponse nous permet d'assurer une bonne productivité tout en minimisant les émissions de poussières. Nous avons aussi constaté, suite à l'expérimentation, qu'au niveau de l'analyse du fini de surface, que la grosseur des grains (grit) est le premier facteur qui influence les variables de réponse, viennent ensuite la vitesse de rotation et l'avance.

RECOMMANDATIONS

Les conclusions sur lesquelles nous nous sommes arrêtées suite à l'étude effectuée sur le polissage des granits nous amènent à formuler les recommandations suivantes:

- Les particules de poussières de granit captées et analysées sont des particules de grosseurs micrométriques, il serait bon de poursuivre l'analyse au niveau des particules ultra-fines à l'échelle nanométrique dans les mêmes conditions.
- Le rapprochement des niveaux de facteurs peut entraîner l'obtention des données aberrantes. Pour ce faire, il serait bon d'élargir l'espace expérimental en sortant de la zone de fragilité de l'abrasif. C'est-à-dire étendre le choix des grosseurs d'abrasifs de manière à passer de la zone de fragilité à la zone de ductilité.
- L'outil abrasif a besoin d'un peu plus de temps sur la surface usinée pour enlever complètement les traces laissées par l'abrasif précédent. Il serait alors bon d'augmenter la durée de polissage afin de permettre à l'abrasif de mieux polir la surface.
- La grosseur des grains abrasifs varie de façon décroissante d'une opération à l'autre. On peut améliorer le fini de surface en s'assurant de bien nettoyer la pièce de granit entre les changements d'abrasifs et avant la prise des mesures.

ANNEXE I

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES

Essai	X1	X2	X3	C ^P (#/cm ³)	C ^S (µm ² /cm ³)	C ^M (mg/m ³)
1	-1	-1	-1	5470	3490	2,42
2	-1	-1	0	5400	3310	2,16
3	-1	-1	1	5030	3220	2,19
4	-1	0	-1	5300	5850	5,82
5	-1	0	0	5230	4480	3,87
6	-1	0	1	2190	4390	4,42
7	-1	1	-1	2510	6510	7,26
8	-1	1	0	4590	5010	4,59
9	-1	1	1	2660	5180	5,26
10	0	-1	-1	2210	4420	4,12
11	0	-1	0	5740	4020	2,92
12	0	-1	1	5690	3880	2,77
13	0	0	-1	5570	4440	3,74
14	0	0	0	2250	4100	3,71
15	0	0	1	5560	4340	3,51
16	0	1	-1	5120	6970	7,41
17	0	1	0	5310	5250	4,98
18	0	1	1	2480	5010	4,80
19	1	-1	-1	6070	3970	2,63
20	1	-1	0	4120	3290	2,23
21	1	-1	1	5700	4190	2,92
22	1	0	-1	5680	3870	2,71
23	1	0	0	5610	3840	2,70
24	1	0	1	5450	3800	2,72
25	1	1	-1	3520	4580	4,08
26	1	1	0	2210	3900	3,46
27	1	1	1	2850	4190	3,62
28	0	0	0	3360	3650	2,90
29	0	0	0	2030	3620	3,06
30	0	0	0	2920	3510	2,75

ANNEXE II

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES FINIS DE SURFACE

Essai	X1	X2	X3	Ra (µm)	Rt (µm)	Rpk (µm)	Rvk (µm)
1	-1	-1	-1	1,289	15,758	1,697	4,222
2	-1	-1	0	0,744	8,567	0,481	1,522
3	-1	-1	1	1,725	17,888	1,666	5,544
4	-1	0	-1	1,194	19,187	1,102	4,206
5	-1	0	0	0,54	7,99	0,467	1,33
6	-1	0	1	1,161	15,105	0,653	4,854
7	-1	1	-1	1,173	24,932	2,56	6,875
8	-1	1	0	0,632	8,357	0,525	1,618
9	-1	1	1	0,413	6	0,361	1,041
10	0	-1	-1	1,47	33,028	4,733	7,308
11	0	-1	0	1,511	29,407	5,076	8,338
12	0	-1	1	0,835	14,154	0,904	4,665
13	0	0	-1	1,267	8,246	1,496	6,234
14	0	0	0	1,736	24,912	2,373	10,655
15	0	0	1	1,339	26,277	2,151	6,233
16	0	1	-1	0,417	8,107	0,336	1,209
17	0	1	0	0,564	14,675	0,875	2,719
18	0	1	1	1,595	30,873	2,065	9,144
19	1	-1	-1	1,226	28,543	1,964	5,466
20	1	-1	0	0,836	18,086	0,895	3,416
21	1	-1	1	1,052	19,868	1,843	4,081
22	1	0	-1	0,577	12,642	0,367	2,402
23	1	0	0	0,486	6,901	0,33	1,491
24	1	0	1	0,562	8,099	0,473	1,631
25	1	1	-1	0,846	14,203	0,999	3,857
26	1	1	0	0,826	17,61	1,052	3,841
27	1	1	1	0,721	10,225	0,336	2,933
28	0	0	0	0,756	14,25	0,791	3,63
29	0	0	0	0,677	16,215	0,925	3,555
30	0	0	0	0,803	16,829	0,846	4,056

ANNEXE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES FORCES DE COUPE

Essai	X1	X2	X3	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
1	-1	-1	-1	24,06	15,99	54,37
2	-1	-1	0	34,63	15,27	49,27
3	-1	-1	1	32,18	20,88	69,05
4	-1	0	-1	21,6	20,63	93,65
5	-1	0	0	29,31	15,45	104,4
6	-1	0	1	23,69	14,76	119,9
7	-1	1	-1	29,41	20,42	134,7
8	-1	1	0	31,51	20,88	150
9	-1	1	1	26,74	20,58	163,9
10	0	-1	-1	28,48	21,85	222,1
11	0	-1	0	23,74	17,27	197,5
12	0	-1	1	17,39	16,35	205,4
13	0	0	-1	20,83	18,56	221,9
14	0	0	0	18,1	17,04	225,5
15	0	0	1	21,81	19,07	250,9
16	0	1	-1	25,91	29,54	262,6
17	0	1	0	29,32	24,07	259,6
18	0	1	1	29,24	23,64	272,3
19	1	-1	-1	30,31	13,6	121,9
20	1	-1	0	14,34	16,21	55,53
21	1	-1	1	12,65	14,32	68,09
22	1	0	-1	16,14	14,36	71,43
23	1	0	0	15,22	14,52	91,25
24	1	0	1	20,45	16,35	118
25	1	1	-1	19,88	19,34	127
26	1	1	0	21,69	19,58	147,5
27	1	1	1	17,62	18,54	161,2
28	0	0	0	23,47	23,62	263,4
29	0	0	0	25,61	22,13	266,4
30	0	0	0	30,81	21,56	279,1

ANNEXE IV

PROFILS DE RUGOSITÉ OBTENUS PAR SURFEST SJ 400

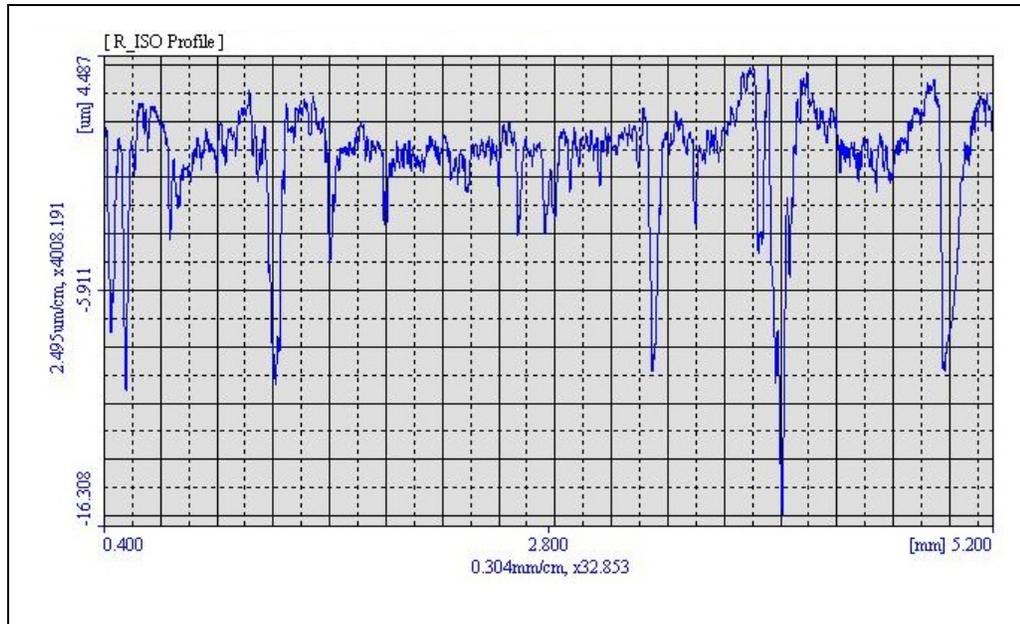


Figure-A IV-1 Profil obtenu à l'essai initial-Grit:45 ; Ra:1.612 µm

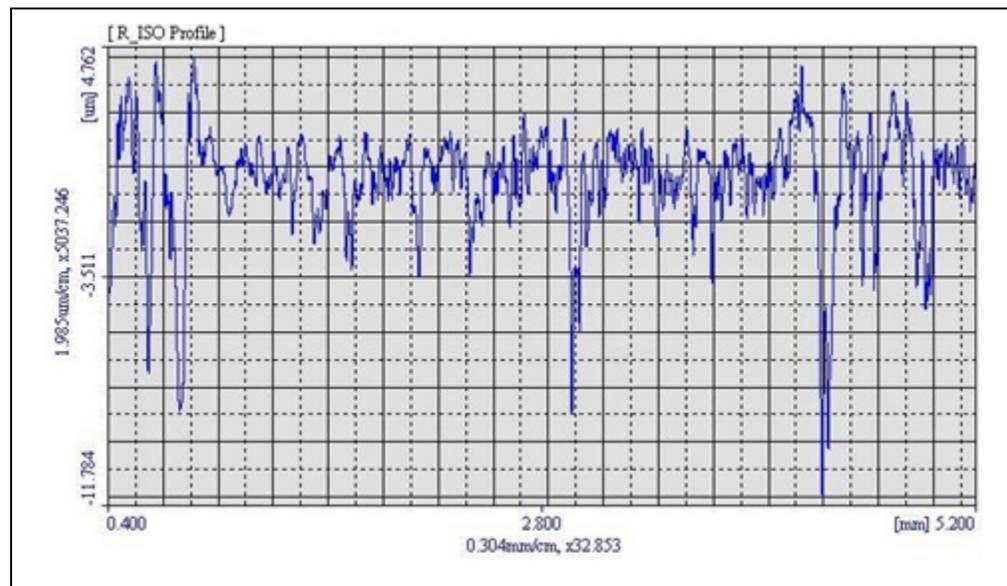


Figure-A IV-2 Profil obtenu à l'essai no.1-Grit:60 ; Ra:1.289 µm

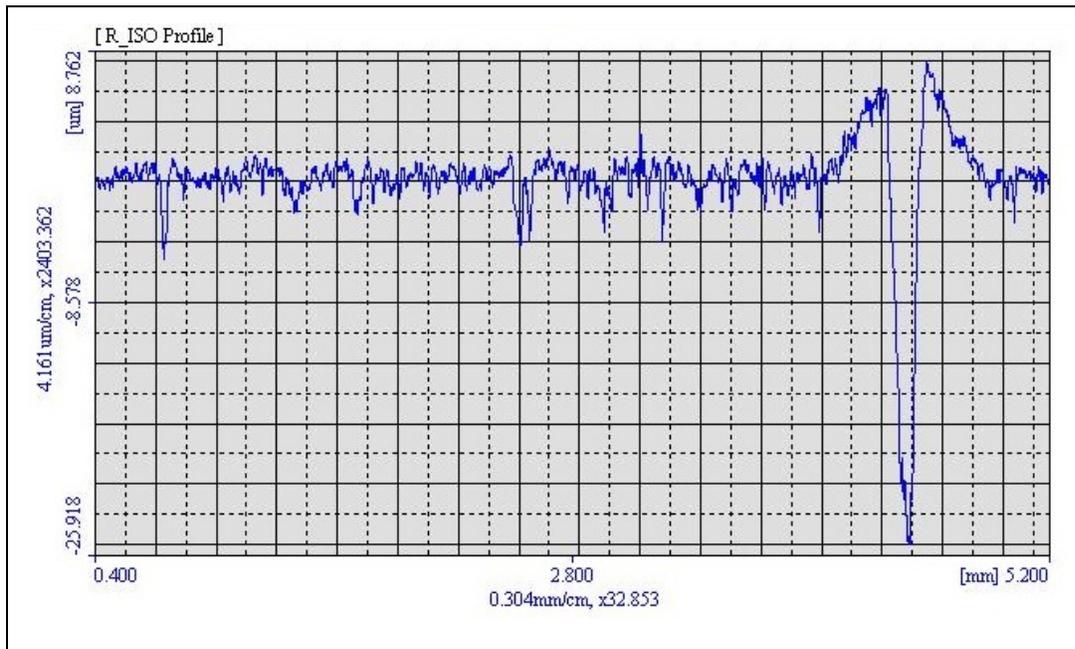


Figure-A IV-3 Profil obtenu à l'essai no.10-Grit:80 ; Ra:1.470 µm

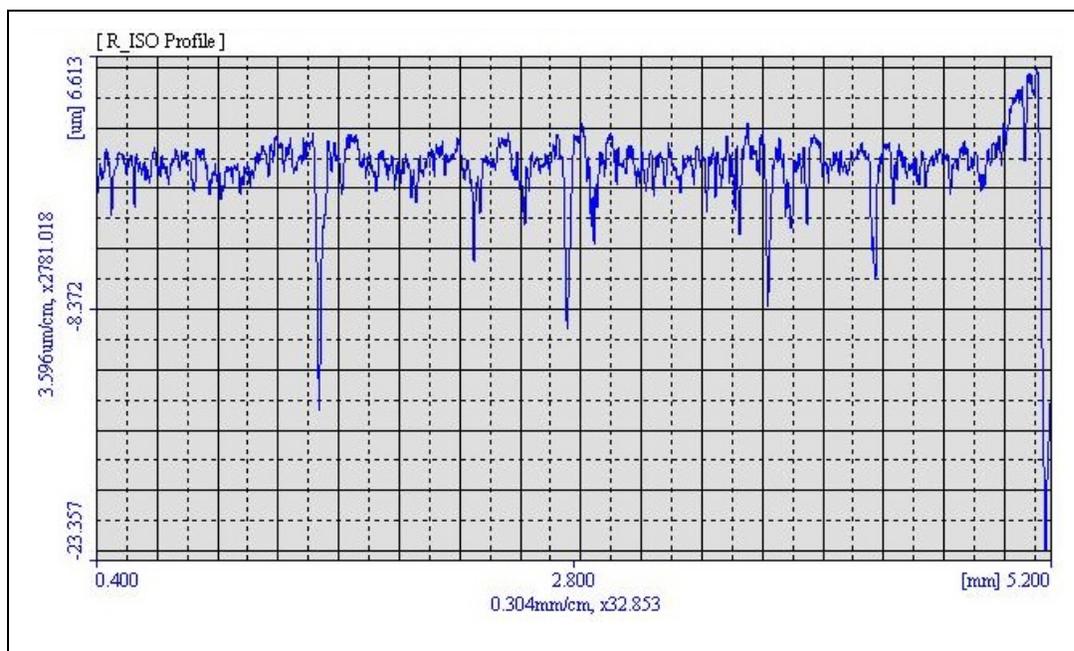


Figure-A IV-4 Profil obtenu à l'essai no.19-Grit:100 ; Ra:1.229 µm

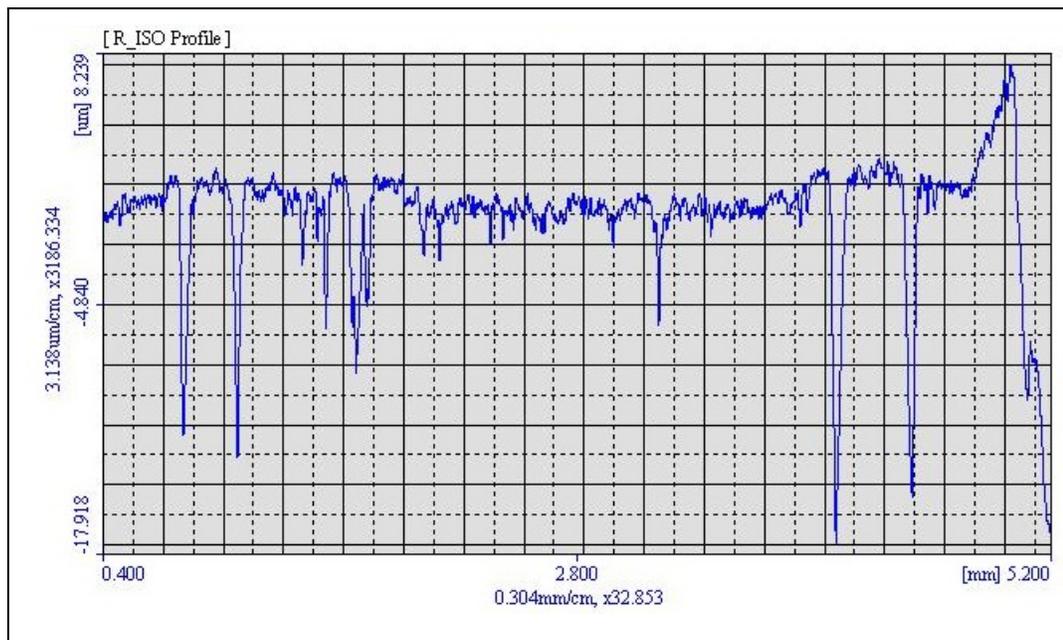


Figure-A IV-5 Profil obtenu à l'essai no.14-Grit:80 ; Ra:1.736 µm

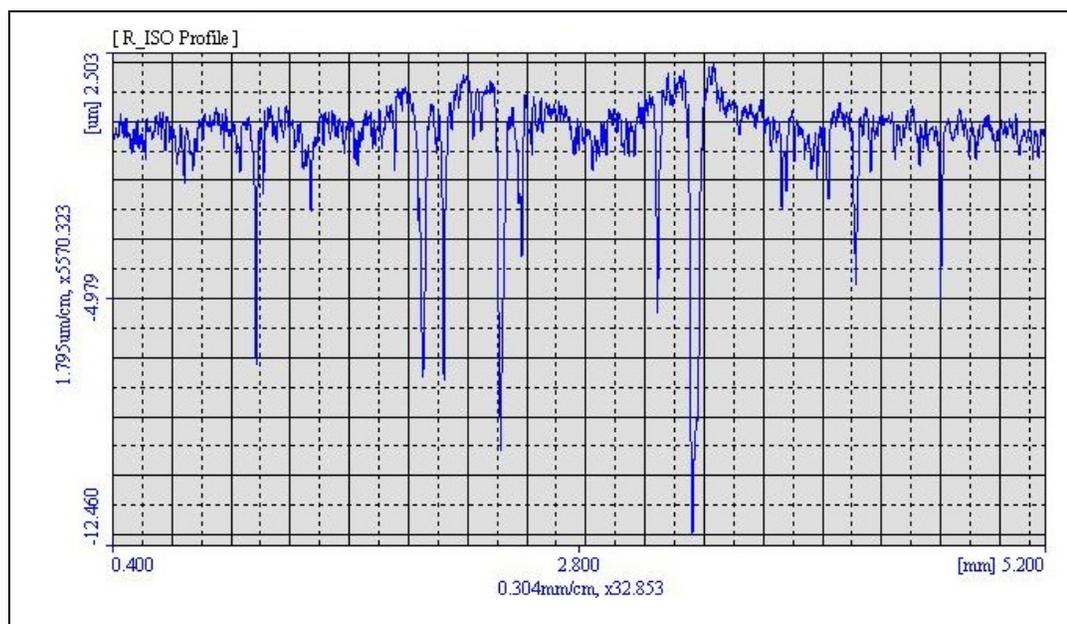


Figure-A IV-6 Profil obtenu à l'essai no.28-Grit:80 ; Ra:0.756 µm

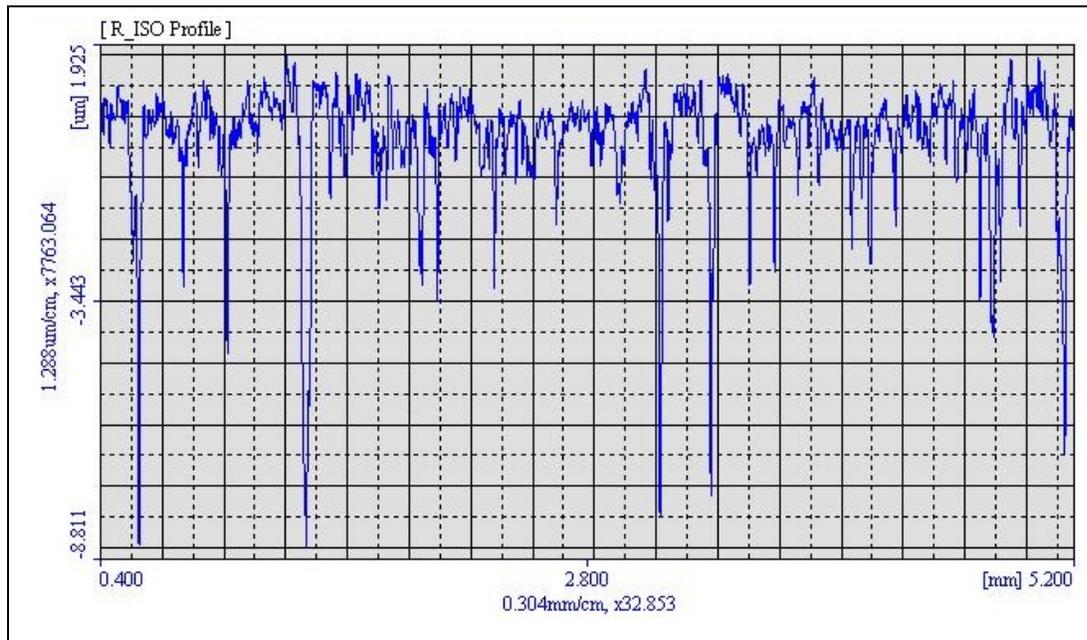


Figure-A IV-7 Profil obtenu à l'essai no.27-Grit:100 ; Ra:0.721 µm

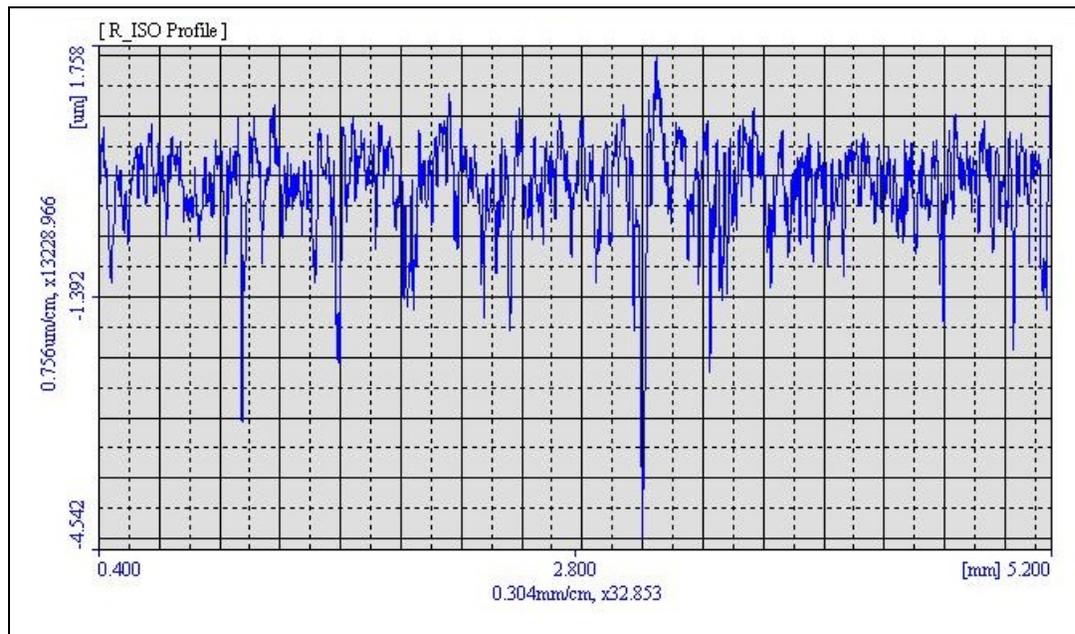


Figure-A IV-8 Profil obtenu à l'essai no.9-Grit:60 ; Ra:0.423 µm

ANNEXE V

COURBE DE CALIBRATION DU PORTE-OUTIL AVEC RESSORTS

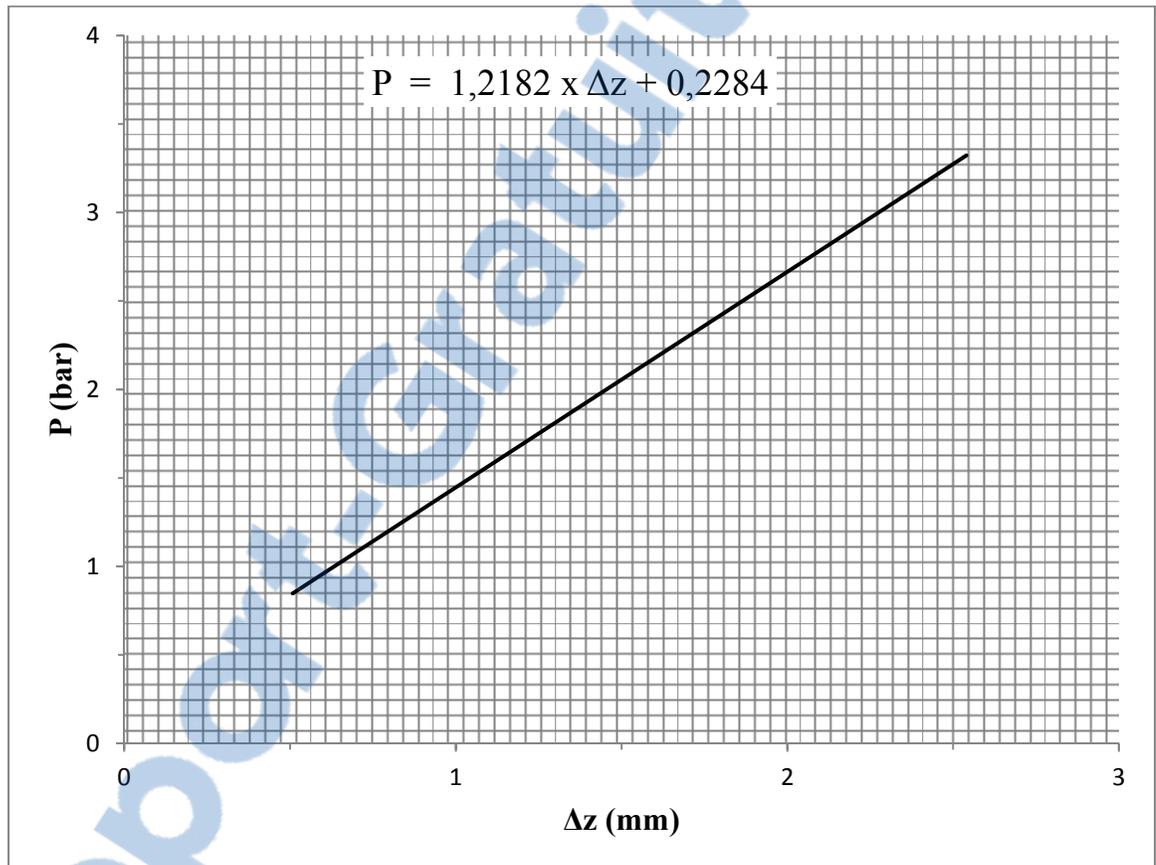


Figure-A V-1 Courbe de calibration du porte-outil
Tirée de Saïdi (2014)

ANNEXE VI

IMAGES DES ROCHES DE GRANIT, MARBRE ET QUARTZ EXPOSÉES À L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



Figure-A VI-1 Bloc de granit



Figure-A VI-2 Bloc de marbre



Figure VI-3 Bloc de quartz

ANNEXE VII

PRÉSENTATION GRAPHIQUE DES ÉMISSIONS DE POUSSIÈRES

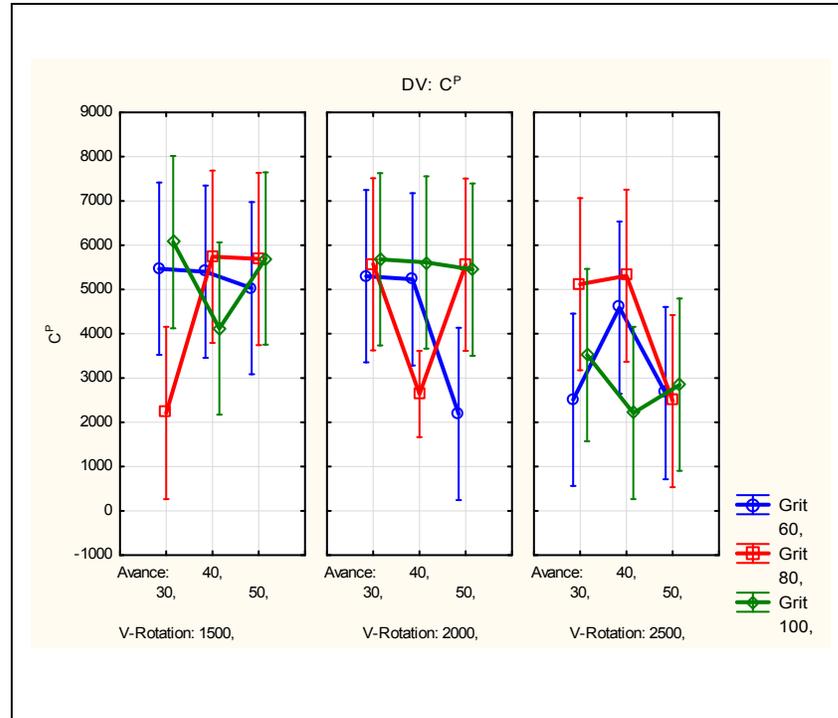


Figure-A VII-1 Concentration moyenne en nombre (#/cm³)

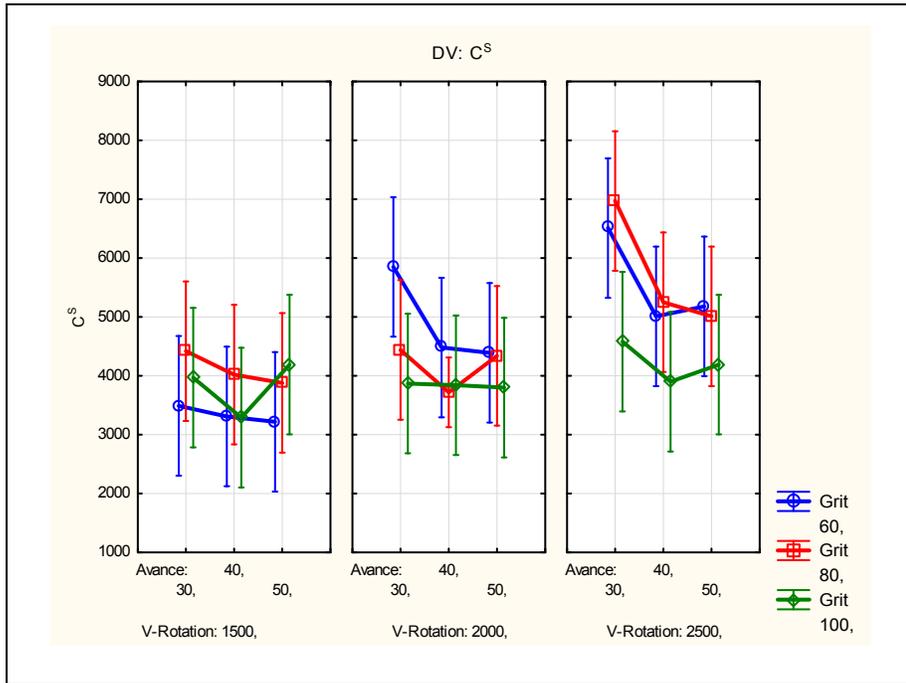


Figure-A VII-2 Concentration moyenne en surface ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)

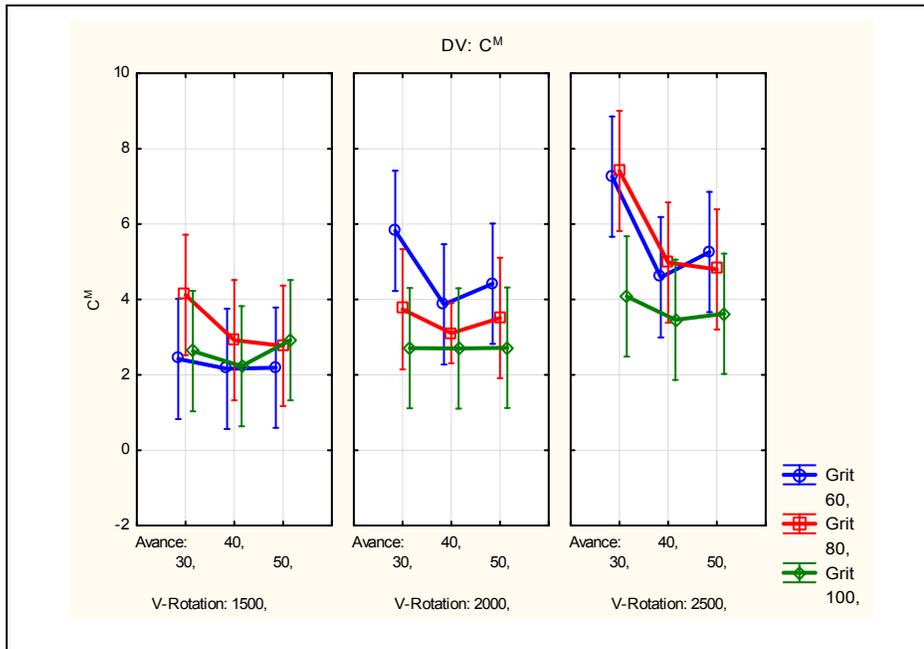


Figure-A VII-3 Concentration moyenne en masse (mg/m^3)

ANNEXE VIII

PRÉSENTATION GRAPHIQUE DES FINIS DE SURFACE

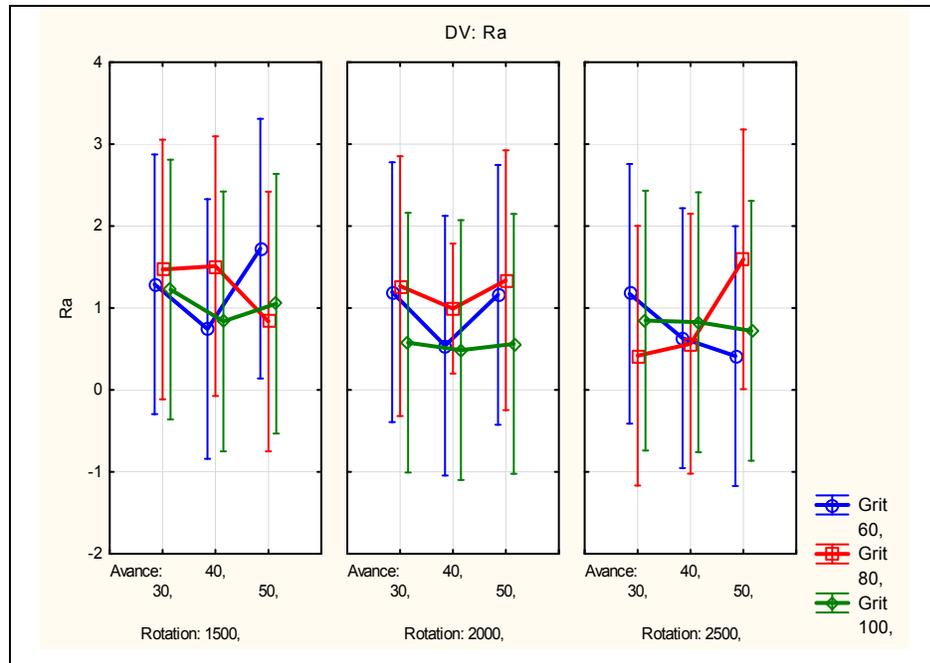


Figure-A VIII-1 Moyenne des Ra en fonction des paramètres de coupe

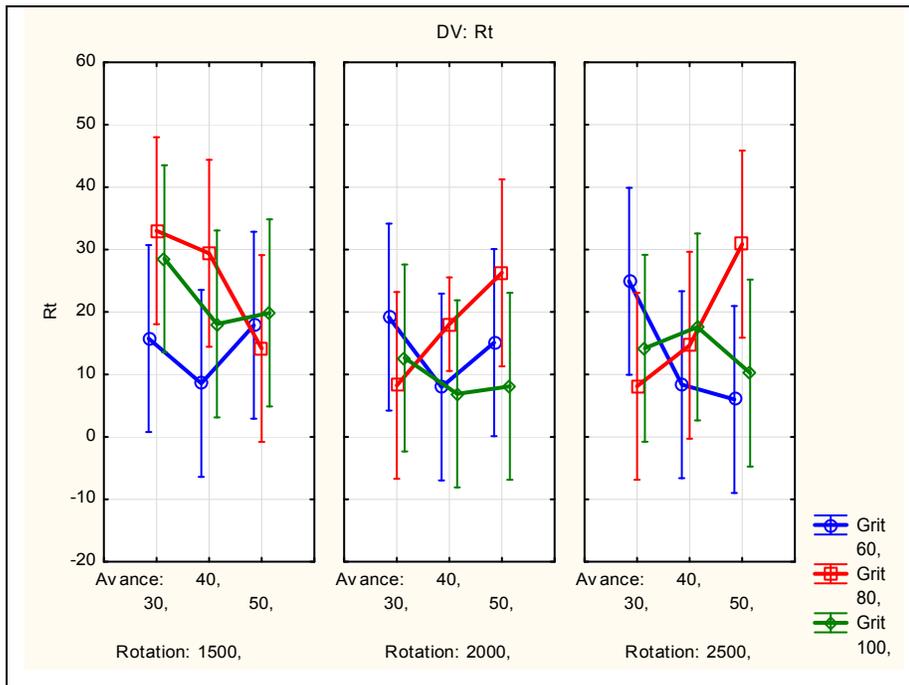


Figure-A VIII-2 Moyenne des Rt en fonction des paramètres de coupe

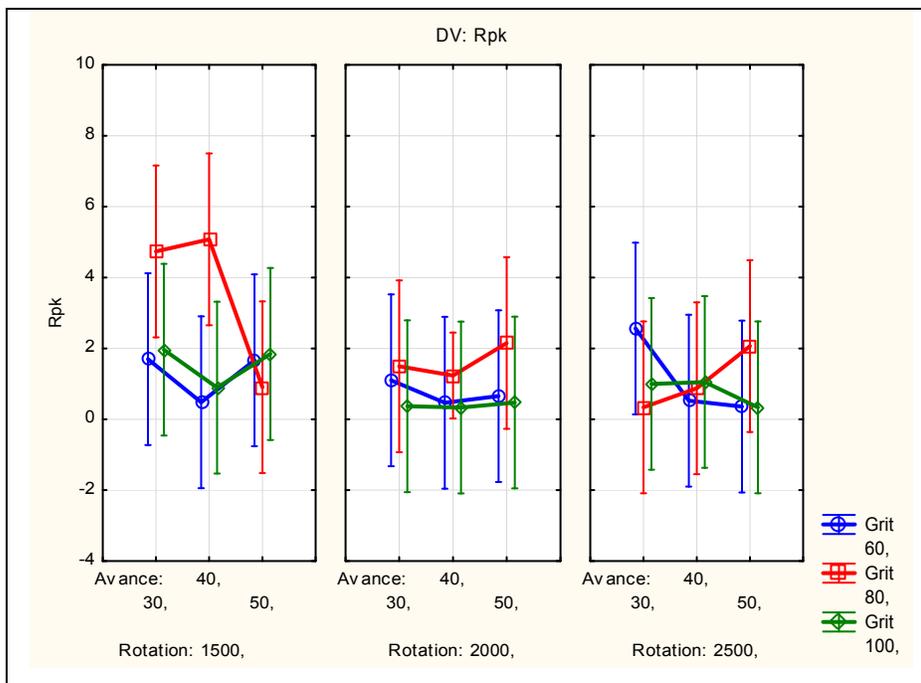


Figure-A VIII-3 Moyenne des Rpk en fonction des paramètres de coupe

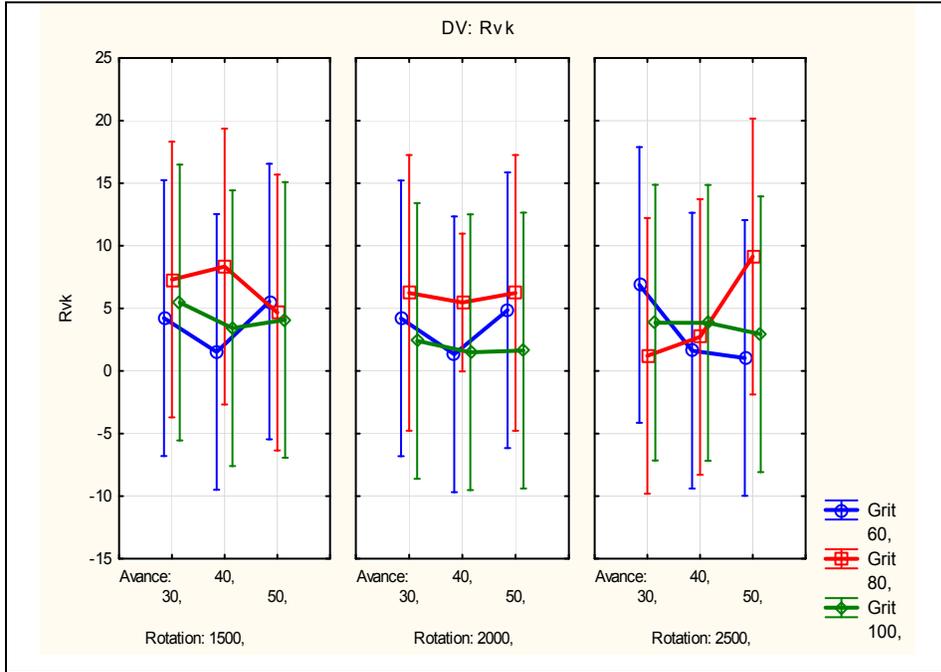


Figure-A VIII-4 Moyenne des Rvk en fonction des paramètres de coupe

BIBLIOGRAPHIE

- Ahmad, I., M. I. Khan et G. Patil. 2011. «Nanotoxicity of occupational dust generated in granite stone saw mill». Conférence on nanoscience, Technology and Societal Implications, Bhubaneswar, 8-9 December 2011, p. 1-6.
- A-Lacroix Granit. 2015. En ligne. <<http://www.lacroixgranit.com/index.php>> Consulté le 18 janvier 2015.
- Balazinski, M. 2013. MEC4530 : Fabrication mécanique avancée : notes de cours MEC-4530. Programme de baccalauréat en génie mécanique. Montréal : École Polytechnique de Montréal, pagination multiple 143 p.
- Balout, B., V. Songmene et J. Masounave. 2007. «An experimental study of dust generation during dry drilling of pre-cooled and pre-heated workpiece material». Journal of manufacturing processes, vol. 9, n° 1, p. 23-34.
- Ben Mhenni, A. 2007. «Influence de l'état de surface et du serrage sur les outils assemblés par frettage». Thèse de doctorat en génie mécanique, Montréal, École Polytechnique de Montréal, 151 p.
- Brasseur, G. 2012. « Silice cristalline, de la poussière à la maladie, il n'y a qu'un pas ». INRS : Brochure, p. 18-34.
- Clément, B. 2013. Planification et analyse statistique d'expérience. Notes de cours MTH8301. Montréal : École Polytechnique de Montréal.
- Comartex. En ligne. <<http://www.comartex.com/index.php>> Consulté le 14 janvier 2015.
- Commission de la santé et de la sécurité du travail. 2012. Guide des bonnes pratiques : Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice. Québec, 11 p.
- Djebara, A., V. Songmene, J. Kouam et R. Khettabi. 2012. «An experimental investigation on dust emission during milling process using statistical analysis». International Science Press, vol.4, no.1, p. 15-37.
- Djebara, A. 2012. «Métrologie des particules ultrafines d'usinage: Optimisation de la caractérisation et de la mesure». Thèse de doctorat en génie, Montréal, École de technologie supérieure, 148 p.
- El-Hofy, H. 2007. Fundamentals of Machining Processes : Conventional and non Conventional Processes. Boca Raton (Fl) : Taylor & Francis Group, 452 p.

- Erdogan, M. 2000. «Measurement of polished rock surface brightness by image analysis method». *Engineering Geology*, vol.57, p. 65-72.
- Görghülü, K. A. et Ceylanoglu. 2008. «Evaluation of continuous grinding tests on some marble and limestone units with silicon carbide and diamond type abrasives. *Journal of Materials Processing Technology*, vol.204, p. 264-268.
- Granit Evolution. En ligne. < <http://www.granitevolution.com/index.html> > consulté le 6 janvier 2015
- Granite Montérégie 2000. 2001. En ligne. < <http://granitemonteregie.com/index.php> > Consulté le 6 janvier 2015.
- Granit Orford. En ligne. < <http://granitorford.com/index.php> > Consulté le 18 janvier 2015.
- Granit Plus. En ligne. < <http://granitplus.com/fr/index.php> > Consulté le 6 janvier 2015.
- Groover, M. P. 2007. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and systems*. 3e éd. John Wiley & Son and the Society of Manufacturing Engineers, 1022 p.
- Hinds, W. C. 1999. *Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles*. Medium: X. Size: 483 p.
- Hocheng H. 2012. *Machining technology for composite materials. Principles and practice*. Philadelphia : Woodhead publishing, 472 p.
- Homand, F., A. S. Chiarelli et D. Hoxha. 2002. «Caractéristiques physiques et mécaniques du granite de la Vienne et de l'argilité de l'Est». *Revue Française de Génie Civil*, vol.6 :1, p. 11-20.
- Hon-yen, T., C-h. L. Osmond et C. K. M. Alberet. 1999. «Robotique polishing of free-form surfaces using scanning paths». *Journal of Materials processing Technology*, p. 191-200.
- Huang, H., Y. Li, J. Y. Shen, H. M. Zhu et X. P. Xu. 2002. «Micro-structure detection of a glossy granite surface machined by the grinding process». *Journal of materials processing technology* 129, p. 403-407.
- Huang, H. et X. P. Xu. 2004. «Interfacial interactions between diamond disk and granit during vertical spindle grinding». *Wear* 256, p. 623-629.
- Kanguem, R., A. Djebara et V. Songmene. 2013. «Investigation on surface finish and metallic particle emission during machining of aluminium alloys using response

- surface methodology and desirability functions». *International Journal of advanced Manufacturing Technology*, 69: p. 1283-1298.
- Kanguem, R. 2013. «Inspection automatique et sans contact de la rugosité des pièces usinées». Thèse de doctorat en génie, Montréal, École de Technologie Supérieure, 136 p.
- Khettabi, R. 2009. «Modélisation des émissions de particules microniques et nanométriques en usinage». Thèse de doctorat en génie, Montréal, École de Technologie Supérieure, 198 p.
- Kouam, J., V. Songmene, A. Djebara et R. Khettabi. 2011. «Effet of friction testing of metals on particle emission». *Journal of Materials Engineering and Performance*, p. 1-8.
- Kouam, J., V. Songmene et A. Balhoul. 2013. «Experimental investigation on PM2.5 particle emission during polishing of granite». *Health*, vol. 5 n^o.10 A2, p.29-35.
- Krar, S. F. 1982. *L'ajustage mécanique*. Montréal : Mc Graw-Hill Éditeurs. Deuxième édition, 530 p.
- Marbrerie Charles & Tocchi. En ligne. < <http://www.societemcp.fr/index.html> > consulté le 6 janvier 2015.
- Mochal Granit. En ligne. < <http://www.mochalgranit.com/index.aspx> > consulté le 6 janvier 2015.
- Palanikumar, A. 2012. «Analyzing surface quality in machined composites». Édité by Hocheng H. Woodhead publishing limited. India : Sri Sairam Institute of Technology, p.154-182.
- Ricaud, M. 2007. «Les silices amorphes». INRS : 1^{ère} Édition. Brochure, 5 p.
- Saidi, M. N. 2014. «Conception et fabrication d'un outil de polissage de granit adaptable aux machines-outils». Rapport de projet de maîtrise en ingénierie, Montréal, École de Technologie Supérieure.
- Songmene, V., B. Balout et J. Masounave. 2008a. «Clean machining : Experimental investigation on dust formation part1:In fluence of machining parameters and chip formation». *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, vol.14, no.1, p.1-16.
- Songmene, V., B. Balout et J. Masounave. 2008b. «Clean machining : Experimental investigation on dust formation part2:In fluence of machining parameters and chip

formation». *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, vol.14, no.1, p. 1-16.

Songmene, V. 2013. *Techniques avancées de mise en forme. Notes de cours SYS849.* Montréal : École de Technologie Supérieure.

STS IPM. Décembre 2009. «Étude des produits et outillages: États de surface». En ligne. 4 p. <http://sti-beziers.fr/tsipm/spip_tsipm/IMG/pdf/etat_de_suface.pdf>. Consulté le 19 janvier 2015.

Xie, J. 2010. «Precision grindability of granite in relation to discrete distribution parameters of microhardness and microbrittleness. *Journal of manufacturing Science and engineering.* p.1-7.

Xie, J., Y. J. Liu, A. Tang, J. Kubo et J. Tamaki. 2009. «Ground surface integrity of granite using dry electro-contact discharge dressing of #600 diamond grinding wheel». China : School of Mechanical Engineering, South China University of Technology.

Xie J. et J. Tamaki. 2007. «Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance». *Journal of Materials Processing Technology*, 186, p. 253-258.

Yavuz, H., T. Ozkahraman et S. Demirdag. 2011. «Polishing experiments on surface quality of building stone tiles». *Construction and Building Materials*, vol.25, p. 1707-1711.

Yilmaz, N. G., R. M. Göktan, H. Gasan et O. N. Celik. 2013. «Particle size distribution and shape characterization of the chips produced during granite machining in relation to process forces and specific energy». *Particulate Science and Technology*, vol. 31, p. 277-286.