

Polissage du granit : qualité, émission et dispersion des poussières et moyens de contrôle à la source

par

Mohamed Néjib SAÏDI

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LE DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTREAL, LE 30 AOÛT 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Mohamed Néjib Saïdi, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor Songmene, directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. Ilian Bonev, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Zhaoheng Liu, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Maximilien Debia, examinateur externe
Département de santé environnementale et santé au travail à l'université de Montréal

M. Mouhab Meshreki, examinateur externe indépendant
Centre des technologies de fabrication en aérospatiale, Conseil National de recherches
Canada, CNRC-NRC

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

LE 15 AOÛT 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur et mon codirecteur de thèse, M. Victor Songmene (de l'ÉTS) et M. Ali Bahloul (de l'IRSST), respectivement. Un grand merci pour leur encadrement, pour les moyens qu'ils ont mis à ma disposition à l'ÉTS et à l'IRSST et leur soutien (de tout genre) tout au long de la thèse.

Je tiens à remercier en second lieu le président et les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer avec attention mon travail.

Je remercie M. Jules Kouam (chercheur à l'ÉTS) pour son assistance et sa disponibilité pendant la phase de travaux expérimentaux de la présente thèse exécutés à l'ÉTS.

Je tiens à remercier M. Rafael Vanterpool (maîtrise en hygiène du travail) pour son aide précieuse pour les travaux expérimentaux exécutés à l'IRSST et à l'ÉTS.

Je tiens à remercier aussi les techniciens du laboratoire de fabrication LIPPS de l'ÉTS à leur tête M. Éric Marcoux (responsable de l'atelier de fabrication) pour avoir facilité l'exécution de nos travaux expérimentaux à l'ÉTS.

Un grand merci aux techniciens du département de prévention des risques chimiques et biologiques de l'IRSST pour leur aide et leur soutien en phase expérimentale à l'IRSST. Je tiens à remercier aussi les techniciens de laboratoires de l'IRSST pour leur rapidité dans l'analyse de la poussière respirable échantillonnée lors de nos travaux à l'ÉTS.

Finalement, je tiens à remercier ma famille et ma femme Mariem Khadhraoui pour leur soutien inconditionnel qui m'a aidé moralement tout au long de la thèse.

POLISSAGE DU GRANIT : QUALITÉ, ÉMISSION ET DISPERSION DES POUSSIÈRES ET MOYENS DE CONTRÔLE À LA SOURCE

Mohamed Néjib SAÏDI

RÉSUMÉ

La présente thèse fait partie d'un large projet de collaboration entre l'IRSST, l'ÉTS et polytechnique de Montréal. Ce projet vise à comprendre les mécanismes de génération et de dispersion des particules émises lors du polissage manuel des granits afin de mieux les contrôler, en agissant, sur le procédé industriel de polissage lui-même et/ou sur la ventilation. Plus spécifiquement, nos travaux de thèse concernent la caractérisation de l'émission et le contrôle à la source de la poussière (fine (PF) et ultrafine (PUF)) émise par polissage à sec du granit qui présente un défi de taille pour la santé et la sécurité des travailleurs. La première partie permet l'étude expérimentale du polissage sur une machine-outil. Elle a pour objectif de comprendre l'émission et la dispersion de poussière lors du polissage dans le but d'optimiser les paramètres de polissage et de réduire les émissions en agissant sur le procédé. La deuxième partie permet une simulation expérimentale de l'émission de poussière soumise à un mouvement de rotation d'un disque simulant le polissage des matériaux. Elle a pour objectif de comprendre le comportement de ces particules dans le sillage rotatif et d'évaluer les moyens de contrôle à la source des émissions. Les résultats montrent que prendre une vitesse de rotation d'environ 1500 tr/min et prendre une vitesse d'avance de 17 mm/s, constitue un bon compromis permettant de minimiser les émissions tout en obtenant un bon état de surface lors de processus de polissage. Il est aussi démontré que la poussière émise lors du polissage contamine de la même façon la proximité que le voisinage de l'outil. Le pic de concentration de poussière générée lors du polissage est détecté pour des diamètres de particule appartenant à PM_{2,5} (diamètre < 2,5 µm). L'analyse des poussières respirables lors du polissage montre que le taux de quartz dépasse largement la norme réglementaire de 0.1 mg/cm³ (8h/jour - 5j/semaine).

Trois dispositifs de réduction de poussière à la source par ventilation locale ont été étudiés : soufflage-aspiration, carter d'aspiration et aspiration intégrée. Ils donnent une bonne efficacité de contrôle (>90%) de l'émission de poussière. La combinaison des paramètres optimisés du procédé de polissage et des dispositifs de réduction à la source peut maximiser l'efficacité de la réduction de la poussière.

L'originalité de ce travail réside dans l'étude du polissage, des émissions et dispersion des particules, ainsi que la proposition des solutions de réduction à la source. Pour y arriver, nous avons opté pour une approche multidisciplinaire allant de la conception d'outillage, le polissage, la captation à la source et la simulation.

Mots clés : polissage de granit, santé et sécurité, émission et dispersion de poussière, particules fines et ultrafines, silice cristalline (quartz), captation à la source

GRANITE POLISHING: QUALITY, DUST EMISSION AND DISPERSION AND SOURCE CONTROL METHODS

Mohamed Néjib SAÏDI

ABSTRACT

This thesis is a part of a large collaborative project between the IRSST, ÉTS and École Polytechnique de Montréal. This project aims to understand the mechanisms of particles generation and dispersion emitted during manual granite polishing in order to better control them, by acting on the industrial polishing process itself and/or by the ventilation. This thesis concerns the 1-characterization of the emission and 2-the control at the source of dust particles (fine (FP) and ultrafine (UFP)) emitted by dry polishing granite, which presents a major importance for health and safety of workers. The first part allows the study of experimental polishing on a machine tool. Its objective is to understand the phenomena of dust emission and dispersion during polishing to optimize polishing parameters and reduce emissions by acting on the polishing process. The second part is an experimental simulation of the dust emission issued from the rotational movement of a disc simulating the polishing of the materials. Its objective to understand the behavior of dust particles in the rotary wake and to evaluate the control devices at the source of the emissions. Results shows that choosing a spindle speed of approximately 1500 tr/min and an average feed rate of 17 mm/s is a good compromise, which leads to minimize emissions while achieving a good surface finish during the polishing process. It is also shown that the dust emitted contaminates in the same way the vicinity and near the polishing tool. Increasing the diameter of the abrasive tool enhances the dust emission. The peak concentration of dust generated during polishing is detected for particle diameters belong to PM_{2.5} (FP less than 2.5 μm in diameter). The analysis of respirable dust during granite polishing shows that the quartz rate far exceeds standard of 0.1 mg/cm³ (8h/day - 5d/week).

Three devices for reducing dust at the source by local ventilation are studied: push-pull, dust shroud and integrated suction slots. These devices provide good control efficiency (> 90%) of the dust emission. The combination of optimized parameters of the polishing process and reduction devices at the source maximizes the efficiency of dust reduction during granite polishing.

The originality of this work lies in the study of polishing, emissions and dispersion of particles, as well as the proposal of reduction solutions at the source. To achieve this, we chose a multidisciplinary approach from tooling design, polishing, capture at the source and simulation.

Keywords: granite polishing, Health and safety, dust emission and dispersion, fine and ultrafine particles, crystalline silica (quartz), source control methods

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 Les aérosols.....	7
1.2.1 Définition	7
1.2.2 Dépôt des particules contenues dans un aérosol dans les voies respiratoires de l'être humain	10
1.3 Influence de la poussière de quartz sur la santé de l'être humain.....	12
1.4 Techniques de mesure des aérosols	13
1.4.1 La méthode de mesure par prélèvement	14
1.4.2 La méthode de mesure à lecture directe.....	15
1.5 Le procédé de polissage rotatif de granit	16
1.5.1 Le granit.....	16
1.5.2 L'outil abrasif utilisé lors du polissage rotatif de granit.....	18
1.5.3 Processus de polissage rotatif régulier de granit.....	20
1.5.4 Enlèvement de matière lors du polissage et usinabilité des granits.....	22
1.5.5 Qualité de la surface de granit obtenue par polissage.....	26
1.6 Émission et dispersion des particules lors des opérations d'usinage.....	30
1.7 Dispositifs de protection contre l'exposition à la poussière de quartz.....	34
1.8 Conclusion	38
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	41
2.1 Introduction.....	41
2.2 Volet 1 : Étude expérimentale de polissage sur machine-outil.....	42
2.2.1 Étude de la rugosité et de l'émission et de la dispersion des PF et PUF lors du polissage régulier des granits	43
2.2.2 Analyse de la poussière dégagée lors de polissage de granit : poussière respirable, taux de quartz et classification des particules de poussière.....	47
2.2.3 Étude de la rugosité et de l'émission et de la dispersion des PF et PUF lors du polissage rotatif et sans translation des granits	49
2.3 Volet 2- Simulation expérimentale du procédé de polissage à l'IRSST	49
2.3.1 Simulation expérimentale de la dispersion des particules ultrafines de sel	51
2.3.2 Étude des solutions de réduction de l'émission à la source des PUF lors de la simulation du processus de polissage de granit.....	52

2.3.2.1	Réduction à la source par le système de ventilation soufflage-aspiration	52
2.3.2.2	Réduction à la source par un carter (ou hotte) d'aspiration.....	55
2.3.2.3	Réduction à la source par aspiration intégrée	56
2.4	Les équipements utilisés dans les travaux expérimentaux.....	57
2.4.1	Pièces en granit	57
2.4.2	Porte-outil avec pression variable.....	58
2.4.3	Outils abrasifs	59
2.4.4	Mesures de la rugosité et de la brillance.....	60
2.4.5	Mesures des particules fines (PF) et des particules ultrafines (PUF).....	61
2.4.6	Échantillonnage de la poussière respirable et classification des particules lors du polissage de granit	62
2.4.7	Mesure du débit et de la vitesse de l'air.....	64
2.4.8	Mesure de la vitesse de rotation.....	64
CHAPITRE 3	ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU POLISSAGE ROTATIF REGULIER SUR MACHINE-OUTIL	67
3.1	Introduction.....	67
3.2	Étude de l'état de surface et optimisation des paramètres de polissage régulier permettant son amélioration.....	68
3.2.1	Présentation des résultats	68
3.2.2	Résultats de l'analyse statistique de la rugosité de surface et optimisation des paramètres de polissage permettant son amélioration.....	70
3.3	Étude de l'émission à la source de poussière des PF et PUF et optimisation des paramètres de polissage régulier permettant de réduire cette émission.....	72
3.3.1	Présentation des résultats	72
3.3.2	Résultats de l'analyse statistique de l'émission à la source des PF et PUF dans le cas de polissage régulier.....	75
3.4	Étude de la dispersion de poussière des PF et PUF dans le cas de polissage régulier	78
3.4.1	Présentation des résultats	78
3.4.2	Étude statistique de la dispersion de poussière des PF lors de polissage régulier de granit.....	81
3.5	Analyse de la poussière respirable et classification des particules dégagées lors du polissage de granit.....	86
3.5.1	Prélèvement et analyse selon la méthode IRSST de la concentration massique en poussière respirable et en quartz lors du polissage régulier de granit	86

3.5.2	Classification selon le diamètre de la poussière de quartz dégagée lors du polissage régulier de granit avec le ELPI (Electrical Low Pressure Impactor).....	87
3.6	Discussion et conclusion.....	90
CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE POLISSAGE ROTATIF ET SANS TRANSLATION SUR MACHINE-OUTIL.....		
4.1	Introduction.....	95
4.2	Qualité du fini de surface lors du polissage rotatif et sans translation.....	95
4.3	Émission des PF et PUF lors du polissage rotatif et sans translation	97
4.4	Dispersion des PF et PUF lors du polissage rotatif et sans translation.....	99
4.5	Comparaison du polissage rotatif et sans translation avec le polissage régulier	102
4.6	Conclusion	103
CHAPITRE 5 ÉTUDE DE LA SIMULATION EXPÉRIMENTALE DU POLISSAGE ROTATIF ET SANS TRANSLATION DE GRANIT ET DES SOLUTIONS DE RÉDUCTION DE POUSSIÈRE À LA SOURCE.....		
5.1	Introduction.....	105
5.2	Simulation expérimentale de la dispersion des particules ultrafines lors de polissage de granit rotatif et sans translation	106
5.3	Étude des solutions de réduction de poussière à la source.....	110
5.3.1	Réduction de la poussière à la source par le système de ventilation locale soufflage-aspiration	110
5.3.2	Réduction de la poussière à la source par le carter d'aspiration	115
5.3.3	Réduction de la poussière à la source par l'aspiration intégrée	117
5.4	Discussion et conclusion.....	118
CONCLUSION.....		121
RECOMMANDATIONS		125
ANNEXE I	PLANS D'EXPÉRIENCE POUR L'ÉTUDE STATISTIQUE DE L'ÉMISSION DE POUSSIÈRE LORS DU POLISSAGE.....	129
ANNEXE II	PLANS D'EXPÉRIENCE POUR L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA DISPERSION DE POUSSIÈRE LORS DU POLISSAGE.....	131
ANNEXE III	RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE L'ÉMISSION DES PF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT.....	133

ANNEXE IV	RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE L'ÉMISSION DES PUF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT.....	137
ANNEXE V	RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE LORS DU POLISSAGE DE GRANIT.....	141
ANNEXE VI	RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA DISPERSION DES PF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT.....	145
ANNEXE VII	RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA DISPERSION DES PUF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT.....	149
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		153

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Formes des particules solides d'un aérosol. Tiré de (Beaudet, 1985)	9
Tableau 1.2 Correspondance grandeur de grain et diamètre de grain selon les standards ANSI (American National Standards Institute). Tiré de (Washington Mills, 2015)	19
Tableau 1.3 Séquence de grandeur des grains abrasifs utilisée durant le polissage rotatif par des industriels et des chercheurs.	22
Tableau 1.4 Composition minérale des pièces en granit. Tiré de (Li, Huang et Xu, 2006)	27
Tableau 1.5 Quelques propriétés physiques et mécaniques des roches à polir. Tiré de (Yavuz, Ozkahraman et Demirdag, 2011)	29
Tableau 2.1 Éléments analysés, paramètres mesurés et conditions de polissage dans le cadre de l'étude statistique de l'émission à la source et de la dispersion durant le processus de polissage du granit	45
Tableau 2.2 Éléments analysés, paramètres mesurés et conditions de simulation dans le cadre de l'étude de la dispersion durant la simulation du processus de polissage du granit	52
Tableau 2.3 Composition chimique des granits étudiés (valeur en pourcentage massique). Tiré de (Saidi et al., 2015)	58
Tableau 2.4 Minéralogie des granits blanc et noir (IOS Services Géoscientifiques inc.)	58
Tableau 3.1 Vérification du modèle statistique de la rugosité de surface	71
Tableau 3.2 Résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant la diminution de la rugosité de surface	72
Tableau 3.3 Détermination de l'erreur du modèle statistique pour l'émission des PF et PUF	77

Tableau 3.4	Résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant la diminution des émissions des PF et PUF	78
Tableau 3.5	Vérification du modèle statistique de la concentration des PF et PUF dans l'espace de dispersion	83
Tableau 3.6	Résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant la diminution des émissions des PF et PUF	84
Tableau 3.7	Formes des particules de poussière générée lors de la phase d'ébauche du polissage régulier des granits blanc et noir (photo MEB X500)	89
Tableau 5.1	Détermination de débit de soufflage permettant d'avoir une efficacité de 95 % du système de ventilation soufflage-aspiration en fonction de la vitesse de rotation du disque et du débit d'aspiration de la hotte d'aspiration	115

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	(a) Centrale électrique fonctionnant au charbon. (b) Photo des particules de cendre de charbon en suspension dans l'air prise avec un microscope électronique. Adapté de (Hinds, 1999)
	8
Figure 1.2	Mécanismes de dépôt des particules d'un aérosol (a) Différents mécanismes de dépôt (b) Mécanismes de dépôt en fonction de diamètre des particules et de la vitesse de l'écoulement de l'aérosol. Tiré de (Plog et Quinlan, 2012)
	9
Figure 1.3	Dépôt théorique total et régional chez l'homme, en fonction du diamètre des particules inhalées (modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique, CIPR). Tiré de (Ricaud et Witschger, 2012)
	11
Figure 1.4	Distribution 3-D du facteur de dépôt (DEF) des PUF dans le modèle numérique de la voie respiratoire avec un $Q_{in} = 30$ l/min (a) particules de diamètre 10 nm (b) particules de diamètre 100 nm. Tiré de (Zhang et al., 2005)
	11
Figure 1.5	Niveaux de toxicité, TNF- α , IL-1 β et IL-6 dans les cellules testées en ajoutant la poussière de granit OD, MD et ND. Tiré de (Ahmad, Khan et Patil, 2011)
	13
Figure 1.6	Niveau de cytotoxicité LDH dans les cellules testées pour différentes tailles de particules de silice. Tiré de (Kusaka et al., 2014)
	13
Figure 1.7	Classification par l'inertie des particules d'aérosol (a) Cyclone (b) Plaque d'impaction. Tiré de (Kulkarni, Baron et Willeke, 2011)
	14
Figure 1.8	Échantillonnage et classification des particules selon leur diamètre par un dispositif composé de plaques d'impaction montées en cascade. Tiré de (DEKATI, 2016a)
	15

Figure 1.9	Classification des roches granitiques selon l'Union Internationale des Sciences Géologiques (U.I.S.G.). Tirée de (Streckeisen, 1976)	17
Figure 1.10	Outil de polissage rotatif (a) Schéma des constituants d'un outil abrasif de polissage (b) Outil avec liant métallique. Tiré de (ABRESSA, 2015a) (c) Outil avec liant en résine. Tiré de (ABRESSA, 2015b)	18
Figure 1.11	Différents paramètres intervenants dans l'opération de polissage rotatif.....	20
Figure 1.12	Polissage rotatif de granit (a) Polissage automatique (b) Polissage manuel. Tiré de (Migan, 2015)	21
Figure 1.13	Vitesse d'enlèvement de matière en fonction de la vitesse d'avance du plateau dans le cas de polissage mécano-chimique. Tiré de (Bernard, 2006)	23
Figure 1.14	Vitesse d'enlèvement de matière en fonction du produit $P^q v$ et la vitesse d'avance du plateau dans le cas de polissage mécano-chimique. Tiré de (Bernard, 2006).....	24
Figure 1.15	Outil rotatif de polissage de granit. Tiré de (Xu, Huang et Li, 2003)	24
Figure 1.16	Photo par la microscopie à balayage électronique des étapes de polissage du granit noir avec les grandeurs de grains (c) 150, (d) 300, (e) 2000 et (f) 3000. Tiré de (Xu, Huang et Li, 2003)	25
Figure 1.17	L'usinabilité dans le cas de polissage en fonction de H et D (a) données expérimentales (b) courbe de régression. Tiré de (Xie et Tamaki, 2007).....	26
Figure 1.18	Variation de la rugosité en fonction des 6 étapes de polissage. Tiré de (Xu, Huang et Li, 2003).....	27
Figure 1.19	Rugosité des pièces polies (a) granit noir (b) granit rouge. Tiré de (Li, Huang et Xu, 2006)	28
Figure 1.20	Variation de la brillance en fonction de la rugosité durant le polissage par trois méthodes (méthode 1 par machine, méthodes 2 et 3 manuelles) (a) granit noir (b) granit rouge. Tiré de (Li, Huang et Xu, 2006)	28

Figure 1.21	Variation de la brillance en fonction de la vitesse d'avance. Tiré de (Yavuz, Ozkahraman et Demirdag, 2011).....	29
Figure 1.22	Variation de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance. Tiré de (Yavuz, Ozkahraman et Demirdag, 2011).....	30
Figure 1.23	Banc d'essai pour l'étude des émissions des PF lors de polissage linéaire de granit. Tiré de (Kouam, Songmene et Bahloul, 2013)	30
Figure 1.24	Concentrations de la masse totale des particules émises en fonction de la vitesse de coupe pour les différents granits. Tiré de (Kouam, Songmene et Bahloul, 2013)	31
Figure 1.25	Rugosité moyenne Ra en fonction de la vitesse de coupe pour deux types de granit noir et blanc. Tiré de (Kouam, Songmene et Bahloul, 2013)	31
Figure 1.26	Effet de la vitesse d'avance sur la concentration massique des PF pour différents outils de fraisage avec différent type de plaquette. Tiré de (Yaonan et al., 2014)	32
Figure 1.27	Dispersion de la concentration massique des particules PM10 lors de l'opération de fraisage de l'acier C45 pour différentes vitesses de rotation. Tiré de (Yaonan et al., 2014)	32
Figure 1.28	Représentation schématique de la trajectoire des particules générées lors d'opérations de perçage, surfaçage et de rainurage (a) particules fines (b) particule ultrafine. Tiré de (Djebara, 2012).....	33
Figure 1.29	Distribution des diamètres aérodynamiques des particules. Tiré de (Toenshoff, Karpuschewski et Glatzel, 1997).....	34
Figure 1.30	Cabine ventilée avec (a) un flux d'air oblique (b) un flux d'air vertical (c) un flux d'air horizontal. Tiré de (Goyer, Bahloul et Veillette, 2010)	35
Figure 1.31	Ventilation locale et influence de flux d'air sur la captation. Tiré de (Goyer, Bahloul et Veillette, 2010).....	35
Figure 1.32	Équipements de protection personnelle (a) demi-masque (b) masque complet (c) masque complet avec filtration d'air. Tiré de (OSHA, 2016a)	36

Figure 1.33	Réduction de poussière de quartz (a) Outil avec LEV (b) Mesure de l'exposition au quartz selon la norme OSHA. Tiré de (Croteau et al., 2002)	37
Figure 1.34	Comparaison des méthodes de réduction (a) Outil de polissage (b) Mesure de l'exposition. Tiré de (Akbar-Khanzadeh et al., 2007)	37
Figure 1.35	Comparaison des PF et PUF dégagées dans le polissage à sec et celui mouillé (avec différents débits d'eau) du granit blanc. Tiré de (Songmene, Kouam et Bahloul, 2018)	38
Figure 1.36	Méthode de mouillage appliqué directement sur la surface du comptoir en granit à polir. Tiré de (Johnson et al., 2017).....	38
Figure 2.1	Diagramme explicatif de la méthodologie adoptée pour la résolution de la problématique du projet	42
Figure 2.2	Modèle statistique.	43
Figure 2.3	Schéma du dispositif mis en œuvre pour l'étude de l'émission et la dispersion des particules fines et ultrafines lors de polissage du granit (ÉTS).....	44
Figure 2.4	Emplacement du système d'échantillonnage de la poussière respirable	48
Figure 2.5	Dispositif de simulation expérimental de la dispersion des PUF de sel (NaCl).....	50
Figure 2.6	Train d'alimentation en PUF de sel (Na Cl)	51
Figure 2.7	Système de ventilation locale soufflage-aspiration. Tiré de (ACGIH, 2010).....	53
Figure 2.8	Dispositif expérimental de la solution de captation à la source par le système soufflage-aspiration	54
Figure 2.9	Dessin des composantes de la solution soufflage-aspiration (a) Souffleur (b) Hotte d'aspiration	54
Figure 2.10	Carter (ou hotte) d'aspiration ajusté à l'outil de polissage. Tiré de (ACGIH, 2010).....	55

Figure 2.11	Disposition de la solution de captation à la source par un carter d'aspirateur	56
Figure 2.12	Dessin de la solution de réduction à la source par l'aspiration intégrée	57
Figure 2.13	Images des deux granits à polir : a) granit blanc b) granit noir. Tiré de (Saidi et al., 2015).....	57
Figure 2.14	Outil de polissage : (a) Dessin d'ensemble du porte-outil (b) Photo de l'outil assemblé. Tiré de (Saidi et al., 2015)	59
Figure 2.15	Caractéristiques de l'outil abrasif 130 SH Eole Flex avec serrure escargot et séquence choisie. Tiré de (Abressa Canada inc.).....	59
Figure 2.16	Appareil de mesure de la rugosité (modèle S-J400, Mitutoyo Canada inc.)	60
Figure 2.17	Principe de fonctionnement de l'appareil de mesure de la brillance (IG, 2017)	61
Figure 2.18	Le spectromètre APS (Aerodynamic Particle Sizer) (modèle 3321, TSI inc.)	61
Figure 2.19	Le spectromètre SMPS constitué de : (a) classificateur électrostatique (modèle 3080, TSI inc.) (b) nano DMA (modèle 3085, TSI inc.) (c) CPC (modèle 3775, TSI inc.).....	62
Figure 2.20	Dispositif d'échantillonnage de l'air de travail lors du polissage de granit sur la machine-outil : (a) Pompe (b) Cyclone (c) Cassette (fournie par l'IRSST)	63
Figure 2.21	Machine de prélèvement et de classification des particules de poussière de quartz : (a) ELPI Classique (DEKATI Ltd) (b) Une des plaques d'impaction de l'ELPI équipée d'un substrat en carbone	63
Figure 2.22	Instruments de mesure de l'air : (a) Débitmètre (modèle 4043, TSI inc.) (b) Anémomètre VelociCalc® (modèle 9535-A, TSI inc.)	64
Figure 2.23	Tachymètre (modèle DT-205LR, ELECTROMATIC inc.)	65
Figure 3.1	Évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir	68

Figure 3.2	Évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse d'avance lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir	69
Figure 3.3	Défauts de surface, constatés dans la phase de finition, dus au frottement et à la surchauffe (a) Brûlure de surface (granit blanc) (b) Arrachement de matière (granit noir)	69
Figure 3.4	Boîtes à moustaches des valeurs de PF et PUF émises lors de polissage régulier de granit dans les deux phases d'ébauche et de finition.....	73
Figure 3.5	Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des émissions de PF et de PUF à la source en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir	74
Figure 3.6	Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des émissions de PF et de PUF à la source en fonction de la vitesse d'avance lors du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir	75
Figure 3.7	Évolution moyenne de la granulométrie des PF et PUF à la source lors du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir	75
Figure 3.8	Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance horizontale lors du polissage régulier des granits (a) blanc (b) noir	79
Figure 3.9	Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance verticale lors du polissage régulier des granits (a) blanc (b) noir	79
Figure 3.10	Évolution moyenne de la granulométrie des PF dans la direction horizontale lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir	80
Figure 3.11	Évolution moyenne de la granulométrie des PUF dans la direction horizontale lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir.....	80
Figure 3.12	Évolution moyenne de la concentration en masse de la poussière respirable en fonction de la distance horizontale lors du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir	87

Figure 3.13	Évolution moyenne de la concentration en masse du quartz en fonction de la distance horizontale lors du polissage régulier du granit blanc	87
Figure 3.14	Évolution de la granulométrie des PF et des PUF à la source lors de la phase d'ébauche du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir	88
Figure 3.15	Évolution de la concentration massique du silicium en fonction du diamètre des PF et PUF de poussière émise lors de polissage régulier des granits, blanc et noir	89
Figure 4.1	Évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir	96
Figure 4.2	Photos MEB des copeaux générés lors du polissage rotatif et sans translation dans la phase d'ébauche du granit noir pour différentes vitesses de rotation.....	97
Figure 4.3	Photos MEB des copeaux générés lors du polissage régulier dans la phase d'ébauche du granit noir pour la vitesse de rotation de 1000 tr/min	97
Figure 4.4	Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des émissions de PF et de PUF à la source en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir	98
Figure 4.5	Évolution moyenne de la granulométrie des PF et PUF à la source lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir.....	99
Figure 4.6	Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance horizontale lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) blanc (b) noir.....	100
Figure 4.7	Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance verticale lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) blanc (b) noir.....	100
Figure 4.8	Évolution moyenne de la granulométrie des PF dans la direction horizontale lors de l'ébauche du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir	101

Figure 4.9	Évolution moyenne de la granulométrie des PF dans la direction horizontale lors de la finition du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir	101
Figure 4.10	Évolution moyenne de la granulométrie des PUF dans la direction horizontale lors de l'ébauche du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir	102
Figure 4.11	Évolution moyenne de la granulométrie des PUF dans la direction horizontale lors de la finition du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir	102
Figure 5.1	Alimentation en PUF de NaCl (a) Calibration de débit d'alimentation en PUF de sel (b) Granulométrie des PUF qui alimente la plaque trouée	107
Figure 5.2	Évolution de la concentration totale en nombre des PUF en fonction de la vitesse de rotation dans le plan horizontal (D, l) pour les distances verticales (h) de 5 et 20 cm	108
Figure 5.3	Évolution de la granulométrie des PUF à 1000, 1750 et 2500 tr/min en fonction de la distance horizontale D et à une distance verticale h de 5 cm	109
Figure 5.4	Comparaison des résultats entre la simulation expérimentale et le polissage rotatif et sans translation de l'évolution moyenne de CPUF suivant les distances : (a) Horizontale (b) Verticale	110
Figure 5.5	Comparaison entre la simulation expérimentale et le polissage rotatif et sans translation de l'évolution moyenne de la granulométrie des PUF émises	110
Figure 5.6	Système de ventilation locale par soufflage-aspiration	111
Figure 5.7	Effet de la rotation du disque rotatif sur la vitesse de l'air reçu au niveau de la hotte pour différentes vitesses de rotation (a) 1000 tr/min (b) 2500 tr/min (la représentation de la hotte est à titre indicatif seulement)	112
Figure 5.8	Évolution de l'efficacité à 95 % du système soufflage-aspiration en fonction de débit de soufflage et de la vitesse de rotation pour des débits d'aspiration de 1250, 1750 et 2000 l/min de la hotte d'aspiration	113

Figure 5.9	Détermination de la relation entre le débit de soufflage D_s , la vitesse de rotation du disque rotatif V_s et le débit d'aspiration D_a (a) Relation D_s et V_s (b) Relation $f(D_a)$ et D_a115
Figure 5.10	Système de ventilation locale par carter d'aspiration116
Figure 5.11	Évolution de l'efficacité à 95 % du carter d'aspiration en fonction de débit d'aspiration pour différentes vitesses de rotation116
Figure 5.12	Système de ventilation locale par aspiration intégrée.....117
Figure 5.13	Évolution de l'efficacité à 95% de l'aspiration intégrée en fonction de débit d'aspiration pour différentes vitesses de rotation118

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ANSI	American National Standards Institute
ANOVA	Analyse de variance (Analysis of variance)
APS	Spectromètre de mesure de PF (Aerodynamic Particle Sizer)
AT	Abrasive Technology
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CNC	Commande numérique par ordinateur (Computer numerical control)
EKC	Eastman Kodak Company
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
ÉTS	École de technologie supérieure
FEPA	Fédération Européenne des Fabricants de Produits Abrasifs
GPP	Granite Polishing Pads
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
LIPPS	Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes de l'ÉTS
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MERN	Ministère de l'énergie et des ressources naturelles du Québec
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PM _{2,5}	PF de taille inférieures à 2,5 µm
PM ₁₀	PF de taille inférieures à 10 µm
PF	Particules fines
PME	Petites et moyennes entreprises
PUF	Particules ultrafines
P _r	Poussière respirable
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SMPS	Spectromètre de mesure de PUF (Scanning Mobility Particle Sizer)
VEMP	Valeur d'exposition moyenne pondérée d'une substance dangereuse

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Br	Brillance, Gloss
β_0, β_i et β_{ij}	Coefficients du modèle statistique
CPF	Concentration en nombre des particules fines, $dN/d\log D_p$ (#/cm ³)
CPUF	Concentration en nombre des particules ultrafines, $dN/d\log D_p$ (#/cm ³)
D	Distance horizontale, cm
D_a	Débit d'aspiration, l/min
D_s	Débit de soufflage, l/min
ε	Erreur de mesure
f	Vitesse d'avance, mm/s
f(Da)	Terme dépendant du débit d'aspiration, l/min
G	Grandeur des grains abrasifs
h	Distance verticale, cm
K_p	Constante
l	Distance horizontale perpendiculaire à D, cm
MRR	Taux d'enlèvement de matière (Material Removal Rate)
P	Pression de polissage, bar
P_{th}	Pression théorique de polissage, bar
Q_{in}	Débit d'inhalation
R_a	Rugosité arithmétique, μm
S	Types de granit selon leur taux de silicium, %
t	Temps de polissage, s
v	Vitesse relative
V_s	Vitesse de rotation de l'outil abrasif, tr/min
X_i et X_j	Variables d'entrée du modèle statistique
Y	Variables de sortie du modèle statistique

INTRODUCTION

Lors des travaux de transformation du granit manuel, les travailleurs sont exposés à la poussière de silice cristalline (quartz). Cette dernière est une substance contenue dans le granit avec un taux qui varie entre 20% et 60% (MERN, 2004-2013). L'exposition prolongée à des taux élevés de quartz provoque chez les travailleurs des maladies pulmonaires comme la silicose, le cancer du poumon et d'autres maladies respiratoires (Steenland et Ward, 2014; Vacek et al., 2011; Cox Jr, 2011; Martínez et al., 2010). Elle conduit aussi à une perte des fonctions pulmonaires avec des concentrations de quartz comprises entre 0,1 et 0,2 mg/m³ (Rushton, 2007). De plus, la taille des particules de poussière de quartz peut avoir une influence nocive. Dans une étude toxicologique, Ahmad et al. (2011) montrent que l'effet inflammatoire des particules de poussière de granit sur les tissus de poumon est plus important pour les PUF (diamètre de 1 à 100 nm) que celui pour les PF (diamètre de 0,1 à 10 µm).

Au Canada et dans la province du Québec, les travailleurs de secteur de transformation de granit sont les plus touchés par le danger d'exposition au quartz. En effet, le Québec produit près de 90% de granit au Canada et compte près de vingt-cinq entreprises spécialisées dans ce secteur (MERN, 2004-2013). Cette production a augmenté significativement entre l'année 1991 (67 000 tonnes) et l'année 2000 (175 000 tonnes). Cette augmentation est évaluée à un taux annuel moyen de 11 %.

Pour prévenir ce danger, l'exposition aux produits dangereux (tel que le quartz) est réglementée au Québec afin de protéger les travailleurs potentiellement exposés. Selon le règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST), le quartz est considéré avoir un effet cancérigène soupçonné chez l'humain. La valeur d'exposition ne doit pas dépasser 0,1 mg/m³ pour 40 heures de travail par semaine à raison de 8 heures par jour (RSST, 2017). Cette valeur notée 'VEMP' est la valeur d'exposition moyenne pondérée de quartz. De plus, selon le même règlement cette exposition doit être réduite au minimum même si elle ne dépasse pas la valeur permise. Cette norme est considérée comme moins sévère que celle appliquée aux États-Unis d'Amérique où le NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) propose de limiter l'exposition à la silice cristalline (quartz) à 0,05 mg/m³ et l'ACGIH (American

Conference of Governmental Industrial Hygienists) propose une valeur limite encore plus basse à 0,025 mg/m³ (OSHA, 2016b).

Au Québec, des cas de silicose liée au secteur de transformation de granit sont encore décelés. Il est à noter que cette maladie est latente et peut prendre plusieurs années avant son apparition suite à la période d'exposition (à la poussière de quartz). Des données statistiques de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) dénombrent 157 cas de cette maladie acceptés au Québec entre 2004 et 2008 (Sabourin, 2012). Ces cas présentent un impact grave autant sur le plan social que sur le plan financier. La CNESST a tenté, en Estrie, entre les années 2004 et 2009 un programme d'intervention régionale visant à réduire l'exposition au quartz dans les sociétés de transformation de granit. Sur les 130 postes contrôlés, 60 postes dépassaient la norme même en utilisant des correctifs. Pour sensibiliser et mettre plus de pression sur les entreprises de transformation de granit, la CNESST est passée à la « tolérance zéro » pour la quantité de poussière de quartz permise dans le milieu de travail, depuis juillet 2012. Par conséquent, l'élimination des émissions de la poussière issue de l'usinage du granit constitue une urgence et un grand challenge auquel les industriels québécois de secteur de granit devraient faire face.

Pour aider les industriels de secteur de transformation du granit, l'IRSST a mis à leur disposition un guide de bonne pratique pour aider à prévenir l'exposition de leurs travailleurs au quartz (Goyer, Bahloul et Veillette, 2010). Ce document propose plusieurs solutions comme, l'utilisation de l'eau, la captation des particules de poussière de quartz basée sur la ventilation générale ou locale (à la source) et l'utilisation des équipements de protection personnelle. Il faut noter que la captation de l'émission des substances dangereuses à la source est la solution la plus privilégiée selon le RSST et sur laquelle l'industriel doit centrer leurs efforts. Dans le guide, les solutions de captation par ventilation générale proposées sont difficiles à appliquer dans les entreprises québécoises. En effet, ces solutions sont coûteuses à mettre en place pour la majorité des entreprises québécoises de transformation de granit constituées essentiellement de petites et moyennes entreprises (PME). Pour les solutions utilisant la ventilation locale, il était constaté que le cas de polissage manuel rotatif (surtout à sec) de granit est difficile à contrôler. Dans ce cas, les particules de poussières se dispersent

dans toutes les directions et rendent leur captation difficile. De plus, l'utilisation des solutions comme l'eau et le carter d'aspiration placé directement sur l'outil rotatif, bien qu'elles sont efficaces, ne réduit pas le niveau d'exposition au quartz sous les normes d'émissions requises (Phillips, Johnson et Johnson, 2013). Donc, des investigations approfondies s'imposent pour ce type de polissage pour mieux comprendre l'émission et la dispersion des particules de poussière de quartz et essayer de réduire leurs émissions à la source. Dans cet objectif et pour aider les industriels québécois du secteur de transformation de granit, La CNESST avec l'IRSST ont lancé le projet, appelé : « Caractérisation et contrôle de la poussière de quartz émise par l'opération de polissage à sec et humide dans le secteur de la transformation du granit et autres matériaux contenant du quartz ». Ce projet contient deux grandes parties. Une première partie expérimentale faite à l'École de technologie supérieure (ÉTS) qui consiste à étudier l'émission et la dispersion des particules de poussière de quartz lors du polissage rotatif à sec ou humide de granit. Dans cette partie, le quartz et le silicium contenus dans la poussière émise lors du polissage rotatif de granit seront analysés. En plus, une étude de réduction de l'émission des particules de poussière de quartz par la modification des paramètres de polissage rotatif sera explorée. Une deuxième partie de simulation expérimentale et de simulation numérique de polissage rotatif et sans translation de granit faites successivement à l'IRSST et à l'École polytechnique de Montréal. Le polissage rotatif et sans translation avec seulement la vitesse de rotation (sans vitesse d'avance ou avec de faibles mouvements de va-et-vient) constitue le pire scénario auquel peut être exposé le travailleur. En effet, la littérature montre que la vitesse de rotation augmente l'émission de poussière (Kouam et al, 2013) et que la vitesse d'avance la fait diminuer (Yaonan et al, 2014). La simulation expérimentale utilisant des particules traceuses de sel (NaCl) de l'émission et la dispersion de la poussière est faite sur un banc d'essai expérimental à l'IRSST. De plus, cette simulation va permettre l'étude en toute sécurité (sans être exposé directement à la poussière de quartz) des solutions de réduction de l'émission des particules de poussière à la source. Ces solutions de réduction sont basées sur des techniques de ventilation locale. La simulation numérique faite à l'École polytechnique a pour objectif de supporter les résultats de la simulation expérimentale. Les conditions de simulation de polissage sont les mêmes utilisées sur le banc d'essai à l'IRSST. Dans ce cas,

des particules de diamètre 1 μm ou un gaz traceur (CO_2) sont utilisés pour simuler numériquement l'opération de polissage rotatif et sans translation à sec de granit.

Dans le cadre de ce projet et pour répondre à une partie des exigences demandées, le présent travail consiste à faire l'étude expérimentale et l'étude de simulation expérimentale du polissage manuel rotatif à sec. Il a pour objectif aussi de proposer des solutions de réduction à la source de la poussière de quartz émise. Pour atteindre ces objectifs, les travaux de recherche se divisent en deux grandes parties :

- Une étude expérimentale de polissage manuel rotatif à sec de granit, réalisée à l'ÉTS. Les objectifs principaux de cette partie sont : étudier la qualité de surface et l'émission et la dispersion des particules de poussière lors du polissage, analyser le quartz et le silicium contenus dans cette poussière émise et étudier la possibilité de sa réduction par la modification des paramètres de polissage.
- Une étude de la simulation expérimentale de polissage manuel rotatif et sans translation à sec de granit, réalisée à l'IRSST. Les objectifs principaux de cette partie sont : étudier l'émission et la dispersion (utilisant des particules traceuses NaCl) sur un banc de simulation expérimentale de polissage rotatif et sans translation et étudier aussi des solutions de réduction à la source des émissions de poussière à l'aide des techniques de ventilation locale.

La présente thèse se divise en cinq chapitres, répartis comme suit :

Chapitre I : Il s'agit d'une revue bibliographique concernant les différents sujets touchés par la présente recherche. Les sujets étudiés concernent : les aérosols et leurs effets sur la santé des travailleurs spécialement ceux qui sont exposés à la poussière de quartz; la méthode, l'outillage et les paramètres de polissage rotatif de granit et les solutions de captations des particules émises à la source pour ce type de polissage.

Chapitre II : Dans cette partie est présentée l'approche méthodologique adoptée dans les deux cas, celle de l'étude expérimentale de polissage rotatif de granit effectuée à l'ÉTS et celle de l'étude de la simulation expérimentale de polissage rotatif et sans translation réalisée à

l'IRSST. Dans ce chapitre sont expliquées les plans d'expériences et les méthodes expérimentales et les paramètres de polissage rotatifs pour étudier l'émission, la dispersion et la captation à la source des PF et PUF. Aussi, les machines, les outillages et les matériaux nécessaires pour la réalisation des différentes études sont exposés.

Chapitre III : Il s'agit d'analyser les différents résultats de l'étude expérimentale du polissage régulier (obtenue par combinaison de la rotation et de la translation de l'outil de polissage) manuel rotatif de granit fait sur machine-outil à l'ÉTS. Les sujets traités dans ce chapitre sont : l'étude statistique du polissage rotatif régulier de granit (qualité de surface et émission et dispersion des particules) et l'analyse de la poussière respirable, du quartz et du silicium contenus dans la poussière émise lors de ce processus.

Chapitre IV : Ce chapitre concerne l'étude du polissage rotatif et sans translation (obtenue par la rotation seule de l'outil de polissage). Ce type de polissage présente le pire cas d'exposition lors du polissage de granit rotatif pour les travailleurs. Les travaux dans cette partie consistent à étudier la qualité de surface et l'émission et la dispersion des particules lors du polissage rotatif et sans translation. Une comparaison avec le polissage régulier sera faite. Les résultats trouvés vont constituer une base pour la réalisation des simulations expérimentale et numérique de polissage de granit.

Chapitre V : Dans cette partie sont analysés les différents résultats de l'étude de la simulation expérimentale du polissage manuel rotatif et sans translation de granit faite à l'IRSST. Les sujets traités dans ce chapitre sont : l'étude de la simulation expérimentale de polissage sur un banc d'essai (validation et dispersion des particules) et l'évaluation de trois solutions de captation à la source en utilisant cette simulation expérimentale (soufflage-aspiration, carter d'aspiration et fentes d'aspiration intégrées).

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Le polissage manuel de granit est une opération qui expose la santé des travailleurs au danger de la silice cristalline (quartz). La poussière de quartz (constituée des particules fines et ultrafines) dégagée pendant le polissage peut causer des maladies pulmonaires graves, une fois inhalée. L'opération de polissage manuel est incontournable lorsque l'utilisation de la machine-outil est impossible (cas de grosse pièce ou de surface inaccessible) ou constitue une perte considérable de temps et d'argent (cas d'un travail unitaire). L'étude des différents paramètres et phénomènes régissant le polissage est nécessaire pour aider à la compréhension de l'émission et la dispersion des particules de poussière émise lors de cette opération et le développement des moyens de protection. La revue de littérature est faite pour répondre à cette nécessité.

1.2 Les aérosols

1.2.1 Définition

Un aérosol est constitué de particules qui peuvent être liquides ou solides en suspension dans un gaz (généralement l'air). L'aérosol engendré par les particules liquides peut être un brouillard ou une brume et l'aérosol engendré par les particules solides peut être une fumée ou de la poussière. La Figure 1.1(a) montre un exemple d'aérosol sous forme de fumée émise par une centrale électrique fonctionnant avec le charbon. La Figure 1.1(b) montre des particules de cendre de charbon qui sont en suspension dans cette fumée.

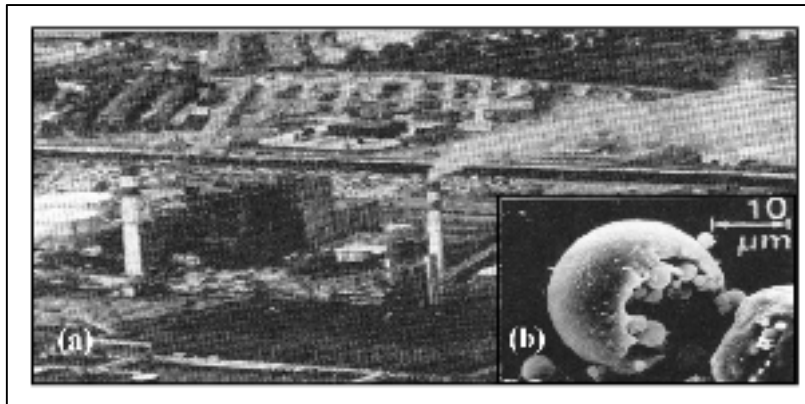


Figure 1.1 (a) Centrale électrique fonctionnant au charbon.
 (b) Photo des particules de cendre de charbon en suspension
 dans l'air prise avec un microscope électronique.
 Adapté de (Hinds, 1999)

Les particules dans l'aérosol sont classées en trois types selon leur diamètre : nanométrique ($0,001 - 0,1 \mu\text{m}$), submicronique ($0,1 - 1 \mu\text{m}$) et micrométrique ($1 - 10 \mu\text{m}$) (Hinds, 1999). Les nanoparticules ont plusieurs applications technologiques notamment dans les fibres optiques, les pesticides et les nanotechnologies. Une autre classification est proposée, elle divise les aérosols en particules ultrafines (PUF) ($0,001 - 0,1 \mu\text{m}$) et particules fines (PF) ($0,1 - 10 \mu\text{m}$). Les particules solides d'un aérosol peuvent prendre plusieurs formes, sphérique, irrégulière cubique, en plaque, fibreuse et en agrégats (Tableau 1.1). Les particules contenues dans l'aérosol peuvent le quitter et se déposer de 5 manières (Figure 1.2-a) :

- L'impaction des particules sur une surface due à leur grande masse et à un changement brusque de trajectoire de l'écoulement de l'aérosol.
- La sédimentation des particules de masse importante due à l'effet de la gravité.
- L'interception des particules de taille moyenne par une surface due à leur faible densité et à une faible vitesse d'écoulement de l'aérosol.
- L'attraction électrostatique des particules chargées par une surface de charge opposée.
- La diffusion ou le mouvement Brownien des petites particules suivant une trajectoire aléatoire par rapport à celle de l'écoulement de l'aérosol due à l'interaction avec les atomes d'un gaz ou les molécules de l'air.

Tableau 1.1 Formes des particules solides d'un aérosol.
Tiré de (Beaudet, 1985)

Forme	Apparence	Nature	Formation
Sphérique		Fumées Pollens Cendres (fly ash)	Condensation Dispersion Combustion
Irrégulière cubique		Minéraux	Disintégration mécanique
En plaques		Minéraux Épiderme	Disintégration mécanique
Fibreuse		Fibres végétales et minérales	Dispersion Disintégration mécanique
En aggrégats		Noir de charbon Fumée	Évaporation et condensation

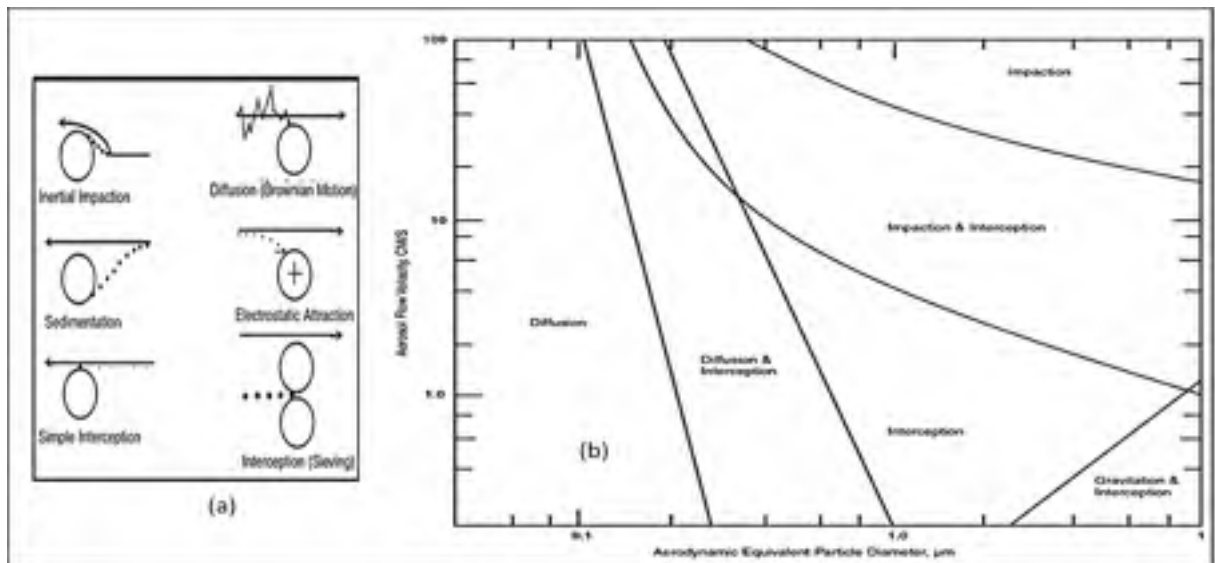


Figure 1.2 Mécanismes de dépôt des particules d'un aérosol (a) Différents mécanismes de dépôt (b) Mécanismes de dépôt en fonction de diamètre des particules et de la vitesse de l'écoulement de l'aérosol. Tiré de (Plog et Quinlan, 2012)

Généralement, le mécanisme de dépôt dépend de deux paramètres, la taille des particules contenues dans l'aérosol et la vitesse d'écoulement dans cet aérosol. Cette relation est montrée à la Figure 1.2-b. Cette figure montre que le dépôt par impaction touche les particules de

grosses tailles et qui se déplacent à grandes vitesses et que le dépôt par diffusion touche les particules de taille inférieure à $0,1\ \mu\text{m}$.

1.2.2 Dépôt des particules contenues dans un aérosol dans les voies respiratoires de l'être humain

Les particules qui se trouvent dans la poussière peuvent être inhalées et pénètrent dans les voies respiratoires de l'être humain. Ils peuvent atteindre différentes régions des voies respiratoires, comme la région extrathoracique, la région trachéobronchique et la région alvéolaires. La Figure 1.3 montre les régions respiratoires, là où les particules sont susceptibles d'être déposées. Cette figure montre aussi que les PUF de diamètre entre 1 et 100 nm se déposent généralement dans la région alvéolaire. Parmi les particules ultrafines, ceux de diamètre 100 nm ont une capacité de se déposer sur une grande surface des parois internes des poumons de l'être humain (Zhang et al., 2005). En effet, la simulation numérique (Figure 1.4) de l'évolution du facteur de dépôt (DEF) des particules à l'intérieur des poumons en fonction de leur diamètre, montre que les particules de diamètre 10 nm (Figure 1.4-a) se déposent sur une surface plus petite que ceux de diamètre 100 nm (Figure 1.4-b). Dans les poumons, ces particules ultrafines déposées en grande quantité créent des sites d'interaction qui favorisent leur absorption par le corps humain. Ces particules peuvent transporter des substances toxiques pour ce dernier.

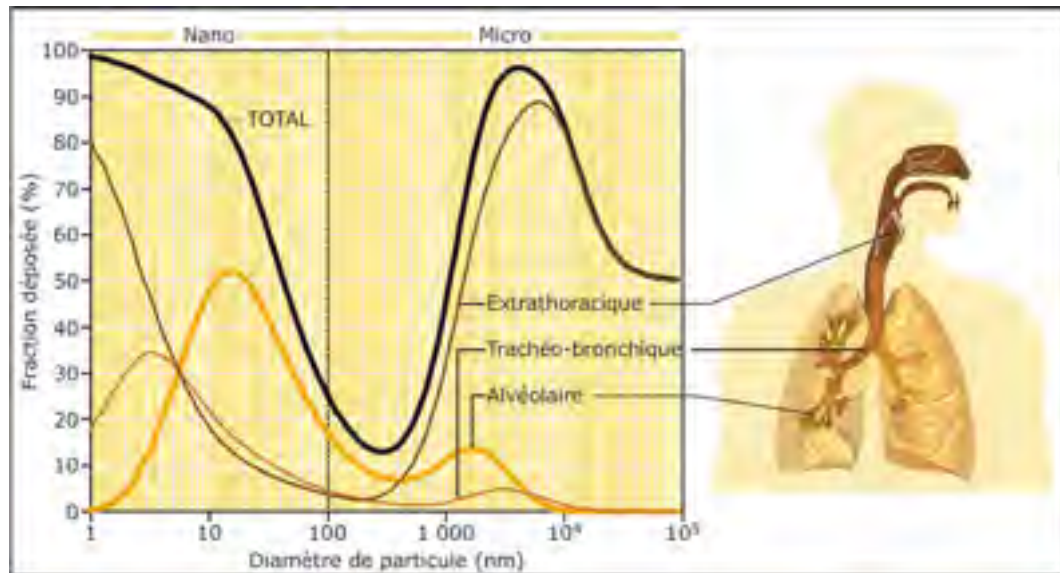


Figure 1.3 Dépôt théorique total et régional chez l'homme, en fonction du diamètre des particules inhalées (modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique, CIPR). Tiré de (Ricaud et Witschger, 2012)

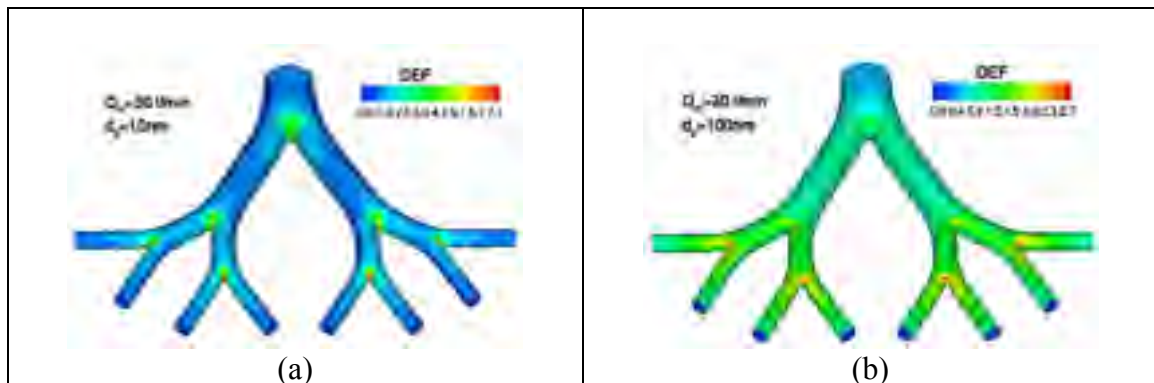


Figure 1.4 Distribution 3-D du facteur de dépôt (DEF) des PUF dans le modèle numérique de la voie respiratoire avec un $Q_{in} = 30 \text{ l/min}$ (a) particules de diamètre 10 nm (b) particules de diamètre 100 nm. Tiré de (Zhang et al., 2005)

1.3 Influence de la poussière de quartz sur la santé de l'être humain

La poussière contenant des particules toxiques telles que le quartz peut nuire à la santé de l'être humain, une fois inhalées. Il a été bien établi que l'inhalation de cette substance produit des inflammations avec la formation de tissu cicatriciel dans les alvéoles des poumons (Rosenberg, 2000). C'est les caractéristiques de la silicose qui est une des maladies pulmonaires causées par l'exposition au quartz. Le quartz est présent dans plusieurs industries comme la construction, la fabrication du ciment et de la céramique, l'industrie du granit et les mines, etc. Une étude des causes de mortalité dans un groupe de 7052 travailleurs dans la transformation de granit au Vermont (États-Unis) montre une relation entre leur exposition à la poussière de quartz et certaines maladies pulmonaires comme la silicose et d'autres maladies respiratoires non malignes (Vacek et al., 2011). Dans cette étude, 5204 valeurs de mesure d'exposition dans l'industrie de granit au Vermont entre les années 1924 et 2004 ont été utilisées. Une autre étude faite sur les travailleurs en Amérique du Nord montre qu'il y a une relation entre l'exposition au quartz et la silicose et le cancer des poumons (McDonald et al., 2005). Cette relation de causalité était amplifiée par la consommation de cigarette. Les travaux sur des matériaux composites contenant des taux élevés de quartz (entre 70% et 90%) augmentent la possibilité d'atteinte de silicose chez les jeunes travailleurs (Martínez et al., 2010). Pour les travailleurs dans la transformation de granit, la perte des fonctions pulmonaires peut se produire à une exposition prolongée avec des concentrations de quartz comprises entre 0,1 et 0,2 mg/m³ (Rushton, 2007). Ce dysfonctionnement pulmonaire peut apparaître dans des périodes d'exposition variantes entre 30 et 40 ans. L'étude de la toxicité du quartz révèle que les PUF sont plus toxiques que les PF dans le cas de poussière provenant de sciage de granit (Ahmad, Khan et Patil, 2011). La Figure 1.5 montre la variation du potentiel inflammatoire dans les cellules pulmonaires en fonction de différentes quantités de poussière (en µg/ml) : poussière de granit (OD), microparticules (PF) de poussière de granit (MD) et nanoparticules (PUF) de poussière de granit (ND). TNF- α , IL-1 β et IL-6 sont des indicateurs de niveau d'aptitude à l'inflammation. Le résultat montre une grande aptitude à l'inflammation surtout pour les cellules contenant des PUF de poussière de granit. Kusaka et al. (2014) a étudié l'effet de la taille des particules de silice sur la cytotoxicité (destruction des cellules). Les diamètres étudiés variaient entre 30 nm et 10,000 nm et l'indicateur de la cytotoxicité était le LDH

(équivalent à l'IL-1 β). La Figure 1.6 montre que les particules de diamètre inférieur à 1000 nm présentent une cytotoxicité plus importante que ceux avec un diamètre supérieur.

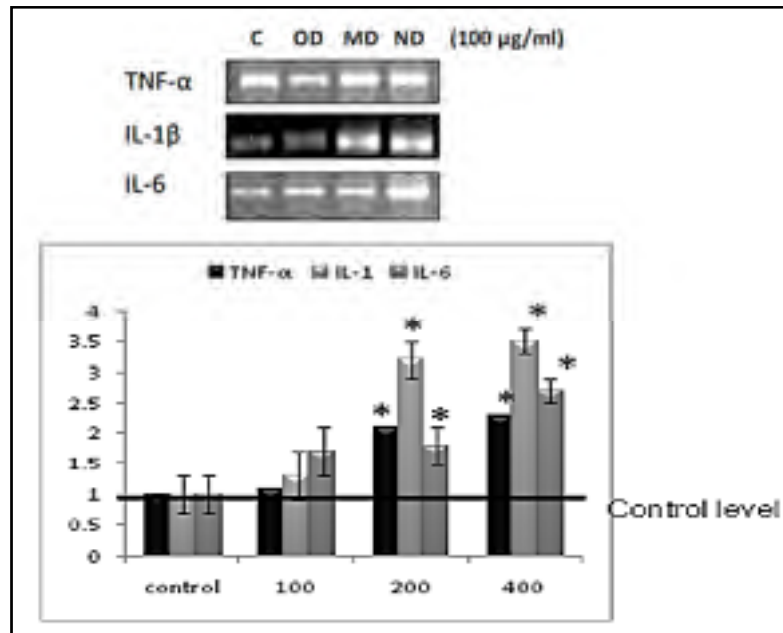


Figure 1.5 Niveaux de toxicité, TNF- α , IL-1 β et IL-6 dans les cellules testées en ajoutant la poussière de granit OD, MD et ND. Tiré de (Ahmad, Khan et Patil, 2011)

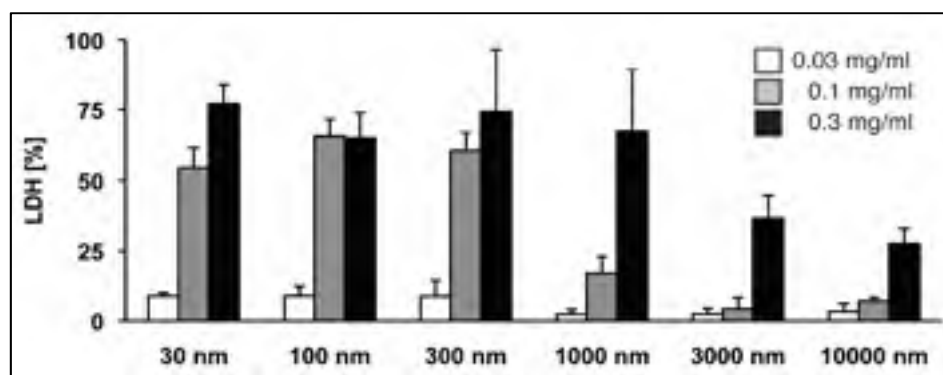


Figure 1.6 Niveau de cytotoxicité LDH dans les cellules testées pour différentes tailles de particules de silice. Tiré de (Kusaka et al., 2014)

1.4 Techniques de mesure des aérosols

La mesure des aérosols et la détermination de leurs caractéristiques physico-chimiques concernent plusieurs secteurs comme l'hygiène de travail, la protection de l'environnement,

le traitement d'air, l'industrie et la toxicologie. Les méthodes de mesure des aérosols peuvent être divisées en deux catégories, les méthodes de prélèvement et les méthodes à lecture directe (Görner et Fabriès, 1990). La méthode de lecture directe est plus rapide que la méthode de prélèvement. Cependant, la méthode de prélèvement permet une analyse physico-chimique approfondie des particules captées.

1.4.1 La méthode de mesure par prélèvement

Le prélèvement des aérosols se fait par l'aspiration des particules sur un support de collecte qui peut être un filtre, une plaque d'impaction ou des électrodes, etc. Cette méthode est coûteuse et prend beaucoup de temps pour être réalisée. Cette méthode vise à classer par l'effet de l'inertie les particules trouvées dans un aérosol. Elle sert à séparer les particules selon leur diamètre. La Figure 1.7-a montre un cyclone qui sert à l'échantillonnage des aérosols dans le milieu de travail. Il a comme rôle de ne laisser passer que les particules respirables vers un filtre. Les particules collectées sur le filtre serviront à faire des analyses physico-chimiques. La Figure 1.7-b montre une plaque d'impaction sur laquelle va se coller les particules de l'aérosol. La classification des particules par impaction se fait selon leur taille et la vitesse de l'écoulement de l'aérosol échantillonné. Il est possible de placer plusieurs plaques d'impaction en cascade pour échantillonner les particules d'un aérosol en les classifiant selon plusieurs diamètres (Figure 1.8). Les particules sont collectées sur des substrats placés sur les plaques d'impaction pour d'éventuelles analyses quantitatives.

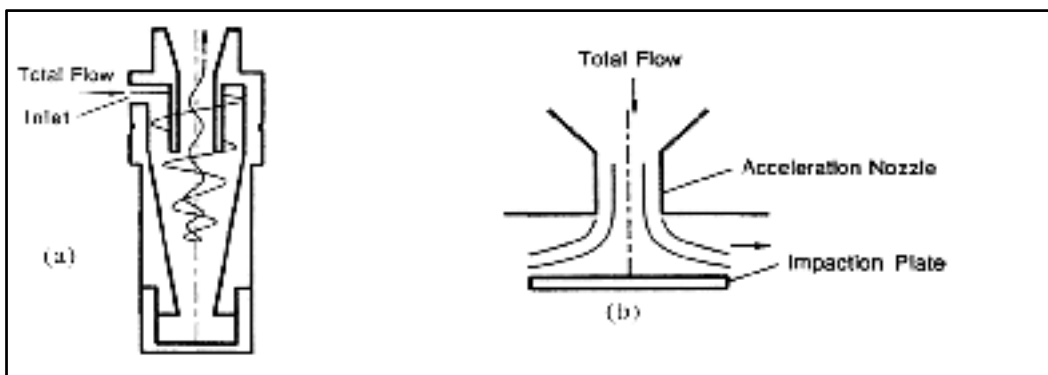


Figure 1.7 Classification par l'inertie des particules d'aérosol (a) Cyclone
(b) Plaque d'impaction. Tiré de (Kulkarni, Baron et Willeke, 2011)

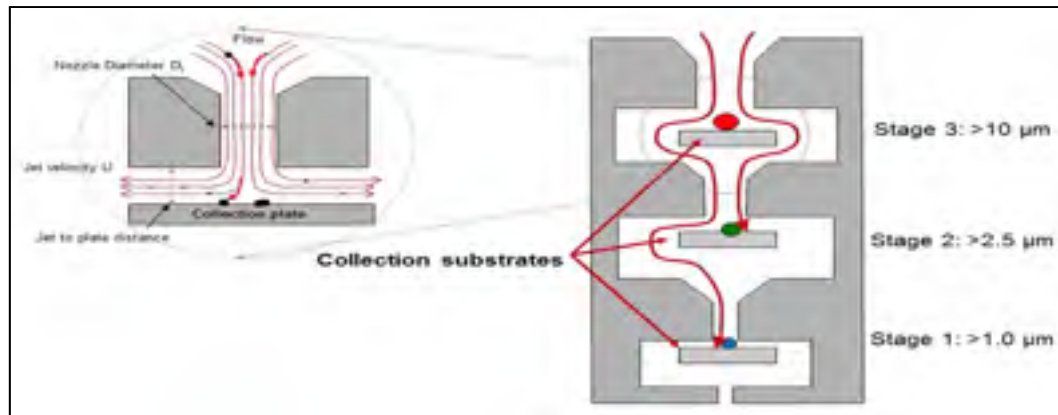


Figure 1.8 Échantillonnage et classification des particules selon leur diamètre par un dispositif composé de plaques d'impaction montées en cascade. Tiré de (DEKATI, 2016a)

1.4.2 La méthode de mesure à lecture directe

Cette méthode permet de faire des mesures instantanées ou séquentielles des aérosols et même de donner la taille des particules. Les appareils utilisés dans ce cas sont appelés des appareils à mesure directe ou appareils de mesure continue. L'utilisation de cette méthode permet de faire une analyse rapide comme : la détermination de la concentration, la détermination des valeurs optimales et la localisation des sources d'émissions. Quatre méthodes de mesure automatique à lecture directe peuvent être distinguées, méthode de jauge piézoélectrique, méthode de jauge bêta, méthode électrique et méthode optique. Pour la mesure des particules ultrafines de diamètre entre 0,005 et 0,1 μm , c'est la méthode électrique qui est la plus utilisée. Cette méthode exploite deux propriétés essentielles des particules d'un aérosol. La première est que ces particules captent facilement les charges électriques. La deuxième est que la quantité de charges est proportionnelle à la masse des particules. Donc, la présente méthode consiste à charger électriquement les particules d'aérosols (par contact avec une surface chargée). Les particules, une fois chargées, sont guidées dans un champ électrique où elles se séparent selon leur mobilité (relativement à leur taille). Puis, finalement ces particules sont détectées ou captées. Cette méthode permet de mesurer les concentrations en nombre, en masse et en surface des particules ultrafines existant dans un aérosol en fonction de leur diamètre. Une des machines utilisant la méthode de la mesure électrique est le spectromètre

SMPS (Scanning mobility particle sizer) (voir Figure 2.19). Pour la mesure des particules fines de diamètre compris entre 0,5 et 10 μm , c'est la méthode optique qui est la plus utilisée. Cette méthode exploite le principe d'interaction des ondes lumineuses avec les particules matérielles. Chaque particule exposée à des rayons lumineux devient une source de lumière. L'intensité de cette lumière diffusée dépend des caractéristiques du faisceau initial et de la taille et la forme des particules. Cette méthode permet de mesurer les concentrations en nombre, en masse et en surface des particules fines existant dans un aérosol en fonction de leur diamètre. Le spectromètre APS (Aerodynamic particle sizer) est l'une des machines utilisant la méthode de mesure optique (voir Figure 2.18).

1.5 Le procédé de polissage rotatif de granit

1.5.1 Le granit

Le granit est une roche plutonique qui se forme par le refroidissement du magma en profondeur. Selon l'Union Internationale des Sciences géologiques (U.I.S.G.), le granit est composé principalement de trois minéraux, le quartz, le feldspath alcalin et le plagioclase (Figure 1.9) (Streckeisen, 1976). Le quartz constitue (20 à 60) pour cent de la composition totale du granit, tandis que le plagioclase constitue (10 à 65) pour cent du feldspath total du granit. L'exemple du point (A) sur la Figure 1.9 donne un granit de composition : 20% de quartz et 80% de feldspath (dont 10% sont du plagioclase). Ce qui donne un granit de composition finale : 20% de quartz, 72% de feldspath et 8% de plagioclase.

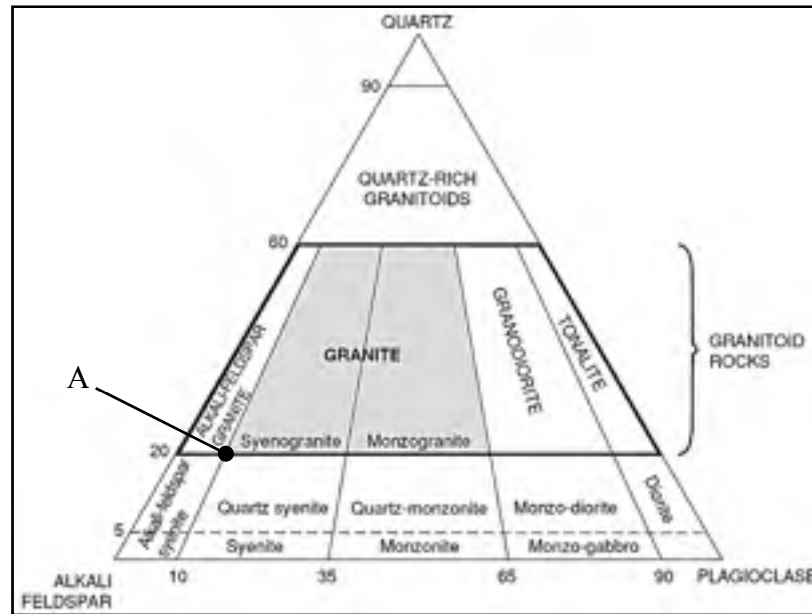


Figure 1.9 Classification des roches granitiques selon l'Union Internationale des Sciences Géologiques (U.I.S.G.).
Tirée de (Streckeisen, 1976)

Les caractéristiques physiques et mécaniques du granit, comme toutes les roches dépendent de son homogénéité et son isotropie. Ces deux propriétés sont affectées par : le pourcentage de différents minéraux qui constituent le granit, les différentes liaisons qui existent entre ces minéraux, l'existence des pores, la texture du granit et l'existence des microfissures. L'étude de la propagation d'onde dans le granit permet de déterminer les porosités, l'état de fissuration et les propriétés mécaniques de ce dernier. La vitesse de propagation d'onde longitudinale dans un granit varie entre 6050 et 6220 m/s et sa conductivité thermique est de 2,8 W/mK (Homand et Duffaut, 2000). La contrainte limite de compression pour le granit varie entre 260 et 280 MPa (Goodman, 1993). Cette caractéristique est essentielle pour le calcul de la résistance mécanique à la rupture dans les travaux de construction faisant intervenir des composantes en granit. La dureté du granit peut être calculée en fonction de la dureté et du pourcentage des minéraux qui le composent. Elle peut varier entre 703 et 751 (kg/mm²) (Sánchez Delgado et al., 2005).

1.5.2 L'outil abrasif utilisé lors du polissage rotatif de granit

La Figure 1.10-a montre les différents composants d'un outil abrasif utilisé pour le polissage rotatif. Ces composantes, les abrasifs, le liant et le support. Les abrasifs utilisés dans le polissage peuvent être des particules de diamant, d'oxyde d'aluminium ou de carbure de silicium (FEPA, 2015). Ces abrasifs sont constitués de particules dures de différentes grandeurs et d'orientations arbitraires. Ils peuvent être appliqués (sur une feuille) ou agglomérés (dans un liant). Le liant dans lequel les abrasifs peuvent être agglomérés peut être un métal (Figure 1.10-b), une céramique ou de la résine (Figure 1.10 -c). Il faut que la dureté du liant soit la même ou légèrement supérieure à celle de l'abrasif pour qu'ils s'usent de la même façon. La concentration des abrasifs en diamant dans le liant varie en général entre 12,5 et 37,5 % du volume total de la partie active de l'outil abrasif (Malkin et Guo, 2008).



Figure 1.10 Outil de polissage rotatif (a) Schéma des constituants d'un outil abrasif de polissage (b) Outil avec liant en résine. Tiré de (ABRESSA, 2015a)
(c) Outil avec liant métallique. Tiré de (ABRESSA, 2015b)

Les abrasifs en diamant sont les plus durs existant en industrie. Ces abrasifs diamantés appelés aussi super-abrasifs ont une durée de vie supérieure aux autres abrasifs conventionnels et permettent le polissage des matériaux difficilement usinable tels que le granit. De plus, le diamant (synthétique) a la particularité d'avoir une grande conductivité thermique et surtout de ne pas présenter des microfissures. Par conséquent, le choix des abrasifs en diamant est le plus approprié pour le polissage de granit. Les abrasifs utilisés dans l'industrie sont classés selon leur grandeur de grain, du plus grand au plus petit. Le Tableau 1.2 donne la

correspondance entre la grandeur de grain abrasif et son diamètre moyen selon les standards ANSI.

Tableau 1.2 Correspondance grandeur de grain et diamètre de grain selon les standards ANSI (American National Standards Institute). Tiré de (Washington Mills, 2015)

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

1.5.3 Processus de polissage rotatif régulier de granit

Le choix du granit comme pierre architectural (très convoité dans le domaine de la construction) est basé sur deux caractéristiques principales : sa faible conductivité thermique et son aspect esthétique (couleur, brillance, finie de surface). Le polissage est un procédé d'usinage par abrasion qui permet d'avoir une surface bien finie et de bonne qualité. Une opération de meulage peut précéder le polissage, dont l'épaisseur de la surface enlevée peut atteindre 1,58 mm, alors que dans le polissage cette épaisseur est de l'ordre de 25,4 μm (Preston, 1929). La Figure 1.11 montre les différents paramètres intervenants dans l'opération de polissage rotatif qui sont : la pression, la vitesse de rotation et la vitesse d'avance. Ces paramètres varient suivant, le type de granit à usiner, la nature de l'opération (polissage de champs ou façonnage), le type d'abrasif utilisé et l'existence ou non de la lubrification. Le polissage peut être exécuté, de façon automatique sur une machine-outil (Figure 1.12- a) ou de façon manuelle (Figure 1.12-b). Pour le polissage rotatif automatisé, la pression peut varier entre 1 à 3 bars, la vitesse de rotation peut avoir une moyenne de 2500 tr/min et la vitesse d'avance peut attendre 3 m/min (Migan, 2015).

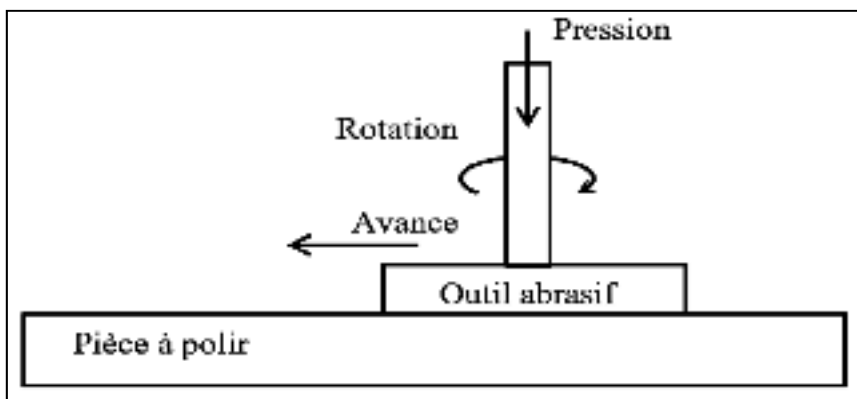


Figure 1.11 Différents paramètres intervenants dans l'opération de polissage rotatif



Figure 1.12 Polissage rotatif de granit (a) Polissage automatique (b) Polissage manuel.
Tiré de (Migan, 2015)

Le processus de polissage varie d'un industriel à un autre. En général, le processus standard de polissage du granit se fait graduellement en 7 étapes avec des abrasifs de grandeur de grain qui varie entre 50 et 3000 avec une vitesse de rotation pouvant atteindre 5000 tr/min (GPP, 2015). Les 7 étapes sont réparties comme suit :

- 1re et 2e étapes appliquées successivement avec des abrasifs de grandeurs de grain 50 et 100. Dans ces étapes, la coupe est dite grossière, où la grande quantité de matière dans le processus de polissage est éliminée de la surface du granit. Ces deux étapes peuvent être remplacées par un outil abrasif en diamant avec un liant métallique (moins cher).
- 3e étape appliquée avec un abrasif de grandeurs de grain 200. Cette étape permet d'éliminer les grosses rayures.
- 4e étape appliquée avec un abrasif de grandeurs de grain 400. Cette étape permet d'éliminer les grosses rayures.
- 5e étape appliquée avec un abrasif de grandeurs de grain 800. Dans cette étape, la surface du granit commence à briller. Il est recommandé d'ajouter un produit de densification lors de l'application de cette étape. Ce produit permet de remplir les pores et les microfissures à la surface et rendre la surface plus brillante.

- 6e et 7e étapes appliquées successivement avec des abrasifs de grandeurs de grain 1500 et 3000. Ces deux étapes permettent de rendre la surface plus réfléchissante.
- Dans le cas de polissage à sec et dans la phase de finition il est recommandé d'utiliser une petite vitesse de rotation ou d'appliquer une petite pression. Cela permet d'éviter le cisaillement des grains de diamant dû au frottement et à la chaleur générés par des grandes vitesses et pressions. Si l'utilisateur n'est pas satisfait par le résultat, il peut utiliser un outil de lustrage pour améliorer le fini de surface.

Le Tableau 1.3 présente quelques séquences de polissage rotatif graduel trouvées dans la littérature. D'autres industriels proposent un nombre d'étapes réduit à 5 ou même à 3 étapes pour permettre de diminuer le temps de polissage (WehaUSA, 2015). Par exemple, la méthode de polissage composé de 5 étapes permet de réduire le temps de polissage de plus que 30 %.

Tableau 1.3 Séquence de grandeur des grains abrasifs utilisée durant le polissage rotatif par des industriels et des chercheurs.

Auteur	Séquence de grandeur des grains abrasifs						
Granit Polishing Pads (GPP, 2015)	50	100	200	400	800	1500	3000
Abrasive Technology (AT, 2015)	50	120	220	400	800	1800	3500
Y. Li (Li, Huang et Xu, 2006) et X. P. Xu (Xu, Huang et Li, 2003)	150	300	500	1000	2000	3000	----

1.5.4 Enlèvement de matière lors du polissage et usinabilité des granits

La loi utilisée en polissage est celle développée par Preston, (1929). Cette loi détermine l'épaisseur de la couche de matière enlevée en fonction des paramètres de polissage dans le cas de polissage mécano-chimique des lentilles de verre. Preston montre que dans le processus de polissage le taux d'enlèvement de matière (MRR) (Material Removal Rate) est proportionnel au produit de la pression (P) de contact et la vitesse relative (v) entre l'outil de polissage et la pièce. L'équation reliant ces paramètres est la suivante :

$$MRR = K_p P v \quad (1.1)$$

Où K_p est une constante dépendante des autres paramètres.

Preston démontre aussi que ce taux est proportionnel au travail de l'outil abrasif par unité de surface. Donc, si l'opérateur veut polir deux fois plus vite la pièce il lui faut une machine qui peut produire un travail (par unité de surface) deux fois plus grand que celui prévu initialement. Bin et Shi (1999) ont constaté que la relation qui se trouve entre le taux d'enlèvement de matière et la pression de contact n'est pas tout à fait linéaire. D'après ces travaux expérimentaux la relation entre (MRR), (P) et (v) s'écrit comme suit :

$$MRR = K_p P^{\frac{2}{3}} v \quad (1.2)$$

Bernard (2006) a constaté que dans le cas de polissage mécano-chimique de plaque de cuivre, la vitesse d'avance du plateau augmente le taux d'enlèvement de matière (voir Figure 1.13). Il montre aussi sur la Figure 1.14 que ce taux augmente avec le produit pression – vitesse relative.

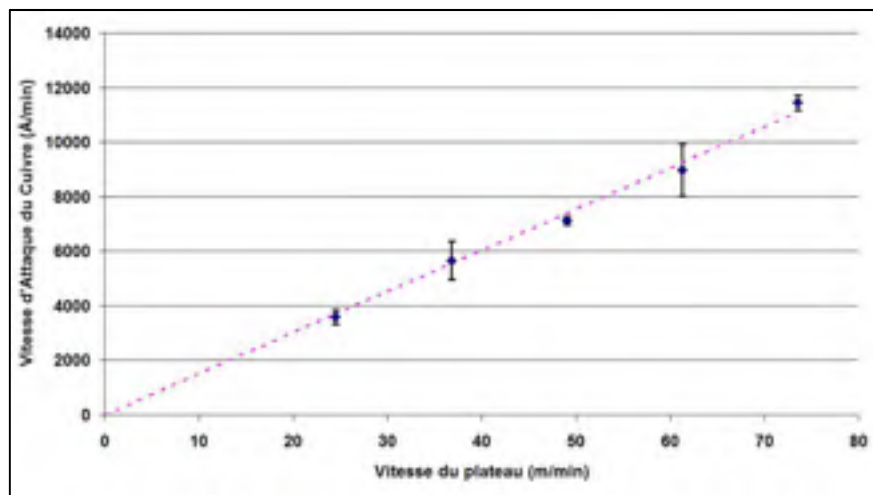


Figure 1.13 Vitesse d'enlèvement de matière en fonction de la vitesse d'avance du plateau dans le cas de polissage mécano-chimique. Tiré de (Bernard, 2006)

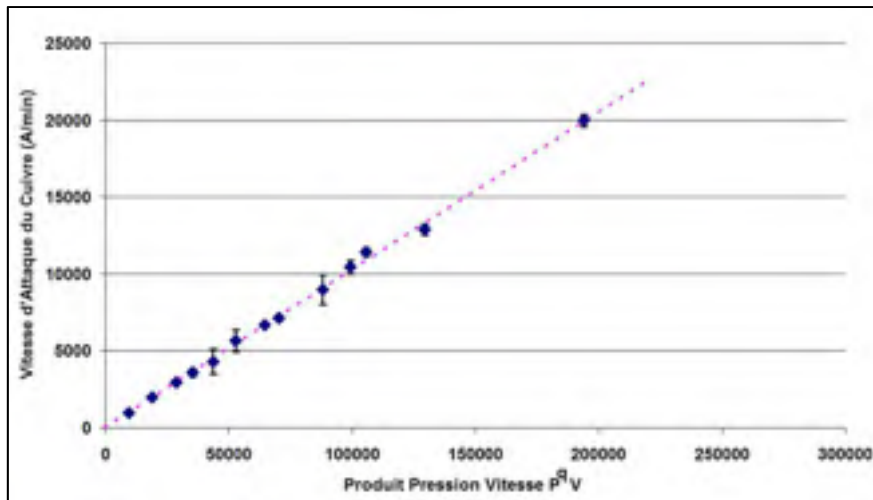


Figure 1.14 Vitesse d'enlèvement de matière en fonction du produit $P^q v$ et la vitesse d'avance du plateau dans le cas de polissage mécano-chimique. Tiré de (Bernard, 2006)

Dans le cas de polissage de granit, le mécanisme d'enlèvement de matière a été étudié par Xu, Huang et Li (2003). Dans cette étude, l'opération de polissage rotatif graduelle est faite par des outils composés d'abrasif en diamant avec lubrification, comme il est montré sur la Figure 1.15.



Figure 1.15 Outil rotatif de polissage de granit. Tiré de (Xu, Huang et Li, 2003)

L'opération de polissage est exécutée sur trois types de granit, noir, rouge et blanc. La séquence des grandeurs de grains abrasifs utilisés est : 150, 300, 500, 1000, 2000 et 3000. Le processus d'enlèvement de matière au cours du processus de polissage est montré à la Figure 1.16. Elle montre l'évolution de l'état de surface au cours du processus de polissage du granit

noir. L'opération est effectuée par un passage successif des outils abrasifs avec des grains qui varient des plus gros aux plus fins. Le processus conduit à un changement graduel de la surface d'un état rugueux à un état lisse. Le processus d'enlèvement de matière commence par des ruptures fragiles avec l'utilisation des gros grains, comme il est montré sur la Figure 1.16-c et la Figure 1.16-d. Vers la fin du processus, le polissage est fait avec des grains fins et le processus d'enlèvement de matière se fait suivant un flux ductile. Les traces des ruptures ductiles sont montrées sur la Figure 1.16-e et la Figure 1.16-f.

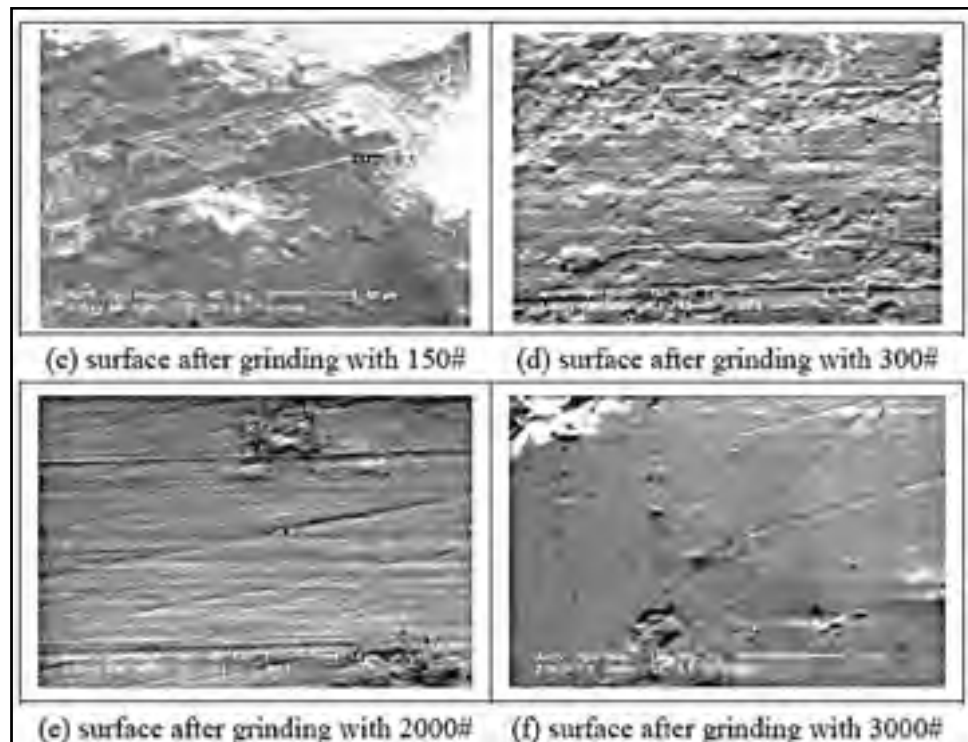


Figure 1.16 Photo par la microscopie à balayage électronique des étapes de polissage du granit noir avec les grandeurs de grains (c) 150, (d) 300, (e) 2000 et (f) 3000. Tiré de (Xu, Huang et Li, 2003)

L'usinabilité a été étudiée par Xie et Tamaki (2007) sur 13 différents types de granit. Une relation a été établie entre la distribution des micros-duretés des différents minéraux constituant le granit et leur usinabilité par abrasion. L'usinabilité varie en fonction des paramètres (H et D) de distribution des microduretés du granit comme il est montré sur la

Figure 1.17. H est la valeur moyenne pondérée de la microdureté du granit et D est l'écart de la distribution de cette dernière.

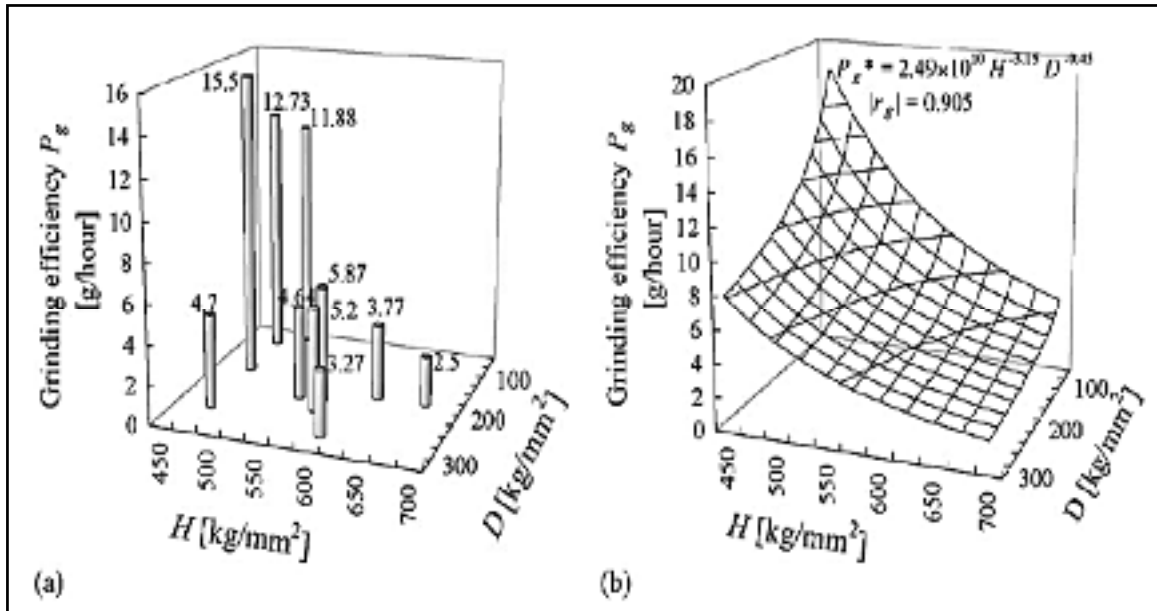


Figure 1.17 L'usinabilité dans le cas de polissage en fonction de H et D (a) données expérimentales (b) courbe de régression. Tiré de (Xie et Tamaki, 2007)

1.5.5 Qualité de la surface de granit obtenue par polissage

Le premier paramètre caractérisant la qualité de la surface de granit après polissage est la rugosité. Le résultat donné sur la Figure 1.18 montre la variation de la rugosité de surface à travers les différentes étapes du processus de polissage. Au début du processus de polissage, le mécanisme d'enlèvement de matière est la rupture fragile caractérisée par une grande quantité de matière enlevée ce qui justifie la grande variation de la rugosité (état de surface rugueuse). À la fin du processus de polissage, le mécanisme d'enlèvement de matière est la rupture ductile caractérisée par une petite quantité de matière enlevée ce qui justifie la petite variation de la rugosité (état de surface lisse).

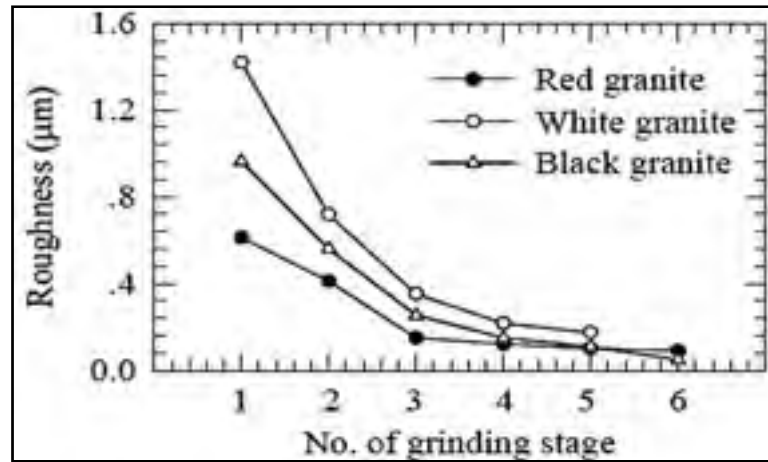


Figure 1.18 Variation de la rugosité en fonction des 6 étapes de polissage. Tiré de (Xu, Huang et Li, 2003)

Le deuxième paramètre caractérisant de la qualité de la surface de granit après polissage est la brillance. La brillance de la surface est une caractéristique très importante dans la commercialisation des produits en granit. Li, Huang et Xu (2006) ont étudié le processus de formation de la brillance des surfaces en granit réalisées par polissage rotatif. Le polissage graduel est réalisé en 6 étapes avec des outils composés d'abrasif en diamant. La séquence des grandeurs de grains est la même que pour Xu, Huang et li (2003). L'opération est faite en utilisant l'eau comme lubrifiant. La composition minérale des deux granits utilisés est donnée sur le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 Composition minérale des pièces en granit. Tiré de (Li, Huang et Xu, 2006)

Workpiece	Shore's hardness	Compression strength [Mpa]	Percentage of main mincrals (%)			Texture
			Quartz	Feldspar	Mica& others	
Black granite	76	137	5	45	50	Fine
Red granite	114	125	25	70	5	Coarse

Le traçage de rugosité des granits polis noir et rouge Figure 1.19 montre que le profil de la surface du granit rouge fluctue plus que celui du granit noir. Cela est dû au fait que les grains et les joints des grains ainsi que les défauts dans le granit rouge sont plus grands que ceux dans le granit noir. Ce qui peut avoir une influence sur la brillance des surfaces obtenues.

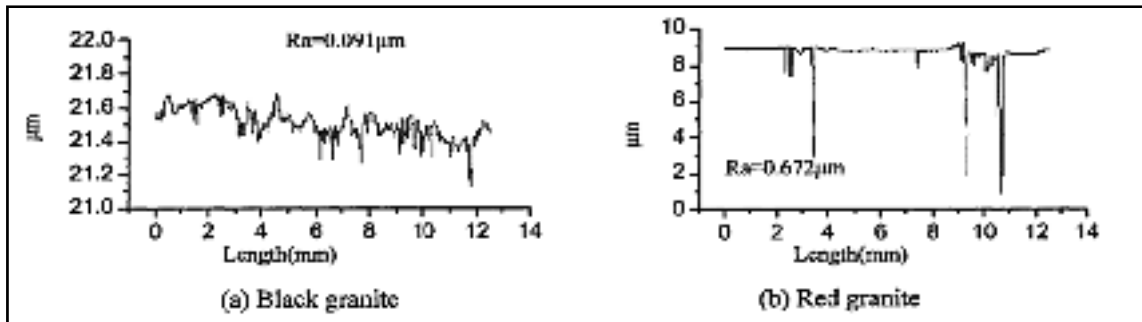


Figure 1.19 Rugosité des pièces polies (a) granit noir (b) granit rouge.
Tiré de (Li, Huang et Xu, 2006)

D'après le graphique Figure 1.20 la valeur de brillance ne varie pas beaucoup avec des valeurs de rugosité supérieures à $0,2 \mu\text{m}$. Par contre, la valeur de brillance augmente rapidement pour les rugosités inférieures à cette valeur. L'équation de régression de puissance trouvée par l'analyse exprime bien la variation de la brillance en fonction de la rugosité. Cette relation est indépendante de la méthode de polissage utilisée et du type de granit à polir.

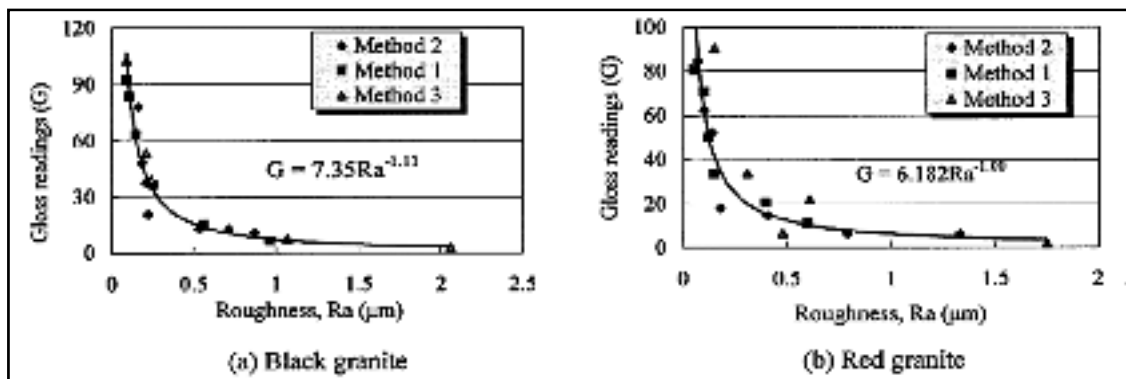


Figure 1.20 Variation de la brillance en fonction de la rugosité durant le polissage par trois méthodes (méthode 1 par machine, méthodes 2 et 3 manuelles) (a) granit noir (b) granit rouge. Tiré de (Li, Huang et Xu, 2006)

L'optimisation de la vitesse d'avance en fonction des deux paramètres, rugosité et brillance (caractérisant la surface de granit après polissage) a été étudiée par Yavouz, Ozkahraman et Demirdag (2011). Cette étude est faite en utilisant 8 types de roche, comme il est montré sur le Tableau 1.5.

Tableau 1.5 Quelques propriétés physiques et mécaniques des roches à polir.
Tiré de (Yavuz, Ozkahraman et Demirdag, 2011)

Stone name (Code)	Stone type	Bulk density (g/cm ³)	Effective porosity (%)	Schmidt hardness	Uniaxial compressive strength (MPa)
Burdur Brown (BB)	Micritic limestone	2.689	0.342	49	119
Crema Zelve (CZ)	Micritic limestone	2.690	0.386	52	126
Tundra Grey (TG)	Micritic limestone	2.635	1.842	45	91
Gold E (GE)	Travertine	2.521	4.580	44	84
Classic Light (CL)	Travertine	2.458	2.139	34	68
Afyon White (AW)	Marble (medium crystals)	2.697	0.220	41	60
Salome (S)	Marble (fine crystals)	2.707	0.363	46	70
Mugla White (MW)	Marble (coarse crystals)	2.701	0.237	40	54

Les résultats trouvés à la Figure 1.21 et à la Figure 1.22 montrent que la brillance diminue avec la vitesse d'avance, tandis que la rugosité augmente avec celle-ci. La superposition des deux figures permet de déterminer une valeur optimale de la vitesse d'avance de 1,3 m/min. En effet, les figures montrent qu'augmenter la vitesse d'avance jusqu'à 1,3 m/min diminue la brillance pour 50% des granits polis et n'affecte pas la rugosité de surface. Augmenter la vitesse d'avance au-delà de cette valeur engendre une dégradation de la rugosité et une diminution de la brillance. Donc, la valeur de vitesse d'avance de 1,3 m/min constitue un bon compromis brillance-rugosité.

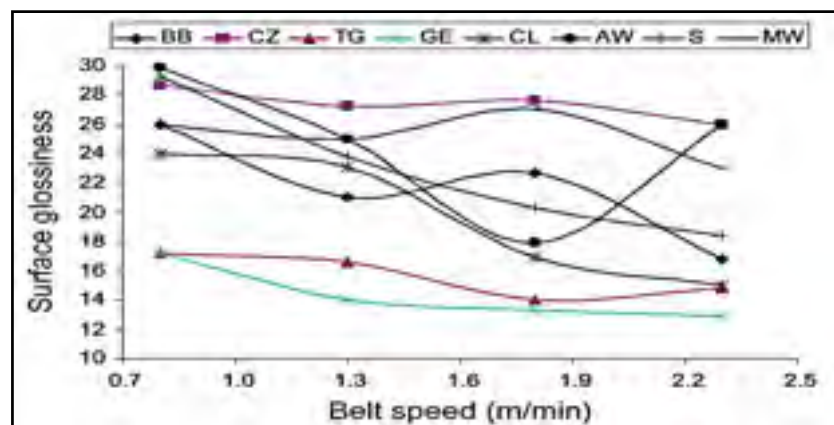


Figure 1.21 Variation de la brillance en fonction de la vitesse d'avance. Tiré de (Yavuz, Ozkahraman et Demirdag, 2011)

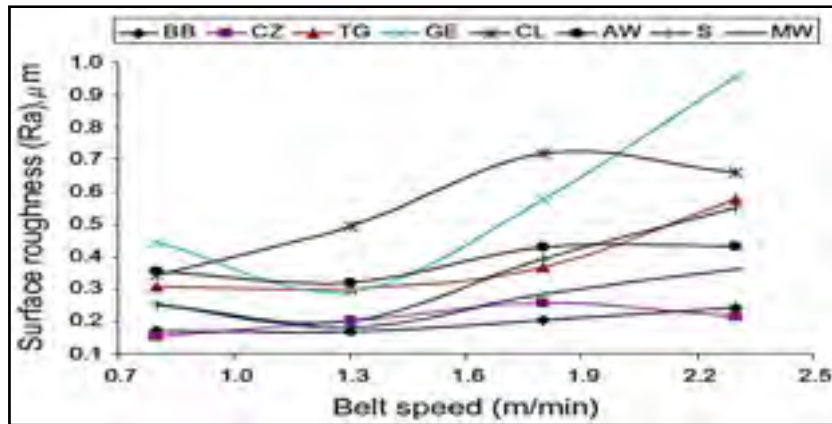


Figure 1.22 Variation de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance. Tiré de (Yavuz, Ozkahraman et Demirdag, 2011)

1.6 Émission et dispersion des particules lors des opérations d'usinage

L'étude de l'émission des PF lors de polissage de granit a été faite par Kouam, Songmene et Bahloul (2013). Il s'agit de mesurer les émissions des particules PM 2,5 (de diamètre inférieur à $2,5 \mu\text{m}$) durant l'opération de polissage linéaire des granits blanc et noir à sec. La Figure 1.23 représente le banc d'essai utilisé pour l'investigation expérimentale des émissions des particules dans le cas de polissage linéaire. Le banc d'essai est isolé pour permettre la collecte des particules fines.

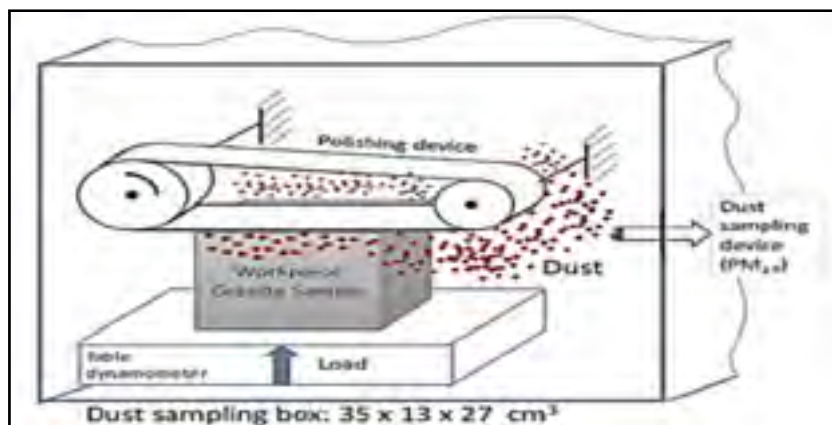


Figure 1.23 Banc d'essai pour l'étude des émissions des PF lors de polissage linéaire de granit. Tiré de (Kouam, Songmene et Bahloul, 2013)

Le résultat à la Figure 1.24 montre que la concentration totale massique des PF augmente rapidement avec l'augmentation de la vitesse de la bande abrasive. Cependant, la Figure 1.25 montre que l'augmentation de la vitesse de coupe améliore l'état de la surface des granits.

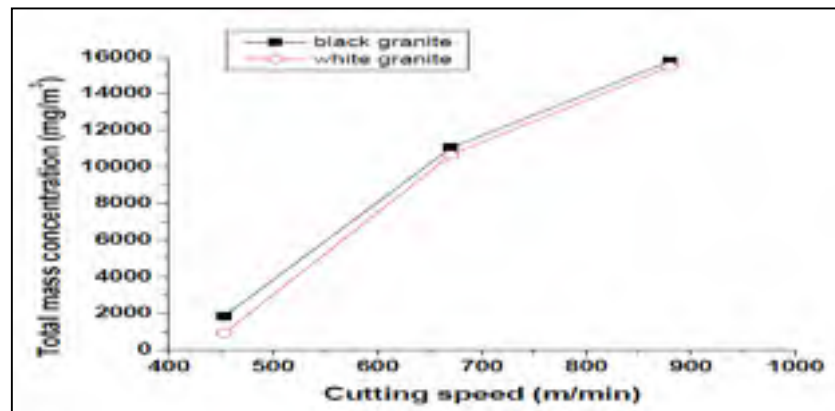


Figure 1.24 Concentrations de la masse totale des particules émises en fonction de la vitesse de coupe pour les différents granits. Tiré de (Kouam, Songmene et Bahloul, 2013)

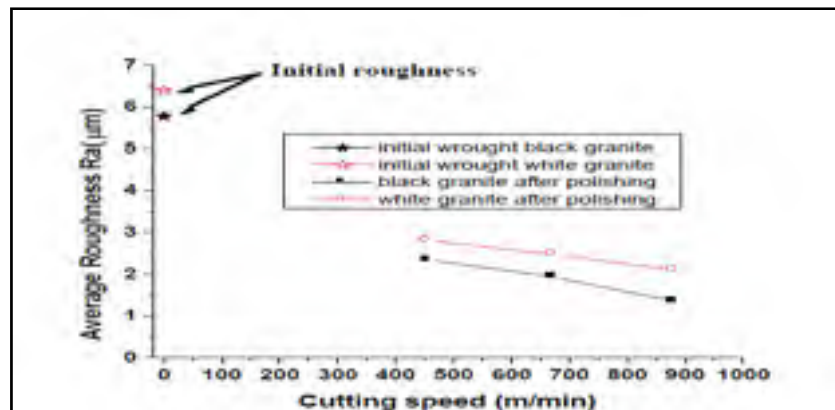


Figure 1.25 Rugosité moyenne Ra en fonction de la vitesse de coupe pour deux types de granit noir et blanc. Tiré de (Kouam, Songmene et Bahloul, 2013)

La Figure 1.26 montre qu'à l'inverse de la vitesse de rotation, la vitesse d'avance a tendance à diminuer la concentration massique des PF (Yaonan et al., 2014). En effet, l'augmentation de la vitesse d'avance favorise l'effet du phénomène de dilution qui conduit à la diminution de la concentration des PF. Il faut mentionner que dans ce cas l'étude est faite pour le fraisage de matériaux métallique. Le point commun avec le polissage est l'utilisation des deux

mouvements de rotation et d'avance combinés lors du processus d'enlèvement de matière. Cependant, il y a plus de particules générées lors du polissage.

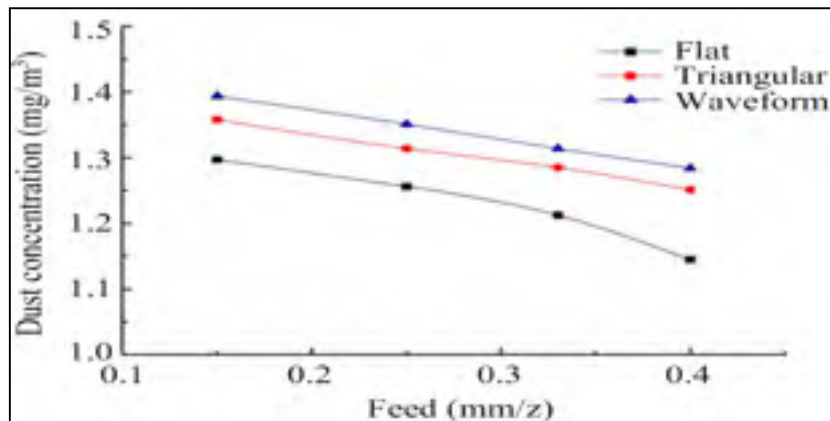


Figure 1.26 Effet de la vitesse d'avance sur la concentration massique des PF pour différents outils de fraisage avec différent type de plaquette. Tiré de (Yaonan et al., 2014)

L'étude de la dispersion des PF PM10 (de diamètre inférieur à 10 μm) a été faite par Yaonan et al (2014). Il s'agit d'analyser l'évolution de la concentration massique des PF autour de l'opération de fraisage d'un acier C45. La Figure 1.27 montre que les particules PM10 se concentrent proche du contact outil-pièce. En passant de la vitesse de rotation de 270 tr/min à 385 tr/min, la concentration massique des PF augmente puis diminue lorsqu'elle atteint 550 tr/min. Les grandes vitesses aident l'effet de dilution des particules dans l'air.

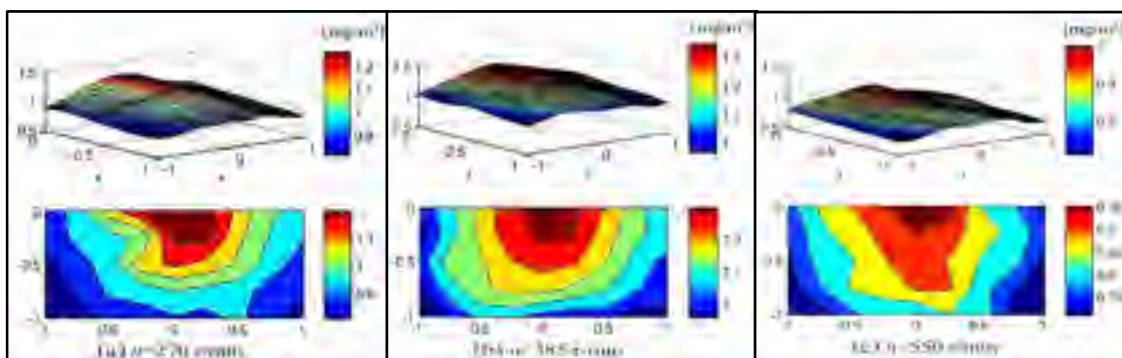


Figure 1.27 Dispersion de la concentration massique des particules PM10 lors de l'opération de fraisage de l'acier C45 pour différentes vitesses de rotation. Tiré de (Yaonan et al., 2014)

Djebara (2012) a étudié la dispersion des particules fines et ultrafines lors des opérations de perçage, surfacage et de rainurage. Pour mieux visualiser la dispersion, les différentes opérations d'usinage ont été faites sur un bloc de glace sèche. Il a été établi que les particules fines générées par l'opération d'usinage se comportent comme un projectile (Figure 1.28-a). Elles sont projetées à la vitesse de rotation de l'outil vers l'extérieur de la zone de coupe. Cependant, les particules ultrafines prennent la trajectoire du champ de vitesse créée par la rotation de l'outil de coupe Figure 1.28-b. Ensuite, elles se détachent de ce champ et restent en suspension dans l'environnement du travail. Leur suspension dans l'air dépend des forces, de gravité, de traînée et de poussée d'Archimède.

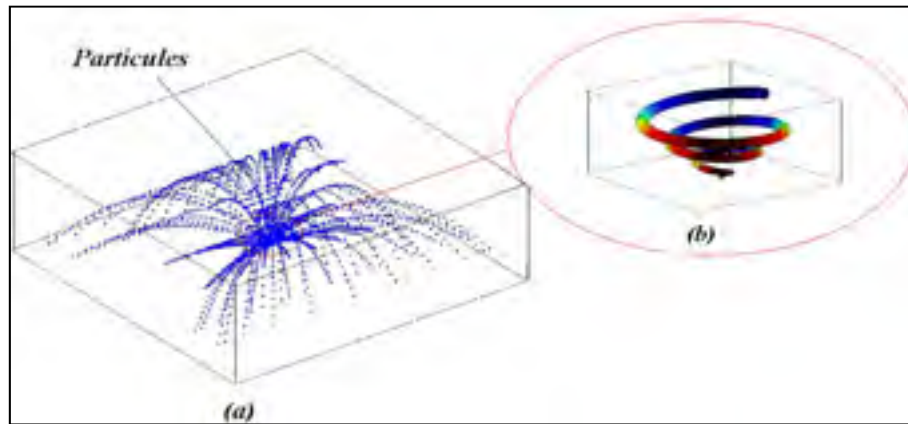


Figure 1.28 Représentation schématique de la trajectoire des particules générées lors d'opérations de perçage, surfacage et de rainurage (a) particules fines (b) particule ultrafine. Tiré de (Djebara, 2012)

Toenshoff, Karpuschewski et Glatzel (1997) ont étudié l'émission des PF dans le cas de meulage à sec de l'acier trempé 100Cr6. La distribution des diamètres aérodynamiques des particules émises est montrée à la Figure 1.29. Les particules détectées ont un diamètre qui varie entre $0,03 \mu\text{m}$ et $16 \mu\text{m}$ avec un maximum observé pour ceux avec un diamètre de $4 \mu\text{m}$. Ces particules une fois inhalées sont très dangereuses pour la santé des travailleurs et peuvent produire de graves maladies. Les mesures du niveau de système de ventilation générale de l'atelier de fabrication montrent que les particules enregistrées ont des diamètres inférieurs à $4 \mu\text{m}$. Les PF de diamètre supérieur à $4 \mu\text{m}$ ne sont pas enregistrées, car elles tombent et ne restent pas en suspension. La modélisation de l'émission des particules a été étudiée par Zaghbani, Songmene, et Khettabidans (2008) dans le cas de fraisage de l'alliage d'aluminium

6061-T6. Le modèle définit une unité de poussière (dust unit) obtenue en divisant la masse totale de la poussière dégagée lors de l'usinage par la masse du copeau produite.

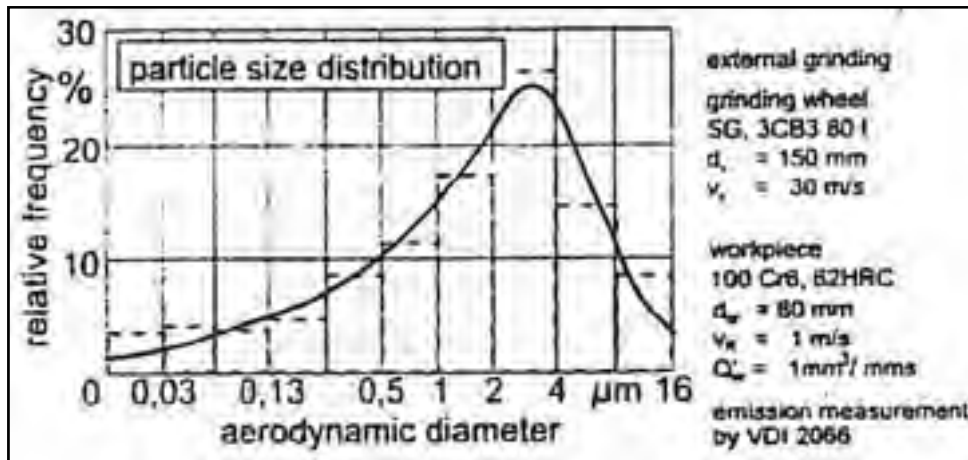


Figure 1.29 Distribution des diamètres aérodynamiques des particules.
Tiré de (Toenshoff, Karpuschewski et Glatzel, 1997)

1.7 Dispositifs de protection contre l'exposition à la poussière de quartz

Selon la CNESST, la démarche de prévention contre l'exposition des travailleurs aux risques doit suivre l'ordre suivant : élimination à la source, remplacement, contrôle technique, sensibilisation, mesures administratives et équipements de protection individuelle (CNESST, 2017). Dans le cadre de cette démarche, la CNESST en collaboration avec l'IRSST a proposé un guide des bonnes pratiques pour la prévention de l'exposition des travailleurs au quartz (Goyer, Bahloul et Veillette, 2010). Les moyens de protection proposés contre cette exposition consistent en des solutions de ventilation générale, de ventilation locale, de lubrification à l'eau et des équipements de protection individuelle. Dans la ventilation générale, la solution proposée pour le polissage consiste en une cabine ventilée avec un flux d'air qui peut être oblique, vertical ou horizontal (Figure 1.30). Cette solution n'est pas applicable à cause de son prix élevé pour les PME québécoises. De plus cette solution est encombrante sachant qu'il faut une cabine par poste.

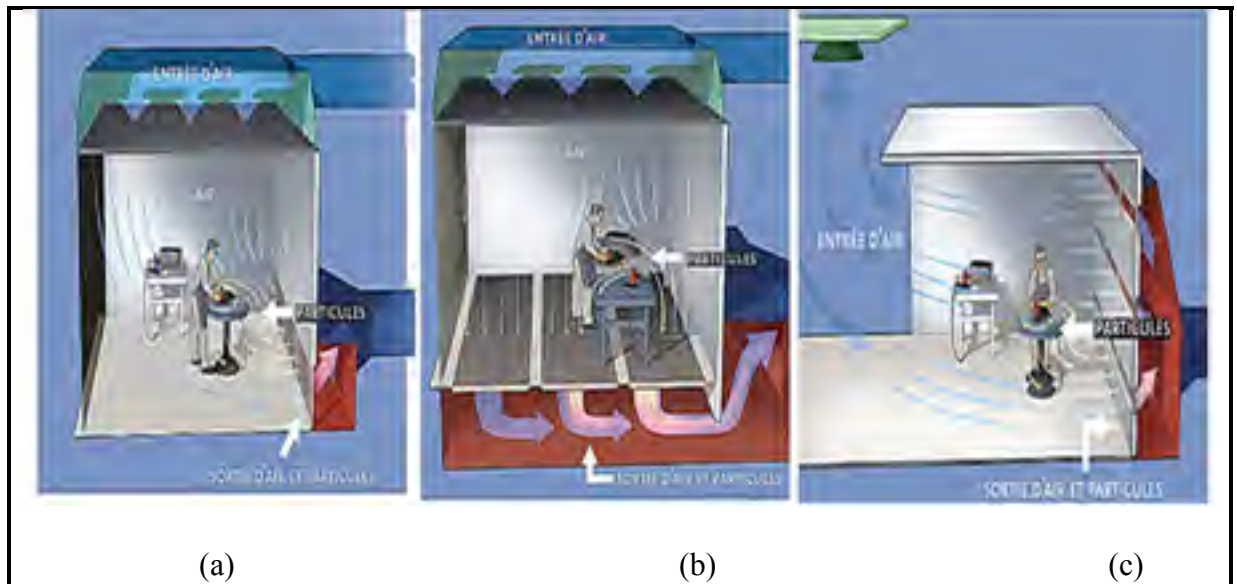


Figure 1.30 Cabine ventilée avec (a) un flux d'air oblique (b) un flux d'air vertical (c) un flux d'air horizontal. Tiré de (Goyer, Bahloul et Veillette, 2010)

Dans la ventilation locale, la solution proposée pour le polissage consiste en un aspirateur horizontal mis à côté de la source de poussière (Figure 1.31). Cette solution ne permet pas la captation de toutes particules émises. La présence du flux d'air comme dans le cas de travail en plein air perturbe la captation des particules.



Figure 1.31 Ventilation locale et influence de flux d'air sur la captation. Tiré de (Goyer, Bahloul et Veillette, 2010)

Les équipements de protection individuelle (EPI) sont considérés comme une solution de dernier recours. Les EPI utilisés pour la protection respiratoire des travailleurs contre l'exposition à la poussière de quartz lors de l'opération de polissage sont constitués des masques de filtration d'air (Figure 1.32). Cette solution est obligatoire dans le cas où le taux d'exposition reste supérieur à la norme ($0,1 \text{ mg/m}^3$). La problématique lors de l'utilisation de ces masques est l'existence des fuites au niveau de contact avec la peau du visage. De plus, cette solution est inconfortable pour les travailleurs et la plupart du temps ils l'enlèvent pour effectuer leurs travaux.

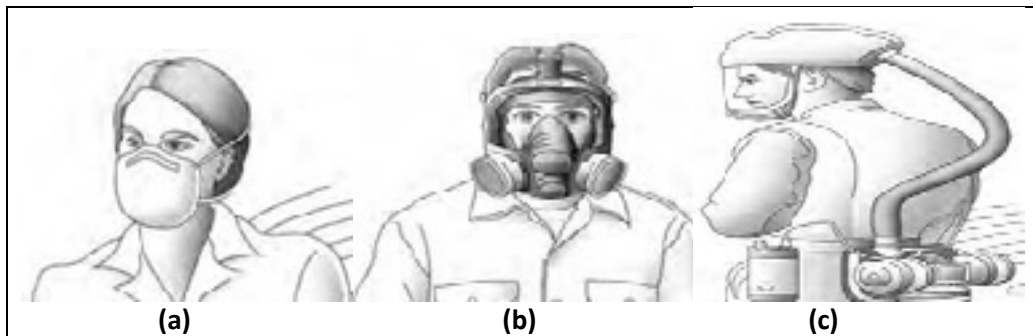


Figure 1.32 Équipements de protection personnelle (a) demi-masque
(b) masque complet (c) masque complet avec filtration d'air.
Tiré de (OSHA, 2016a)

Parmi les moyens de réduction les plus utilisés, il y a le système de ventilation locale LEV (Local Exhaust Ventilation). Il s'agit de monter sur l'outil de polissage rotatif un carter ou une hotte d'aspiration de poussière, comme il est monté sur la Figure 1.33-a. Cette méthode de réduction des émissions de poussière aide à diminuer le taux de quartz présent dans l'air de travail. Cependant, cette solution est insuffisante et ce taux reste supérieur à la limite d'exposition admissible PEL (permissible exposure limit) selon la norme OSHA (Figure 1.33-b). Les valeurs d'exposition mesurées dépassent cette limite, de 30 fois en utilisant un débit d'aspiration faible et de 20 fois en utilisant un débit d'aspiration élevé (Croteau et al., 2002). L'utilisation de l'eau comme moyen de réduction est insuffisante pour diminuer l'exposition à la poussière de quartz (Akbar-Khanzadeh et al., 2007 ; Simcox et al., 1999). La Figure 1.34-b montre la comparaison entre les taux de quartz mesurés pour les deux méthodes de réduction de poussière lors du polissage rotatif. Les valeurs mesurées dépassent la limite d'exposition

admissible de $0,025 \text{ mg/m}^3$ selon l'ACGIH. Ces valeurs dépassent cette limite, de 6 fois pour le système de ventilation locale LEV et de 38 fois pour la méthode utilisant l'eau.

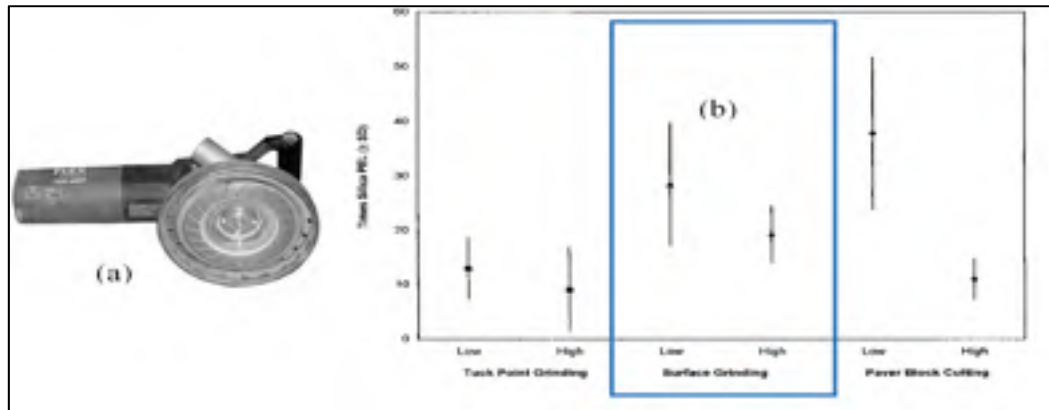


Figure 1.33 Réduction de poussière de quartz (a) Outil avec LEV (b) Mesure de l'exposition au quartz selon la norme OSHA. Tiré de (Croteau et al., 2002)

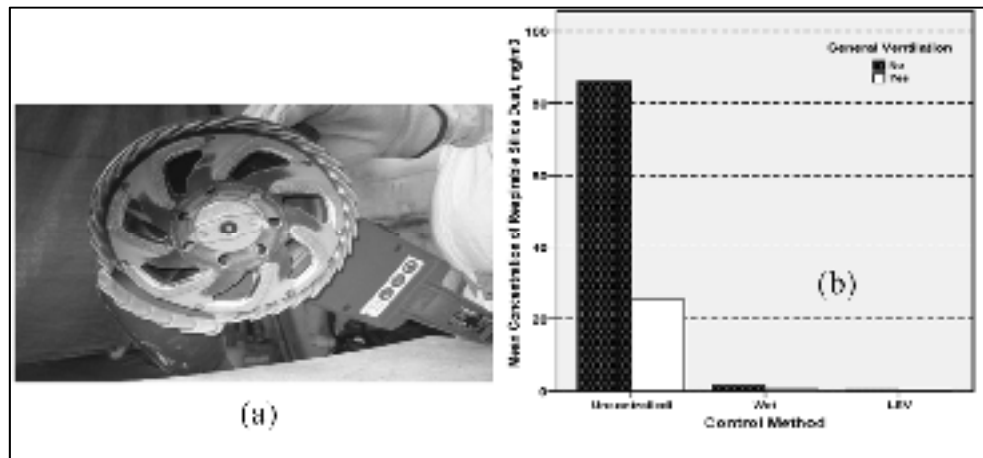


Figure 1.34 Comparaison des méthodes de réduction (a) Outil de polissage (b) Mesure de l'exposition. Tiré de (Akbar-Khanzadeh et al., 2007)

Songmene, Kouam et Bahloul (2018) ont démontré que l'utilisation de l'eau constitue un bon moyen de réduction pour l'émission des PF et non des PUF (voir la Figure 1.35). Johnson et al. 2017 ont montré que l'utilisation d'un flux d'eau continu sur la surface à polir (voir Figure 1.36) réduit plus efficacement l'émission de poussière que la pulvérisation de l'eau lors du polissage de comptoir en granit.

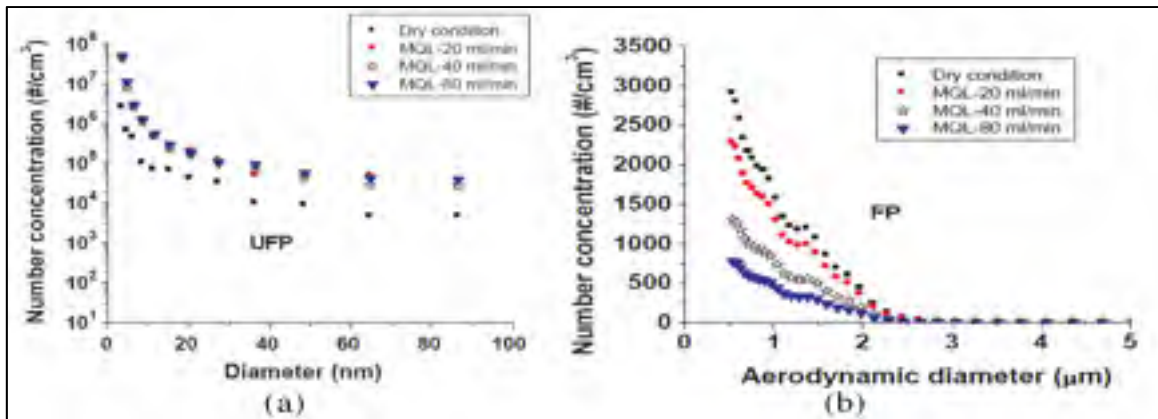


Figure 1.35 Comparaison des PF et PUF dégagées dans le polissage à sec et celui mouillé (avec différents débits d'eau) du granit blanc.
Tiré de (Songmene, Kouam et Bahloul, 2018)



Figure 1.36 Méthode de mouillage appliquée directement sur la surface du comptoir en granit à polir.
Tiré de (Johnson et al., 2017)

1.8 Conclusion

La poussière des particules fines et ultrafines émise lors du polissage de granit contient du quartz. Ce quartz est nocif pour la santé des travailleurs une fois qu'il atteint leurs poumons. Les particules fines de cette poussière sont moins dangereuses que celles ultrafines de point de vue de l'inflammation des tissus pulmonaires. Deux méthodes de mesure des particules de poussière peuvent être utilisées. La méthode de mesure par prélèvement pour déterminer la poussière respirable et le taux de quartz contenu dans cette dernière. Cette méthode sert aussi à déterminer les caractéristiques physico-chimiques de la poussière émise. Il y a aussi la méthode de mesure à lecture directe pour déterminer la concentration (en nombre, en masse

ou en surface) des PUF et des PF dans la poussière. Le procédé de polissage rotatif se pratique sur des pièces contenant des taux variables de quartz, ce qui se reflète sur les taux de celui-ci trouvés dans la poussière respirable. Les outils utilisés contiennent des abrasifs en diamant, qui est plus dur que le granit et permet l'enlèvement de matière de la surface de pièce (en granit). Le processus de polissage standard est constitué de 7 étapes qui consistent à polir la surface par des outils en commençant par ceux avec de gros grains abrasifs et en finissant par ceux avec des grains abrasifs fins (au début de polissage, le processus d'enlèvement de matière est la rupture fragile et la rupture ductile est à sa fin). Le taux d'enlèvement de matière dans le processus de polissage dépend de la pression de contact et des vitesses, de rotation et d'avance de l'outil abrasif. Ce taux augmente avec ces deux paramètres. L'usinabilité des granits dépend de la dureté des minéraux qui le constituent. La qualité de la surface obtenue par polissage est déterminée par la rugosité qui diminue tout au long du processus. La qualité de la surface peut être mesurée par la brillance qui est inversement proportionnelle à la rugosité. L'émission des particules de poussière lors du polissage de granit est influencée de façon positive par la vitesse de coupe et de façon négative par la vitesse d'avance. L'étude de la dispersion des particules de poussière dans des procédés d'usinage similaires au polissage (comme le fraisage) montre que les particules fines sont éjectées vers l'extérieur du contact outil-pièce et les particules ultrafines suivent l'écoulement imposé par le champ de la vitesse de rotation de l'outil. De façon générale, c'est les particules de diamètre inférieur à 4 μm qui restent en suspension dans l'air du travail. L'utilisation des moyens de protection basés sur la ventilation générale est inapplicable à cause des contraintes d'espace et de coût à prévoir pour sa mise en œuvre. Les moyens basés sur l'utilisation de l'eau et de la ventilation locale (carter d'aspiration) sont très efficaces, mais ne permettent pas de réduire le taux de quartz sous les normes permises. L'utilisation de l'eau permet de réduire seulement l'émission des PF de poussière émise lors de polissage de granit et pour celle des PUF. Il faut donc faire plus d'investigation pour trouver des moyens de réduction de l'émission de poussière de quartz lors du polissage de granit.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Introduction

L'objectif de ce travail est de comprendre l'émission et la dispersion des particules de poussière, générées lors du polissage manuel de granit et de rechercher les solutions permettant la captation de ces particules. La Figure 2.1 montre un diagramme qui explique l'approche méthodologique adoptée pour atteindre cet objectif. Les travaux sont décomposés en deux volets. Le premier volet réalisé à l'ÉTS va permettre l'étude expérimentale de polissage régulier et rotatif sans translation de granit sur une machine-outil. Ce volet permet de documenter l'émission et la dispersion de la poussière de quartz lors du polissage de granit. Une analyse de quartz sera faite dans cette partie. Dans ce volet, la possibilité de la réduction des émissions de poussière par variation des paramètres de polissage sera explorée.

Le deuxième volet réalisé à l'IRSST consiste à étudier la simulation expérimentale du polissage en utilisant la technique des particules NaCl traceuses. Dans cette partie sera étudiée la dispersion des particules autour d'un disque rotatif simulant l'opération de polissage rotatif et sans translation. Ce volet permet aussi d'évaluer différents concepts de captation à la source des particules émises lors du polissage.

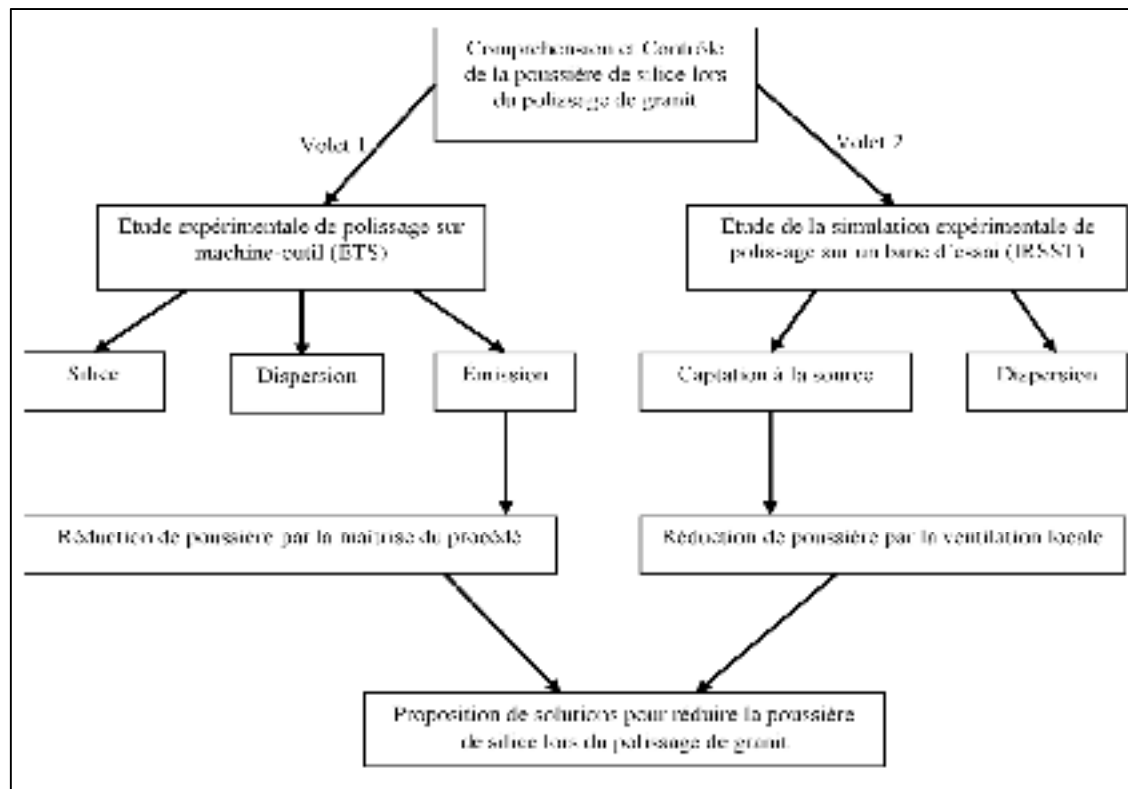


Figure 2.1 Diagramme explicatif de la méthodologie adoptée pour la résolution de la problématique du projet

2.2 Volet 1 : Étude expérimentale de polissage sur machine-outil

Les essais expérimentaux du polissage de granit sont faits au laboratoire de fabrication de l'ÉTS. Ce volet sera divisé en quatre parties. Dans une première partie, le polissage graduel tel qu'il est fait à l'industrie sera étudié. Cette partie va aider à comprendre, le processus d'enlèvement de matière, l'émission et la dispersion des particules de poussière de quartz lors de l'opération de polissage. Les résultats de cette partie ont été regroupés dans un article publié en 2015 (Saidi et al., 2015). Dans une deuxième partie, sera faite une étude de la rugosité, l'émission et la dispersion dans le cas de polissage régulier (mouvements de rotation et de translation combinées). Dans la troisième partie, une analyse de la poussière de quartz générée lors du polissage de granit sera faite. Dans la quatrième partie, sera faite une étude de la rugosité, l'émission et la dispersion dans le cas de polissage rotatif et sans translation (mouvements de rotation seule).

2.2.1 Étude de la rugosité et de l'émission et de la dispersion des PF et PUF lors du polissage régulier des granits

Dans cette partie il s'agit de déterminer avec une étude statistique, les paramètres qui peuvent influencer l'émission et la dispersion des PF et des PUF durant l'opération de polissage régulier (rotation et translation combinées) de granit. Cette étude va permettre de faire une optimisation des paramètres de polissage susceptibles de diminuer l'émission de poussière tout en assurant un bon état de surface (rugosité et brillance). Le modèle statistique permettant de relier les variables de sortie avec les variables d'entrée est présenté à la Figure 2.2.

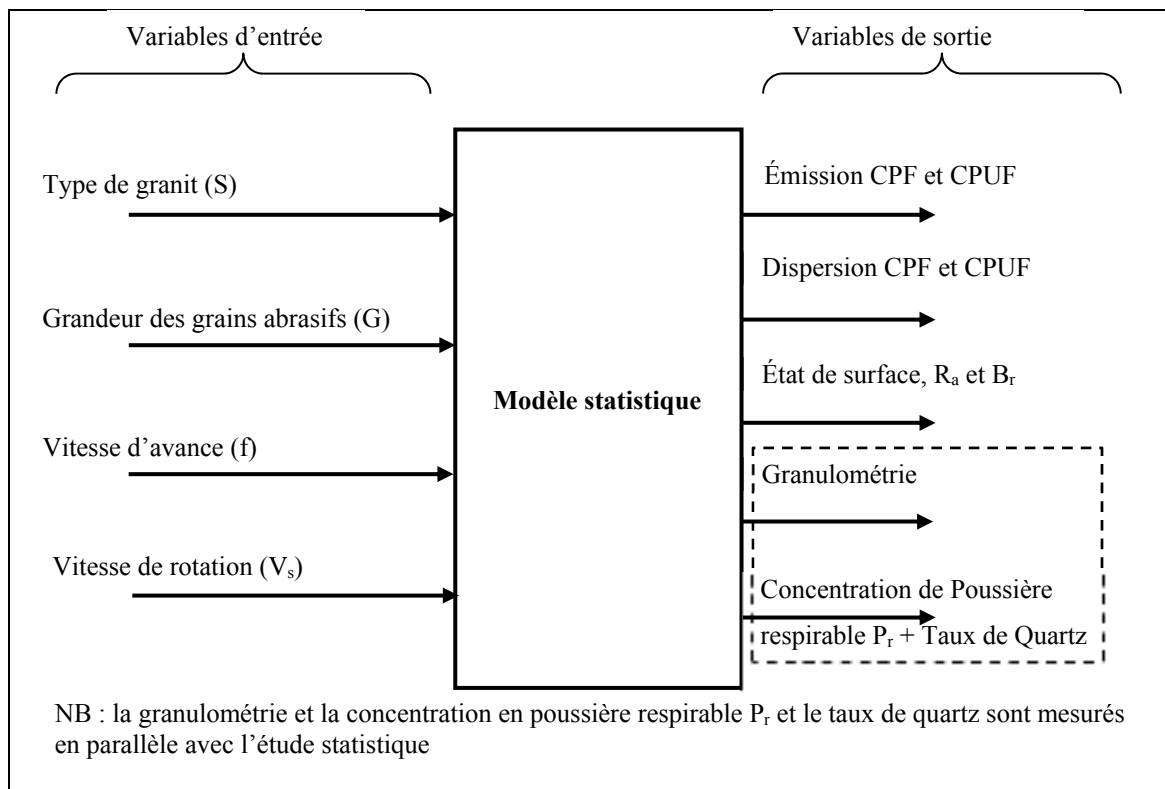


Figure 2.2 Modèle statistique.

La Figure 2.3 donne le schéma du dispositif expérimental permettant l'étude statistique de l'émission et de la dispersion lors du processus de polissage réalisé à l'ÉTS. L'émission à la source des PF et des PUF est mesurée au point de coordonnées $D = 5$ cm et $h = 5$ cm. La dispersion est évaluée en 9 points de coordonnées indiquées sur la Figure 2.3. Dans cette

partie, le polissage de granit est fait sur la machine-outil CNC Huron K2X10. Cette machine possède une vitesse maximale de 28000 tr/min, une puissance maximale de 40 KW, une vitesse d'avance maximale de 30 m/min et un volume de travail de 1000 x 800 x 500 mm³. Dans cette étude, les pièces en granit blanc et noir sont de dimensions de 200 x 200 x 30 mm³.

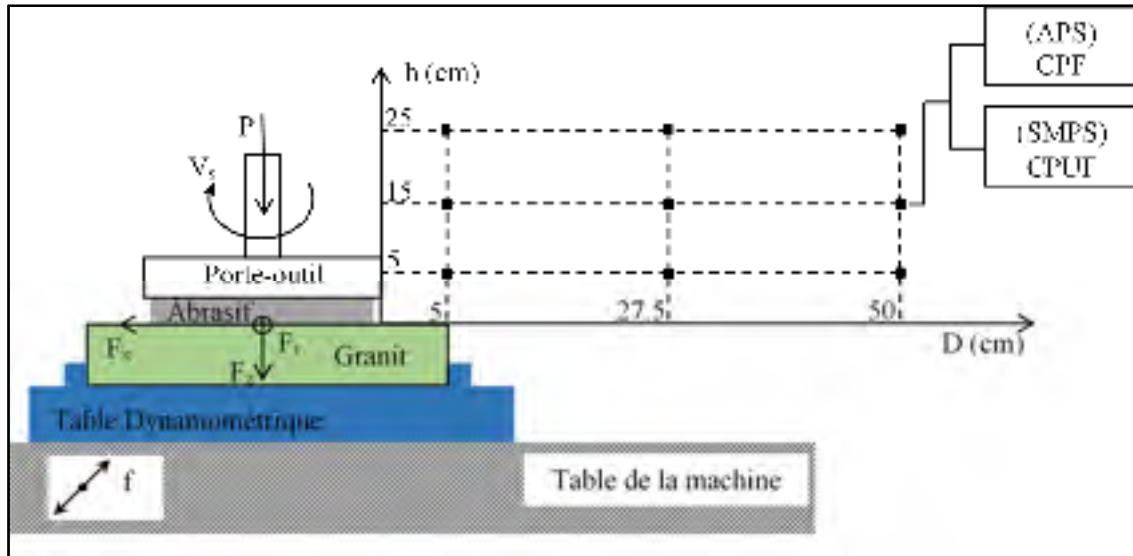


Figure 2.3 Schéma du dispositif mis en œuvre pour l'étude de l'émission et la dispersion des particules fines et ultrafines lors de polissage du granit (ÉTS)

Le Tableau 2.1 montre les éléments à analyser, les paramètres mesurés et les conditions de polissage lors de l'étude de l'émission et de la dispersion des PF et PUF. Le plan d'expérience sera exécuté pour deux types de granit (blanc et noir) et pour les deux phases de polissage, d'ébauche (abrasif G100) et de finition (abrasif G800). La vitesse de rotation et la vitesse d'avance seront variées à 3 niveaux.

Tableau 2.1 Éléments analysés, paramètres mesurés et conditions de polissage dans le cadre de l'étude statistique de l'émission à la source et de la dispersion durant le processus de polissage du granit

Éléments analysés	Paramètres mesurés	Conditions de polissage
Qualité de surface	- Rugosité arithmétique R_a en μm - Brillance B_r en Gloss	- Outil abrasif G : 100 et 800 - Pièces en granit S : Blanc et noir - Rugosité R_a initiale obtenue par G 46 - Vitesse de rotation V_s : 1000, 1750 et 2500 tr/min - Vitesse d'avance f : 8,5, 17 et 25,5 mm/s - La pression P_{th} est fixée à 0,23 bar - Distance de polissage : 300 mm
Émission des particules fines	- Concentration totale en nombre ($\#/\text{cm}^3$) - Granulométrie : concentration en nombre ($\#/\text{cm}^3$) des PF de diamètre aérodynamique situé entre 0,5 et 10 μm.	- Pas de lubrification - Pas d'aspiration d'air - Point de mesure de la poussière pour l'émission: $D = 5\text{ cm}$ $h = 5\text{ cm}$ - Points de mesure de la poussière pour la dispersion: $D = 5, 27,5, \text{ et } 50\text{ cm}$ $h = 5, 15 \text{ et } 25\text{ cm}$
Émission des particules ultrafines	- Concentration totale en nombre ($\#/\text{cm}^3$) - Granulométrie : concentration en nombre ($\#/\text{cm}^3$) des PUF de diamètre de mobilité électrique situé entre 10 et 100 nm (entre 17 et 150 nm en faisant la conversion en diamètre aérodynamique)	

La représentation de la granulométrie va être faite en utilisant le diamètre aérodynamique des PF et des PUF. En faisant comme hypothèse que le régime d'écoulement est permanent et en assumant que les PUF sont de forme sphérique, la conversion du diamètre de mobilité électrique D_{ME} en diamètre aérodynamique D_{AE} se fait en utilisant l'équation suivante :

$$D_{AE} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} D_{ME} \quad (\text{DeCarlo et al., 2004}) \quad (2.1)$$

Avec :

ρ est la densité du granit (2,6 g/cm³)

ρ_0 est la densité référence (1 g/cm³)

D'où :

$$D_{AE} = 1,612 D_{ME} \quad (2.2)$$

Les diamètres de mobilité électrique des PUF observés varient entre 10 et 100 nm. Ce qui correspond à des diamètres aérodynamiques variant entre 16,12 et 161,24 nm.

Pour l'émission, le modèle statistique doit relier les paramètres d'entrée qui sont la vitesse de rotation (V_s) et la vitesse d'avance (f) avec les paramètres de sortie qui sont la concentration des particules fines (CPF), la concentration des particules ultrafines (CPUF), la rugosité (R_a) et la brillance (B_r). Dans le cas de la dispersion, les paramètres d'entrée sont augmentés de la distance horizontale (D) et la distance verticale (h). L'analyse statistique est réalisée en tenant compte des effets linéaires, quadratiques et d'interactions entre les paramètres étudiés. En général, les résultats obtenus démontrent que les effets quadratiques et d'interactions influencent de très peu les variables de sortie (CPF, CPUF et R_a) comparés aux effets linéaires. Dans la suite, uniquement les effets linéaires sont alors analysés. Il est à noter aussi que toutes les interactions sont considérées dans les équations du modèle statistique. Ces hypothèses sont vraies pour toutes les analyses statistiques qui vont suivre. Le modèle choisi est un modèle quadratique avec des interactions linéaire-linéaire et les équations trouvées sont sous la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i \times X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j \geq i}^2 \beta_{ij} \times X_i \times X_j + \varepsilon \quad (2.3)$$

Où :

Y : Variables de sortie;

X_i et X_j : Variables d'entrée;

β_0 : Coefficient de l'effet général;

β_i : Coefficient des effets principaux;

β_{ij} : Coefficient des effets quadratiques et des effets des interactions;

ε : L'erreur de mesure.

Il faut noter que l'analyse statistique est réalisée avec des variables codées. Pour trouver les résultats donnés par les équations statistiques, il faut rapporter les valeurs réelles des variables (V_s , f , D et h) dans l'intervalle $[-1 \ 1]$. L'équation de passage de la variable réelle $X_{réel}$ incluse dans l'intervalle $[X_{min} \ X_{max}]$ vers la variable codée $X_{codé}$ incluse dans l'intervalle $[-1 \ 1]$ est comme suit :

$$X_{codé} = \frac{X_{réel} - \left(\frac{X_{max} + X_{min}}{2}\right)}{\frac{X_{max} - X_{min}}{2}} \quad (2.4)$$

Dans l'étude de l'émission, une optimisation des deux paramètres de polissage, la vitesse de rotation et la vitesse d'avance, peut être effectuée au moyen du logiciel statistique STATISTICA (StatSoft Inc.). Cette optimisation va permettre de voir s'il est possible de minimiser les émissions des particules fines et ultrafines tout en gardant une bonne qualité de surface.

Le Tableau-A I-1 (voir annexe I p.129) et le Tableau-A II-1 (voir annexe II p.131) donnent le plan d'expérience (pour un type de granit et une phase de polissage donné) pour l'étude respectivement de l'émission et de la dispersion. Pour une bonne robustesse du modèle statistique, les essais sont répétés 3 fois avec des répétitions au centre (noté c). Trois répétitions au centre pour l'étude de l'émission et 5 pour l'étude de la dispersion. Un point arbitraire (noté arb) est exécuté pour valider le modèle statistique trouvé.

2.2.2 Analyse de la poussière dégagée lors de polissage de granit : poussière respirable, taux de quartz et classification des particules de poussière

Dans cette partie, il s'agit de l'étude quantitative et qualitative de la poussière respirable P_r dégagée lors du polissage régulier de granit. Le prélèvement de la poussière est fait tout au long de l'étude statistique dans le cas de polissage régulier. Les paramètres considérés lors de l'analyse de la poussière respirable sont les types de granit, blanc et noir et les deux phases de polissage, ébauche et finition. Les points de prélèvement de poussière sont fixés à différentes hauteurs h de 5, 15 et 25 cm et à une même distance horizontale D de 40 cm. La Figure 2.4 montre les conditions de polissage et la position des points de prélèvement de poussière

respirable lors du polissage régulier de granit. L'échantillonnage de la poussière respirable constitué des particules de diamètre inférieur à $4\text{ }\mu\text{m}$ est fait par un ensemble cassette-cyclone-pompe avec un débit d'aspiration de $1,7\text{ l/min}$ (Drolet et Beauchamp, 2012). Le débit de la pompe est contrôlé avant et après l'échantillonnage et pour un bon fonctionnement l'écart entre les mesures ne doit pas dépasser 5%. La concentration de poussière respirable Pr (en mg/m^3) et le taux de quartz (en mg/m^3) correspondant (contenu dans cette portion de poussière) sont analysés dans le laboratoire de l'IRSST respectivement selon la méthode 48-1 et la méthode 206-2. La machine de prélèvement et de classification des particules fines et ultrafines est un ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) classique (DEKATI, 2016b). La classification des PF et PUF selon leurs diamètres est faite par la méthode de prélèvement par des plaques d'impaction disposées en cascade et équipées avec des substrats en carbone. La classification sera faite pour des diamètres allant de $0,039$ à $8,175\text{ }\mu\text{m}$. Le débit d'aspiration de l'ELPI est de 10 l/min . Le prélèvement est effectué lors du polissage des granits blanc et noir avec un abrasif G45. Les conditions de polissage sont : une pression de $0,23\text{ bar}$, une vitesse de rotation de 1000 tr/min , une vitesse d'avance de $8,5\text{ mm/s}$ et un temps de polissage de $1\text{ h }12\text{ min}$.

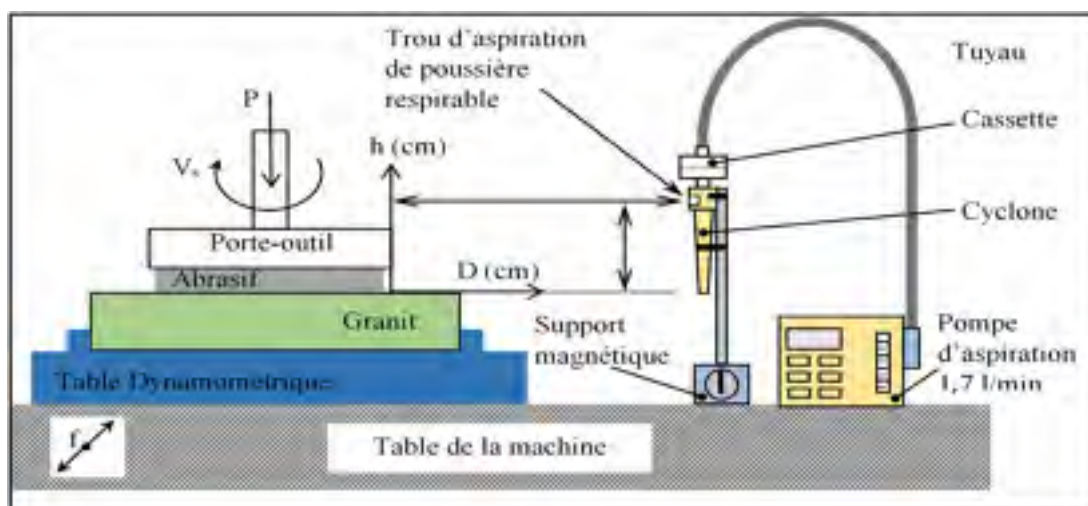


Figure 2.4 Emplacement du système d'échantillonnage de la poussière respirable

2.2.3 Étude de la rugosité et de l'émission et de la dispersion des PF et PUF lors du polissage rotatif et sans translation des granits

Il s'agit dans cette partie d'étudier le processus de polissage rotatif et sans translation des granits là où le travailleur polit la pièce avec une amplitude de translation nulle ou faible. Dans ce cas, les PF et PUF sont moins diluées dans l'air que dans le cas de polissage régulier. Ce type de polissage est considéré comme le pire scénario auquel le travailleur peut être exposé. La qualité des pièces, l'émission et la dispersion seront étudiées dans les mêmes conditions que pour le polissage régulier sauf que la vitesse d'avance est mise à zéro et le temps de polissage est fixé à 40 s. Cette étude servira de base à la mise en œuvre des simulations expérimentale et numérique de procédés de polissage de granit (dans le pire cas d'exposition). Le

Tableau-A I-2 (voir annexe I p.129) et le Tableau-A II-2 (voir annexe II p.132) donnent le plan d'expérience pour ce type de polissage (pour un type de granit et une phase de polissage donné) pour l'étude respectivement de l'émission et de la dispersion.

2.3 Volet 2- Simulation expérimentale du procédé de polissage à l'IRSST

Dans cette partie il s'agit d'étudier la dispersion et de la captation à la source des PF et PUF lors du polissage rotatif et sans translation de granit. Pour faire cette étude, le dispositif de simulation expérimentale à la Figure 2.5 a été mis en place dans le laboratoire de l'IRSST. Ce dispositif permet de faire la simulation expérimentale du procédé de polissage de granit en toute sécurité, sans être exposé à la poussière de quartz. De plus, Il offre un espace ouvert et plus grand que celui qu'on trouve sur une machine-outil (espace limité et fermé). Les particules utilisées dans la simulation sont les particules NaCl qui ont une forme cubique et irrégulière similaire à celle des particules de poussière dégagées lors du polissage de granit (Weis et Ewing, 1999).

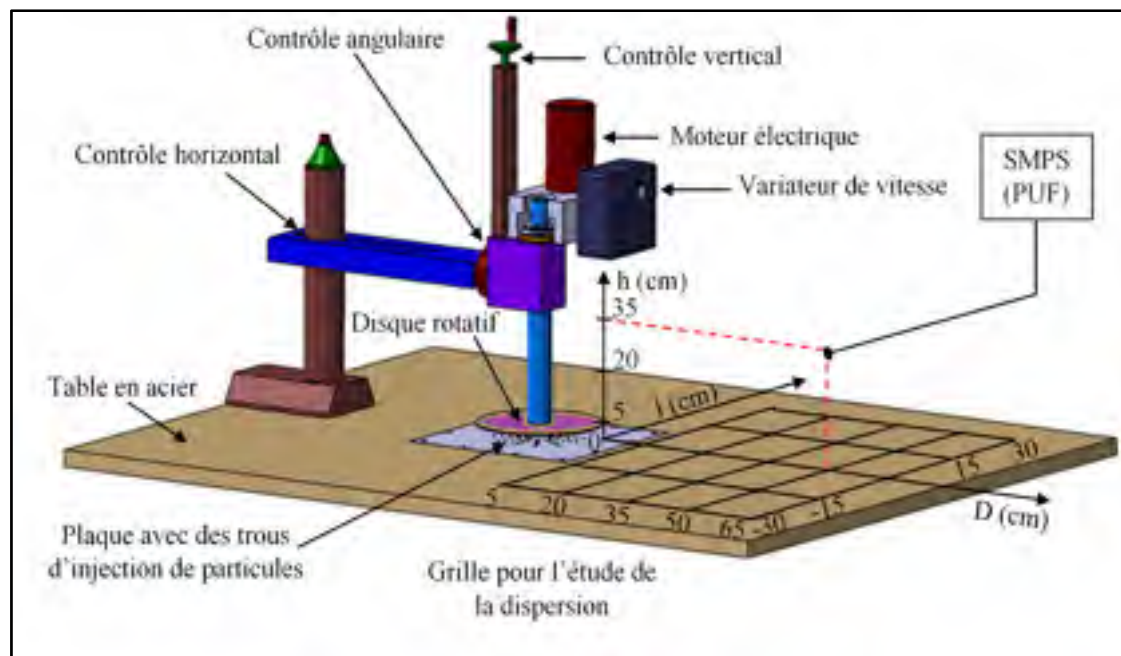


Figure 2.5 Dispositif de simulation expérimental de la dispersion des PUF de sel (NaCl)

Le banc d'essai expérimental est constitué d'une mini-fraiseuse CNC (modèle 2000, Sherline Products Inc.). La vitesse de rotation de cette machine peut varier entre 70 et 2800 tr/min. Cette mini fraiseuse est installée sur une table métallique pour assurer sa stabilité. Un disque de diamètre 5 pouces est monté sur la broche de la mini fraiseuse. La face inférieure du disque est positionnée parallèlement à la surface de la table au moyen de 3 systèmes de contrôle, vertical, horizontal et angulaire. Une distance de 1 mm est respectée entre le disque et la table. Des trous placés sous le disque permettent l'injection des PUF. Cette étude va permettre de confirmer si le comportement de ces PUF éjectées par l'effet de la rotation du disque est semblable à celui des PUF produites lors du polissage rotatif et sans translation de granit.

Le schéma de train d'alimentation en PUF de sel sec qui vont être injectées sous le disque rotatif est donné à la Figure 2.6. Les particules sont produites par un atomiseur 6 jets (modèle 9306A, TSI Inc.). L'atomisation se fait par injection d'un jet de solution saline sur une sphère. Les particules générées peuvent atteindre une concentration de $10^6 \text{ \#}/\text{cm}^3$. L'humidité des aérosols de sel générés par l'atomiseur est éliminée par leurs passages à travers un tube rempli de gel de silice. Les particules séchées passent ensuite par un régulateur de débit qui permet d'injecter un débit de 4 l/min directement sous le disque rotatif par 42 trous de 3 mm de

diamètre. Pour éviter l'oxydation par le sel, la connexion avec la table et la plaque trouée est en plexiglas.

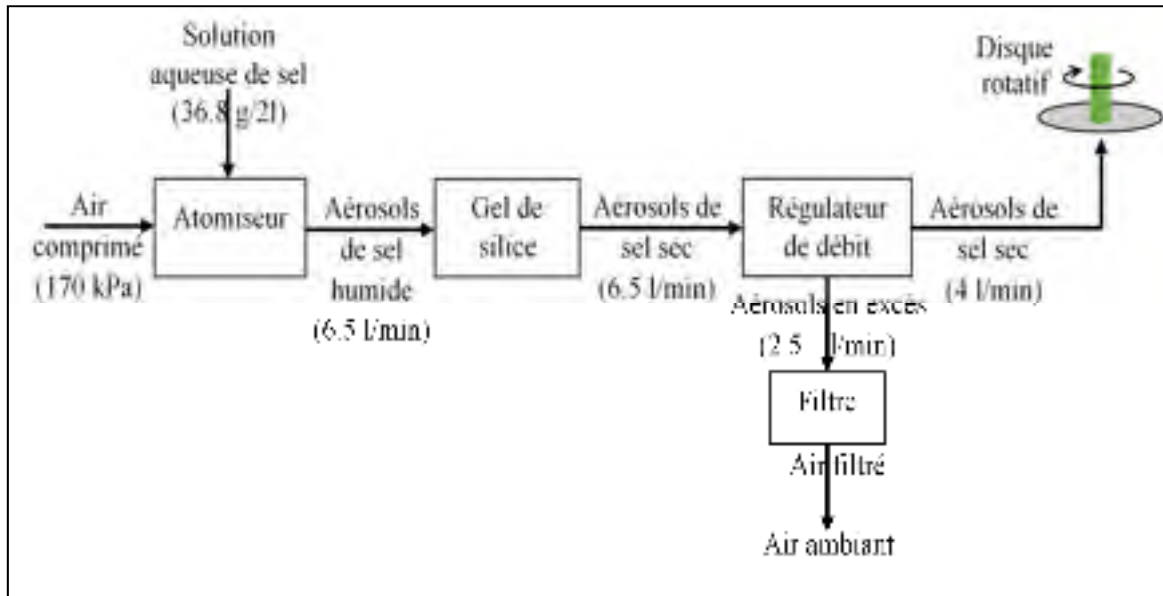


Figure 2.6 Train d'alimentation en PUF de sel (NaCl)

2.3.1 Simulation expérimentale de la dispersion des particules ultrafines de sel

Le Tableau 2.2 montre les éléments à analyser avec les paramètres mesurés et les conditions de simulation à varier pour chaque élément. L'émission et la dispersion sont étudiées pour un débit d'alimentation en PUF sous le disque rotatif de 4 l/min. La vitesse de rotation est variée de 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min. La dispersion est étudiée suivant le plan horizontal (D, l) aux distances verticales $h = 5, 20$ et 35 cm. La grille du plan de dispersion avec les coordonnées des points de mesure est donnée sur la Figure 2.5.

Tableau 2.2 Éléments analysés, paramètres mesurés et conditions de simulation dans le cadre de l'étude de la dispersion durant la simulation du processus de polissage du granit

Éléments analysés	Paramètres mesurés	Conditions de simulation
Émission des particules ultrafines	- Concentration totale en nombre ($\#/cm^3$) - Granulométrie : Concentration en nombre ($\#/cm^3$) des particules de diamètre situé entre 10 et 100 nm.	- Outil rotatif de diamètre 5 pouces - Distance disque-table de 1 mm - Débit d'alimentation en PUF : 4 l/min - Vitesse de rotation V_s : 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min - Temps de simulation : 60 s - Pas d'aspiration d'air - Points de mesure de la poussière : D en cm : 5, 20, 35, 50 et 60 l en cm : -30, -15, 0, 15 et 30 h en cm : 5, 20 et 35

2.3.2 Étude des solutions de réduction de l'émission à la source des PUF lors de la simulation du processus de polissage de granit

2.3.2.1 Réduction à la source par le système de ventilation soufflage-aspiration

La première solution de captation à la source est le système de ventilation locale soufflage-aspiration (Figure 2.7). Cette solution consiste à pousser les particules de poussière (ou de contaminant) par un souffleur d'air vers une hotte d'aspiration. Cette dernière capte les particules et les dirige vers le système de filtration et de récupération.

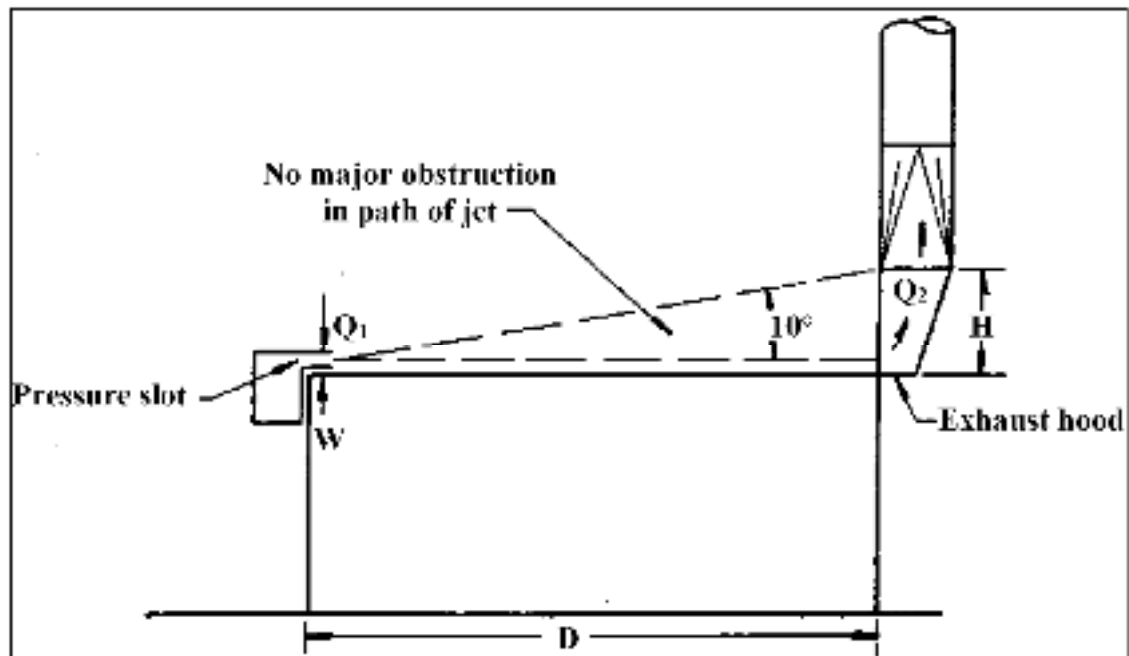


Figure 2.7 Système de ventilation locale soufflage-aspiration. Tiré de (ACGIH, 2010)

La Figure 2.8 montre le dispositif expérimental de la solution de captation à la source par le système soufflage-aspiration. Cette solution est constituée, d'un souffleur d'air Figure 2.9-a et d'une hotte d'aspiration Figure 2.9-b. Ces deux composantes sont placées d'une part et d'autres du disque rotatif à une distance de 30 cm. L'air injecté par le souffleur pousse les PUF éjectées par le disque rotatif vers la hotte réceptrice. Le débit d'aspiration de la hotte réceptrice est fixé à 3 valeurs de 1250, 1750 et 2250 l/min. Le débit de soufflage est augmenté petit à petit et la concentration en nombre des PUF est mesurée à une distance de 25 cm perpendiculairement au flux d'air soufflé (Figure 2.8). Ce point de mesure est choisi à l'extérieur de la zone de passage de l'air soufflé. La concentration est mesurée par un spectromètre SMPS. Pour vérifier les fuites des particules à l'extérieur de la hotte, des mesures de concentration sont faites sur les côtés droit, gauche et haut de celle-ci. L'expérimentation est faite pour les 4 vitesses de rotation de 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min.

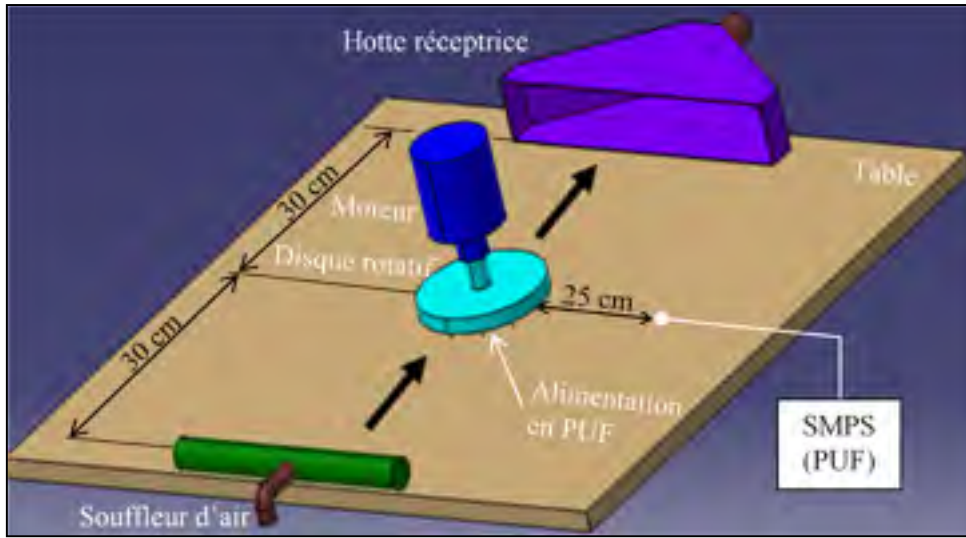


Figure 2.8 Dispositif expérimental de la solution de captation à la source par le système soufflage-aspiration

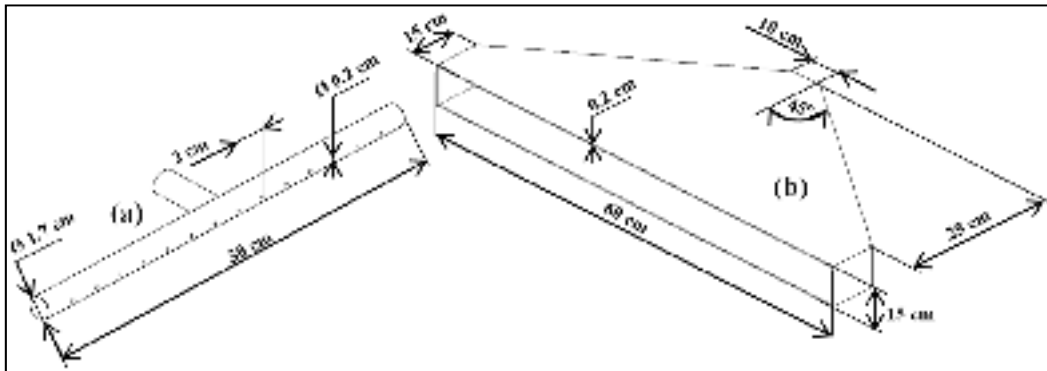


Figure 2.9 Dessin des composantes de la solution soufflage-aspiration
(a) Souffleur (b) Hotte d'aspiration

L'efficacité de cette solution est donnée par la formule suivante :

$$Efficacité \% = \left(1 - \frac{CPUF_{sans\ réduction}}{CPUF_{avec\ réduction}} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

La valeur de débit de soufflage nécessaire pour ramener les PUF vers la hotte réceptrice est notée pour chaque vitesse de rotation du disque à une efficacité de 95 %.

2.3.2.2 Réduction à la source par un carter (ou hotte) d'aspiration

La deuxième solution de captation à la source des particules de poussière est le carter (ou la hotte) d'aspiration (Figure 2.10). La solution de captation consiste à un confinement du disque rotatif par un carter d'aspiration. Le carter d'aspiration monté sur le disque abrasif permet l'aspiration de la poussière directement à la source. Cette solution est bien adaptée pour l'aspiration de la poussière dans le cas de polissage des surfaces planes.

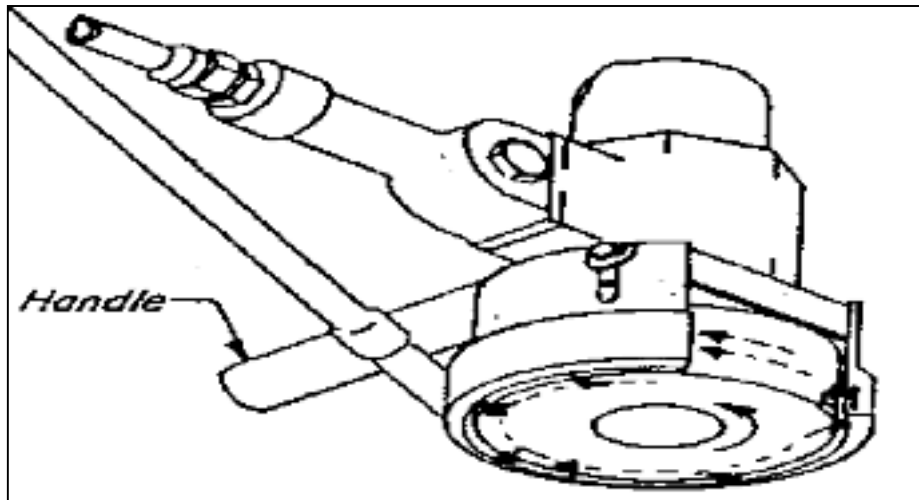


Figure 2.10 Carter (ou hotte) d'aspiration ajusté à l'outil de polissage.
Tiré de (ACGIH, 2010)

Le dispositif d'expérimentation de cette solution est montré à la Figure 2.11. Le point de contrôle de l'efficacité de ce système est placé à une distance de 1 cm et la concentration des PUF en ce point est mesurée par le SMPS. L'expérimentation est faite pour les 4 vitesses de rotation de 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min. L'efficacité de cette solution est calculée par la formule utilisée dans l'équation 2.4. La valeur de débit d'aspiration nécessaire pour capter les PUF est notée pour chaque vitesse de rotation du disque à une efficacité de 95%.

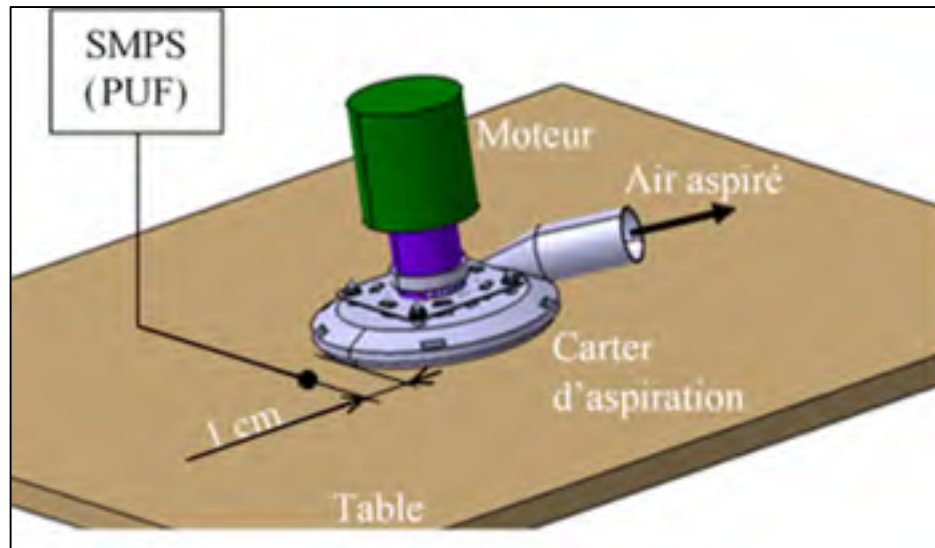


Figure 2.11 Disposition de la solution de captation à la source par un carter d'aspirateur

2.3.2.3 Réduction à la source par aspiration intégrée

La troisième solution de captation à la source des particules de poussière est l'aspiration intégrée (Figure 2.12). La solution de captation consiste à modifier la conception de l'outil de polissage en intégrant une canalisation d'aspiration interne qui permet l'évacuation de la poussière dégagée lors du polissage. Cette solution permet une aspiration la plus proche possible du contact outil abrasif – pièce en granit. Cette solution est le bien adapté pour l'aspiration de la poussière dans le cas de polissage des surfaces planes et inclinées. L'analyse de cette solution est faite de la même façon que pour celle du carter d'aspiration. Le point de contrôle de l'efficacité du ce système de captation est placé à une distance de 1 cm et la concentration des PUF en ce point est mesurée par le SMPS. L'expérimentation est faite pour 2 vitesses de rotation, une vitesse faible de 1500 et une vitesse élevée de 2500 tr/min. L'efficacité de cette solution est calculée par la formule utilisée dans l'équation 2.4. La valeur de débit d'aspiration nécessaire pour capter les PUF est notée pour chaque vitesse de rotation de l'outil de polissage à une efficacité de 95%.

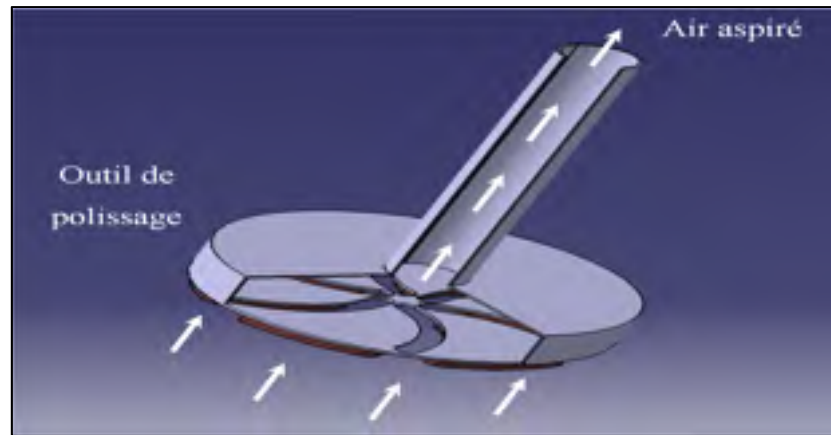


Figure 2.12 Dessin de la solution de réduction à la source par l'aspiration intégrée

2.4 Les équipements utilisés dans les travaux expérimentaux

2.4.1 Pièces en granit

Le polissage sera fait sur deux types de granit, le granit noir (Figure 2.13-a) avec un faible taux de silicium à 11% et le granit blanc (Figure 2.13-b) avec un grand taux de silicium à 52%. Le

Tableau 2.3 montre la composition chimique des deux granits, dont les différents taux de silicium. Les pièces en granit blanc et noir sont fournies par la société Granite Lacroix Inc. avec un volume de $150 \times 150 \times 20 \text{ mm}^3$.



Figure 2.13 Images des deux granits à polir : a) granit blanc b) granit noir.
Tiré de (Saidi et al., 2015)

Tableau 2.3 Composition chimique des granits étudiés
(valeur en pourcentage massique). Tiré de (Saidi et al., 2015)

Composants chimiques	Al	C	Fe	Mg	Na	O	Si	Total
Granit blanc	4,66	-	-	-	4,93	41,31	52,11	100
Granit noir	-	40,31	31,20	2,40	-	18,29	10,94	100

La composition minéralogique des deux granits est exposée au Tableau 2.4. L'analyse faite par IOS Services (Géoscientifiques inc.) montre que le granit noir ne contient pas de quartz. L'analyse minéralogique a montré que la grosseur des grains du granit noir (entre 0,2 et 17 mm) est supérieure à celle de granit blanc (entre 0,5 et 7 mm). La majorité des composantes minérales contiennent le silicium dans leur formule chimique.

Tableau 2.4 Minéralogie des granits blanc et noir (IOS Services Géoscientifiques inc.)

Minéral	Pourcentage dans le granit blanc (%)	Pourcentage dans le granit noir (%)
Quartz	41,38	0
Plagioclase	32,39	83,61
Feldspath-K	23,14	0
Biotite	1,14	2,83
Olivine	0	1,51
Oxydes/biotite	1,95	0
Oxydes/sulfure	0	5,20
Orthopyroxène	0	6,85

2.4.2 Porte-outil avec pression variable

La pression de polissage est appliquée sur la pièce en granit par un porte-outil adaptable aux machines-outils (Figure 2.14). Le type de polissage visé par cette étude est le polissage manuel. La force appliquée par l'être humain en poussant en bas au niveau des coudes est d'une valeur maximale d'environ 290 N (EKC, 2004). Par hypothèse, la force appliquée lors des travaux expérimentaux de polissage rotatif est estimée à 200 N. Cette force est équivalente à une pression théorique (P_{th}) appliquée sur la pièce en granit de 0,23 bar.

2.4.4 Mesures de la rugosité et de la brillance

Après chaque étape de polissage, la rugosité est mesurée par l'appareil de mesure de rugosité (modèle S-J400, Mitutoyo Canada inc.) Figure 2.16. Cet appareil est capable de mesurer une gamme de rugosité de 800 μm avec une résolution de 0,000125 μm pour une gamme mesurée de 8 μm . Cette machine peut évaluer 36 paramètres de rugosité conformément à plusieurs standards tels que l'ISO 1997.



Figure 2.16 Appareil de mesure de la rugosité
(modèle S-J400, Mitutoyo Canada inc.)

La brillance de la surface polie est mesurée par la machine Weha Gloss Meter (Weha USA). Le principe de la mesure est montré à la Figure 2.17. La machine envoie un rayon lumineux suivant un angle incident défini selon la grandeur estimée de la brillance (brillance faible (20°), brillance moyenne (60°) et brillance élevée (85°)). Ce rayon réfléchi est détecté par un capteur et sera converti en brillance. L'appareil utilisé dans les présents travaux a un angle incident de 60° . Cet appareil peut mesurer des valeurs moyennes de brillance proches de 100 Gloss. Il est conforme au standard de mesure de brillance ISO 2813. La calibration avant chaque utilisation se fait avec deux échantillons de référence, un de brillance 16,8 Gloss pour mesurer les pièces de basse brillance et un de brillance 93,4 Gloss pour mesurer les pièces de haute brillance.

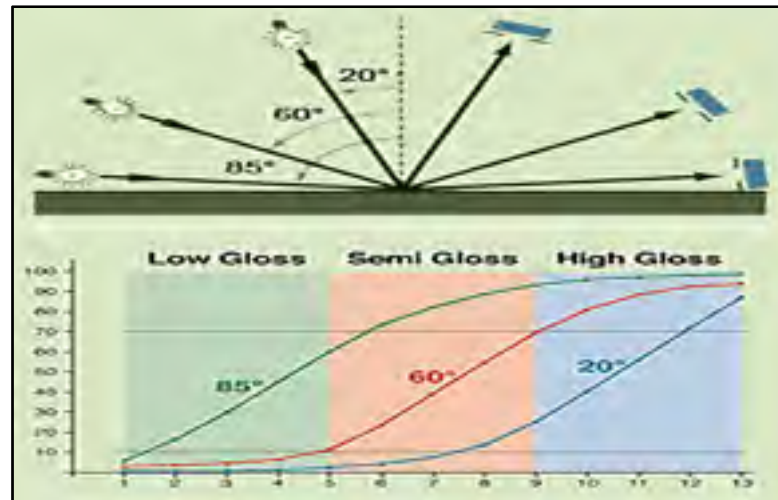


Figure 2.17 Principe de fonctionnement de l'appareil de mesure de la brillance (IG, 2017)

2.4.5 Mesures des particules fines (PF) et des particules ultrafines (PUF)

Le spectromètre APS (Aerodynamic Particle Sizer) (modèle 3321, TSI inc.) présenté à la Figure 2.18 est utilisé pour mesurer la concentration des particules fines de poussière durant le processus de polissage. Il permet de donner la concentration totale en nombre, en masse et en surface de ces particules fines de diamètre variant entre 0,5 à 20 μm , ainsi que leur granulométrie. L'aspiration des particules fines se fait avec un débit de 5 l/min. La mesure à la source est réalisée à une distance verticale h de 0 cm et à une distance horizontale D de 2 cm.



Figure 2.18 Le spectromètre APS (Aerodynamic Particle Sizer) (modèle 3321, TSI inc.)

La mesure de la concentration des particules ultrafines et leurs granulométries sont faites par un spectromètre SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). Le SMPS montré à la Figure 2.19 est constitué d'un classificateur électrostatique (modèle 3080, TSI inc.) (Figure 2.19-a), d'un analyseur différentiel de mobilité nano DMA (Differential Mobility Analyser) (modèle 3085, TSI inc.) (Figure 2.19-b) et d'un compteur de particules à condensation CPC (Condensation Particle Counter) (modèle 3775, TSI inc.) (Figure 2.19-c). Ce spectromètre permet l'aspiration des particules de poussière avec un débit de 0,3, 0,6 ou de 1,5 l/min. Il a la capacité de mesurer des PUF de diamètres variant entre 2 et 150 nm.



Figure 2.19 Le spectromètre SMPS constitué de : (a) classificateur électrostatique (modèle 3080, TSI inc.) (b) nano DMA (modèle 3085, TSI inc.) (c) CPC (modèle 3775, TSI inc.)

2.4.6 Échantillonnage de la poussière respirable et classification des particules lors du polissage de granit

L'échantillonnage de la poussière respirable constitué des particules de diamètre inférieur à 4 μm est fait par un ensemble pompe-cyclone-cassette avec un débit d'aspiration de 1,7 l/min. La Figure 2.20 montre le dispositif fourni par l'IRSST pour le prélèvement de la poussière respirable. Le dispositif se compose d'une pompe d'aspiration d'un débit de 1,7 l/min, d'un cyclone permettant le passage des particules de diamètre inférieur à 4 μm et d'une cassette contenant un filtre pour la captation de ces particules. Après prélèvement, les cassettes (de diamètre 37 mm) sont analysées dans le laboratoire de l'IRSST, pour déterminer les taux de poussière respirable et de quartz.

Pour la classification des particules, la mesure de la concentration des particules fines et ultrafines et leurs granulométries peuvent être faites par un seul appareil. Cet appareil est un ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) classique (DEKATI Ltd.) qui peut prélever des particules de diamètre variant entre 7 nm et 10 μm (Figure 2.21-a). Le débit d'aspiration des particules fourni par l'ELPI est de 10 l/min. La classification des particules se fait par une colonne de 12 étages de plaque d'impaction. Les diamètres prélevés sont 0,039, 0,072, 0,121, 0,203, 0,318, 0,486, 0,766, 1,239, 1,966, 3,102, 5,187 et 8,175 μm . La Figure 2.21-b montre le dépôt des particules de poussière sur une des plaques d'impaction de l'ELPI équipée d'un substrat en carbone.



Figure 2.20 Dispositif d'échantillonnage de l'air de travail lors du polissage de granit sur la machine-outil : (a) Pompe (b) Cyclone (c) Cassette (fournie par l'IRSST)



Figure 2.21 Machine de prélèvement et de classification des particules de poussière de quartz : (a) ELPI Classique (DEKATI Ltd) (b) Une des plaques d'impaction de l'ELPI équipée d'un substrat en carbone

2.4.7 Mesure du débit et de la vitesse de l'air

Un débitmètre (modèle 4043, TSI inc.) est utilisé pour mesurer le débit d'air de soufflage et d'aspiration (voir Figure 2.22-a). Ce débitmètre a une capacité de mesurer un débit variant de 0 à 200 l/min avec un temps de réponse de 4 ms. Il est adapté pour mesurer les débits d'air, de l'O₂, de N₂ et des mélanges Air/O₂. Les valeurs de débit d'air mesurées avec cet instrument ont une précision de $\pm 2\%$ (de la valeur mesurée). Un anémomètre VelociCalc[®] (modèle 9535-A, TSI inc.) est utilisé pour mesurer la vitesse d'écoulement de l'air (voir Figure 2.22-b). Cet instrument permet de mesurer une plage de vitesse variant de 0 à 30 m/s. Il permet l'affichage de plusieurs paramètres de ventilation comme la vitesse, la température et le débit volumétrique. La précision de cet appareil est de $\pm 3\%$ de la valeur de vitesse mesurée.

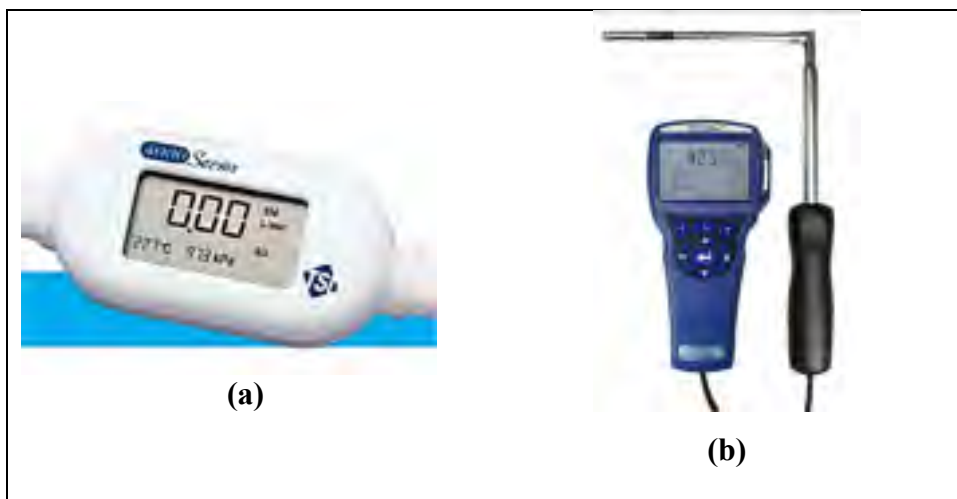


Figure 2.22 Instruments de mesure de l'air : (a) Débitmètre (modèle 4043, TSI inc.) (b) Anémomètre VelociCalc[®] (modèle 9535-A, TSI inc.)

2.4.8 Mesure de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation (en tr/min) est mesurée avec le tachymètre (modèle DT-205LR, ELECTROMATIC inc.) montré sur la Figure 2.23. Cet instrument permet de mesurer une vitesse de rotation dans une plage de 6 à 99 999 tr/min. La mesure est faite sans contact avec une diode laser de classe II. L'appareil de mesure a une résolution de ± 1 tr/min pour les valeurs mesurées variant de 6 à 8 299 tr/min, de ± 2 tr/min pour les valeurs mesurées variant

de 8 300 à 24 999 tr/min et de ± 6 tr/min pour les valeurs mesurées variant de 25 000 à 99 999 tr/min.



Figure 2.23 Tachymètre (modèle DT-205LR, ELECTROMATIC inc.)

CHAPITRE 3

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU POLISSAGE ROTATIF REGULIER SUR MACHINE-OUTIL

3.1 Introduction

Dans cette partie, il s'agit de faire une étude expérimentale du polissage rotatif régulier (avec translation) de granit, tel que fait dans les industries, sur une machine-outil à l'ÉTS. Un porte-outil a été conçu pour adapter la machine-outil aux travaux de polissage de granit. Ce porte-outil permet de contrôler la pression de contact lors du polissage. Les travaux d'investigation de polissage avec ce porte-outil ont abouti à la publication d'un premier article en 2015 (Saidi et al., 2015). Ces travaux préliminaires ont permis d'identifier deux phases de polissage 'ébauche et finition' avec un comportement différent de point de vue de la qualité de surface et de l'émission de particules.

Ce chapitre porte essentiellement sur l'étude de la qualité de surface, des émissions et dispersions des particules (fines et ultrafines) lors du polissage régulier consistant en une rotation et translation de l'outil abrasif. Une étude statistique est faite pour voir l'influence des paramètres de polissage sur l'état de la surface, l'émission et la dispersion des particules. On termine par une étude de la poussière respirable et le taux de quartz contenu dans celle-ci. Une classification des particules de poussière sera faite et la détermination de leur taux de quartz et leur morphologie.

Ce chapitre, sur le polissage régulier, a donné lieu à un article de revue en évaluation « Emission and dispersion of fine and ultrafine particles during dry granite polishing process » soumis le 18 juin 2018 à la revue Measurement: *MEAS-D-18-01550*.

3.2 Étude de l'état de surface et optimisation des paramètres de polissage régulier permettant son amélioration

3.2.1 Présentation des résultats

Dans cette partie, il s'agit d'étudier la rugosité et la brillance de surface des pièces en granit lors du polissage régulier. La Figure 3.1 donne l'évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse de rotation dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. Elle montre que l'augmentation de la vitesse de rotation de 1000 à 1750 tr/min fait décroître la rugosité de surface lors des deux phases de polissage régulier des deux types de granit. L'augmentation de cette vitesse de 1750 à 2500 tr/min n'a pas une grande influence sur la rugosité de surface.

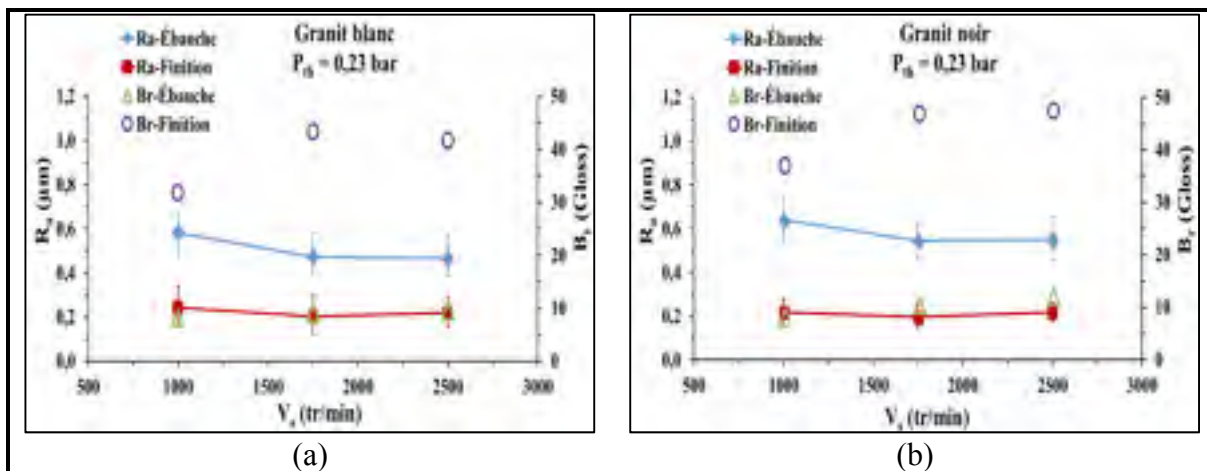


Figure 3.1 Évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir

La Figure 3.2 donne l'évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse d'avance dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. Elle montre que l'augmentation de la vitesse d'avance de 8.5 à 17 mm/s garde la rugosité constante pour les deux types de granit et dans les deux phases de polissage. Cependant, l'augmentation de la vitesse d'avance de 17 à 25.5 mm/s fait diminuer la rugosité dans la phase d'ébauche et la fait augmenter dans celle de finition pour les deux types de granit. En effet, l'augmentation de la vitesse d'avance facilite l'évacuation des copeaux du contact (outil pièce) et par conséquent, évite qu'ils détériorent la surface. Les deux figures précédentes (Figure 3.1 et Figure 3.2)

montrent que l'évolution de la brillance de la surface d'une pièce en granit lors du polissage est inversement proportionnelle à celle de la rugosité de cette surface (tel qu'il était indiqué dans la littérature).

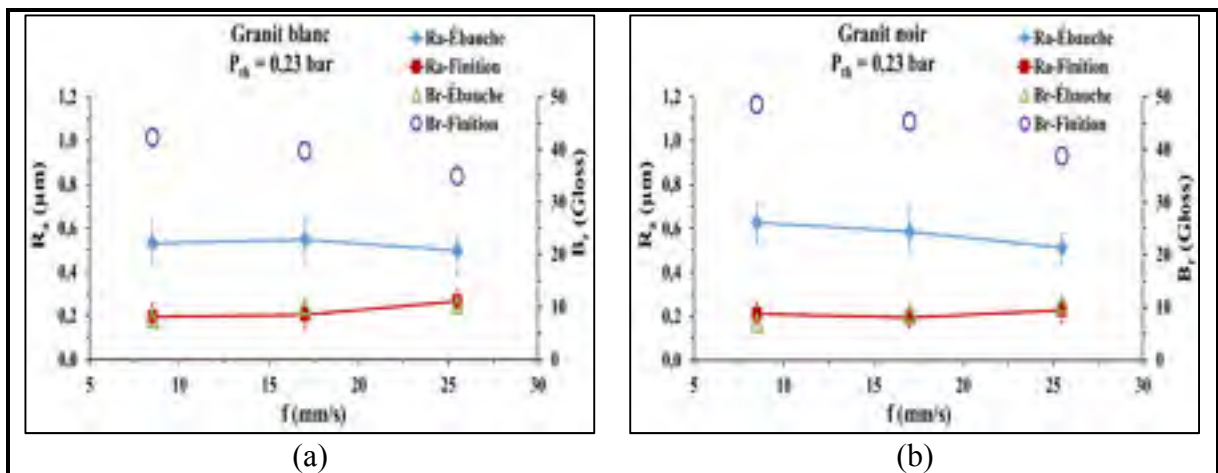


Figure 3.2 Évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse d'avance lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir



Figure 3.3 Défauts de surface, constatés dans la phase de finition, dus au frottement et à la surchauffe (a) Brûlure de surface (granit blanc) (b) Arrachement de matière (granit noir)

La Figure 3.3 donne les défauts de surface constatés lors de la phase de finition du polissage de granit. Elle montre que dans la phase de finition il y a une apparition des brûlures et d'arrachement de surface qui sont dus au frottement et à la surchauffe causés par l'utilisation des grandes vitesses de rotation et d'avance. L'industriel propose l'utilisation d'un produit de

densification pour réparer la surface et de réduire l'une des deux vitesses, de rotation ou d'avance. Cette recommandation permet d'augmenter la brillance de la surface des pièces en granit à la fin de l'opération de polissage.

3.2.2 Résultats de l'analyse statistique de la rugosité de surface et optimisation des paramètres de polissage permettant son amélioration

Sur le Tableau-A V-1 (voir annexe V p.141) se trouve les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la rugosité de surface lors du polissage régulier des granits. Le coefficient de détermination varie entre 86 et 99% et le un manque d'ajustement est non significatif. Par conséquent, le modèle quadratique choisi convient bien pour représenter la rugosité de surface lors du polissage régulier des granits dans les conditions actuelles d'expérience. Le Tableau-A V-2 (voir annexe V p.142) donne les effets des facteurs influençant la rugosité de surface lors des opérations de polissage. Les paramètres les plus influents sur la rugosité de surface sont :

- La vitesse de rotation linéaire (avec un effet négatif) et la vitesse d'avance linéaire (avec un effet négatif) dans la phase d'ébauche des deux types de granit
- La vitesse de rotation linéaire (avec un effet négatif) et la vitesse d'avance linéaire (avec un effet positif) dans la phase de finition des deux types de granit

Ces résultats sont obtenus avec un coefficient de détermination variant entre 86 et 99% et un manque d'ajustement non significatif. Les tendances de la rugosité en fonction des vitesses de rotation et d'avance sont conformes aux résultats déjà expliqués à la section 3.3.1.

Le Tableau-A V-2 (voir annexe V p.142) des effets donne aussi les coefficients du modèle statistique qui permet de déterminer la valeur de la rugosité pour, une vitesse de rotation et une vitesse d'avance données. Les équations du modèle statistique de la rugosité de surface lors du polissage régulier des granits (en fonction des variables d'entrées codées [-1 1], voir Eq 2.4) sont comme suit :

Ébauche blanc

$$R_a = 0,523 - 0,071 V_s - 0,032 V_s^2 - 0,036 f + 0,017 f^2 + 0,019 V_s f \quad (3.1)$$

Ébauche noir

$$R_a = 0,567 - 0,059 V_s - 0,021 V_s^2 - 0,070 f + 0,002 f^2 + 0,015 V_s f \quad (3.2)$$

Finition blanc

$$R_a = 0,212 - 0,027 V_s - 0,006 V_s^2 + 0,009 f + 0,003 f^2 + 0,005 V_s f \quad (3.3)$$

Finition noir

$$R_a = 0,192 - 0,013 V_s + 0,001 V_s^2 + 0,011 f + 0,002 f^2 + 0,004 V_s f \quad (3.4)$$

Le Tableau 3.1 montre le pourcentage d'erreur entre les valeurs mesurées et celles prédites par les différentes équations. L'erreur trouvée est acceptable et permet de valider le modèle statistique. Cette erreur varie entre 0,0 et 9,8%.

Tableau 3.1 Vérification du modèle statistique de la rugosité de surface

Granit	Phase	Rugosité (μm)		Erreur (%)
		Mesurée	Prédite	
Blanc	Ébauche	0,525	0,568	7,6
		0,612	0,561	9,1
		0,592	0,576	2,7
	Finition	0,212	0,217	2,3
		0,251	0,233	7,6
		0,206	0,206	0,0
Noir	Ébauche	0,659	0,622	5,9
		0,596	0,605	1,5
		0,677	0,639	5,9
	Finition	0,181	0,192	5,7
		0,212	0,206	2,8
		0,201	0,183	9,8

La Figure-A V-1 (voir annexe V p.143) donne les résultats de l'optimisation des paramètres de polissage permettant la minimisation de la rugosité de surface lors du polissage régulier des granits. Le résultat d'optimisation donné au Tableau 3.2 est obtenu avec une bonne désirabilité variante entre 91 et 100%. Il montre que prendre une vitesse de rotation de 2125 tr/min avec une vitesse d'avance de 25,5 mm/s permet de minimiser la rugosité de surface lors de la phase d'ébauche des granits (blanc et noir). Par contre, dans les cas de finition du granit blanc et du

granit noir il faut prendre une vitesse de rotation de 2500 tr/min et une vitesse d'avance de 8,5 mm/s. Ces résultats peuvent être déduits à partir de la Figure 3.1 et de la Figure 3.2.

Tableau 3.2 Résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant la diminution de la rugosité de surface

		Rugosité minimale	
Granit	Phase	V_s (tr/min)	f (mm/s)
Blanc	Ébauche	2125	25,5
	Finition	2125	25,5
Noir	Ébauche	2500	8,5
	Finition	2500	8,5

3.3 Étude de l'émission à la source de poussière des PF et PUF et optimisation des paramètres de polissage régulier permettant de réduire cette émission

3.3.1 Présentation des résultats

Dans cette partie, il s'agit d'étudier l'émission des PF et des PUF lors du polissage régulier du polissage de granit. L'étude de l'émission à la source est faite en un point de coordonnées 5 cm suivant la direction horizontale D et 5 cm et suivant la direction verticale h (voir Figure 2.3). La Figure 3.4 montre les boîtes à moustaches des valeurs des PF et PUF émises lors du polissage régulier de granit lors des deux phases d'ébauche et de finition. Ce graphique montre que la quantité en nombre des PUF dégagée lors du polissage est plus importante que celle des PF. Il montre aussi que lors de la phase d'ébauche la quantité des PF émises est plus importante que celle émises lors de la phase de finition et inversement pour la quantité des PUF émises.

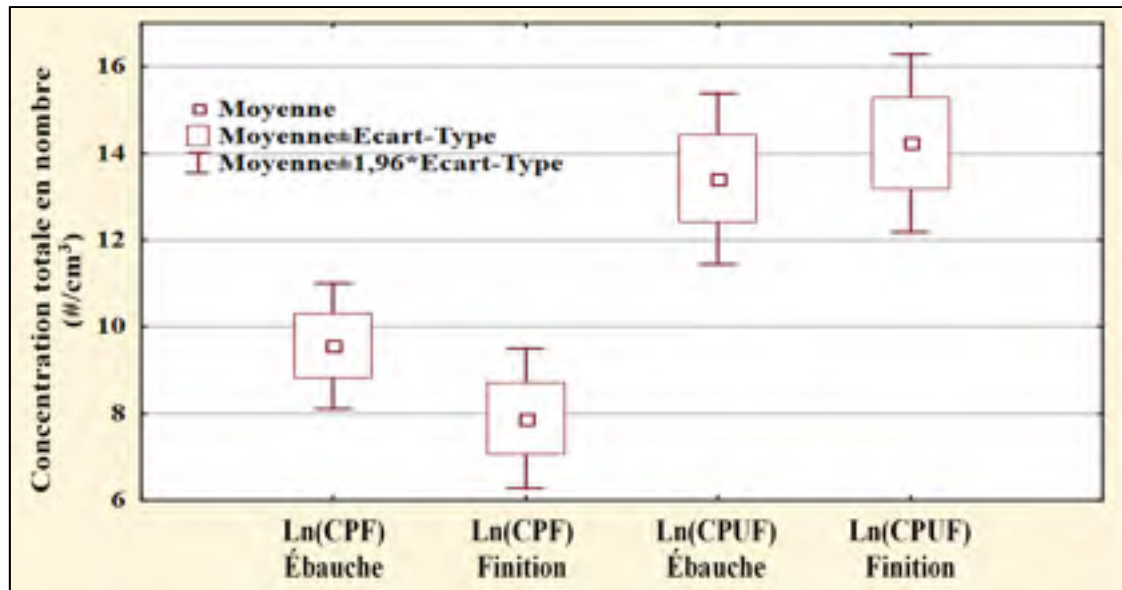


Figure 3.4 Boîtes à moustaches des valeurs de PF et PUF émises lors de polissage régulier de granit dans les deux phases d'ébauche et de finition

La Figure 3.5 donne la variation moyenne à la source de la concentration totale en nombre des PF et PUF en fonction de la vitesse de rotation dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. La Figure 3.5-a et la Figure 3.5-b montrent que la concentration en nombre des PF croît avec l'augmentation de la vitesse de rotation dans le cas de polissage régulier des granits blanc et noir pour les deux phases de polissage. Cette augmentation est très importante dans le cas de la phase de finition pour le granit blanc. La Figure 3.5-a et la Figure 3.5-b montrent que la concentration en nombre des PUF croît avec l'augmentation de la vitesse de rotation dans le cas de polissage régulier des granits blanc et noir. L'utilisation de la vitesse de rotation de 1000 tr/min conduit à la génération de la même quantité de PUF dans les deux phases de polissage du granit blanc. L'utilisation d'une vitesse de rotation variant entre 1000 et 1750 tr/min permet de générer la même quantité de PUF dans la phase d'ébauche du granit blanc et dans la phase de finition du granit noir.

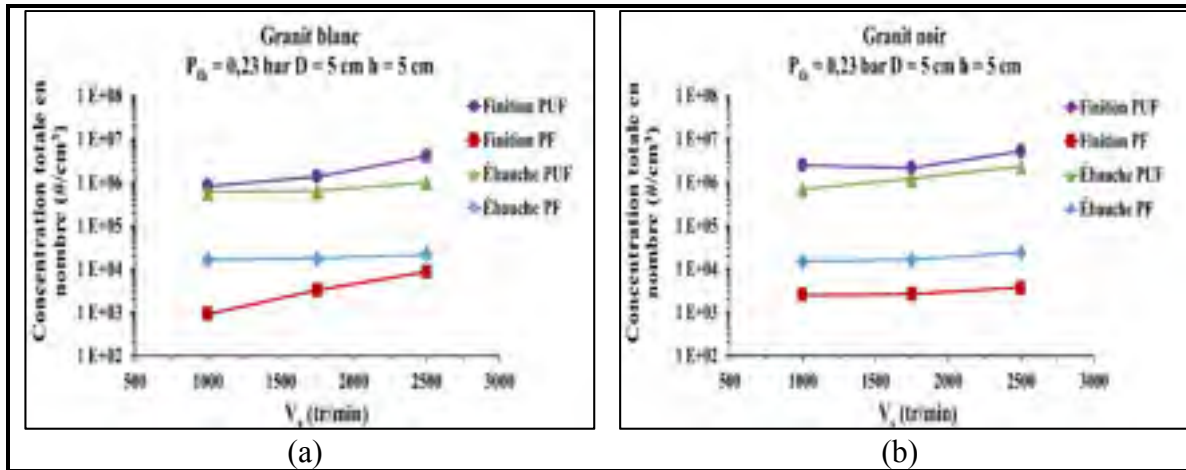


Figure 3.5 Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des émissions de PF et de PUF à la source en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage régulier des granits
(a) Granit blanc (b) Granit noir

La Figure 3.6 donne la variation moyenne à la source de la concentration totale en nombre des PF et PUF en fonction de la vitesse d'avance dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. La Figure 3.6-a et la Figure 3.6-b montrent que la concentration en nombre des PF décroît avec l'augmentation de la vitesse d'avance dans le cas de polissage régulier des granits blanc et noir. La Figure 3.6-a et la Figure 3.6-b montrent que la concentration en nombre des PUF décroît avec l'augmentation de la vitesse d'avance dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. L'utilisation de la vitesse d'avance de 25,5 mm/s conduit à la génération de la même quantité de PUF dans les deux phases de polissage des granits blanc et noir.

La Figure 3.7 donne l'évolution moyenne à la source de la granulométrie des PF et PUF dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. Elle montre que le pic de concentration en nombre des PF est détecté pour un diamètre de particule compris entre 0,626 et 0,723 μm pour les deux opérations d'ébauche et de finition des granits blanc et noir. La Figure 3.7 montre aussi que le pic de concentration en nombre des PUF est détecté pour un diamètre de particule compris entre 14,1 et 34,6 nm pour les deux opérations de polissage des granits blanc et noir.

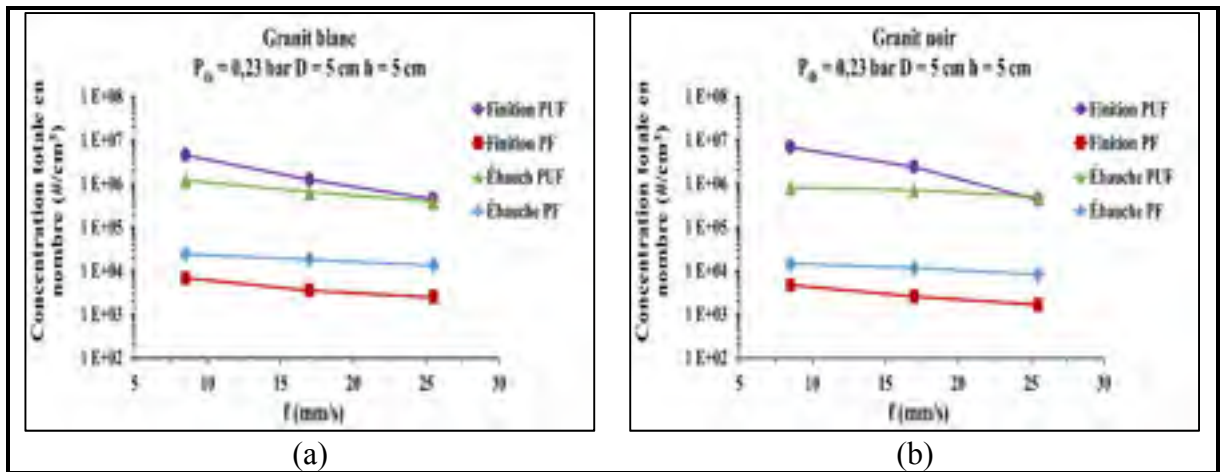


Figure 3.6 Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des émissions de PF et de PUF à la source en fonction de la vitesse d'avance lors du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir

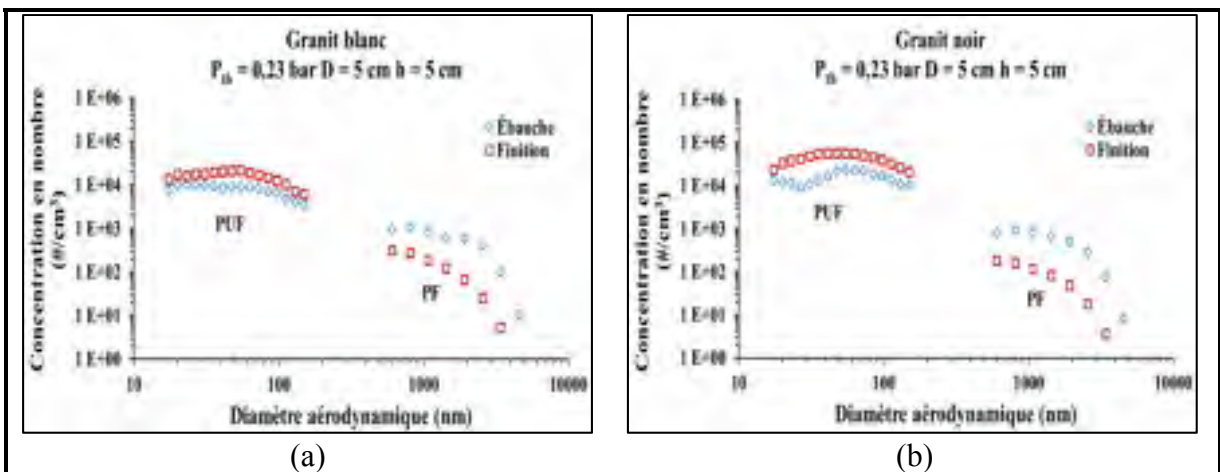


Figure 3.7 Évolution moyenne de la granulométrie des PF et PUF à la source lors du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir

3.3.2 Résultats de l'analyse statistique de l'émission à la source des PF et PUF dans le cas de polissage régulier

Le Tableau-A III-1 (voir annexe III p.133) et le Tableau-A IV-1 (voir annexe IV p.137) montre les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de l'émission respectivement des PF et des PUF lors des deux phases du polissage régulier des deux granits blanc et noir. Ces tableaux montrent que le modèle quadratique a été déterminé avec un bon coefficient de détermination (R^2) variant entre 86 et 98% et avec un manque d'ajustement (Lack of fit) non significatif avec

un P-value $> 0,05$. Par conséquent, le modèle choisi représente bien le phénomène d'émission des PF et PUF lors du polissage régulier de granit dans les conditions actuelles d'expérience. Les facteurs qui ont une variabilité significative sur cette émission sont ceux avec un P-value $< 0,05$ (colonne P). De plus, le Tableau-A III-2 (voir annexe III p.134) et le tableau Tableau-A IV-2 (voir annexe IV p.138) montrent les effets (positif ou négatif) des facteurs influençant l'émission respectivement des PF et des PUF lors des deux phases du polissage régulier des deux granits blanc et noir. Les résultats obtenus dans cette partie montrent que les paramètres les plus influents sur l'émission des PF et PUF sont la vitesse de rotation linéaire avec une influence positive et la vitesse d'avance linéaire avec une influence négative pour deux phases du polissage régulier des deux types de granit.

Les tableaux des effets donnent aussi les coefficients du modèle statistique pour déterminer l'émission des PF et PUF pour une vitesse de rotation et une vitesse d'avance données. Ces coefficients sont déterminés sur la colonne (Coeff.) et correspondent respectivement aux effets : général (moyenne des données), vitesse de rotation linéaire, vitesse de rotation quadratique, vitesse d'avance linéaire, vitesse d'avance quadratique et d'interaction vitesse de rotation linéaire – vitesse d'avance linéaire. Les équations du modèle statistique de l'émission des PF et PUF lors du polissage régulier des granits blanc et noir(en fonction des variables d'entrées codées $[-1 \ 1]$, voir Eq 2.4) sont comme suit :

Ébauche blanc

$$\ln(CPF) = 9,789 + 0,166 V_s - 0,029 V_s^2 - 0,294 f - 0,006 f^2 + 0,004 V_s f \quad (3.5)$$

$$\ln(CPUF) = 13,512 + 0,211 V_s - 0,005 V_s^2 - 0,335 f - 0,080 f^2 - 0,248 V_s f \quad (3.6)$$

Ébauche noir

$$\ln(CPF) = 9,445 + 0,615 V_s - 0,139 V_s^2 - 1,005 f - 0,157 f^2 + 0,569 V_s f \quad (3.7)$$

$$\ln(CPUF) = 13,354 + 1,201 V_s + 0,274 V_s^2 - 1,297 f - 0,285 f^2 + 0,505 V_s f \quad (3.8)$$

Finition blanc

$$\ln(CPF) = 7,945 + 1,084 V_s + 0,165 V_s^2 - 0,500 f - 0,133 f^2 - 0,091 V_s f \quad (3.9)$$

$$\ln(CPUF) = 13,963 + 0,641 V_s - 0,128 V_s^2 - 0,863 f - 0,173 f^2 - 0,211 V_s f \quad (3.10)$$

Finition noir

$$\ln(CPF) = 7,728 + 0,583 V_s + 0,133 V_s^2 - 0,571 f + 0,140 f^2 + 0,391 V_s f \quad (3.11)$$

$$\ln(CPUF) = 14,549 + 0,320 V_s - 0,102 V_s^2 - 1,348 f + 0,294 f^2 - 0,153 V_s f \quad (3.12)$$

Tableau 3.3 Détermination de l'erreur du modèle statistique pour l'émission des PF et PUF

Granit	Phase	Concentration des PF 'ln(CPF)'		Erreur (%)	Concentration des PUF 'ln(CPUF)'		Erreur (%)
		Mesurée	Prédite		Mesurée	Prédite	
Blanc	Ébauche	9,72	9,99	2,7	13,22	13,77	4,0
		9,47	9,59	1,3	13,31	13,3	0,1
		10,04	10,08	0,4	13,83	13,77	0,4
	Finition	8,20	8,56	4,2	14,99	14,59	2,7
		6,55	7,03	6,8	13,49	13,19	2,3
		8,70	8,31	4,6	14,50	14,65	1,0
Noir	Ébauche	10,21	10,01	2,0	13,35	14,28	6,5
		8,81	8,69	1,4	11,25	12,43	9,5
		10,56	10,29	2,7	14,85	14,37	3,3
	Finition	7,92	8,20	3,4	15,42	15,43	0,1
		6,83	7,28	6,1	14,83	14,13	5,0
		8,27	8,44	2,1	15,45	16,19	4,6

Le Tableau 3.3 montre le pourcentage d'erreur entre les valeurs mesurées et celles prédites par les différentes équations. L'erreur trouvée est acceptable et permet de valider le modèle statistique. Cette erreur varie entre 0,1 et 9,5%.

Figure-A III-1 (voir annexe III p.135) et la Figure-A IV-1 (voir annexe IV p.139) donnent les résultats de l'optimisation des paramètres de polissage (V_s et f) permettant la minimisation des émissions respectivement des PF et des PUF lors du polissage régulier des deux granits blanc

et noir. Ces résultats d'optimisation sont obtenus avec une bonne désirabilité comprise entre 81 et 100%. Les résultats d'optimisation sont donnés sur le Tableau 3.4. Ils montrent que prendre une petite valeur de la vitesse de rotation de 1000 tr/min (sauf 1375 tr/min pour l'émission des PUF lors de la finition de granit noir) avec une grande valeur de la vitesse d'avance de 25,5 mm/s (sauf 21,25 mm/s pour l'émission des PUF lors de l'ébauche de granit blanc) permet de minimiser l'émission des PF et PUF lors du polissage régulier des granits.

Tableau 3.4 Résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant la diminution des émissions des PF et PUF

Granit	Phase	CPF minimale		CPUF minimale	
		V _s (tr/min)	f (mm/s)	V _s (tr/min)	f (mm/s)
Blanc	Ébauche	1000	25,5	1000	21,25
	Finition	1000	25,5	1000	25,5
Noir	Ébauche	1000	25,5	1000	25,5
	Finition	1000	25,5	1375	25,5

3.4 Étude de la dispersion de poussière des PF et PUF dans le cas de polissage régulier

3.4.1 Présentation des résultats

Dans cette partie, l'étude de dispersion concerne le polissage régulier des granits. L'étude de la dispersion est faite suivant 9 points de coordonnées 5, 27,5 et 50 cm suivant la direction horizontale D et 5, 15 et 25 cm suivant la direction verticale h (voir Figure 2.3). La Figure 3.8 donne la variation moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF en fonction de la distance horizontale dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. Elle montre que la concentration en nombre des PF et PUF décroît dans la direction horizontale dans l'ébauche des granits blanc et noir. La Figure 3.8-b montre que la concentration en nombre des PF croît jusqu'à la distance horizontale de 27,5 cm puis décroît jusqu'à la distance horizontale de 50 cm dans la phase de finition de granit noir. La Figure 3.9 donne la variation moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF en fonction de la distance

verticale dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. Elle montre que la concentration en nombre des PF et PUF passe par un pic de concentration à la distance verticale de 15 cm sauf pour celle des PUF dans la phase d'ébauche de granit blanc où elle décroît (Figure 3.9-a).

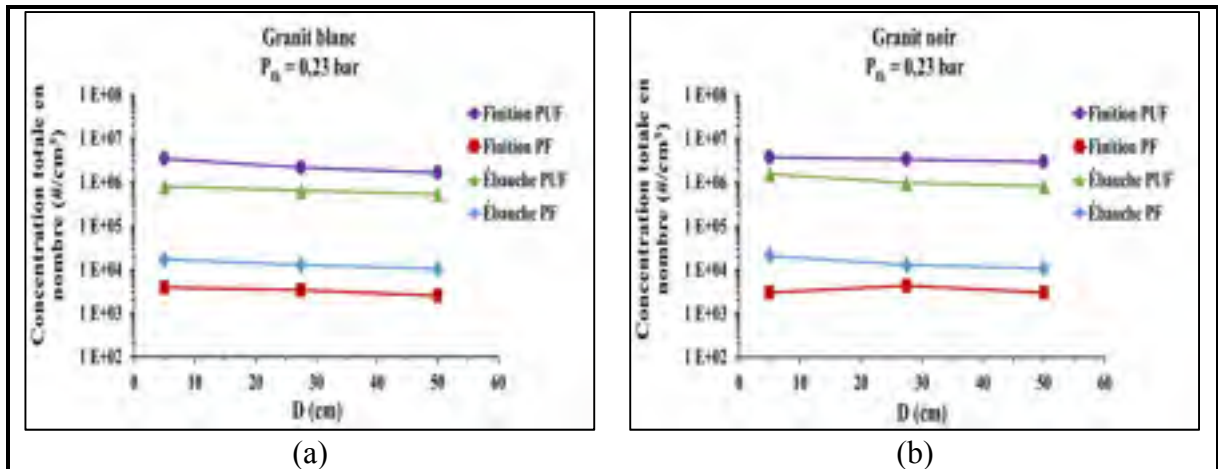


Figure 3.8 Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance horizontale lors du polissage régulier des granits (a) blanc (b) noir

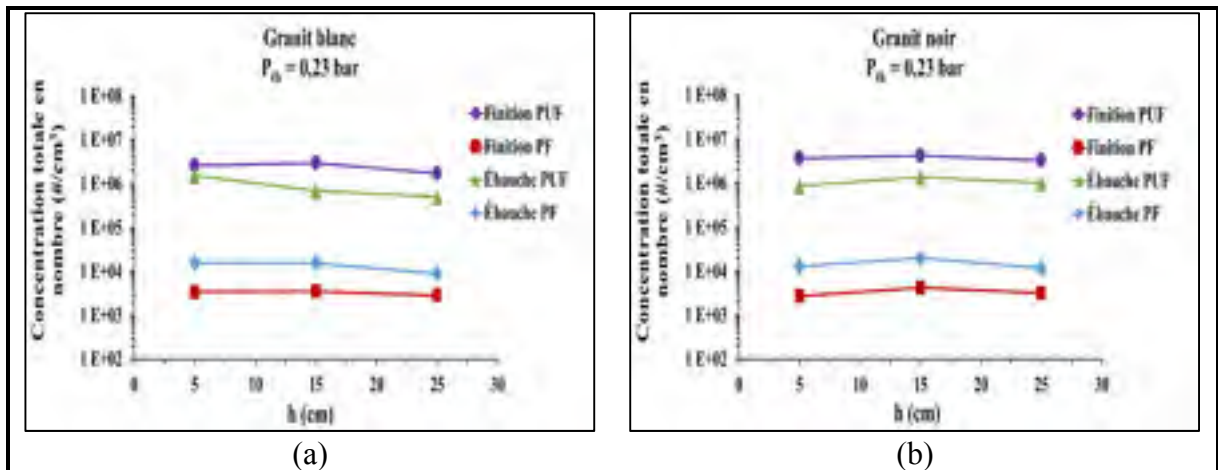


Figure 3.9 Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance verticale lors du polissage régulier des granits (a) blanc (b) noir

La Figure 3.10 donne l'évolution moyenne de la granulométrie des PF suivant la direction horizontale dans les deux phases de polissage régulier des deux granits blanc et noir. Elle montre que le pic de concentration en nombre des PF est détecté pour un diamètre de particule

compris entre 0,542 et 0,777 μm pour les opérations d'ébauche et de finition des deux granits. La Figure 3.11 donne l'évolution moyenne de la granulométrie des PUF suivant la direction horizontale dans les deux phases de polissage régulier des deux granits blanc et noir. Elle montre que le pic de concentration en nombre des PUF est détecté pour un diamètre de particule compris entre 20,2 et 98,2 nm pour les opérations d'ébauche et de finition des deux granits.

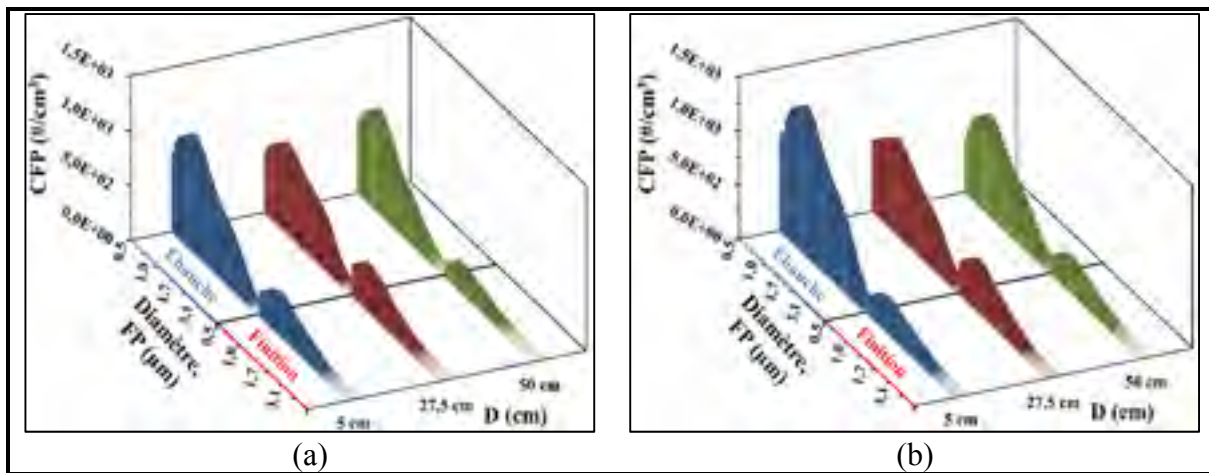


Figure 3.10 Évolution moyenne de la granulométrie des PF dans la direction horizontale lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir

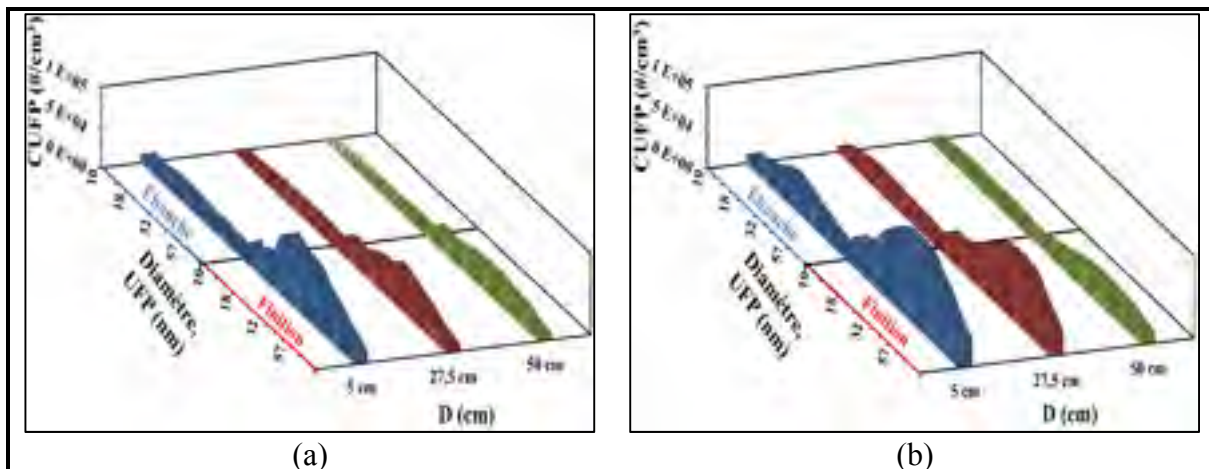


Figure 3.11 Évolution moyenne de la granulométrie des PUF dans la direction horizontale lors du polissage régulier des granits (a) Blanc (b) Noir

3.4.2 Étude statistique de la dispersion de poussière des PF lors de polissage régulier de granit

Le Tableau-A VI-1 (voir annexe VI p.145) et le Tableau-A VII-1 (voir annexe VII p.149) montre les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la dispersion respectivement des PF et des PUF lors des deux phases du polissage régulier des deux granits blanc et noir. Ces tableaux montrent que le modèle quadratique a été déterminé avec un bon coefficient de détermination variant entre 73 et 84% et avec un manque d'ajustement non significatif. Par conséquent, le modèle choisi représente bien le phénomène de dispersion des PF et PUF lors du polissage régulier de granit dans les conditions actuelles d'expérience. De plus, le Tableau-A VI-2 (voir annexe VI p.146) et le Tableau-A VII-2 (voir annexe VII p.150) montrent les effets des facteurs influençant la dispersion respectivement des PF et des PUF lors des deux phases du polissage régulier des deux granits blanc et noir. Les résultats obtenus dans cette partie montrent que les paramètres les plus influents sur la dispersion des PF et PUF sont la vitesse de rotation linéaire avec une influence positive, la vitesse d'avance linéaire avec une influence négative, la distance horizontale avec une influence négative (sauf pour la dispersion des PUF dans la finition du granit noir) et la distance verticale avec une influence négative pour les deux phases du polissage régulier des deux types de granit.

Les tableaux des effets donnent aussi les coefficients du modèle statistique pour déterminer l'émission des PF et PUF pour une vitesse de rotation et une vitesse d'avance données. Les équations du modèle statistique de la concentration des PF et PUF dans l'espace de dispersion lors du polissage régulier des granits blanc et noir et dans les deux phases ébauche et finition (en fonction des variables d'entrées codées [-1 1], voir Eq 2.4) sont comme suit :

Ébauche blanc

$$\begin{aligned} \ln(CPF) = & 9,127 + 0,638 V_s + 0,076 V_s^2 - 0,489 f - 0,042 f^2 - 0,428 D - \\ & 0,034 D^2 - 0,154 h + 0,156 h^2 + 0,082 V_s f + 0,149 V_s D - 0,056 V_s h - \\ & 0,050 f D + 0,058 f h + 0,126 D h \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \ln(CPUF) = & 12,833 + 0,315 V_s - 0,109 V_s^2 - 0,151 f + 0,005 f^2 - \\ & 0,339 D + 0,065 D^2 - 0,197 h - 0,002 h^2 + 0,001 V_s f - 0,016 V_s D - \\ & 0,017 V_s h + 0,036 f D + 0,054 f h + 0,075 D h \end{aligned} \quad (3.14)$$

Ébauche noir

$$\begin{aligned} \ln(CPF) = & 9,183 + 0,728 V_s + 0,252 V_s^2 - 0,506 f - 0,063 f^2 - 0,284 D - \\ & 0,109 D^2 + 0,003 h + 0,201 h^2 + 0,129 V_s f + 0,009 V_s D - 0,147 V_s h + \\ & 0,192 f D + 0,036 f h + 0,193 D h \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \ln(CPUF) = & 13,768 + 0,353 V_s + 0,033 V_s^2 - 0,212 f + 0,036 f^2 - \\ & 0,356 D + 0,054 D^2 - 0,291 h - 0,016 h^2 - 0,139 V_s f - 0,134 V_s D - \\ & 0,046 V_s h - 0,010 f D + 0,067 f h + 0,064 D h \end{aligned} \quad (3.16)$$

Finition blanc

$$\begin{aligned} \ln(CPF) = & 7,799 + 0,727 V_s + 0,039 V_s^2 - 0,310 f + 0,033 f^2 - 0,133 D + \\ & 0,043 D^2 - 0,004 h + 0,104 h^2 - 0,020 V_s f - 0,245 V_s D - 0,128 V_s h + \\ & 0,033 f D + 0,066 f h + 0,041 D h \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \ln(CPUF) = & 14,302 + 0,567 V_s - 0,007 V_s^2 - 0,318 f + 0,010 f^2 - \\ & 0,779 D - 0,023 D^2 - 0,318 h + 0,045 h^2 + 0,023 V_s f - 0,134 V_s D - \\ & 0,075 V_s h - 0,123 f D + 0,161 f h + 0,124 D h \end{aligned} \quad (3.18)$$

Finition noir

$$\begin{aligned} \ln(CPF) = & 7,788 + 0,818 V_s + 0,104 V_s^2 - 0,377 f - 0,046 f^2 + 0,120 D + \\ & 0,158 D^2 + 0,059 h + 0,185 h^2 + 0,078 V_s f - 0,079 V_s D + 0,026 V_s h + \\ & 0,128 f D - 0,028 f h + 0,258 D h \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \ln(CPUF) = & 14,484 + 0,761 V_s + 0,064 V_s^2 - 0,248 f + 0,011 f^2 - \\ & 0,362 D - 0,087 D^2 - 0,365 h + 0,216 h^2 + 0,060 V_s f + 0,80 V_s D - \\ & 0,174 V_s h + 0,156 f D + 0,119 f h + 0,189 D h \end{aligned} \quad (3.20)$$

Tableau 3.5 Vérification du modèle statistique de la concentration des PF et PUF dans l'espace de dispersion

Granit	Phase	Concentration des PF 'ln(CPF)'		Erreur (%)	Concentration des PUF 'ln(CPUF)'		Erreur (%)
		Mesurée	Prédite		Mesurée	Prédite	
Blanc	Ébauche	9,52	9,13	4,3	12,50	12,71	1,7
		8,35	8,57	2,58	12,52	12,41	0,9
		9,68	9,57	1,15	12,75	12,99	1,9
	Finition	8,39	7,73	8,5	14,73	14,10	4,5
		7,05	7,11	0,91	13,57	13,73	1,2
		8,39	8,14	3,07	14,48	14,63	1,0
Noir	Ébauche	9,33	9,27	0,6	13,51	13,56	0,4
		7,86	8,71	9,76	13,73	13,45	2,1
		9,84	9,63	2,14	13,56	14,02	3,3
	Finition	8,01	7,80	2,7	15,02	14,22	5,6
		7,18	7,07	1,57	13,94	13,79	1,1
		8,93	8,12	9,96	14,77	14,74	0,2

Le Tableau 3.5 montre le pourcentage d'erreur entre les valeurs mesurées et celles prédites par les différentes équations. L'erreur trouvée est acceptable et permet de valider le modèle statistique. Cette erreur varie entre 0,2 et 9,96%.

La Figure-A VI-1 (voir annexe VI p.147) et la Figure-A VII-1 (voir annexe VII p.151) donnent les résultats de la détermination de la position maximale respectivement de concentration des PF et des PUF lors du polissage régulier des deux granits blanc et noir. Ces résultats sont obtenus avec une bonne désirabilité comprise entre 82 et 100%. Les résultats d'optimisation sont donnés sur le Tableau 3.6. La valeur maximale de concentration des PF est obtenue au point de coordonnées $D = 5$ cm et $h = 10$ cm pour les deux phases de polissage régulier des deux granits sauf dans les cas de finition du granit noir où la valeur maximale de concentration est obtenue au point de coordonnées $D = 27,5$ cm et $h = 15$ cm. Le Tableau 3.6 montre aussi que la valeur maximale de concentration des PUF est obtenue au point de coordonnées $D = 5$ cm et $h = 5$ cm pour les deux phases de polissage régulier des deux granits. La Figure-A VI-2

(voir annexe VI p.148) et la Figure-A VII-2 (voir annexe VII p.152) donnent la dispersion respectivement des PF et des PUF lors des deux phases de polissage des deux types de granit.

Tableau 3.6 Résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant la diminution des émissions des PF et PUF

Granit	Phase	PF		PUF	
		D (cm)	h (cm)	D (cm)	h (cm)
Blanc	Ébauche	5	10	5	5
	Finition	5	10	5	5
Noir	Ébauche	5	10	5	5
	Finition	27,5	15	5	5

Les équations de la dispersion (de la concentration des PF et PUF lors des deux phases de polissage des granits blanc et noir) sont déterminées à partir des courbes de la Figure-A VI-2 (voir annexe VI p.148) et la Figure-A VII-2 (voir annexe VII p.152), (en fonction des variables d'entrées codées [-1 1], voir Eq 2.4), comme suit :

Ébauche blanc

$$\ln(CPF) = 9,720 - 0,0348 D + 0,0001 D^2 + 0,0758 h - 0,0031 h^2 + 0,0006 Dh \quad (3.21)$$

$$\ln(CPUF) = 13,44 - 0,006 D - 0,0003 D^2 - 0,0298 h + 0,0001 h^2 - 0,0003 Dh \quad (3.22)$$

Ébauche noir

$$\ln(CPF) = 9,6762 - 0,049 D - 0,0004 D^2 + 0,0972 h - 0,0040 h^2 + 0,0009 Dh \quad (3.23)$$

$$\ln(CPUF) = 14,81 - 0,0083 D - 0,0002 D^2 - 0,0462 h + 0,0003 h^2 + 0,0003 Dh \quad (3.24)$$

Finition blanc

$$\begin{aligned} \ln(CPF) = 7,7386 + 0,0008 D - 0,0002 D^2 + 0,0445 h - 0,0021 h^2 + \\ 0,0002 Dh \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \ln(CPUF) = 15,8563 - 0,0478 D + 0,0001 D^2 - 0,0200 h - 0,0009 h^2 + \\ 0,0006 Dh \end{aligned} \quad (3.26)$$

Finition noir

$$\begin{aligned} \ln(CPF) = 7,2570 + 0,0224 D - 0,0006 D^2 + 0,0908 h - 0,0037 h^2 - \\ 0,0011 Dh \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \ln(CPUF) = 15,39 - 0,0489 D + 0,0004 D^2 + 0,0667 h - 0,0042 h^2 - \\ 0,0008 Dh \end{aligned} \quad (3.28)$$

3.5 Analyse de la poussière respirable et classification des particules dégagées lors du polissage de granit

3.5.1 Prélèvement et analyse selon la méthode IRSST de la concentration massique en poussière respirable et en quartz lors du polissage régulier de granit

Dans cette partie, il s'agit de l'étude de la poussière respirable P_r dégagée lors du polissage régulier de granit et le quartz SiO_2 contenu dans cette poussière. Les points de prélèvement de poussière sont fixés à différentes hauteurs h de 5, 15 et 25 cm et à une même distance horizontale D de 40 cm (voir Figure 2.4). La Figure 3.12 donne la variation moyenne de la concentration en masse de la poussière respirable P_r en fonction de la distance verticale dans le cas du polissage régulier des granits blanc et noir. La Figure 3.12-a et la Figure 3.12-b montrent que la concentration en masse de la poussière respirable P_r reste constante avec la variation de la distance verticale pour les deux phases de polissage des deux granits. Elles montrent aussi que celle-ci est plus importante pour la phase d'ébauche. La Figure 3.12 montre aussi que les deux granits (blanc et noir) dégagent la même quantité de poussière respirable P_r . La Figure 3.13 donne la variation moyenne de la concentration en masse de quartz SiO_2 en fonction de la distance horizontale dans le cas du polissage régulier du granit blanc. Elle montre que la concentration massique de quartz reste constante avec la variation de la distance verticale pour les deux phases de polissage de granit blanc. La Figure 3.13 montre aussi que la concentration en masse de quartz est plus importante pour la phase d'ébauche. Dans la phase de l'ébauche du granit blanc, cette concentration dépasse la limite d'exposition VEMP et dépasse aussi la limite d'excursion qui est de 5 fois la VEMP. Ces limites sont à ne pas dépasser durant l'exposition du travailleur à la poussière de quartz selon le RSST. Ces résultats montrent l'importance de mettre en place des dispositifs de captation des particules de poussière à la source. Ces dispositifs proches de la source de poussière vont réduire considérablement l'exposition des travailleurs.

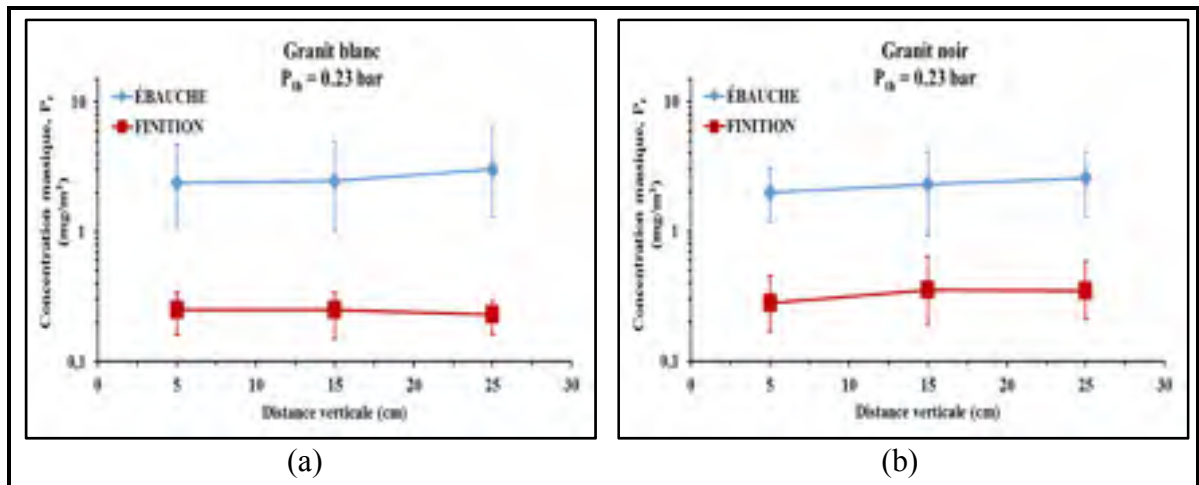


Figure 3.12 Évolution moyenne de la concentration en masse de la poussière respirable en fonction de la distance horizontale lors du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir

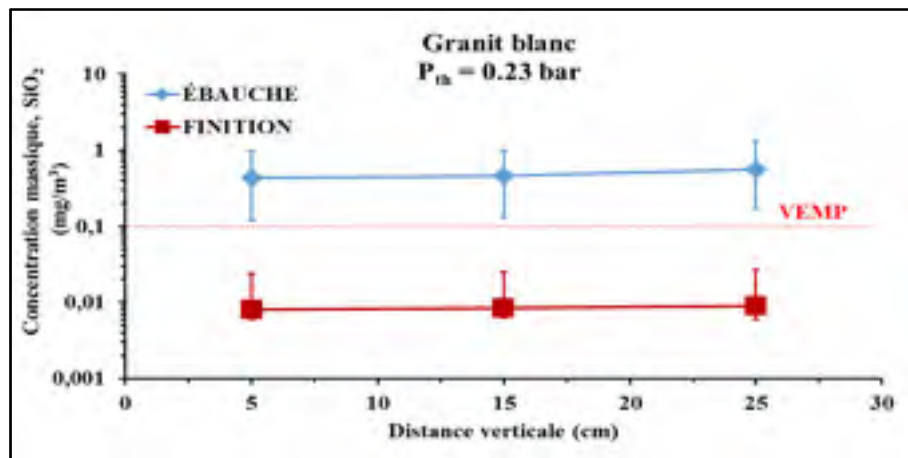


Figure 3.13 Évolution moyenne de la concentration en masse du quartz en fonction de la distance horizontale lors du polissage régulier du granit blanc

3.5.2 Classification selon le diamètre de la poussière de quartz dégagée lors du polissage régulier de granit avec le ELPI (Electrical Low Pressure Impactor)

Dans cette partie, il s'agit d'étudier le taux du silicium contenu dans les PF et les PUF de la poussière émise lors du polissage régulier de granit. Une classification sera faite selon le diamètre de ces particules. Les diamètres prélevés sont 0,039, 0,072, 0,121, 0,203, 0,318, 0,486, 0,766, 1,239, 1,966, 3,102, 5,187 et 8,175 μm . L'aspiration de la poussière à la source

est faite en un point de coordonnées 5 cm suivant la direction horizontale D et 5 cm et suivant la direction verticale h (voir Figure 2.3). La Figure 3.14 donne l'évolution de la granulométrie des PF et des PUF à la source durant la phase d'ébauche du polissage des granits blanc et noir. Elle montre que le granit noir émet plus de poussière que le granit blanc. Elle montre aussi que le pic de concentration en nombre des PF varie entre 0,203 et 0,318 μm et celui des PUF varie entre 0,039 et 0,072 μm .

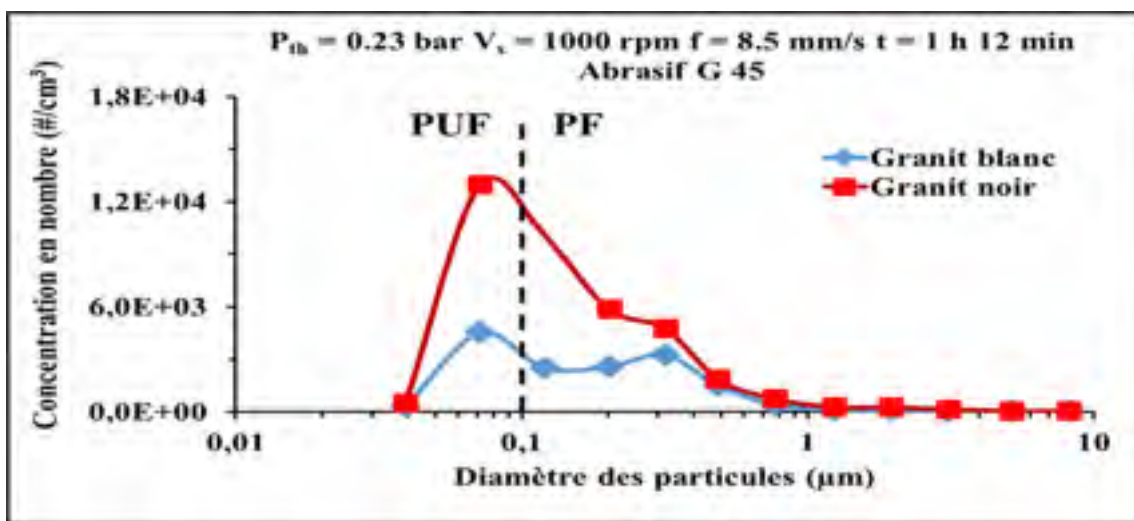


Figure 3.14 Évolution de la granulométrie des PF et des PUF à la source lors de la phase d'ébauche du polissage régulier des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir

La Figure 3.15 montre aussi que le taux de silicium augmente jusqu'au diamètre de particules de 3,102 μm . Ensuite, le taux de silicium diminue jusqu'au diamètre de particules de 8,175 μm . En effet, les particules de diamètre supérieur à 4 μm se déposent sur les surfaces à cause de l'effet de la masse (Toenshoff, Karpuschewski et Glatzel, 1997). Le Tableau 3.7 montre la forme des PF et des PUF générées lors de la phase d'ébauche du polissage des granits blanc et noir. Ce tableau montre que les PF ont une forme en agrégats composés d'accumulation des PUF. Le Tableau 3.7 montre aussi que les PUF ont une forme irrégulière cubique.

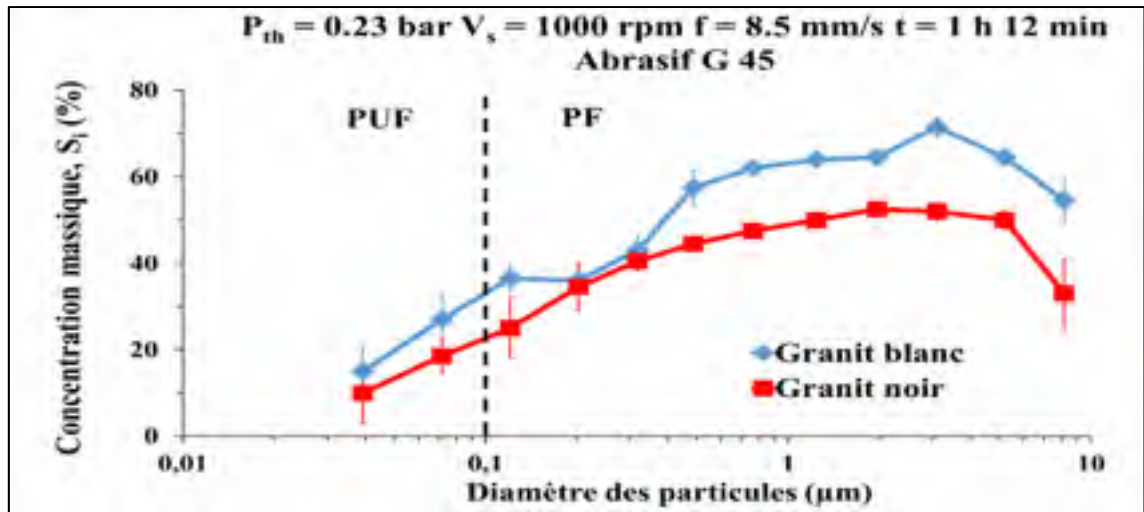


Figure 3.15 Évolution de la concentration massique du silicium en fonction du diamètre des PF et PUF de poussière émise lors de polissage régulier des granits, blanc et noir

Tableau 3.7 Formes des particules de poussière générée lors de la phase d'ébauche du polissage régulier des granits blanc et noir (photo MEB X500)

Diamètre des particules prélevées	Granit blanc	Granit noir
0,072 µm		
0,486 µm		
3,102 µm		

3.5.3 Discussion et conclusion

Pour comprendre l'émission de la poussière lors du polissage de granit il est important d'étudier le polissage graduel tel qu'il est pratiqué en industrie (étude faite dans l'article saidi et al. (2015)). Cette étude montre que le polissage peut être divisé en deux phases, une phase d'ébauche au début du processus et une phase de finition à sa fin. Ce résultat est conforme à celui trouvé par Xu, Huang et Li (2003). Dans la séquence adoptée, le point de séparation ébauche-finition est l'abrasif de grandeur des grains G 400. L'étude de l'émission des particules fines peut se faire en utilisant la lecture directe des concentrations en nombre, en masse ou en surface. L'allure des courbes d'évaluation de l'émission obtenue avec ces trois paramètres de concentration montre une grande ressemblance entre eux. Dans ce projet le choix est fait sur la concentration en nombre pour étudier l'émission et la dispersion. Les résultats de l'étude de l'évolution de la concentration des PF au cours du polissage montrent que cette concentration est plus importante à la phase d'ébauche qu'à la phase de finition. Cette étude préliminaire montre que le granit noir produit plus de particules fines que le granit blanc. Elle a permis aussi d'identifier et de diviser le processus de polissage en deux phases : une phase d'ébauche au début de processus et une phase de finition à sa fin. L'étude de l'évolution de la rugosité montre que celle-ci diminue au cours du processus de polissage en fonction des étapes de ce dernier. Ce résultat est conforme à celui trouvé par Xu, Huang et Li (2003). À la phase d'ébauche, la variation de la rugosité est importante, c'est dû à l'enlèvement de grande quantité de matière et à la phase de finition la variation de la rugosité est petite, car la quantité de matière enlevée est minime. Il existe une relation exponentielle entre la rugosité et la grandeur des grains abrasifs qui est obtenue avec un bon coefficient de détermination supérieur à 96%. L'étude de la dispersion dans l'espace intérieur de la machine CNC Mazak montre que la concentration reste constante jusqu'à une distance de 25 cm du contact outil-pièce puis augmente rapidement jusqu'à la distance 75 cm. Cette augmentation rapide est à cause de l'accumulation des particules fines dans l'espace intérieur de la machine et l'effet de rebond sur les surfaces intérieures de celle-ci. Les particules fines dispersées dans l'espace intérieur de la machine ont un pic (de concentration) observé pour un diamètre de particule de 1 μm . Ces particules sont dans la gamme des particules PM_{2,5}. Cela montre la gravité de la

poussière émise lors de polissage de granit, car ces particules sont susceptibles d'atteindre la région alvéolaire des poumons et y causer des graves lésions.

L'étude de l'émission à la source des PF et des PUF lors des deux phases de polissage régulier de granit montre que leur concentration augmente avec la vitesse de rotation du disque abrasif. Ce résultat est conforme à celui trouvé par Kouam, Songmene et Bahloul (2013). L'augmentation de la vitesse de rotation aide à éliminer plus de matière et par conséquent à générer plus de particules de poussière. L'étude montre aussi que cette concentration diminue avec la vitesse d'avance. Ce résultat est conforme à celui trouvé par Yavuz, Ozkahraman et Demirdag (2011). L'augmentation de la vitesse d'avance aide à diluer les particules générées dans l'air du travail et par conséquent fait diminuer leurs concentrations. La phase d'ébauche génère plus de PF que de PUF et inversement pour la phase de finition. Les PF dégagées ont un pic (de concentration) observé pour un diamètre de particule variant entre 0,583 et 0,723 μm et les PUF dégagées ont un pic observé pour un diamètre de particule variant entre 14,1 et 82 nm. Ces particules constituent un danger potentiel pour la santé de travailleurs au niveau pulmonaire. L'étude statistique de l'émission à la source des PF et des PUF montre aussi l'influence positive de la vitesse de rotation et l'influence négative de la vitesse d'avance sur la concentration des particules générées. Le modèle statistique quadratique adoptée est obtenue avec un bon coefficient de détermination variant entre 86 et 98% et un manque d'ajustement non significatif. Ce qui montre que ce modèle est bien adapté pour expliquer l'émission à la source lors du polissage de granit. La vérification du modèle par un point arbitraire montre aussi une erreur faible variant entre 0,1 et 7%. Les résultats d'optimisation montrent qu'il faut prendre une vitesse de rotation de 1000 tr/min et une vitesse d'avance variant entre 21,25 et 25,5 mm/s pour minimiser la concentration à la source des PF et PUF.

L'étude de l'état de surface lors des deux phases de polissage régulier de granit montre que la rugosité a tendance à s'améliorer en augmentant la vitesse de rotation du disque abrasif. L'étude montre aussi que l'augmentation de la vitesse d'avance fait améliorer la rugosité dans la phase de l'ébauche et inversement dans la phase de la finition. La brillance de la surface polie est inversement proportionnelle à la rugosité de surface. Ce résultat est conforme à celui

trouvé par Li, Huang et Xu (2006). L'étude statistique de l'état de surface montre aussi l'influence négative de la vitesse de rotation sur la rugosité de la surface dans les deux phases de polissage de granit. Quant à la vitesse d'avance, elle a une influence négative dans la phase d'ébauche et une influence positive dans la phase de la finition. Le modèle statistique quadratique adoptée est obtenue avec un bon coefficient de détermination variant entre 86 et 99% et un manque d'ajustement non significatif. Ce qui montre que ce modèle est bien adapté pour expliquer l'évolution de l'état de surface lors du polissage de granit. La vérification du modèle par un point arbitraire montre aussi une erreur faible variant entre 2,6 et 8,2%. Les résultats d'optimisation montrent qu'il faut prendre une vitesse de rotation de 2125 tr/min et une vitesse d'avance variant de 25,5 mm/s pour minimiser la rugosité de surface dans la phase d'ébauche. Pour la phase de finition, il faut prendre une vitesse de rotation de 2500 tr/min et une vitesse d'avance de 8,5 mm/s.

L'étude de la dispersion des PF et PUF lors des deux phases de polissage régulier de granit montre que leur concentration diminue suivant la distance horizontale. Ce résultat est conforme avec celui trouvé par Yaonan et al. (2014). Suivant la distance verticale, cette concentration augmente légèrement pour atteindre un pic à la distance verticale de 15 cm et puis diminue jusqu'à la distance verticale de 25 cm. L'effet de dilution commence à 5 cm suivant la distance horizontale et à 15 cm suivant la distance verticale. Dans l'espace de dispersion, les PF dégagées ont un pic de concentration observé pour un diamètre de particule variant entre 0,542 et 0,777 μm et les PUF dégagées ont un pic (de concentration) observé pour un diamètre de particule variant entre 12,2 et 98,2 nm. De la même façon que pour l'étude de l'émission à la source cette gamme des particules constitue un danger potentiel pour la santé de travailleurs au niveau pulmonaire. L'étude statistique de l'émission à la source des PF et des PUF montre aussi l'influence positive de la vitesse de rotation et l'influence négative de la vitesse d'avance sur la concentration des particules générées. C'est la même constatation trouvée dans l'étude statistique de l'émission à la source. En effet, c'est la même quantité émise qui sera dispersée dans l'espace de travail. Le modèle statistique quadratique adoptée est obtenue avec un bon coefficient de détermination variant entre 73 et 84% et un manque d'ajustement non significatif. Ce qui montre que ce modèle est bien adapté pour expliquer la

dispersion des particules lors du polissage de granit. La vérification du modèle par un point arbitraire montre aussi une erreur faible variant entre 0,4 et 7,85%. La valeur maximale de concentration totale des PF est obtenue au point de coordonnées $D = 5$ cm et $h = 10$ cm pour les deux phases d'ébauche des deux granits et pour la phase de finition du granit blanc. Pour la phase de finition du granit noir cette valeur est localisée au point de coordonnée $D = 27,5$ cm et $h = 15$ cm. La valeur maximale de concentration totale des PUF est obtenue au point de coordonnées $D = 5$ cm et $h = 5$ cm pour les deux phases de polissage des deux granits. La valeur maximale des concentrations de PF et PUF sont obtenues pour une valeur de vitesse de rotation maximale et une vitesse d'avance minimale. Donc, lors de polissage régulier les PF et PUF restent concentrées proche du contact outil-pièce. Ce résultat montre que le travailleur est gravement exposé à la poussière de quartz lors de polissage rotatif de granit.

L'étude de l'évolution de la concentration massique de la poussière respirable en fonction de la distance verticale montre que celle-ci augmente légèrement en fonction de cette distance pour les deux phases de polissage des deux granits. La phase d'ébauche dégage plus de poussière respirable (constituée de PF de diamètre inférieur à $10\text{ }\mu\text{m}$). La concentration massique de quartz augmente légèrement avec la variation de la distance verticale pour les deux phases de polissage de granit blanc. Dans la phase de l'ébauche du granit blanc, cette concentration dépasse la limite d'exposition VEMP et dépasse aussi la limite d'excursion qui est de 5 fois la VEMP. Ces limites sont à ne pas dépasser durant l'exposition du travailleur à la poussière de quartz selon le RSST. Ce résultat montre que dans la phase d'ébauche du granit blanc qui contient 41,38% de quartz le travailleur est potentiellement exposé à des taux très élevés de quartz.

L'étude de la classification des particules de la poussière de quartz dégagée lors de polissage rotatif de granit (dans la phase d'ébauche) montre que la poussière générée par le granit blanc transporte plus de silicium que celle générée par le granit noir. Elle montre aussi que le taux de silicium augmente jusqu'au diamètre de particules de $3,102\text{ }\mu\text{m}$ et puis il diminue jusqu'au diamètre de particules de $8,175\text{ }\mu\text{m}$. En effet, les particules de diamètre supérieures à $4\text{ }\mu\text{m}$ ont tendance à se déposer à cause de l'effet de leur masse (Toenshoff, Karpuschewski et

Glatzel, 1997). Les PF générées ont une forme en agrégats composés d'accumulation des PUF et les PUF ont une forme irrégulière. Ce résultat montre que généralement les particules émises PM 2,5 susceptibles d'atteindre la région alvéolaire sont constituées essentiellement des PUF ou d'accumulation des PUF. Ces PUF peuvent être très nocives pour les poumons des travailleurs de transformation de granit (Ahmad, Khan et Patil, 2011).

L'étude expérimentale du polissage a permis de :

- Comprendre l'émission et la dispersion lors du processus de polissage de granit.
- Caractériser la poussière de silice dégagée lors du processus de polissage susceptible d'être inhalée par le travailleur.
- Optimiser les paramètres de polissage de granit permettant la réduction de l'exposition à la poussière de silice tout en gardant un bon fini de surface.
- Construire une base de données pour étudier et mettre en place des solutions de ventilation locale pour la réduction de l'exposition à la poussière de silice dans le cas de polissage de granit.

Les résultats énumérés peuvent servir pour sensibiliser les industriels (de transformation de granit) au danger de la poussière de silice cristalline présente lors de polissage de granit et auquel leurs travailleurs sont exposés. Ils fournissent aux industriels une base de données leur permettant de réduire l'émission de cette poussière tout en gardant un bon état de surface. Les résultats leur montrent aussi que la poussière dégagée pendant le polissage de granit occupe tout l'environnement du travail d'où l'intérêt de rechercher des solutions de réduction à la source.

CHAPITRE 4

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE POLISSAGE ROTATIF ET SANS TRANSLATION SUR MACHINE-OUTIL

4.1 Introduction

L'étude de l'effet de la vitesse de rotation sur l'émission des PF et PUF nécessite un examen du polissage rotatif et sans translation (vitesse d'avance nulle). Ce type de polissage est utilisé dans l'industrie pour polir les petites pièces. En utilisant une amplitude de translation faible, les particules de poussière sont moins diluées dans l'air, ce qui représente le pire scénario auquel le travailleur peut être exposé. Cette partie vise à étudier le processus de polissage rotatif et sans translation afin de comprendre les effets de la vitesse de rotation et des matériaux de la pièce sur la qualité des pièces, l'émission de particules et la dispersion pendant ce processus. Cette étude servira de base à la mise en œuvre des simulations expérimentale et numérique de procédés de polissage de granit (dans le pire cas d'exposition). Cette partie a abouti à la publication d'un article de revue :

Saidi, M. N., V. Songmene, J. Kouam et A. Bahloul. 2018. « Rotational and translation-free polishing of granite: surface quality and dust particles emission and dispersion ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 98, no 1, p. 289-303. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2247-8>.

4.2 Qualité du fini de surface lors du polissage rotatif et sans translation

Comme pour l'étude de l'émission, les conditions de polissage sont les mêmes que pour le polissage régulier sauf que la translation est mise à zéro ($f = 0$ mm/s). Le temps de polissage est fixé à 40 s. La vitesse est variée entre 1000, 1750 et 2500 tr/min. La Figure 4.1 donne l'évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse de rotation dans le cas du polissage rotatif et sans translation des granits blanc et noir. Elle montre que l'augmentation de la vitesse de rotation fait croître la rugosité de surface lors des deux phases de polissage régulier des deux types de granit. En mettant la vitesse d'avance à zéro,

les copeaux restent plus de temps entre la l'outil abrasif et la pièce. Ces copeaux endommagent la surface de la pièce en granit et font augmenter la rugosité.

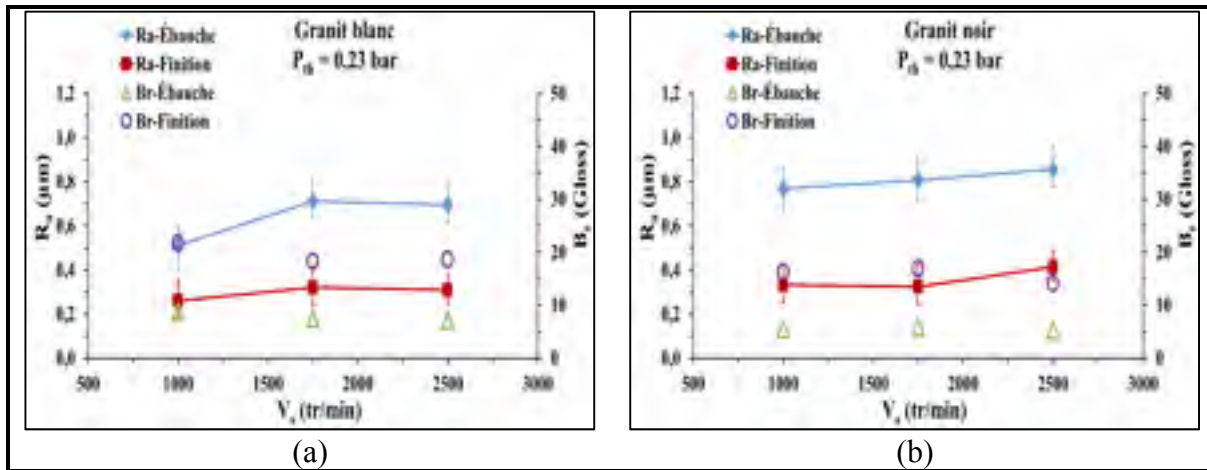


Figure 4.1 Évolution moyenne de la rugosité et la brillance de surface en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir

La Figure 4.2 et la Figure 4.3 représentent les photos MEB (microscopie électronique à balayage) des copeaux dégagés lors de la phase d'ébauche du granit noir respectivement dans le polissage rotatif et sans translation et le polissage régulier. La Figure 4.2 présente les copeaux générés pendant le polissage rotatif et sans translation du granit noir en fonction de la vitesse de rotation dans la phase d'ébauche. Elle montre que les copeaux ont une forme sphérique et sont constitués d'agglomération de poussière dégagée. Cette forme sphérique est causée par la durée du temps prolongé que les copeaux passent entre l'outil abrasif et la pièce. Pour une vitesse élevée de 2500 tr/min le diamètre des copeaux diminue.

La Figure 4.3 montre les particules de copeaux générées lors du polissage régulier (dans les mêmes conditions que le polissage rotatif et sans translation) sont agglomérées dans une forme plate. Dans ce cas, les copeaux passent une courte durée entre l'outil abrasif et la pièce et ils n'ont pas le temps de prendre une forme sphérique. La forme sphérique des copeaux leur offre une résistance moindre de l'air et par conséquent ils peuvent traverser plus de distance dans l'air du travail avant de se déposer sur les surfaces avoisinantes.

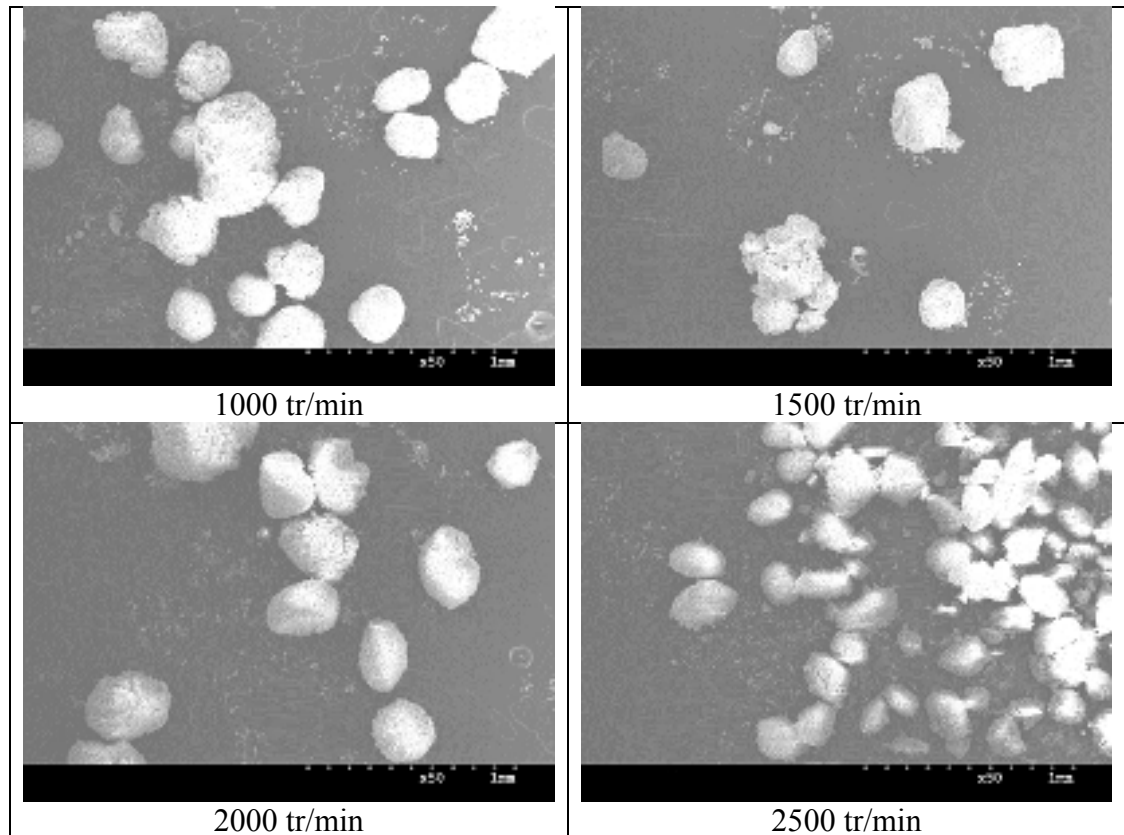


Figure 4.2 Photos MEB des copeaux générés lors du polissage rotatif et sans translation dans la phase d'ébauche du granit noir pour différentes vitesses de rotation



Figure 4.3 Photos MEB des copeaux générés lors du polissage régulier dans la phase d'ébauche du granit noir pour la vitesse de rotation de 1000 tr/min

4.3 Émission des PF et PUF lors du polissage rotatif et sans translation

L'émission est observée au point $D = 5 \text{ cm}$ et $h = 5 \text{ cm}$ (voir Figure 2.3). Les conditions de polissage sont les mêmes que pour le polissage régulier sauf que la translation est mise à zéro

($f = 0$ mm/s). Le temps de polissage est fixé à 40 s. La vitesse est variée entre 1000, 1750 et 2500 tr/min. La Figure 4.4 donne la variation moyenne à la source de la concentration totale en nombre des PF et PUF en fonction de la vitesse de rotation dans le cas du polissage rotatif et sans translation des granits blanc et noir. Elle montre que la concentration en nombre des PF et PUF croît avec l'augmentation de la vitesse de rotation dans le cas de polissage rotatif et sans translation des granits, blanc et noir et pour les deux phases de polissage. Cette augmentation est très importante dans le cas de la phase de finition pour les deux types de granit. L'utilisation d'une vitesse de rotation de 1000 tr/min permet la génération de la même quantité des PF et PUF dans les deux phases de polissage du granit blanc. La concentration des PUF est constante en fonction de la vitesse de rotation dans la phase d'ébauche des deux granits.

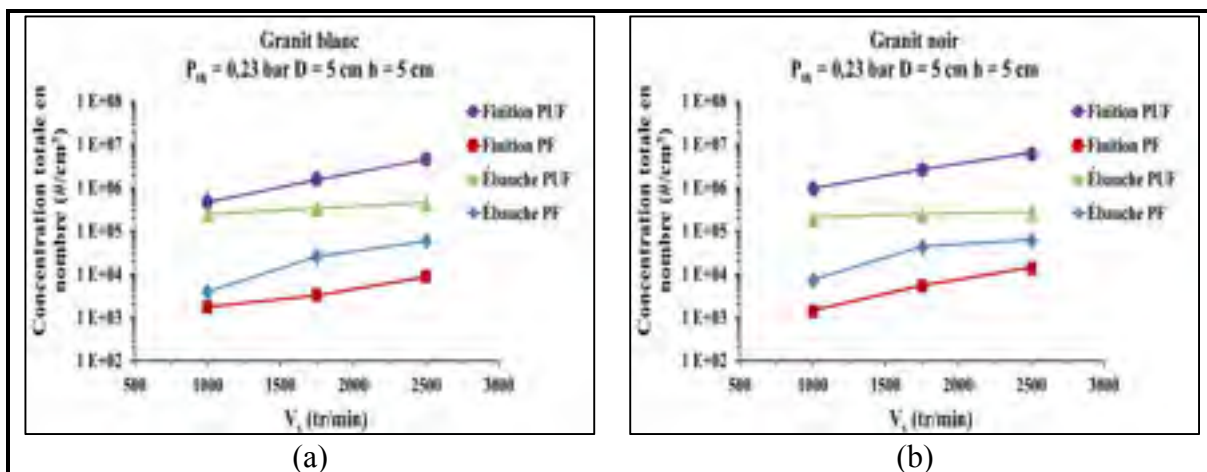


Figure 4.4 Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des émissions de PF et de PUF à la source en fonction de la vitesse de rotation lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir

La Figure 4.5 donne l'évolution moyenne à la source de la granulométrie des PF et PUF dans le cas du polissage rotatif et sans translation des granits blanc et noir. Elle montre que le pic de concentration en nombre des PF est détecté pour un diamètre de particule compris entre 0,583 et 0,673 μm pour les deux opérations d'ébauche et de finition des granits (blanc et noir). Elle montre aussi que le pic de concentration en nombre des PUF est détecté pour un diamètre de particule compris entre 28,9 et 82 nm pour les deux opérations de polissage des deux

granits. Ces particules contiennent des particules respirables PM_{2,5}, dangereuses pour la santé des travailleurs.

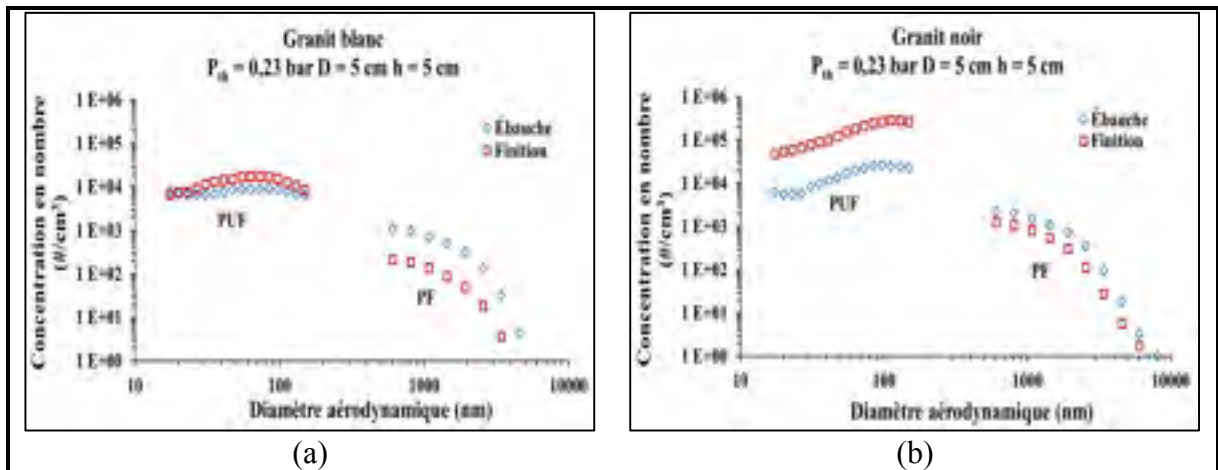


Figure 4.5 Évolution moyenne de la granulométrie des PF et PUF à la source lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Granit blanc (b) Granit noir

4.4 Dispersion des PF et PUF lors du polissage rotatif et sans translation

Comme pour le polissage régulier, la dispersion du est observée à 9 points avec $D = 5, 27$ et 50 cm et $h = 5, 15$ et 25 cm (voir Figure 2.3). Comme pour l'étude de l'émission, les conditions de polissage sont les mêmes que pour le polissage régulier sauf que la translation est mise à zéro ($f = 0 \text{ mm/s}$). Le temps de polissage est fixé à 40 s . La vitesse est variée entre $1000, 1750$ et 2500 tr/min .

La Figure 4.6 et la Figure 4.7 présentent la concentration des PF et PUF en fonction respectivement de la distance horizontale D et la distance verticale h lors du polissage rotatif et sans translation pour les deux granits. Elles montrent que la concentration des PF dans la zone spatiale avec D comprise entre 5 et $27,5 \text{ cm}$ et h comprise entre 5 et 15 cm est plus importante dans la phase d'ébauche que dans la phase de finition. Au-delà de la de cette zone, les deux phases produisent la même quantité de PF. Les deux figures montrent que la concentration de PUF passe par un pic proche du point $D = 27,5 \text{ cm}$ et $h = 15 \text{ cm}$ lors du polissage rotatif et sans translation pour les deux granits. Les PF sont concentrés à la source, à $D = 5 \text{ cm}$ et $h = 5 \text{ cm}$. Ces résultats montrent comme pour le polissage régulier que la

concentration des PF reste près de l'outil de polissage et que la concentration des PUF se propage uniformément dans l'espace de travail. Ils montrent aussi que la santé des travailleurs est exposée à des concentrations très élevées de poussière pouvant contenir du quartz.

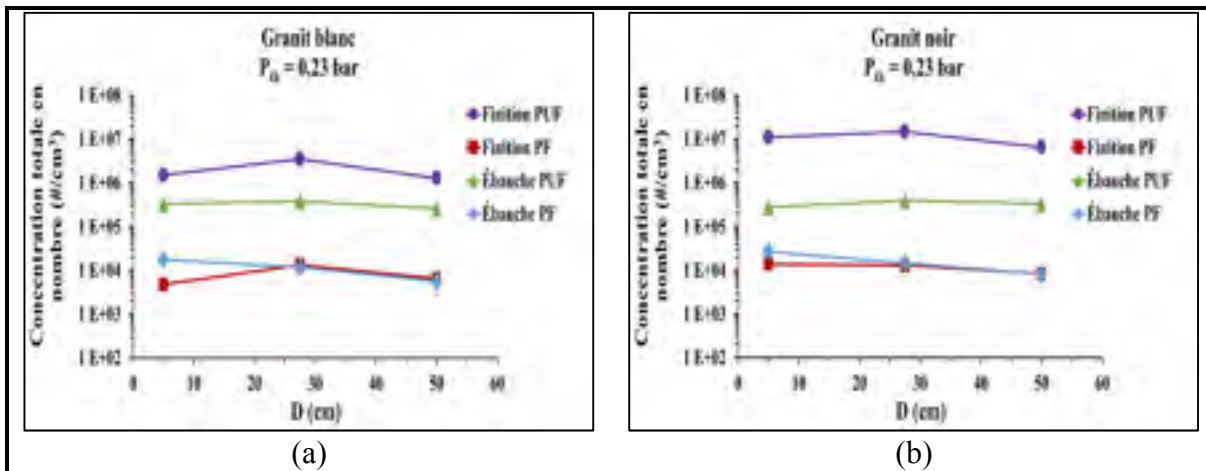


Figure 4.6 Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance horizontale lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) blanc (b) noir

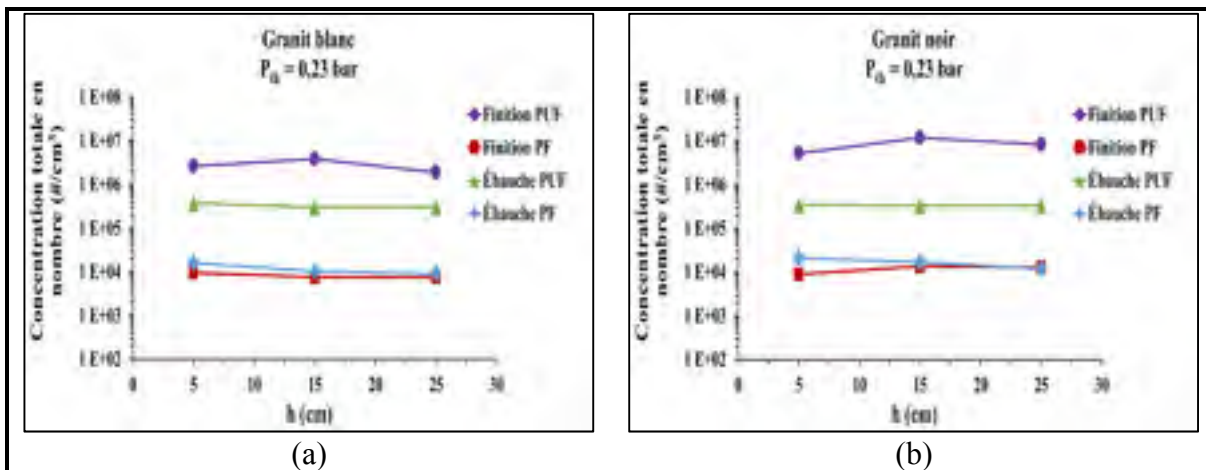


Figure 4.7 Évolution moyenne de la concentration totale en nombre des PF et PUF suivant la distance verticale lors du polissage rotatif et sans translation des granits (a) blanc (b) noir

La Figure 4.8 et la Figure 4.9 présentent la distribution de PF en fonction de la distance horizontale respectivement dans la phase d'ébauche et la phase de finition du polissage rotatif

et sans translation. Les figures présentent les mêmes tendances que celles de la Figure 4.6. Elles montrent que le pic de PF est détecté pour des diamètres allant de 0,583 à 0,723 μm .

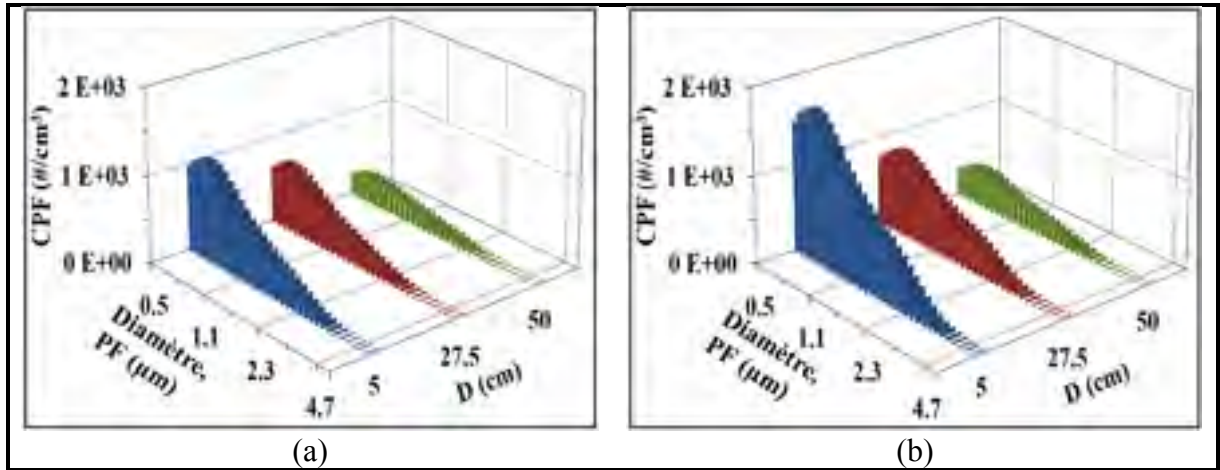


Figure 4.8 Évolution moyenne de la granulométrie des PF dans la direction horizontale lors de l'ébauche du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir

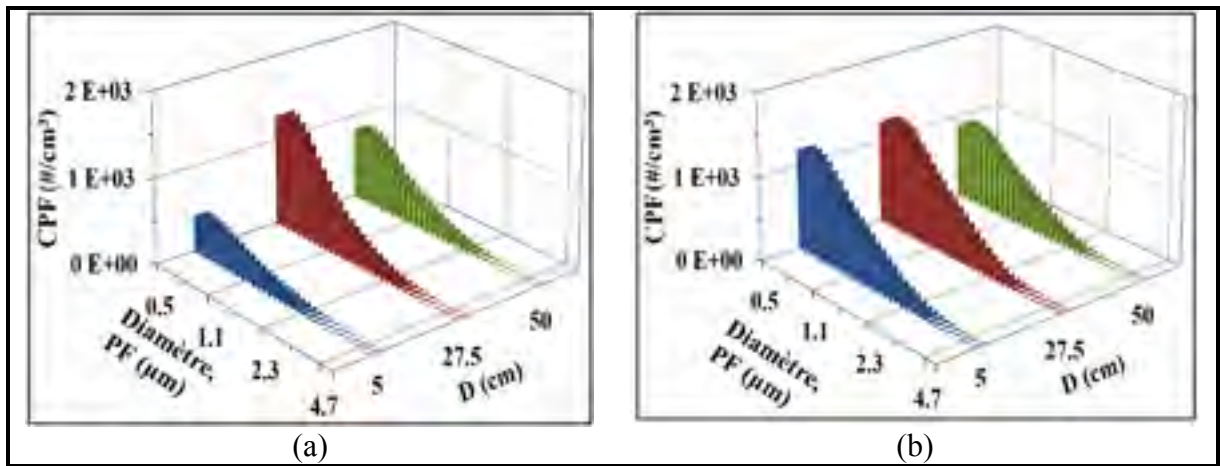


Figure 4.9 Évolution moyenne de la granulométrie des PF dans la direction horizontale lors de la finition du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir

La Figure 4.10 et la Figure 4.11 présentent la distribution de PUF en fonction de la distance horizontale respectivement dans la phase d'ébauche et la phase de finition du polissage rotatif et sans translation. Ces figures ont les mêmes tendances que celles de la Figure 4.7. Elles montrent que le pic de PUF est détecté pour des particules ayant un diamètre de 12,2 à 59,4 nm.

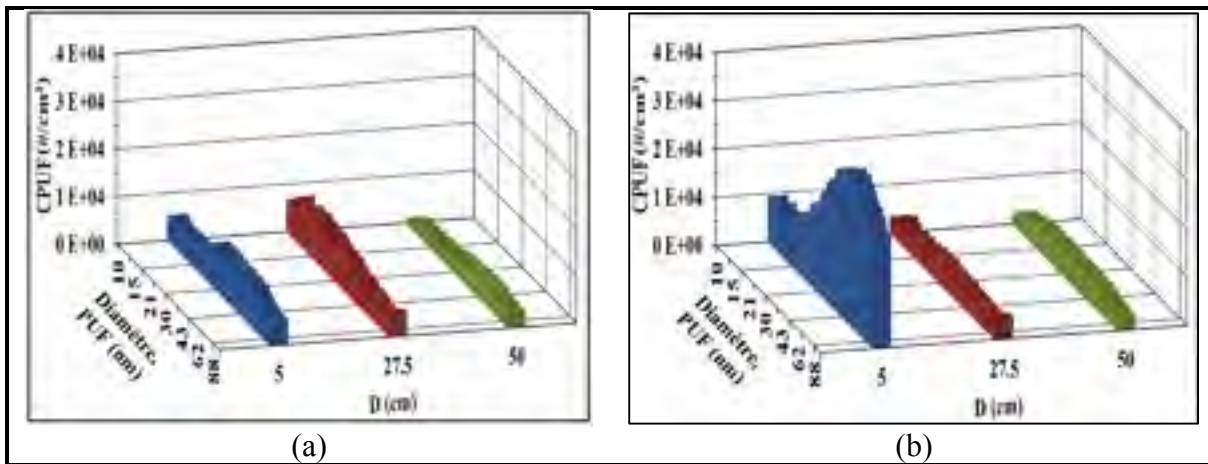


Figure 4.10 Évolution moyenne de la granulométrie des PUF dans la direction horizontale lors de l'ébauche du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir

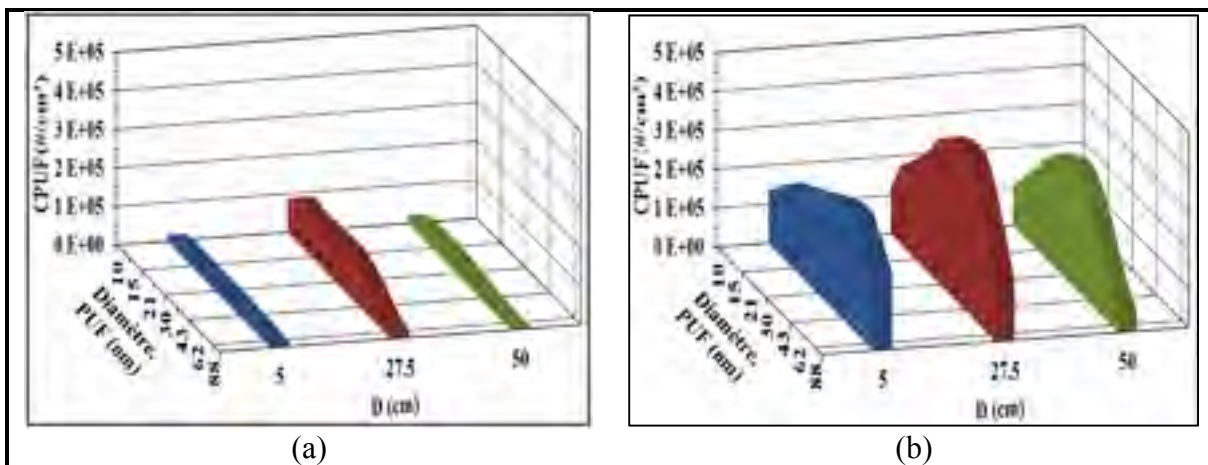


Figure 4.11 Évolution moyenne de la granulométrie des PUF dans la direction horizontale lors de la finition du polissage rotatif et sans translation des granits (a) Blanc (b) Noir

4.5 Comparaison du polissage rotatif et sans translation avec le polissage régulier

La comparaison du polissage rotatif et sans translation avec le polissage régulier vise à conclure si les résultats d'une simulation (expérimentale ou numérique) basée sur le premier peuvent être utilisés pour le deuxième.

La rugosité de surface dans le polissage de granit régulier (Figure 3.1) diminue légèrement avec la vitesse de rotation contrairement au polissage rotatif et sans polissage (Figure 4.1). En effet, l'utilisation de la vitesse d'avance dans le polissage régulier entraîne une amélioration de la qualité de surface. Elle aide à éjecter la matière enlevée du contact outil abrasif-pièce en

granit. Par conséquent, cette matière ne reste pas beaucoup de temps dans ce contact et n'affectera pas la qualité de la surface comme dans le polissage rotatif et sans polissage.

La comparaison de l'émission des PF et PUF dans le polissage rotatif et sans translation (Figure 4.4) et dans le polissage régulier (Figure 3.5) montre que pour les deux cas, les PF et PUF augmentent avec la vitesse de rotation. Les PF et PUF émises dans la phase d'ébauche sont moins importantes dans le polissage régulier. Dans le polissage de granit régulier, la vitesse d'avance aide à diluer les particules de poussière dans l'espace de travail, et par conséquent, la quantité de PF et de PUF émise diminue. Dans la phase de finition, cette diminution n'affecte que l'émission des PF.

L'étude de la dispersion des PF et PUF dans le polissage rotatif et sans translation (Figure 4.6 et Figure 4.7) et dans le polissage régulier (Figure 3.8 et Figure 3.9) montre que des grandes concentrations de PF et PUF restent proches de l'outil abrasif lors du processus de polissage et elles contaminent uniformément l'espace de travail. Ainsi, dans les deux cas de polissage les travailleurs sont fortement exposés aux particules de poussière pouvant contenir du quartz (néfaste pour la santé et pouvant conduire à des maladies dangereuses).

La comparaison entre les deux types de polissage montre qu'ils sont semblables surtout concernant l'émission et la dispersion des PF et PUF. Donc, l'utilisation d'une simulation basée sur le polissage rotatif et sans translation est fiable pour simuler le polissage régulier et étudier des solutions de réduction de poussière émise à la source.

4.6 Conclusion

Ce chapitre vise à étudier la qualité de la surface de la pièce en granit, l'émission et la dispersion des particules pendant le polissage rotatif et sans translation du granit. Les résultats trouvés sont comme suit :

- Pendant ce processus, la qualité de la surface diminue avec la vitesse de rotation. L'augmentation de la vitesse entraîne l'élimination de plus de matière. Les copeaux coincés entre l'outil abrasif et la pièce de granit endommagent la surface polie.

- L'étude de l'émission montre que les PF et PUF augmentent avec la vitesse de rotation. L'utilisation d'une vitesse d'environ 1000 tr/min permet d'améliorer la qualité de surface et, en même temps, de réduire l'émission des PF et PUF.
- Le granit noir en matériau tendre émet plus des PF et PUF que le granit blanc en matériau plus dur. Les PF et PUF émises pendant le polissage de granit rotatif et sans translation contient des particules respirables PM_{2,5} dangereuses pour la santé des travailleurs.
- L'étude de dispersion a montré que pendant le polissage de granit rotatif et sans traduction, les CPF et CPUF restent proches de l'outil de polissage et que les CPUF occupent uniformément l'espace de travail (Djebara, 2012). Par conséquent, il est important de mettre en place des systèmes de captation des PF et PUF à la source d'émission.
- La comparaison entre le polissage rotatif et sans translation et le polissage régulier des granits montre que l'utilisation de la vitesse d'avance diminue les PF émises dans la phase d'ébauche. Les PF et PUF dégagées lors du polissage rotatif et sans translation sont supérieures à ceux dégagées lors du polissage régulier. Dans les deux cas, la vitesse de rotation augmente les PF et PUF à la source d'émission et par conséquent dans la zone de dispersion. De plus, une grande concentration de PF et PUF reste proche des travailleurs et contamine uniformément l'espace de travail. Lors du polissage rotatif et sans translation, les particules générées sont sphériques, alors qu'elles ont une forme plane pour le polissage régulier ce qui montre l'influence de la rotation et la translation de l'outil sur la formation des copeaux.

Les résultats trouvés dans ce chapitre montrent que le travailleur ne doit pas faire un polissage sur place ou avec de faibles mouvements d'avance pour éviter d'être exposé à des concentrations élevées des PF et PUF. Ils montrent aussi une ressemblance entre les deux types de polissage (rotatif et sans translation et celui régulier). Ils serviront de base à la conception des simulations expérimentale et numérique de polissage de granit. Ces simulations vont aider à étudier le processus de polissage et rechercher des solutions de captation de particules tout en éliminant l'exposition à la poussière de granit dangereuse.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DE LA SIMULATION EXPÉRIMENTALE DU POLISSAGE ROTATIF ET SANS TRANSLATION DE GRANIT ET DES SOLUTIONS DE RÉDUCTION DE POUSSIÈRE À LA SOURCE

5.1 Introduction

Dans cette partie, il s'agit de faire une étude de la simulation expérimentale du polissage de granit rotatif et sans translation et des solutions de réduction de poussière à la source. La simulation est faite dans les laboratoires de l'IRSST et avec des particules de poussière de sel. Le choix de ce type de polissage est fait par ce qu'il représente le pire cas d'exposition pour les travailleurs et qu'il est aussi semblable au polissage régulier de point de vue d'émission et de dispersion des PF et PUF.

Cette étude est divisée en deux parties. La première partie consiste à étudier la dispersion des particules ultrafines lors de la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation de granit. Dans cette partie, seront faites une calibration de débit d'alimentation en particules de sel, une étude de la dispersion des particules ultrafines suivant différents plans verticaux et une étude de l'évolution de la granulométrie des particules ultrafines. La deuxième partie consiste à étudier trois solutions de captation à la source des particules lors de la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation. La première solution est un système de ventilation locale par soufflage-aspiration. L'étude de l'efficacité de cette solution est faite pour différents débits de soufflage, débits d'aspiration et vitesses de rotation. La deuxième solution est un carter (ou hotte) d'aspiration. La troisième solution consiste en une aspiration intégrée dans l'outil rotatif. L'étude de l'efficacité de ces deux dernières solutions est faite pour différents débits d'aspiration et vitesses de rotation.

5.2 Simulation expérimentale de la dispersion des particules ultrafines lors de polissage de granit rotatif et sans translation

Dans cette partie, il s'agit d'étudier la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation. L'étude de la dispersion est faite suivant une grille de 75 points de coordonnées disposées suivant le plan (D, l, h) comme il est indiqué sur la Figure 2.5.

Dans une première étape, il faut calibrer le débit d'alimentation de façon à n'avoir que l'influence de la vitesse de rotation sur l'émission des PUF comme il est le cas dans le polissage rotatif et sans translation. La Figure 5.1-a montre la calibration du débit des PUF de sel pour la plus petite vitesse de rotation de 1000 tr/min. Elle montre que pour un débit de 0,5 l/min il n'y a pas assez de particules générées pour voir le phénomène de dispersion lié à la rotation du disque. Pour des débits allant de 1 l/min à 4 l/min les PUF sont dispersées par la vitesse de rotation et atteignent un pic entre les distances horizontales 15 et 20 cm. À partir de cette distance, la concentration commence à diminuer à cause du phénomène de dilution des PUF dans l'air. Pour le débit de 5 l/min le pic de concentration diminue à cause de l'augmentation de débit d'alimentation en PUF de sel. Ces PUF sortent avec une vitesse radiale qui domine celle engendrée par la rotation du disque. Donc, le débit d'alimentation en PUF de 4 l/min est le plus convenable pour faire l'étude de dispersion. Avec ce débit, il est possible d'avoir l'influence de la vitesse de rotation seule sur le phénomène de la dispersion des PUF. La granulométrie des PUF qui arrive sous la plaque trouée est donnée à la Figure 5.1-b. Le pic de la concentration des PUF est atteint pour un diamètre de particule de 94,7 nm. Pour réduire l'erreur de mesure au maximum, chaque mesure est répétée 6 fois dans cette partie.

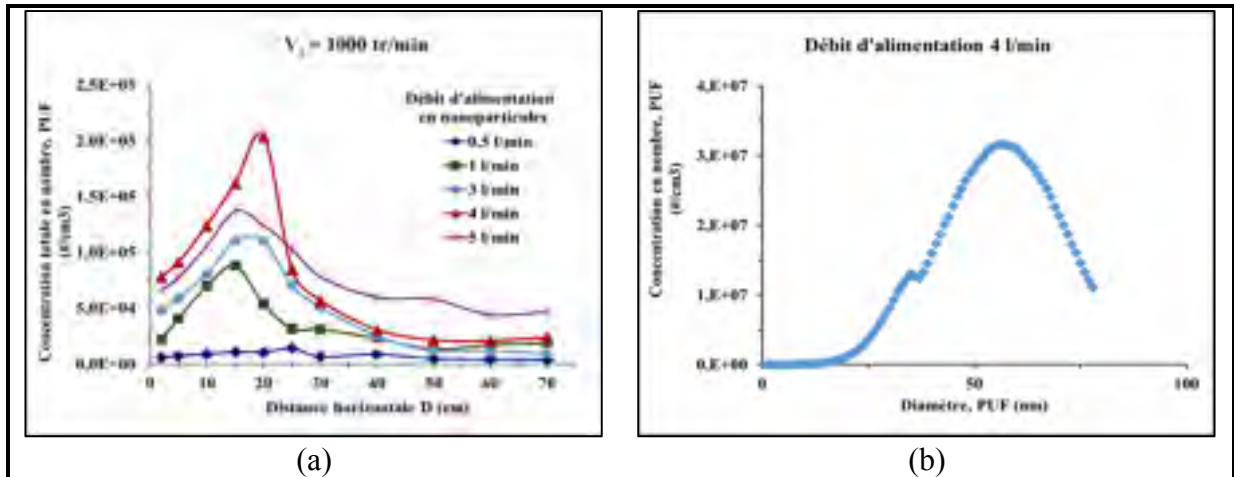


Figure 5.1 Alimentation en PUF de NaCl (a) Calibration de débit d'alimentation en PUF de sel (b) Granulométrie des PUF qui alimente la plaque trouée

La Figure 5.2 donne la dispersion des PUF dans le plan horizontal (D , l) suivant la distance horizontale h de 5 et de 20 cm pour les trois vitesses de rotation de 1000, 1750 et 2500 tr/min. Elle montre que pour la distance verticale $h = 5$ cm, le pic de la concentration totale en nombre des PUF est atteint pour une distance horizontale D de 20 cm pour les deux vitesses de rotation de 1000 et 1750 tr/min et de 35 cm pour la vitesse de rotation de 2500 tr/min. Pour la vitesse de rotation de 1000 tr/min, la concentration des PUF reste proche du disque et cette concentration commence à couvrir la totalité du domaine de dispersion au fur et à mesure que la vitesse augmente. Cette figure montre aussi que pour la distance verticale $h = 20$ cm, le niveau de concentration diminue considérablement pour les deux vitesses de rotation de 1000 et 1750 tr/min et diminue légèrement pour la vitesse de rotation de 2500 tr/min.

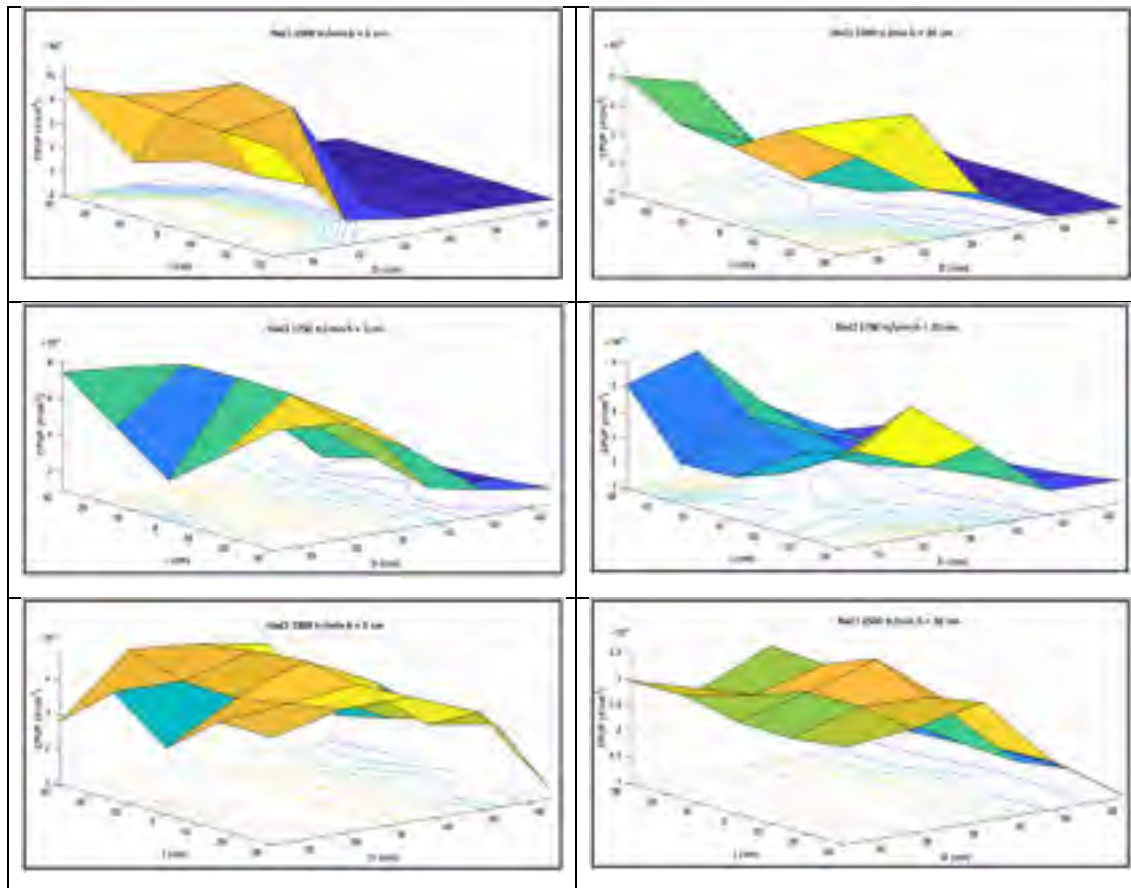


Figure 5.2 Évolution de la concentration totale en nombre des PUF en fonction de la vitesse de rotation dans le plan horizontal (D , l) pour les distances verticales (h) de 5 et 20 cm

La Figure 5.3 donne l'évolution de la granulométrie des PUF en fonction de la distance horizontale D à une distance verticale h de 5 cm et pour les trois vitesses de rotation 1000, 1750 et 2500 tr/min. Elle montre que le pic de concentration des PUF est localisé pour les différentes vitesses pour un diamètre de particule variant entre 63,8 et 88,2 nm.

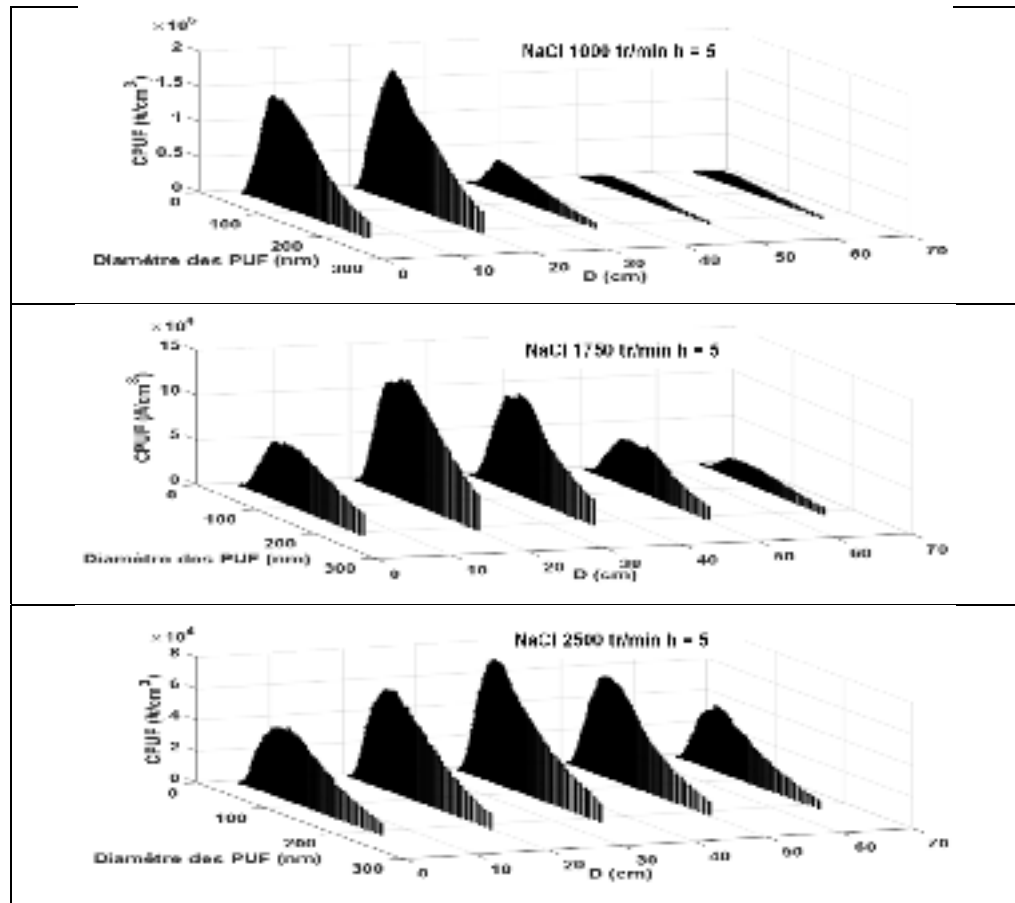


Figure 5.3 Évolution de la granulométrie des PUF à 1000, 1750 et 2500 tr/min en fonction de la distance horizontale D et à une distance verticale h de 5 cm

La Figure 5.4 présente la comparaison des résultats de la dispersion des PUF entre la simulation expérimentale et les deux phases de polissage rotatif et sans translation de granit suivant les distances : verticale et horizontale. Elle montre une similarité entre les résultats. La Figure 5.4-a montre que dans la simulation expérimentale et dans le polissage rotatif et sans translation, la concentration en PUF augmente jusqu'à atteindre un pic puis diminue suivant la distance horizontale. La Figure 5.4-b montre que dans les deux cas, cette concentration diminue suivant la distance verticale sauf pour la phase de finition du polissage rotatif et sans translation où elle passe par un pic puis elle diminue. La Figure 5.5 montre une similarité entre la distribution des diamètres des PUF émises dans la simulation expérimentale et celles émises lors du polissage rotatif et sans translation (pour une distribution des PUF de diamètre variant entre 10 et 100 nm). La comparaison montre l'efficacité du banc de

simulation expérimentale de polissage rotatif et sans translation à simuler ce procédé et la fiabilité des résultats qui vont être obtenus.

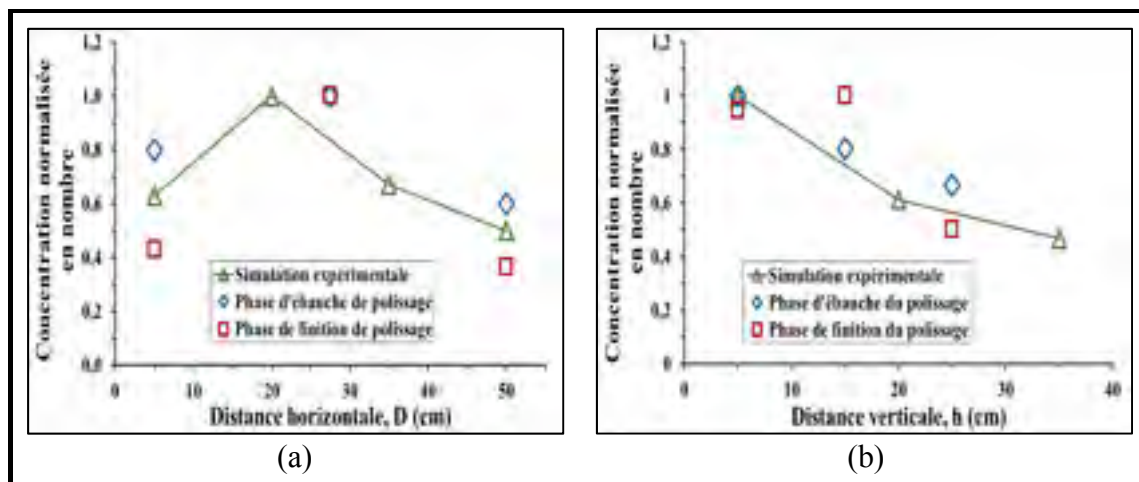


Figure 5.4 Comparaison des résultats entre la simulation expérimentale et le polissage rotatif et sans translation de l'évolution moyenne de CPUF suivant les distances :
(a) Horizontale (b) Verticale

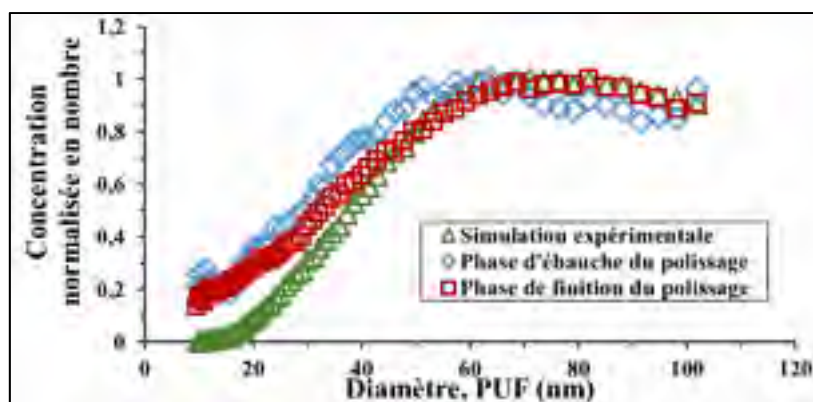


Figure 5.5 Comparaison entre la simulation expérimentale et le polissage rotatif et sans translation de l'évolution moyenne de la granulométrie des PUF émises

5.3 Étude des solutions de réduction de poussière à la source

5.3.1 Réduction de la poussière à la source par le système de ventilation locale soufflage-aspiration

Dans cette partie, Il s'agit d'étudier l'efficacité du système de ventilation locale soufflage-aspiration mis en place pour la réduction des émissions des poussières à la source lors de la

simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation. Le temps de simulation est de 60 s. 4 niveaux de vitesse de rotation 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min ont été utilisés. Le débit d'aspiration de la hotte d'aspiration varie entre 1250, 1750 et 2250 l/min (noté D_a). Le débit de soufflage varie entre 5 et 100 l/min avec une incrémentation de 5 l/min. Le point de contrôle de l'efficacité est à une distance du disque rotatif de coordonnées 25 cm suivant la direction horizontale D et 0 cm suivant la direction verticale h . La Figure 5.6 montre les conditions de simulation expérimentale et la position du point de contrôle du prélèvement des PUF de NaCl pour la détermination de l'efficacité à 95% du système de ventilation soufflage-aspiration (3D Figure 2.8). Pour s'assurer que toutes les PUF sont captées et évacuées par la hotte des mesures sont faites sur les côtés gauche, droit et celui du haut de celle-ci. L'efficacité est calculée suivant la formule de l'équation (2.5).

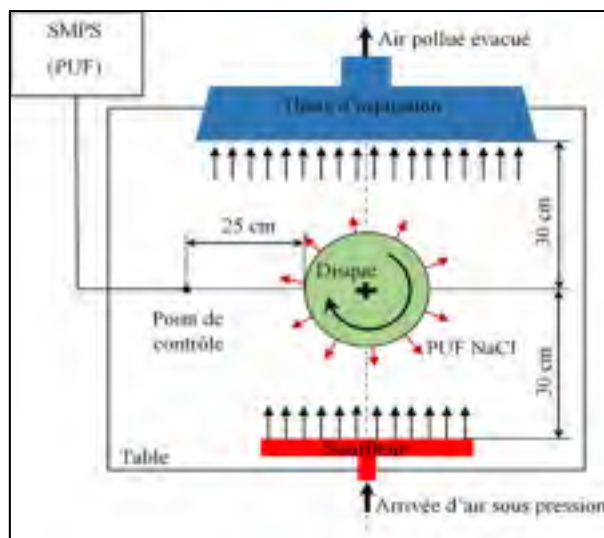


Figure 5.6 Système de ventilation locale par soufflage-aspiration

Le sens de rotation du disque rotatif a un effet sur la vitesse d'écoulement de l'air qui arrive au niveau de la hotte d'aspiration. Pour voir cette influence, des mesures de vitesse à gauche et à droite du disque rotatif à l'emplacement de cette dernière sont faites pour deux vitesses de rotation 1000 et 2500 tr/min. La Figure 5.7 montre que le soufflage commence à dominer la rotation avec un débit de 15 l/min pour la vitesse de 1000 tr/min et de 25 l/min pour la vitesse de 2500 tr/min. Elle montre aussi que le sens de rotation du disque a une influence positive à

droite de la hotte d'aspiration et une influence négative à gauche de celle-ci. À droite de la hotte, le sens de rotation aide l'écoulement de l'air et inversement à sa gauche. L'augmentation et la diminution sont de même valeur de 0,12 m/s pour 1000 tr/min et de 0,2 m/s pour 2500 tr/min.

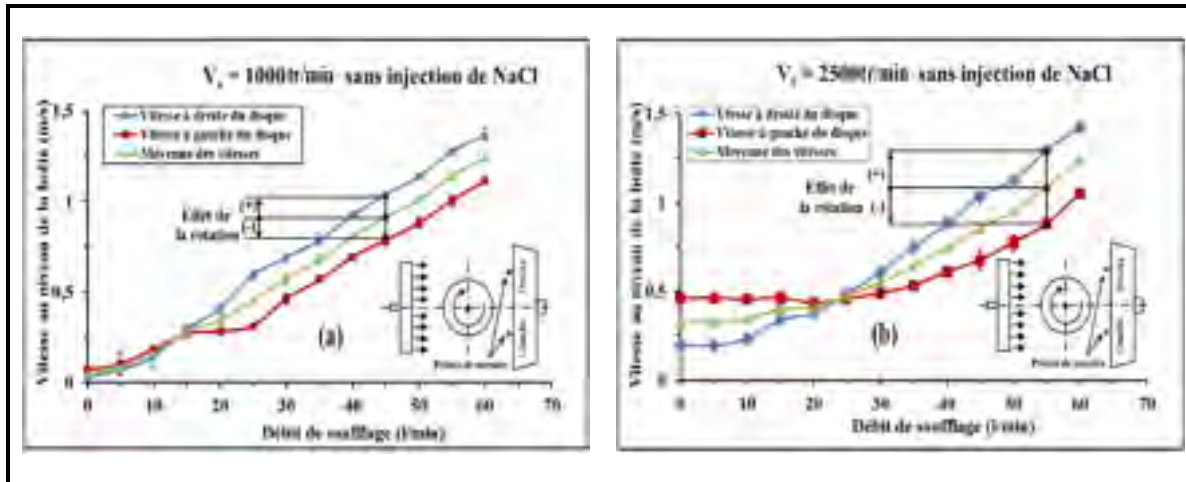


Figure 5.7 Effet de la rotation du disque rotatif sur la vitesse de l'air reçu au niveau de la hotte pour différentes vitesses de rotation (a) 1000 tr/min (b) 2500 tr/min (la représentation de la hotte est à titre indicatif seulement)

La Figure 5.8 donne la variation de l'efficacité à 95% du système de ventilation soufflage-aspiration en fonction de débit de soufflage et de la vitesse de rotation du disque lors de la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation et pour des débits d'aspiration de la hotte d'aspiration de 1250, 1750 et 2250 l/min. La figure montre que plus que la vitesse de rotation augmente plus que le débit de soufflage nécessaire pour évacuer les PUF vers la hotte d'aspiration augmente. Elle montre aussi que l'augmentation de débit d'aspiration de la hotte d'aspiration fait diminuer le débit de soufflage nécessaire pour diriger les PUF vers cette dernière. L'augmentation du débit d'aspiration de la hotte facilite l'écoulement de l'air transportant les PUF de sel. Cette augmentation fait diminuer le débit de soufflage nécessaire à l'évacuation de ces PUF vers la hotte. Pour le débit d'aspiration de 1250 l/min, il a été impossible de trouver le débit de soufflage nécessaire pour ramener les PUF de NaCl vers la hotte pour la vitesse 2500 tr/min. En effet, les PUF arrivent à la hotte en grande quantité et retournent vers l'extérieur de celle-ci puisque l'aspiration est insuffisante pour les faire toutes évacuer.

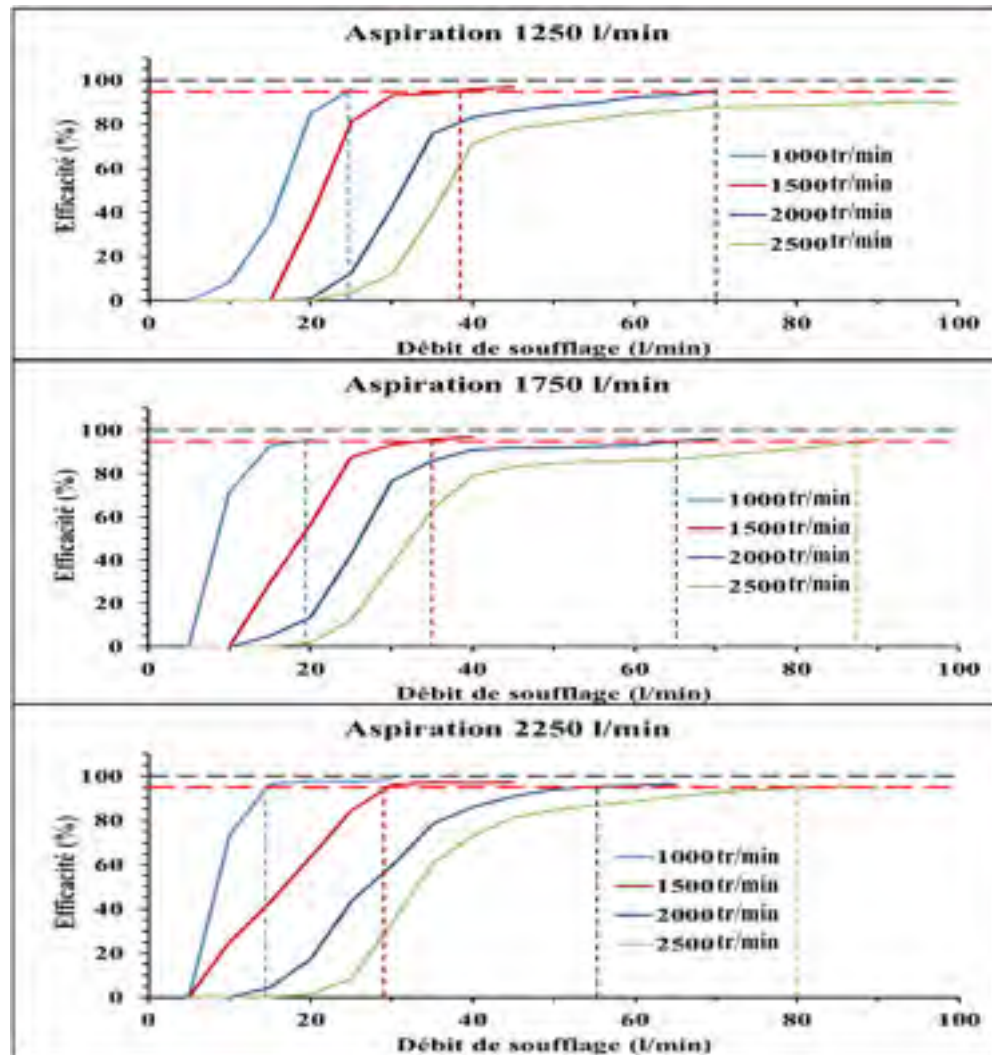


Figure 5.8 Évolution de l'efficacité à 95 % du système soufflage-aspiration en fonction de débit de soufflage et de la vitesse de rotation pour des débits d'aspiration de 1250, 1750 et 2000 l/min de la hotte d'aspiration

Le Tableau 5.1 montre la variation du débit de soufflage en fonction de la vitesse de rotation du disque rotatif et du débit d'aspiration de la hotte d'aspiration. Cette variation est représentée à la Figure 5.9-a. Cette figure montre qu'il existe une relation linéaire entre le débit de soufflage D_s et la vitesse de rotation du disque rotatif V_s . Cette relation est donnée pour chaque débit d'aspiration de la hotte d'aspiration comme suit :

- Débit de la hotte d'aspiration de 1250 l/min

$$D_s = 0,05 V_s - 25,00 \quad (5.1)$$

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 95 \%$

- Débit de la hotte d'aspiration de 1750 l/min

$$D_s = 0,05 V_s - 30,35 \quad (5.2)$$

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 98 \%$

- Débit de la hotte d'aspiration de 2250 l/min

$$D_s = 0,05 V_s - 35,80 \quad (5.3)$$

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 99 \%$. La formule générale de cette relation peut s'écrire comme suit :

$$D_s = 0,05 V_s - f(D_a) \quad (5.4)$$

Cette relation est vraie pour des vitesses de rotation supérieures à 1000 tr/min. Le terme $f(D_a)$ est déterminé en traçant celui obtenu pour les trois fonctions précédentes en fonction du débit d'aspiration correspondant. La Figure 5.9-b montre que ce terme varie de façon linéaire en fonction du débit d'aspiration de la hotte et l'équation obtenue est comme suit :

$$f(D_a) = 0,01 D_a + 11,48 \quad (5.5)$$

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 100 \%$. Donc l'équation (5.4) devient comme suit :

$$D_s = 0,05 V_s - 0,01 D_a - 11,48 \quad (5.6)$$

Cette relation est vraie pour des valeurs de vitesse de rotation supérieures à 1000 tr/min.

Tableau 5.1 Détermination de débit de soufflage permettant d'avoir une efficacité de 95 % du système de ventilation soufflage-aspiration en fonction de la vitesse de rotation du disque et du débit d'aspiration de la hotte d'aspiration

	Aspiration de 1250 l/min	Aspiration de 1750 l/min	Aspiration de 2250 l/min
Vitesse de rotation (tr/min)	Soufflage (l/min)	Soufflage (l/min)	Soufflage (l/min)
1000	24	19,5	13
1500	38	34	28
2000	70	65	55
2500	-----	87	80

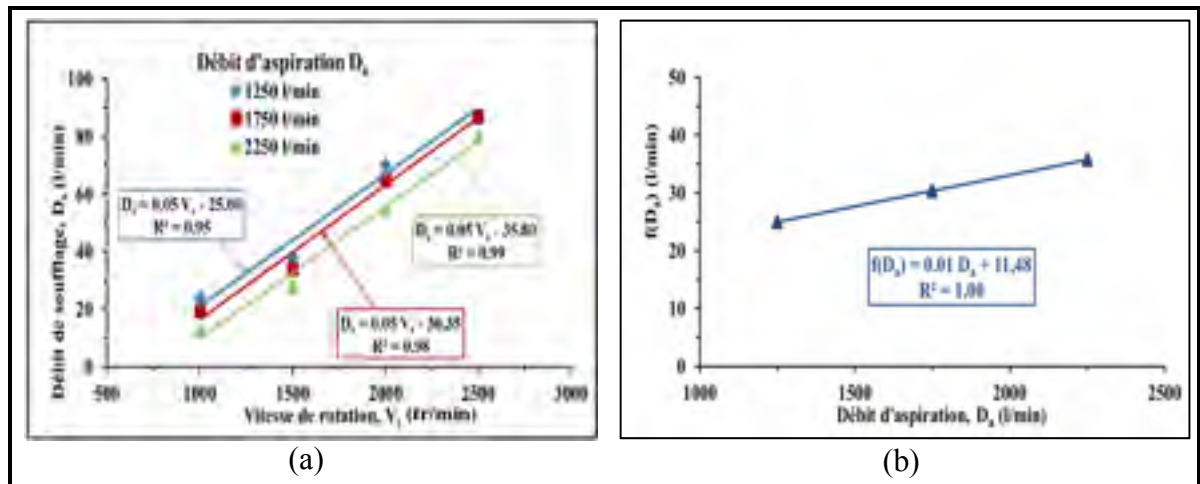


Figure 5.9 Détermination de la relation entre le débit de soufflage D_s , la vitesse de rotation du disque rotatif V_s et le débit d'aspiration D_a (a) Relation D_s et V_s (b) Relation $f(D_a)$ et D_a

5.3.2 Réduction de la poussière à la source par le carter d'aspiration

Dans cette partie, Il s'agit d'étudier l'efficacité à 95% du carter d'aspiration mis en place pour la réduction des émissions des poussières à la source lors de la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation. Le carter est placé sur le disque rotatif avec un jeu, entre lui et la table, de 1 mm. Le temps de simulation est de 60 s. La vitesse de rotation varie entre 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min. Le débit d'aspiration du carter d'aspiration varie entre 0 et 20 l/min avec une incrémentation de 5 l/min. Le point de contrôle de l'efficacité est à une distance du carter d'aspiration de coordonnées 1 cm suivant la direction horizontale D et 0 cm suivant la direction verticale h . La Figure 5.10 montre les conditions de simulation expérimentale et la position du point de contrôle de prélèvement des PUF de NaCl pour la

détermination de l'efficacité du carter d'aspiration (3D Figure 2.11). L'efficacité est calculée suivant la formule de l'équation (2.5).

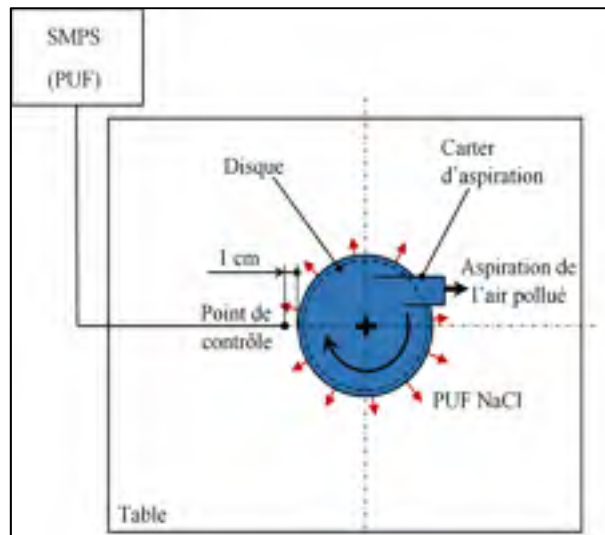


Figure 5.10 Système de ventilation locale par carter d'aspiration

La Figure 5.11 donne la variation de l'efficacité à 95% du carter d'aspiration en fonction de débit d'aspiration et de la vitesse de rotation du disque lors de la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation. Elle montre que le débit nécessaire pour atteindre une efficacité de 95% du carter d'aspiration pour les différentes vitesses de rotation système est de 13,5 l/min.

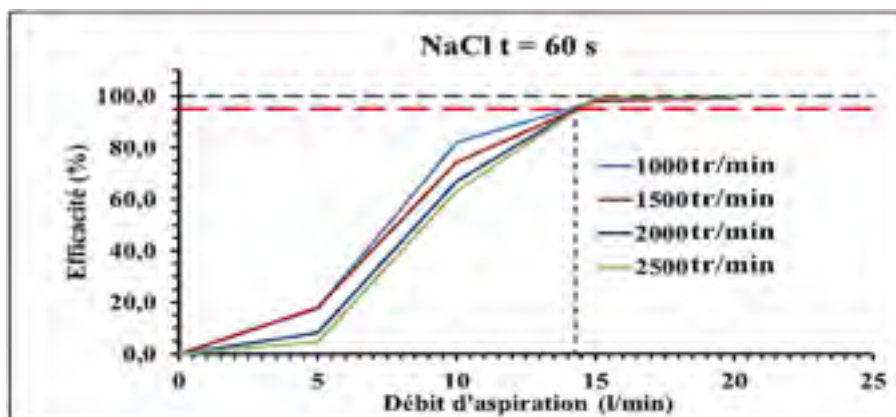


Figure 5.11 Évolution de l'efficacité à 95 % du carter d'aspiration en fonction de débit d'aspiration pour différentes vitesses de rotation

5.3.3 Réduction de la poussière à la source par l'aspiration intégrée

Dans cette partie, Il s'agit d'étudier l'efficacité à 95% de l'aspiration intégrée mis en place pour la réduction des émissions des poussières à la source lors de la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation. L'aspiration intégrée permet l'évacuation de la poussière produite par l'action des secteurs abrasifs sur la pièce. L'aspiration de cette poussière est faite à travers de six fentes comme il est montré à Figure 5.12. Le temps de simulation est de 60 s. La vitesse de rotation varie entre 1500 et 2500 tr/min. Le débit d'aspiration du carter d'aspiration varie entre 0 et 60 l/min avec une incrémentation de 5 l/min. Le point de contrôle de l'efficacité est à une distance du disque rotatif de coordonnées 25 cm suivant la direction horizontale D et 0 cm suivant la direction verticale h. La Figure 5.12 montre les conditions de simulation expérimentale et la position du point de contrôle de prélèvement des PUF de NaCl pour la détermination de l'efficacité du carter d'aspiration (3D Figure 2.12). L'efficacité est calculée suivant la formule de l'équation (2.5).

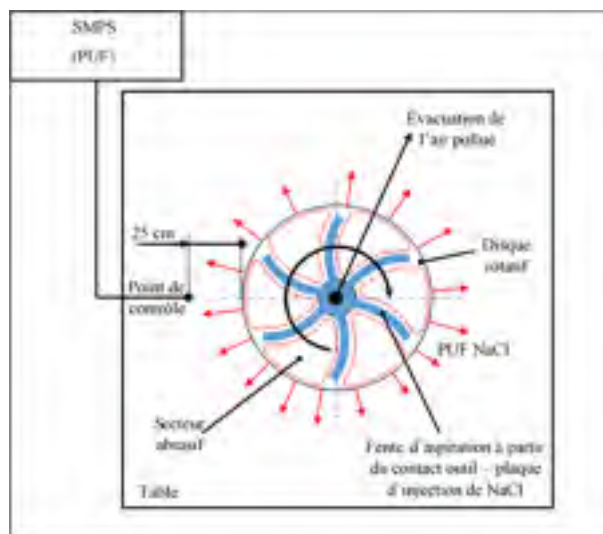


Figure 5.12 Système de ventilation locale par aspiration intégrée

La Figure 5.13 donne la variation de l'efficacité à 95% de l'aspiration intégrée en fonction de débit d'aspiration et de la vitesse de rotation du disque lors de la simulation expérimentale du polissage rotatif et sans translation. Elle montre que le débit nécessaire pour atteindre une

efficacité de 95% du carter d'aspiration pour une vitesse faible de 1500 tr/min de 30 l/min. Par contre, pour une vitesse élevée de 2500 tr/min l'efficacité de 95% n'est pas atteinte à cause de la grande puissance à laquelle les PUF de sel sont éjectées par le disque rotatif. À l'inverse de la solution de captation par le carter d'aspiration, l'aspiration intégrée est plus efficace pour le polissage des surfaces inclinées. Dans ce cas, les fentes d'aspiration sont placées au-dessous de l'outil abrasif et aspirent directement à partir du contact outil pièce.

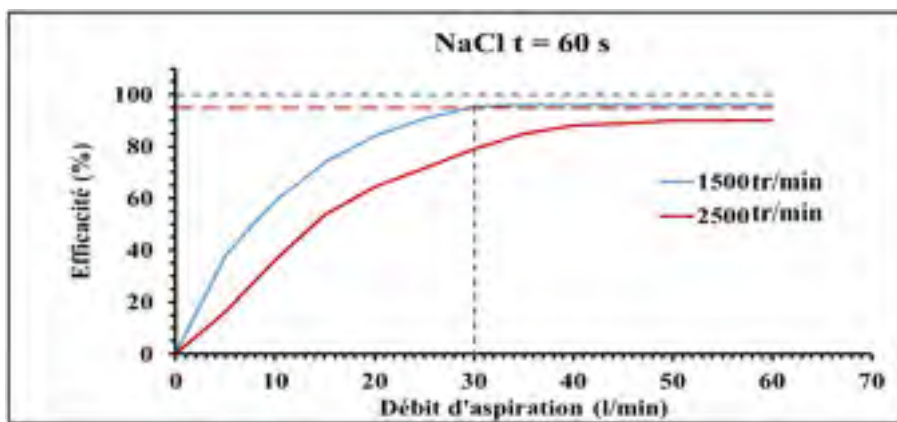


Figure 5.13 Évolution de l'efficacité à 95% de l'aspiration intégrée en fonction de débit d'aspiration pour différentes vitesses de rotation

5.4 Discussion et conclusion

Dans le polissage rotatif et sans translation, c'est la vitesse de rotation qui influence l'émission des PUF. La calibration du débit d'alimentation lors de la simulation du polissage rotatif et sans translation montre qu'un débit de 4 l/min est le plus approprié. Avec ce débit, il est possible de faire l'étude de dispersion. Avec ce débit, il est aussi possible d'avoir seulement une influence de la vitesse de rotation sur l'émission des PUF. L'étude de la granulométrie des PUF générées à la source d'émission montre qu'elles ont un pic de concentration observé à un diamètre de particules de 94,7 nm.

L'étude de la dispersion suivant un plan horizontal fixé à une distance verticale $h = 5$ cm montre que la concentration des PUF passe par un pic à une distance horizontale D de 20 cm pour les vitesses de rotation de 1000 et 1750 tr/min et de 35 cm pour la vitesse de rotation de 2500 tr/min. L'étude de cette dispersion suivant un plan horizontal fixé à une distance verticale

$h = 20$ cm montre que le niveau de concentration diminue considérablement pour les deux vitesses de rotation de 1000 et 1750 tr/min et diminue légèrement pour la vitesse de rotation de 2500 tr/min. Les PUF couvrent la totalité de l'espace de dispersion suivant les distances horizontales (D , l) et la distance verticale h pour la vitesse de rotation de 2500 tr/min. Pendant la minute d'acquisition, c'est la même quantité des PUF générées qui est dispersée par les différentes vitesses de rotation. À l'inverse du polissage expérimental, cette concentration augmente avec la vitesse de rotation. En effet, dans le cas de polissage l'augmentation de la vitesse de rotation conduit à une génération plus importante des PUF. Cependant, en comparaison avec le polissage rotatif et sans translation, la concentration des PUF atteint aussi un pic qui est à une distance de 27,5 cm. L'étude de la granulométrie des PUF dispersées suivant la distance horizontale D montre qu'elles ont un pic de concentration observé à un diamètre de particules variant entre 63,8 et 88,2 nm. Cette gamme de diamètres est comprise dans celle trouvée pour le pic des PUF générées lors du polissage rotatif et sans translation de granit qui varie entre 12,2 et 98,2 nm.

L'étude de la solution de captation à la source par le système soufflage-aspiration montre que le sens de rotation du disque rotatif a une influence sur la vitesse de l'écoulement d'air dirigé par le soufflage vers la hotte d'aspiration. À droite de la hotte, le sens de rotation aide l'écoulement tandis qu'à sa gauche le sens de rotation s'oppose à celui-ci. Le soufflage commence à dominer la rotation avec un débit de 15 l/min pour la vitesse de 1000 tr/min et de 25 l/min pour la vitesse de 2500 tr/min. La variation de la vitesse d'écoulement d'air mesurée au niveau de la position de la hotte d'aspiration est de $\pm 0,12$ m/s pour la vitesse de rotation de 1000 tr/min et de $\pm 0,2$ m/s pour la vitesse de rotation de 2500 tr/min. L'étude de la solution de captation à la source par le système soufflage-aspiration montre que le débit de soufflage nécessaire pour atteindre une efficacité à 95% augmente avec la vitesse de rotation du disque rotatif et diminue avec le débit d'aspiration. Cette relation peut être exprimée par une équation linéaire regroupant ces trois paramètres (débit de soufflage, vitesse de rotation du disque et débit d'aspiration de la hotte). Cette équation est valable pour des vitesses de rotation du disque supérieures à 1000 tr/min. L'étude de la solution de captation à la source par le carter (ou hotte) d'aspiration montre qu'un débit d'aspiration de 13,5 l/min est suffisant pour

atteindre une efficacité de 95%. Cette efficacité est conforme avec celle trouvée dans la littérature qui est supérieure à 90% (Croteau et al., 2002 ; Akbar-Khanzadeh et al., 2007). L'étude de la solution de captation à la source par l'aspiration intégrée montre qu'un débit d'aspiration de 30 l/min est suffisant pour atteindre l'efficacité de 95% avec une vitesse de rotation faible de 1500 tr/min. Pour des vitesses élevées, cette solution fournit une efficacité légèrement inférieure à 95%. L'efficacité de captation des systèmes de captation proposés (soufflage-aspiration, carter d'aspiration et aspiration intégrée) est conforme à celle trouvée dans la littérature qui est supérieure à 90% (Huang et al., 2004 ; Cao et al., 2016). Pour augmenter l'efficacité de la captation des PUF il est possible de combiner les trois solutions.

L'étude la simulation expérimentale du polissage a permis de :

- Valider un banc d'essai de simulation expérimentale de polissage rotatif de granit.
- D'étudier l'efficacité de trois systèmes (basés sur la ventilation locale) de réduction à la source de l'émission de poussière dégagée lors du polissage rotatif de granit.

Les résultats trouvés dans cette partie peuvent servir aux industriels (de transformation de granit) pour concevoir et mettre en place dans leurs entreprises des solutions de captation à la source de poussière. Ces solutions peuvent être couplées entre eux et aussi avec les paramètres optimisés trouvés lors de l'étude expérimentale de polissage de granit pour augmenter l'efficacité de la captation.

CONCLUSION

L'objectif du présent travail est de trouver des moyens de réduction à la source des particules de poussière dégagées lors du polissage de granit. Cette poussière constituée des PF et PUF est très dangereuse, car elle peut contenir des taux élevés de quartz. Ce quartz peut conduire à des lésions pulmonaires graves pour les travailleurs en cas d'exposition prolongée.

La revue de la littérature a permis une compréhension de plusieurs points sur le processus de polissage comme :

- Les conditions expérimentales pour réaliser le polissage rotatif de façon industrielle.
- Le mécanisme d'enlèvement qui varie de la rupture fragile à la rupture ductile.
- La mesure de la qualité de la surface par la rugosité et la brillance qui lui est inversement proportionnelle.
- L'émission des particules de poussière lors du polissage de granit qui est influencée positivement par la vitesse de coupe et négativement par la vitesse d'avance.
- L'étude des procédés d'usinage similaires au polissage montre que les particules fines sont éjectées du contact outil-pièce et les particules ultrafines suivent l'écoulement imposé par le champ de la vitesse de rotation de l'outil.
- Lors de polissage, comme pour d'autre opération d'usinage, les particules de diamètre inférieur à 4 μm restent en suspension dans l'air du travail.
- L'utilisation des moyens de protection contre la poussière de quartz comme la ventilation générale, l'eau et de la ventilation locale réduit efficacement l'exposition mais pas suffisamment pour la garder sous les PELs.

L'étude du polissage graduel tel qu'il est pratiqué en industrie a permis de trouver un point de séparation ébauche-finition au niveau de l'abrasif de grandeur des grains G 400. Ce qui a permis la décision d'étudier séparément les deux phases d'ébauche et de finition. L'étude montre que les concentrations des PF sont plus importantes à la phase d'ébauche que ceux à

la phase de finition et que le granit noir produit plus des PF que le granit blanc. L'étude de l'évolution de la rugosité montre qu'il y a une relation exponentielle entre celle-ci et la grandeur des grains abrasifs. L'étude de la dispersion dans l'espace intérieur de la machine CNC Mazak montre qu'elle est influencée par l'accumulation des particules fines à l'intérieure de la machine.

L'étude de l'émission à la source des PF et des PUF lors des deux phases de polissage régulier de granit montre que leur concentration augmente avec la vitesse de rotation du disque abrasif et diminue avec la vitesse d'avance. L'optimisation faite pour minimiser cette émission montre qu'il faut prendre une vitesse de rotation variant entre 1000 et 1375 tr/min et une vitesse d'avance variant entre 21,25 et 25,5 mm/s pour minimiser la concentration à la source des PF et PUF.

L'étude de l'état de surface lors des deux phases de polissage régulier de granit montre que la rugosité a tendance à s'améliorer en augmentant la vitesse de rotation du disque abrasif. L'étude montre aussi que l'augmentation de la vitesse d'avance fait améliorer la rugosité dans la phase de l'ébauche et inversement dans la phase de la finition. L'optimisation faite pour minimiser cette rugosité montre qu'il faut prendre une vitesse de rotation de 2125 tr/min et une vitesse d'avance variant de 25,5 mm/s pour minimiser la rugosité de surface dans la phase d'ébauche. Pour la phase de finition, il faut prendre une vitesse de rotation de 2500 tr/min et une vitesse d'avance de 8,5 mm/s. Pour faire un compromis entre la réduction de poussière et l'obtention d'un bon état de surface, il faut prendre une vitesse de rotation de 1500 tr/min et une vitesse d'avance de 17,5 mm/s pour les deux phases d'ébauche et de finition des granits.

L'étude de la dispersion (à l'intérieure de la Huron K2X10) des PF et PUF lors des deux phases de polissage régulier de granit montre que leur concentration diminue suivant la distance horizontale. Suivant la distance verticale, cette concentration passe par un pic à la distance verticale de 15 cm et puis diminue jusqu'à la distance verticale de 25 cm. L'optimisation faite pour maximiser cette dispersion montre que la valeur maximale de concentration totale des PF est obtenue au point de coordonnées $D = 5$ cm et $h = 10$ cm pour les deux phases de

polissage des deux granits. Pour la phase de finition du granit noir cette valeur est localisée au point de coordonnée $D = 27,5$ cm et $h = 15$ cm. La valeur maximale de concentration totale des PUF est obtenue au point de coordonnées $D = 5$ cm et $h = 5$ cm pour les deux phases de polissage des deux granits. La valeur maximale des concentrations de PF et PUF sont obtenues pour une valeur de vitesse de rotation maximale et une vitesse d'avance minimale.

L'étude de l'évolution de la concentration massique de la poussière respirable montre que la phase d'ébauche dégage plus de poussière respirable (constituée de PF de diamètre inférieur à $4 \mu\text{m}$). L'étude de la concentration massique de quartz trouvée dans cette poussière respirable montre que cette concentration dépasse la limite d'exposition VEMP et dépasse aussi la limite d'excursion qui est de 5 fois la VEMP (dans la zone respiratoire d'un travailleur). Ces limites sont à ne pas dépasser durant l'exposition du travailleur à la poussière de quartz selon le RSST. Cela montre que le travailleur pourrait être exposé à des taux très élevés de quartz lors du polissage de granit et que sa santé peut être gravement compromise.

La classification des particules de la poussière de quartz (selon leur diamètre) dégagée lors de polissage rotatif de granit (dans la phase d'ébauche) montre que le taux de silicium augmente jusqu'au diamètre de particules de $3,102 \mu\text{m}$ et puis il diminue jusqu'au diamètre de particules de $8,175 \mu\text{m}$. Les PF générées ont une forme en agrégats composés d'accumulation de PUF et les PUF ont une forme irrégulière. Ce résultat montre que généralement les particules émises PM $2,5$ susceptibles d'atteindre la région alvéolaire sont constituées essentiellement de PUF ou d'accumulation de PUF. Ces PUF transportant une grande quantité de quartz peuvent être très nocives pour les poumons des travailleurs.

L'étude du polissage rotatif et sans translation montrent que faire un polissage sur place ou avec de faibles mouvements d'avance présente le pire cas d'exposition pour les travailleurs. En effet, l'exposition dans ce cas est plus importante que dans le cas de polissage régulier. Ce type de polissage possède une ressemblance avec le polissage régulier et peut servir de base à la conception des simulations expérimentale et numérique de polissage de granit. Ces simulations vont permettre d'étudier le processus de polissage de granit et de rechercher des

solutions de captation de particules de poussière en toute sécurité (sans exposition à la poussière de quartz).

L'étude de la dispersion dans le cas de la simulation du polissage rotatif et sans translation montre que la concentration des PUF se comporte de la même façon que dans le polissage réel. L'étude des solutions de captation à la source des émissions de poussière lors du polissage rotatif par le système soufflage-aspiration, par le carter d'aspiration et par l'aspiration intégrée montrent qu'ils peuvent réduire considérablement ces émissions.

Le présent travail répond à une grande partie d'un projet de recherche de grande envergure regroupant l'École de technologie supérieure, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail et l'École polytechnique de Montréal. Ce travail a permis de chercher des solutions pour réduire les émissions de poussière à la source lors de la transformation du granit et du quartz. L'originalité de ce travail est de coupler l'optimisation du procédé industriel à la ventilation locale pour maximiser la performance de réduction à la source des émissions et améliorer le fini de la surface. L'intégration de la SST (santé et sécurité du travail) à la qualité de la finition du produit encouragera les industriels à adopter les solutions identifiées dans ce projet. Les solutions identifiées pourraient servir à d'autres secteurs industriels de transformation de matériaux comme celui de la construction, des mines, de l'aéronautique, etc.

RECOMMANDATIONS

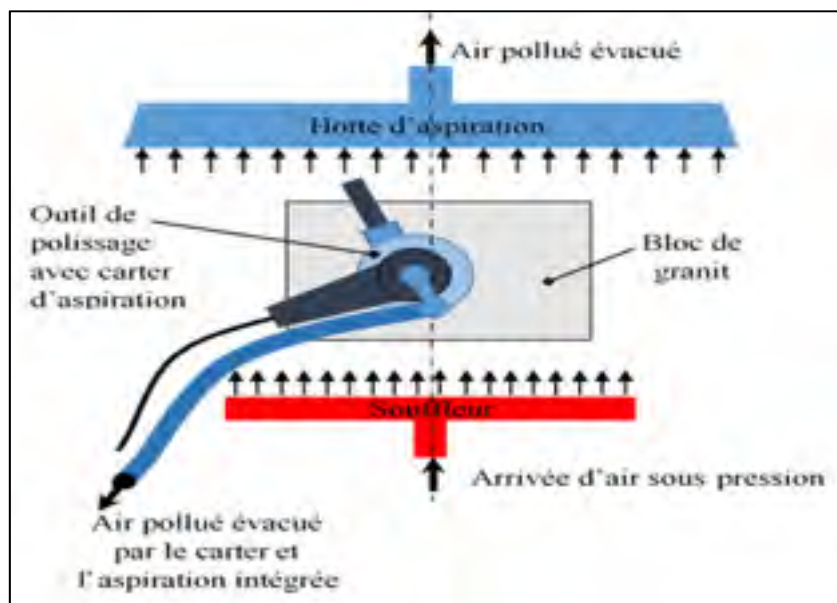
Le présent travail a pour objectif la compréhension de l'émission et de la dispersion de poussière lors du polissage de granit et le développement des moyens de captation à la source. Les résultats montrent que l'environnement proche du travailleur est contaminé de PF et PUF de poussière avec des taux considérables de quartz surtout dans la phase d'ébauche. L'expérimentation est faite dans un milieu fermé (à l'intérieur d'une machine-outil CNC) qui permet de se protéger de l'exposition au quartz. Cependant, dans ce cas il est impossible d'étudier l'influence de la ventilation générale (dans l'environnement de travail réel) sur la dispersion des particules de poussière. En effet, la vitesse et la direction de l'air dans le milieu de travail influencent le mouvement de ces particules. Aussi, l'expérimentation est faite pour le cas de polissage de surface plane où le contact outil-pièce est maximal, l'émission de poussière est maximale et la dispersion des particules de poussière est maximale dans la direction horizontale. Par contre, si le polissage est fait sur une surface inclinée le contact outil-pièce va diminuer et par conséquent l'émission de poussière aussi. Dans ce cas, il faut étudier avec approfondissement la dispersion et voir si les particules vont se disperser plus dans la direction verticale et atteindre facilement le système respiratoire du travailleur. Pour mieux se rapprocher des conditions de polissage réel et tout en travaillant en toute sécurité, il est recommandé de faire l'expérimentation dans une cabine ventilée. Celui qui va faire le polissage dans cette cabine doit porter une combinaison de protection totale et un masque complet avec filtration d'air.

Les trois solutions, de captation de poussière à la source, étudiées présentent une bonne efficacité. Cependant, il manque deux facteurs essentiels qui sont le facteur humain et le facteur de ventilation générale. En effet, la grandeur du travailleur, son positionnement et son comportement durant le polissage peuvent influencer les résultats expérimentaux. De plus, l'existence d'une ventilation générale peut influencer la dispersion des particules de poussière. Ces constatations, confirme le besoin de faire les expérimentations dans une cabine ventilée et avec un travailleur exécutant le polissage réel. Pour augmenter l'efficacité de la captation des émissions de poussière à la source, il est possible de combiner les trois solutions. En plus, il est recommandé de prendre les valeurs de vitesse de rotation et de vitesse d'avance obtenue

lors de l'optimisation permettant la réduction des émissions de poussière. Ce qui permet d'augmenter plus l'efficacité de la captation à la source.

Pour éviter l'exposition des travailleurs au quartz dégagée lors du polissage de granit, il est recommandé aux industriels de transformation de granit :

- D'inciter leurs clients à utiliser des pierres architecturales qui ne contiennent pas de quartz. Même si leur choix va être limité il faut qu'ils soient conscients qu'avec leur geste ils protègent la santé des travailleurs. Pour mieux aider les industriels, il faut dresser une liste de tous les types de granit existants au Québec avec leur taux de quartz correspondant.
- De diminuer, dans la mesure du possible les étapes de polissage dans la phase d'ébauche.
- D'utiliser un dispositif de réduction de poussière à la source composé d'un système soufflage-aspiration, un carter (hotte) d'aspiration et une aspiration intégrée. Le dispositif est montré à la figure suivante.



Dispositif recommandé pour réduire l'exposition des travailleurs à la poussière de quartz lors du polissage de granit

- Le travailleur doit se positionner de façon à ne pas bloquer l'écoulement de l'air du souffleur vers la hotte d'aspiration.
- D'utiliser une vitesse de rotation moyenne de 1500 tr/min et une vitesse d'avance moyenne de 17 mm/s dans les deux phases de polissage des granits.
- De sensibiliser les travailleurs à propos du risque d'exposition au quartz et de les former sur les moyens de protection qu'ils mettent à leur disposition.
- De mettre en place une procédure de nettoyage de la poussière de quartz qui peut se déposer sur le lieu du travail, sur les outils utilisés et sur les vêtements de travail. Ce nettoyage doit être fait par un aspirateur.
- De demander à leurs travailleurs de nettoyer et laver les parties du corps exposées à la poussière et contenant des poils, car les poils attirent les particules de poussière par effet électrostatique.

Pour les perspectives de recherche, nous recommandons de :

- Valider l'efficacité des moyens de captation de poussière combinés et les tester sur le terrain.
- Étudier l'émission et la dispersion lors du polissage incliné des bords des pièces et voir l'efficacité des moyens de réduction dans ce cas.
- Faire une liste qui comporte toutes les variétés de granit au Québec avec leur taux de quartz correspondant.
- Étudier l'émission et la dispersion dans le cas de polissage de granit synthétique (à 97% de quartz). Faire la caractérisation de la poussière respirable dans ce cas et la comparer à celle faite pour le granit naturel.

ANNEXE I

PLANS D'EXPÉRIENCE POUR L'ÉTUDE STATISTIQUE DE L'ÉMISSION DE POUSSIÈRE LORS DU POLISSAGE

Tableau-A I-1 Plan d'expérience pour chacune des combinaisons granit-abrasif :
blanc-G100, blanc-G800, noir-G100 et noir-G800 pour le polissage régulier.

(c) : points de répétition au centre (arb) : point arbitraire. Cas d'étude d'émission

N°	V _s (tr/min)	f (mm/s)	CPF		CPUF		R _a (μm)	B _r (Gloss)
			Nombre (#/cm ³)	Masse (mg/cm ³)	Nombre (#/cm ³)	Masse (μg/cm ³)		
1	1000	8,5						
2	1000	17						
3	1000	25,5						
4	1750	8,5						
5	1750	17						
6	1750	25,5						
7	2500	8,5						
8	2500	17						
9	2500	25,5						
(c)	1750	17						
(c)	1750	17						
(c)	1750	17						
(arb)	1500	12,75						
(arb)	1000	17						
(arb)	1750	8,5						

Tableau-A I-2 Essais à réaliser pour chacune des combinaisons granit-abrasif :
blanc-G100, blanc-G800, noir-G100 et noir-G800 pour le polissage
rotatif et sans translation (f = 0 mm/s). Cas d'étude d'émission

N°	V _s (tr/min)	CPF		CPUF		R _a (μm)	B _r (Gloss)
		Nombre (#/cm ³)	Masse (mg/cm ³)	Nombre (#/cm ³)	Masse (μg/cm ³)		
1	1000						
2	1750						
3	2500						

ANNEXE II

PLANS D'EXPÉRIENCE POUR L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA DISPERSION DE POUSSIÈRE LORS DU POLISSAGE

Tableau-A II-1 Plan d'expérience pour chacune des combinaisons granit-abrasif :
blanc-G100, blanc-G800, noir-G100 et noir-G800 pour le polissage régulier.

(c) : points de répétition au centre (arb) : point arbitraire. Cas d'étude de dispersion

N°	V _s (tr/min)	f (mm/s)	D (cm)	h (cm)	CPF		CPUF	
					Nombre (#/cm ³)	Masse (mg/cm ³)	Nombre (#/cm ³)	Masse (µg/cm ³)
1	1000	8,5	5	5				
2	1000	8,5	5	15				
3	1000	8,5	5	25				
4	1000	8,5	27,5	5				
5	1000	8,5	27,5	15				
6	1000	8,5	27,5	25				
7	1000	8,5	50	5				
8	1000	8,5	50	15				
9	1000	8,5	50	25				
10	1000	17	5	5				
11	1000	17	5	15				
12	1000	17	5	25				
13	1000	17	27,5	5				
14	1000	17	27,5	15				
15	1000	17	27,5	25				
16	1000	17	50	5				
17	1000	17	50	15				
18	1000	17	50	25				
19	1000	25,5	5	5				
20	1000	25,5	5	15				
21	1000	25,5	5	25				
22	1000	25,5	27,5	5				
23	1000	25,5	27,5	15				
24	1000	25,5	27,5	25				
25	1000	25,5	50	5				
26	1000	25,5	50	15				
27	1000	25,5	50	25				
28	1750	8,5	5	5				
...	...	...	...	...				
54	1750	25,5	50	25				
55	2500	8,5	5	5				
...	...	...	...	...				
81	2500	25,5	50	25				
(c)	1750	17	27,5	15				
(c)	1750	17	27,5	15				
(c)	1750	17	27,5	15				
(c)	1750	17	27,5	15				
(c)	1750	17	27,5	15				
(arb)	1500	12,75	27,5	20				
(arb)	1000	17	27,5	15				
(arb)	1750	8,5	27,5	15				

Tableau-A II-2 Essais à réaliser pour chacune des combinaisons granit-abrasif :
 blanc-G100, blanc-G800, noir-G100 et noir-G800 pour le polissage rotatif
 et sans translation. Cas d'étude de dispersion

N°	V _s (tr/min)	D (cm)	h (cm)	CPF		CPUF	
				Nombre (#/cm ³)	Masse (mg/cm ³)	Nombre (#/cm ³)	Masse (µg/cm ³)
1	1000	5	5				
2	1000	5	15				
3	1000	5	25				
4	1000	27,5	5				
5	1000	27,5	15				
6	1000	27,5	25				
7	1000	50	5				
8	1000	50	15				
9	1000	50	25				
10	1750	5	5				
11	1750	5	15				
12	1750	5	25				
13	1750	27,5	5				
14	1750	27,5	15				
15	1750	27,5	25				
16	1750	50	5				
17	1750	50	15				
18	1750	50	25				
19	2500	5	5				
20	2500	5	15				
21	2500	5	25				
22	2500	27,5	5				
23	2500	27,5	15				
24	2500	27,5	25				
25	2500	50	5				
26	2500	50	15				
27	2500	50	25				

ANNEXE III

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE L'ÉMISSION DES PF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT

Tableau-A III-1 Tableaux ANOVA de l'émission des PF a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir. (L) linéaire et (Q) quadratique.

ANOVA: Var.:ln(CPF); R-sqr=,88286; Adj.:78524 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,0036673 DV: ln(CPF)						ANOVA: Var.:ln(CPF); R-sqr=,96959; Adj.:94424 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,0015681 DV: ln(CPF)					
Factor	SS	df	MS	F	p	Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V _s (rpm)(L)	0,165432	1	0,165432	45,4096	0,006737	(1)V _s (rpm)(L)	2,26822	1	2,26822	27,80766	0,013295
V _s (rpm)(Q)	0,000212	1	0,000212	2,5119	0,211163	V _s (rpm)(Q)	0,20634	1	0,206338	2,62964	0,209952
(2)f (mm/s)(L)	0,510835	1	0,510835	141,4751	0,001278	(2)f (mm/s)(L)	6,06564	1	6,065639	74,36291	0,003279
f (mm/s)(Q)	0,000362	1	0,000362	0,9988	0,773821	f (mm/s)(Q)	0,26406	1	0,264060	3,23730	0,169008
1L by 2L	0,000053	1	0,000053	0,0146	0,911577	1L by 2L	1,29372	1	1,293719	15,86061	0,028331
Lack of Fit	0,081045	3	0,027015	7,3664	0,067990	Lack of Fit	0,07938	3	0,026461	0,32440	0,810058
Pure Error	0,011002	3	0,003667			Pure Error	0,24470	3	0,081568		
Total SS	0,785763	11				Total SS	10,65593	11			

a) b)

ANOVA: Var.:ln(CPF); R-sqr=,95256; Adj.:31303 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,1404407 DV: ln(CPF)						ANOVA: Var.:ln(CPF); R-sqr=,85825; Adj.:74013 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,0321766 DV: ln(CPF)					
Factor	SS	df	MS	F	p	Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V _s (rpm)(L)	7,056226	1	7,056226	58,24344	0,005775	(1)V _s (rpm)(L)	2,041646	1	2,041646	63,44007	0,004128
V _s (rpm)(Q)	0,290187	1	0,290187	2,06626	0,246147	V _s (rpm)(Q)	0,187821	1	0,187821	5,837201	0,094505
(2)f (mm/s)(L)	1,490902	1	1,490902	19,67327	0,046803	(2)f (mm/s)(L)	1,956715	1	1,956715	60,81169	0,004309
f (mm/s)(Q)	0,187320	1	0,187320	1,33380	0,331771	f (mm/s)(Q)	0,208771	1	0,208771	6,498291	0,04147
1L by 2L	0,033080	1	0,033080	0,23655	0,660677	1L by 2L	0,611638	1	0,611638	19,036781	0,022332
Lack of Fit	0,024403	3	0,008134	0,05792	0,978513	Lack of Fit	0,763047	3	0,254349	7,90477	0,061699
Pure Error	0,421322	3	0,140441			Pure Error	0,096530	3	0,032177		
Total SS	9,396327	11				Total SS	6,064156	11			

c) d)

Tableau-A III-2 Tableaux des effets des facteurs influençant l'émission des PF a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

Effect Estimates: Var.:ln(CPF), R-sq=.88286, Adj.:78524 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error=.0036673 DV: ln(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff.
Mean/interc.	9.788910	0.018882	518.4088	0.000001	9.788910
(1)V _s (rpm)(L)	0.332086	0.049446	6.7164	0.000737	0.168048
V _s (rpm)(Q)	-0.068775	0.037084	-1.849	0.211163	-0.029388
(2)f (mm/s)(L)	-0.588124	0.049446	-11.8943	0.001278	-0.294062
f (mm/s)(Q)	0.011659	0.037084	0.3144	0.773821	0.005829
1L by 2L	0.007308	0.060558	0.1207	0.911577	0.003654

a)

Effect Estimates: Var.:ln(CPF), R-sq=.96959, Adj.:94424 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error=.0015681 DV: ln(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff.
Mean/interc.	9.44525	0.009052	105.0647	0.000002	9.44525
(1)V _s (rpm)(L)	1.22985	0.233192	5.2733	0.013295	0.61485
V _s (rpm)(Q)	-0.27817	0.174894	-1.5905	0.209952	-0.13908
(2)f (mm/s)(L)	-2.01091	0.233192	-8.6234	0.003279	-1.00545
f (mm/s)(Q)	-0.31468	0.174894	-1.7932	0.169808	-0.15734
1L by 2L	1.13742	0.285401	3.9825	0.028331	0.56871

b)

Effect Estimates: Var.:ln(CPF), R-sq=.96256, Adj.:91303 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error=.0404407 DV: ln(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff.
Mean/interc.	7.945361	0.116850	67.99595	0.000007	7.945361
(1)V _s (rpm)(L)	2.188905	0.305988	7.08826	0.005775	1.094453
V _s (rpm)(Q)	0.329879	0.229489	1.43745	0.246147	0.164939
(2)f (mm/s)(L)	-0.999654	0.305988	-3.26700	0.046883	-0.499827
f (mm/s)(Q)	-0.266037	0.229489	-1.15490	0.331771	-0.132519
1L by 2L	-0.181880	0.374754	-0.48533	0.680677	-0.090940

c)

Effect Estimates: Var.:ln(CPF), R-sq=.85825, Adj.:74013 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error=.0321766 DV: ln(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff.
Mean/interc.	7.72830	0.055931	138.1754	0.000001	7.72830
(1)V _s (rpm)(L)	1.10983	0.146462	7.9654	0.004120	0.553315
V _s (rpm)(Q)	0.26539	0.109846	2.4160	0.04505	0.132696
(2)f (mm/s)(L)	-1.14234	0.146462	-7.7982	0.004389	-0.571068
f (mm/s)(Q)	0.27980	0.109846	2.5472	0.04147	0.139901
1L by 2L	0.78207	0.179378	4.3599	0.022302	0.391037

d)

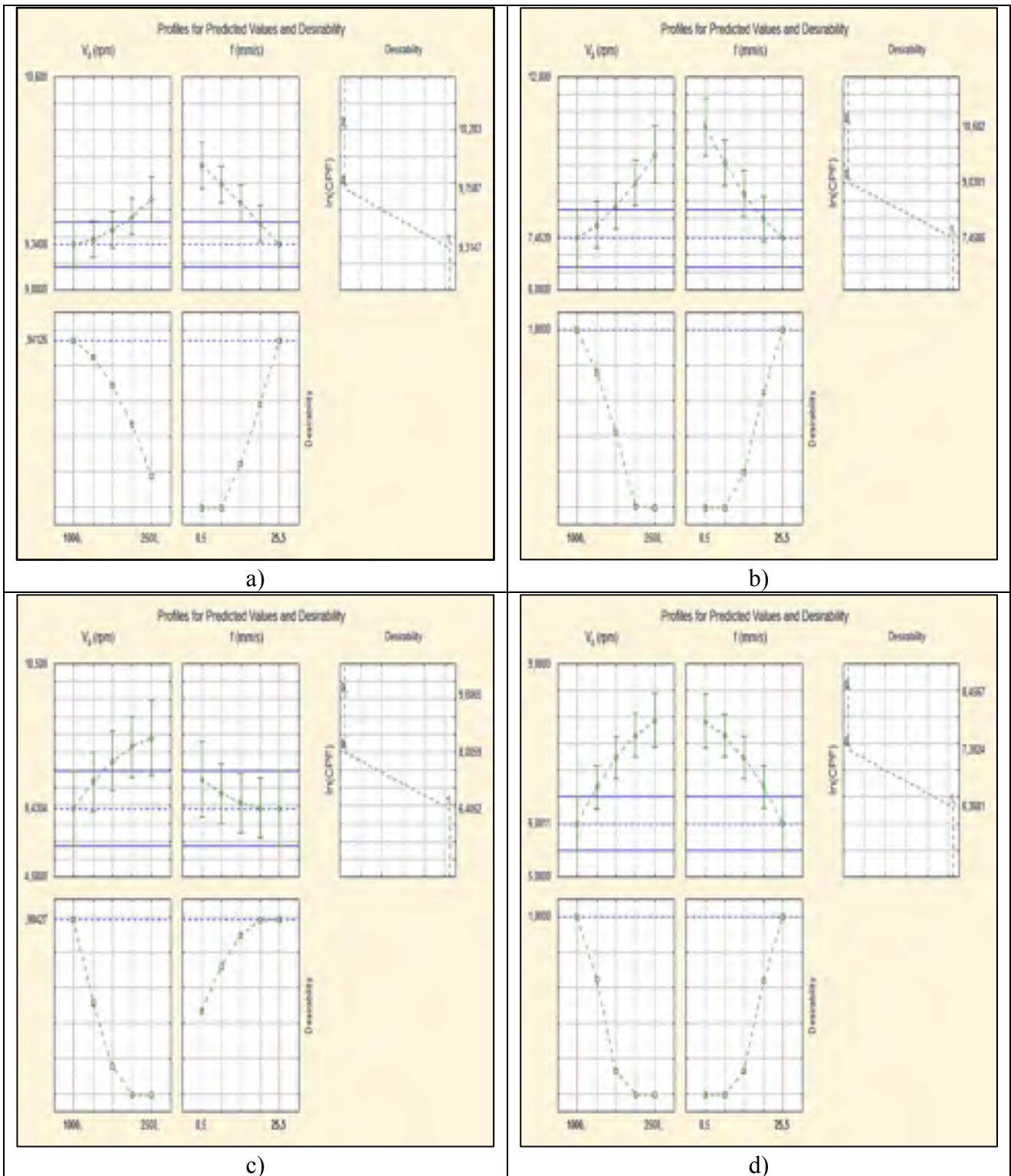


Figure-A III-1 Détermination des conditions minimisant de l'émission des PF a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANNEXE IV

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE L'ÉMISSION DES PUF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT

Tableau-A IV-1 Tableaux ANOVA pour l'analyse de l'émission des PUF a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANOVA: Var. ln(CPUF); R-sqr= 34898, Adj. 30647 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error= 0072846 DV: ln(CPUF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V _s (rpm)(L)	0.265171	1	0.265171	36.53889	0.00081
V _s (rpm)(Q)	0.000234	1	0.000234	0.03208	0.859273
(2)f (mm/s)(L)	0.672230	1	0.672230	92.28107	0.002394
f (mm/s)(Q)	0.067965	1	0.067965	9.33267	0.055213
1L by 2L	0.245847	1	0.245847	33.76262	0.010147
Lack of Fit	0.046103	3	0.015368	2.10960	0.277752
Pure Error	0.021854	3	0.007285		
Total SS	1.332039	11			

a)

ANOVA: Var. ln(CPUF); R-sqr= 9501, Adj. 92586 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error= 0061536 DV: ln(CPUF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V _s (rpm)(L)	0.65621	1	0.65621	100.4742	0.002114
V _s (rpm)(Q)	0.79891	1	0.79891	9.2731	0.055639
(2)f (mm/s)(L)	10.08727	1	10.08727	117.0845	0.001689
f (mm/s)(Q)	0.06580	1	0.06580	10.0495	0.050477
1L by 2L	0.01878	1	0.01878	11.8251	0.041273
Lack of Fit	0.61466	3	0.20489	2.3781	0.247681
Pure Error	0.25846	3	0.08615		
Total SS	21.88442	11			

b)

ANOVA: Var. ln(CPUF); R-sqr= 87449, Adj. 7699 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error= 1797064 DV: ln(CPUF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V _s (rpm)(L)	2.466806	1	2.466806	13.72576	0.034164
V _s (rpm)(Q)	0.175473	1	0.175473	0.97644	0.395931
(2)f (mm/s)(L)	4.466620	1	4.466620	24.85511	0.015515
f (mm/s)(Q)	0.320535	1	0.320535	1.78366	0.273987
1L by 2L	0.177372	1	0.177372	0.98701	0.393706
Lack of Fit	0.587040	3	0.195680	1.08889	0.472910
Pure Error	0.539119	3	0.179706		
Total SS	8.972636	11			

c)

ANOVA: Var. ln(CPUF); R-sqr= 9835, Adj. 96975 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error= 0131602 DV: ln(CPUF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V _s (rpm)(L)	0.51361	1	0.51361	45.6279	0.000426
V _s (rpm)(Q)	0.11095	1	0.11095	8.4311	0.062318
(2)f (mm/s)(L)	10.90888	1	10.90888	328.9100	0.000092
f (mm/s)(Q)	0.92326	1	0.92326	70.1554	0.003669
1L by 2L	0.09338	1	0.09338	7.0945	0.076108
Lack of Fit	0.17088	3	0.05696	4.3281	0.129981
Pure Error	0.03948	3	0.01316		
Total SS	12.74937	11			

d)

Tableau-A IV-2 Tableaux des effets des facteurs influençant l'émission des PUF a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

Effect Estimates: Var. ln(CPUF), R-sq= 94888, Adj. 90647 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error= 0072646 DV: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std Err Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	13.51196	0.026912	507.7301	0.000000	13.51196
(1/V _g (rpm))(L)	0.42124	0.063628	6.6447	0.000081	0.21062
V _g (rpm)(Q)	-0.00936	0.062266	-0.1791	0.869273	-0.00468
(2)f (mm/s)(L)	-0.66944	0.069698	-9.6063	0.000294	-0.33472
f (mm/s)(Q)	-0.15967	0.062266	-3.0549	0.055213	-0.07983
1L by 2L	-0.49593	0.085350	-5.8106	0.00147	-0.24797

a)

Effect Estimates: Var. ln(CPUF), R-sq= 96011, Adj. 92686 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error= 0061536 DV: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std Err Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	13.35389	0.091521	145.9111	0.000001	13.35389
(1/V _g (rpm))(L)	2.40225	0.230658	10.0237	0.002114	1.20113
V _g (rpm)(Q)	0.54735	0.179743	3.0452	0.055639	0.27368
(2)f (mm/s)(L)	-2.59323	0.230658	-10.8204	0.001605	-1.29662
f (mm/s)(Q)	-0.56980	0.179743	-3.1701	0.050477	-0.28490
1L by 2L	1.00934	0.293519	3.4388	0.041273	0.50467

b)

Effect Estimates: Var. ln(CPUF), R-sq= 87449, Adj. 7699 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error= 1797064 DV: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std Err Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	13.96337	0.132180	105.6394	0.000002	13.96337
(1/V _g (rpm))(L)	1.28234	0.346127	3.7048	0.034154	0.64117
V _g (rpm)(Q)	-0.25652	0.259596	-0.9882	0.395931	-0.12826
(2)f (mm/s)(L)	-1.72561	0.346127	-4.9855	0.015516	-0.86281
f (mm/s)(Q)	-0.34670	0.259596	-1.3365	0.273987	-0.17335
1L by 2L	-0.42116	0.423918	-0.9935	0.393706	-0.21058

c)

Effect Estimates: Var. ln(CPUF), R-sq= 9835, Adj. 99975 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs, MS Pure Error= 0131602 DV: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std Err Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	14.54945	0.035770	408.7554	0.000000	14.54945
(1/V _g (rpm))(L)	0.63960	0.093667	6.8286	0.005425	0.31980
V _g (rpm)(Q)	-0.20398	0.070250	-2.9036	0.062318	-0.10199
(2)f (mm/s)(L)	-2.58574	0.093667	-28.7908	0.000032	-1.34837
f (mm/s)(Q)	0.88841	0.070250	8.3759	0.003553	0.29420
1L by 2L	-0.30556	0.114718	-2.6638	0.076108	-0.15278

d)

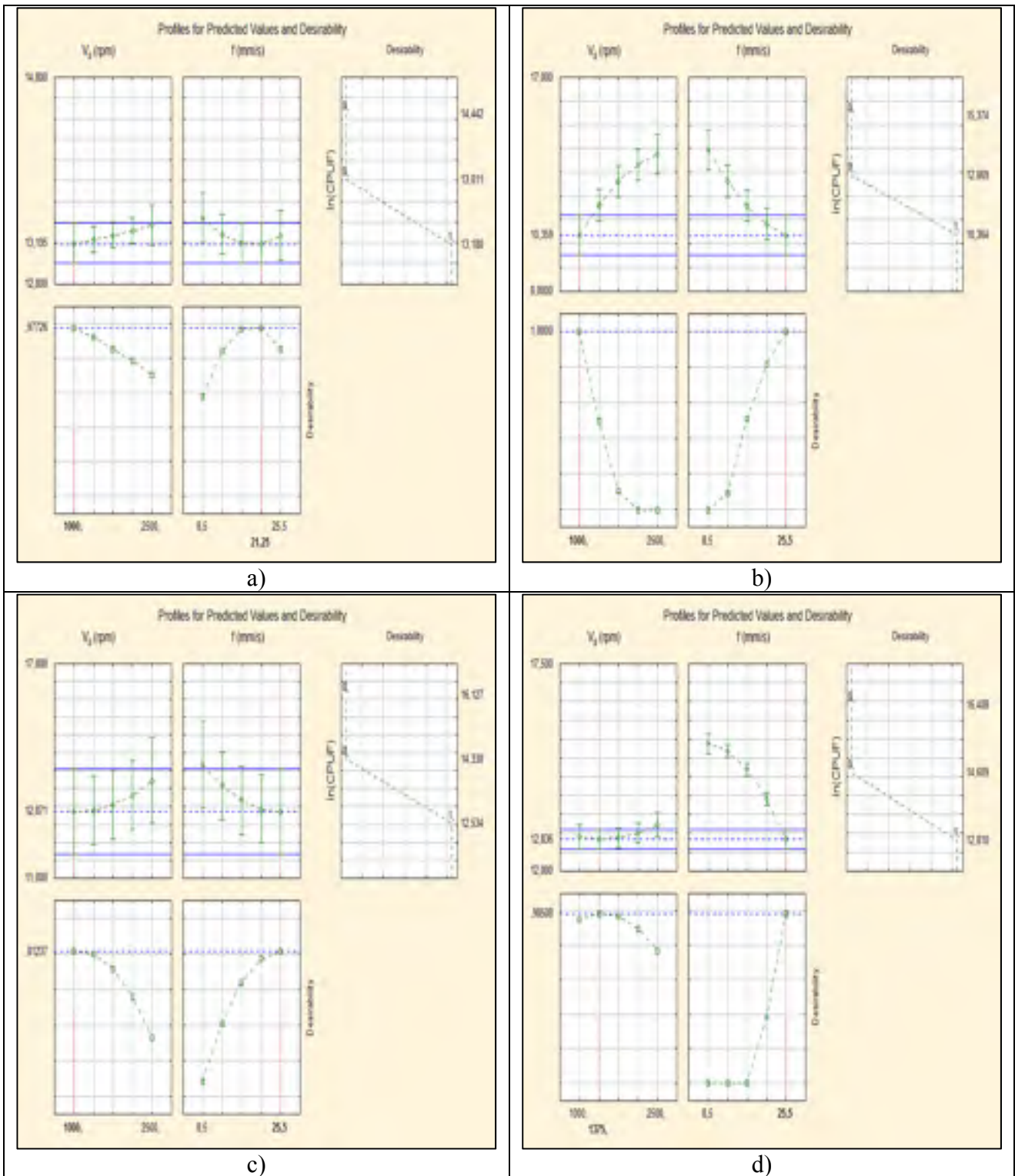


Figure-A IV-1 Détermination des conditions minimisant l'émission des PUF a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANNEXE V

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE LORS DU POLISSAGE DE GRANIT

Tableau-A V-1 Tableaux ANOVA pour l'analyse de la rugosité de surface a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANOVA: Var. R_a (μm); R-sq= 89153; Adj: 80132 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,0002593 DV: R_a (μm)						ANOVA: Var. R_a (μm); R-sq= 98707; Adj: 97829 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,0000868 DV: R_a (μm)					
Factor	SS	df	MS	F	p	Factor	SS	df	MS	F	p
(1/ V_s (rpm))L	0,030220	1	0,030220	115,5574	0,001709	(1/ V_s (rpm))L	0,020547	1	0,020547	236,7818	0,000996
V_s (rpm)Q	0,010945	1	0,010945	42,2202	0,004402	V_s (rpm)Q	0,004651	1	0,004651	52,6513	0,005114
(z)f (mm/s)L	0,007680	1	0,007680	29,5229	0,012179	(z)f (mm/s)L	0,029618	1	0,029618	341,3255	0,000346
f (mm/s)Q	0,003067	1	0,003067	11,8284	0,041259	f (mm/s)Q	0,000064	1	0,000064	0,7387	0,453277
1L by 2L	0,001514	1	0,001514	5,8387	0,094479	1L by 2L	0,000029	1	0,000029	10,7074	0,046899
Lack of Fit	0,005401	3	0,001800	6,9435	0,072896	Lack of Fit	0,000472	3	0,000157	1,8130	0,318597
Pure Error	0,000778	3	0,000259			Pure Error	0,000260	3	0,000087		
Total SS	0,057012	11				Total SS	0,056624	11			

a)
b)

ANOVA: Var. R_a (μm); R-sq= 97185; Adj: 94839 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,0000318 DV: R_a (μm)						ANOVA: Var. R_a (μm); R-sq= 85724; Adj: 73827 2 3-level factors, 1 Blocks, 12 Runs; MS Pure Error=,0000473 DV: R_a (μm)					
Factor	SS	df	MS	F	p	Factor	SS	df	MS	F	p
(1/ V_s (rpm))L	0,004368	1	0,004368	137,5199	0,001339	(1/ V_s (rpm))L	0,001021	1	0,001021	21,58980	0,018795
V_s (rpm)Q	0,000439	1	0,000439	13,8071	0,033905	V_s (rpm)Q	0,000007	1	0,000007	0,15640	0,718933
(z)f (mm/s)L	0,000476	1	0,000476	14,9402	0,030000	(z)f (mm/s)L	0,000731	1	0,000731	15,45925	0,029295
f (mm/s)Q	0,000088	1	0,000088	2,7579	0,195357	f (mm/s)Q	0,000045	1	0,000045	0,94405	0,402904
1L by 2L	0,000120	1	0,000120	3,7839	0,146959	1L by 2L	0,000071	1	0,000071	1,49505	0,308729
Lack of Fit	0,000051	3	0,000020	0,6440	0,636749	Lack of Fit	0,000174	3	0,000058	1,22444	0,435875
Pure Error	0,000095	3	0,000032			Pure Error	0,000142	3	0,000047		
Total SS	0,005564	11				Total SS	0,002210	11			

c)
d)

Tableau-A V-2 Tableaux des effets des facteurs influençant la rugosité de surface a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

Effect Estimates; Var: R_a (μm); R-sq= 89163; Adj: 80132 2 3-level factors; 1 Blocks; 12 Runs; MS Pure Error= 0002593 DV: R_a (μm)					
Factor	Effect	Std Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	0.523489	0.005021	104.2677	0.000002	0.523489
(1) V_s (rpm)(L)	-0.141938	0.013147	-10.7962	0.001700	-0.070969
V_s (rpm)(Q)	-0.064069	0.008860	-5.4977	0.001402	-0.032035
(2)f (mm/s)(L)	-0.071556	0.013147	-5.4427	0.012179	-0.035778
f (mm/s)(Q)	0.033912	0.008860	3.4392	0.01259	0.016956
1L by 2L	0.038907	0.016102	2.4163	0.04479	0.019454

a)

Effect Estimates; Var: R_a (μm); R-sq= 98707; Adj: 97629 2 3-level factors; 1 Blocks; 12 Runs; MS Pure Error= 0000868 DV: R_a (μm)					
Factor	Effect	Std Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	0.567177	0.002905	195.2725	0.000000	0.567177
(1) V_s (rpm)(L)	-0.117037	0.007606	-15.3877	0.000595	-0.058519
V_s (rpm)(Q)	-0.041355	0.005704	-7.2499	0.000414	-0.020678
(2)f (mm/s)(L)	-0.140519	0.007606	-18.4750	0.000345	-0.070259
f (mm/s)(Q)	0.004903	0.005704	0.8595	0.453277	0.002451
1L by 2L	-0.030481	0.009315	-3.2722	0.046699	-0.015241

b)

Effect Estimates; Var: R_a (μm); R-sq= 97165; Adj: 94839 2 3-level factors; 1 Blocks; 12 Runs; MS Pure Error= 0000318 DV: R_a (μm)					
Factor	Effect	Std Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	0.212154	0.001757	120.7340	0.000001	0.212154
(1) V_s (rpm)(L)	-0.053963	0.004502	-11.7269	0.001333	-0.026981
V_s (rpm)(Q)	-0.012824	0.003451	-3.7158	0.033005	-0.006412
(2)f (mm/s)(L)	0.017790	0.004502	3.9580	0.030609	0.008895
f (mm/s)(Q)	0.005731	0.003451	1.6607	0.195357	0.002866
1L by 2L	0.010963	0.005636	1.9452	0.146659	0.005481

c)

Effect Estimates; Var: R_a (μm); R-sq= 85724; Adj: 73827 2 3-level factors; 1 Blocks; 12 Runs; MS Pure Error= 0000473 DV: R_a (μm)					
Factor	Effect	Std Err. Pure Err	t(3)	p	Coeff
Mean/Interc.	0.192475	0.002144	89.77537	0.000003	0.192475
(1) V_s (rpm)(L)	-0.026986	0.005614	-4.64650	0.018795	-0.013493
V_s (rpm)(Q)	0.001665	0.004211	0.39548	0.718933	0.000833
(2)f (mm/s)(L)	0.022074	0.005614	3.93182	0.029295	0.011037
f (mm/s)(Q)	0.004091	0.004211	0.97162	0.402904	0.002046
1L by 2L	0.008407	0.006876	1.22272	0.308729	0.004204

d)

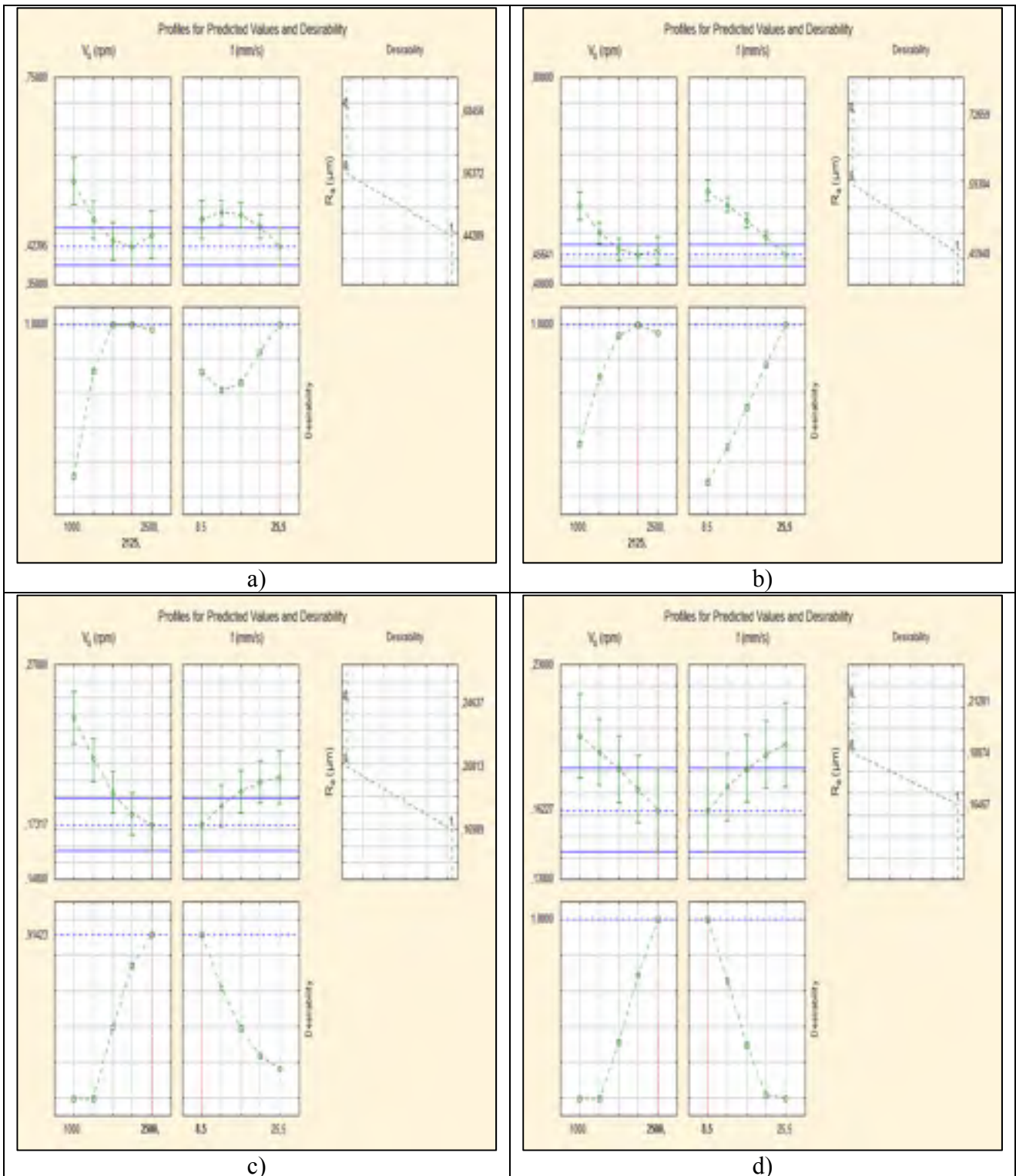


Figure-A V-1 Détermination des conditions minimisant la rugosité de surface a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANNEXE VI

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA DISPERSION DES PF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT

Tableau-A VI-1 Tableaux ANOVA pour l'analyse de la dispersion des PF. a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANOVA: Var. ln(CPF) Regr=81417, Adj: 77752 4 3-level factors, 1 Block, 86 Runs; MS Pure Error: 2496745 DV: ln(CPF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V/s (rpm)(L)	27.88647	1	27.88647	88.08454	0.000002
V/s (rpm)(Q)	0.45823	1	0.45823	1.82328	0.234822
(2)f (mm/s)(L)	12.32016	1	12.32016	51.74000	0.000008
f (mm/s)(Q)	0.13494	1	0.13494	0.54846	0.495260
(3)D (cm)(L)	1.14861	1	1.14861	28.52071	0.000004
D (cm)(Q)	0.03043	1	0.03043	0.36227	0.553530
(4)h (cm)(L)	1.27638	1	1.27638	5.11217	0.032589
h (cm)(Q)	1.50391	1	1.50391	7.82657	0.007077
TL by 2L	0.24306	1	0.24306	0.97349	0.369119
TL by 3L	0.00081	1	0.00081	3.29741	0.113306
TL by 4L	0.11118	1	0.11118	0.44629	0.534136
2L by 3L	0.00975	1	0.00975	0.35846	0.554927
2L by 4L	0.12017	1	0.12017	0.49129	0.518741
3L by 4L	0.57358	1	0.57358	2.29733	0.190033
Lack of Fit	18.29564	66	0.27569	0.63479	0.827764
Pure Error	1.24037	5	0.24807		
Total SS	62.1055	86			

a)

ANOVA: Var. ln(CPF) Regr=72734, Adj: 87321 4 3-level factors, 1 Block, 86 Runs; MS Pure Error: 8773285 DV: ln(CPF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V/s (rpm)(L)	28.65020	1	28.65020	128.5003	0.000007
V/s (rpm)(Q)	4.97809	1	4.97809	64.0061	0.000493
(2)f (mm/s)(L)	12.84789	1	12.84789	178.1465	0.000002
f (mm/s)(Q)	0.10754	1	0.10754	3.9946	0.053365
(3)D (cm)(L)	4.19297	1	4.19297	78.0021	0.000003
D (cm)(Q)	0.02075	1	0.02075	1.18458	0.283400
(4)h (cm)(L)	0.00065	1	0.00065	0.0084	0.930462
h (cm)(Q)	2.15130	1	2.15130	40.5424	0.000413
TL by 2L	0.00511	1	0.00511	7.0088	0.009484
TL by 3L	0.00313	1	0.00313	0.0402	0.848934
TL by 4L	0.78030	1	0.78030	10.0396	0.004636
2L by 3L	1.32059	1	1.32059	17.0164	0.000130
2L by 4L	0.04674	1	0.04674	0.6014	0.473123
3L by 4L	1.34887	1	1.34887	17.2160	0.000014
Lack of Fit	22.22142	66	0.33669	4.3316	0.002264
Pure Error	0.38664	5	0.07733		
Total SS	82.83176	86			

b)

ANOVA: Var. ln(CPF) Regr=22193, Adj: 7994 4 3-level factors, 1 Block, 86 Runs; MS Pure Error: 1026748 DV: ln(CPF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V/s (rpm)(L)	28.03442	1	28.03442	171.8194	0.000004
V/s (rpm)(Q)	0.11997	1	0.11997	1.1826	0.329076
(2)f (mm/s)(L)	5.20214	1	5.20214	58.6962	0.000004
f (mm/s)(Q)	0.08761	1	0.08761	0.8513	0.490018
(3)D (cm)(L)	0.95869	1	0.95869	5.3460	0.026134
D (cm)(Q)	0.14681	1	0.14681	1.4211	0.286711
(4)h (cm)(L)	0.00074	1	0.00074	0.0073	0.938445
h (cm)(Q)	0.84311	1	0.84311	8.2115	0.005708
TL by 2L	0.01461	1	0.01461	0.1412	0.722423
TL by 3L	2.16411	1	2.16411	21.0775	0.000008
TL by 4L	0.08651	1	0.08651	5.7123	0.023965
2L by 3L	0.03876	1	0.03876	0.3775	0.568838
2L by 4L	0.15837	1	0.15837	1.5424	0.258336
3L by 4L	0.05947	1	0.05947	0.5792	0.480867
Lack of Fit	7.52227	66	0.11399	1.1308	0.514058
Pure Error	0.51337	5	0.10267		
Total SS	47.24985	86			

c)

ANOVA: Var. ln(CPF) Regr=22011, Adj: 73446 4 3-level factors, 1 Block, 86 Runs; MS Pure Error: 3643418 DV: ln(CPF)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)V/s (rpm)(L)	38.15671	1	38.15671	354.8821	0.000007
V/s (rpm)(Q)	0.03882	1	0.03882	1.0362	0.318373
(2)f (mm/s)(L)	7.69349	1	7.69349	119.3605	0.000001
f (mm/s)(Q)	2.16421	1	2.16421	2.5618	0.111058
(3)D (cm)(L)	2.78880	1	2.78880	12.1971	0.001164
D (cm)(Q)	1.54059	1	1.54059	8.2494	0.005742
(4)h (cm)(L)	0.18877	1	0.18877	2.8490	0.146677
h (cm)(Q)	2.58880	1	2.58880	11.4258	0.001382
TL by 2L	0.21642	1	0.21642	3.3632	0.126131
TL by 3L	0.22720	1	0.22720	3.6367	0.119027
TL by 4L	0.02396	1	0.02396	0.3708	0.569162
2L by 3L	0.58796	1	0.58796	1.1771	0.285323
2L by 4L	0.02894	1	0.02894	0.4457	0.532186
3L by 4L	2.40512	1	2.40512	37.3765	0.000007
Lack of Fit	11.84153	66	0.16730	2.6998	0.142399
Pure Error	0.32174	5	0.06435		
Total SS	66.18651	86			

d)

Tableau-A VI-2 Tableaux des effets des facteurs influençant la dispersion des PF. a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

Effect Estimates, Var. in(CPF), R-sqr= 8147, Adj. 77152 4 3-level factors, 1 Blocks, 86 Runs, MS Pure Error= 2496726 DV: in(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err.	t(S)	p	Coef.
Mean/Inter.	1.18515	0.054017	167.7623	0.000000	1.18515
(1)Vs (rpm)(L)	1.275177	0.120994	1.3841	0.000220	0.630089
Vs (rpm)(Q)	0.15268	0.113004	1.3523	0.234022	0.076294
(2)f (mm/s)(L)	-0.976280	0.115504	-7.3830	0.000000	-0.489140
f (mm/s)(Q)	-0.003075	0.113004	-0.7362	0.495009	-0.04509
(3)D (cm)(L)	-0.855043	0.115504	-6.3874	0.000000	-0.429522
D (cm)(Q)	-0.069010	0.113004	-0.6019	0.573530	-0.034095
(4)h (cm)(L)	-0.307494	0.115504	-2.6610	0.012359	0.153742
h (cm)(Q)	0.312055	0.113004	2.7614	0.037957	0.156027
1L by 2L	0.164335	0.166558	0.9867	0.369119	0.082168
1L by 3L	0.290293	0.166558	1.7903	0.133305	0.149145
1L by 4L	0.111145	0.166558	0.6673	0.504135	0.055572
2L by 3L	-0.039060	0.166558	-0.5996	0.574937	-0.049330
2L by 4L	0.115550	0.166558	0.6938	0.519741	0.057775
3L by 4L	-0.252451	0.166558	-1.5157	0.190833	0.126226

a)

Effect Estimates, Var. in(CPF), R-sqr= 72704, Adj. 37321 4 3-level factors, 1 Blocks, 86 Runs, MS Pure Error= 0777285 DV: in(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err.	t(S)	p	Coef.
Mean/Inter.	9.183391	0.030357	302.6150	0.000000	9.183391
(1)Vs (rpm)(L)	1.456791	0.075879	19.1980	0.000000	0.728395
Vs (rpm)(Q)	0.504441	0.063052	8.0004	0.000000	0.252220
(2)f (mm/s)(L)	-1.01277	0.075879	-13.3472	0.000000	-0.506385
f (mm/s)(Q)	-0.12642	0.063052	-1.9891	0.113366	-0.063209
(3)D (cm)(L)	-0.56794	0.075879	-7.4835	0.000000	-0.283970
D (cm)(Q)	-0.21701	0.063052	-3.4419	0.019400	-0.108505
(4)h (cm)(L)	0.006995	0.075879	0.0917	0.930462	0.003497
h (cm)(Q)	0.40147	0.063052	6.3673	0.000000	0.200735
1L by 2L	0.25719	0.092933	2.7775	0.030494	0.128594
1L by 3L	0.01864	0.092933	0.2006	0.841934	0.009320
1L by 4L	-0.29446	0.092933	-3.1885	0.020855	-0.147230
2L by 3L	0.38335	0.092933	4.1250	0.000000	0.191675
2L by 4L	0.07207	0.092933	0.7756	0.473123	0.036034
3L by 4L	0.39679	0.092933	4.2611	0.000000	0.198393

b)

Effect Estimates, Var. in(CPF), R-sqr= 82931, Adj. 7964 4 3-level factors, 1 Blocks, 86 Runs, MS Pure Error= 1026748 DV: in(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err.	t(S)	p	Coef.
Mean/Inter.	7.798880	0.030357	256.5700	0.000000	7.798880
(1)Vs (rpm)(L)	1.453580	0.075879	19.1670	0.000000	0.726790
Vs (rpm)(Q)	0.078333	0.072467	1.0810	0.329075	0.039167
(2)f (mm/s)(L)	-0.700761	0.072467	-9.6683	0.000000	-0.350380
f (mm/s)(Q)	0.066939	0.072467	0.9237	0.398119	0.033470
(3)D (cm)(L)	-0.368801	0.072467	-5.0871	0.000000	-0.184400
D (cm)(Q)	0.046386	0.072467	0.6391	0.526711	0.023194
(4)h (cm)(L)	-0.007425	0.072467	-0.0852	0.935445	-0.003713
h (cm)(Q)	0.201654	0.072467	2.7835	0.035135	0.100828
1L by 2L	-0.040148	0.106810	-0.3759	0.729423	-0.020074
1L by 3L	-0.190364	0.106810	-1.8110	0.095880	-0.095182
1L by 4L	0.255279	0.106810	2.3900	0.062385	0.127639
2L by 3L	0.066522	0.106810	0.6144	0.569338	0.032811
2L by 4L	0.122651	0.106810	1.2419	0.269335	0.061325
3L by 4L	0.091285	0.106810	0.7610	0.480967	0.045643

c)

Effect Estimates, Var. in(CPF), R-sqr= 82831, Adj. 79445 4 3-level factors, 1 Blocks, 86 Runs, MS Pure Error= 0543489 DV: in(CPF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err.	t(S)	p	Coef.
Mean/Inter.	7.798843	0.027921	254.9034	0.000000	7.798843
(1)Vs (rpm)(L)	1.438601	0.035048	21.7000	0.000000	0.719300
Vs (rpm)(Q)	0.207120	0.057160	3.6265	0.000373	0.103560
(2)f (mm/s)(L)	-0.754899	0.030948	-24.3947	0.000000	-0.377449
f (mm/s)(Q)	-0.091544	0.057160	-1.5974	0.171058	-0.045822
(3)D (cm)(L)	0.241122	0.030948	7.8025	0.000000	0.120561
D (cm)(Q)	0.315629	0.057160	5.5200	0.000000	0.157814
(4)h (cm)(L)	0.116561	0.030948	3.7517	0.000377	0.058281
h (cm)(Q)	0.250262	0.057160	4.3805	0.000000	0.125131
1L by 2L	0.155070	0.084557	1.8338	0.126131	0.077535
1L by 3L	-0.158884	0.084557	-1.8790	0.119027	-0.079442
1L by 4L	0.051491	0.084557	0.6090	0.593152	0.025745
2L by 3L	0.255095	0.084557	3.0279	0.020273	0.127798
2L by 4L	-0.056705	0.084557	-0.6705	0.532185	-0.028353
3L by 4L	0.510543	0.084557	6.1335	0.000000	0.258474

d)

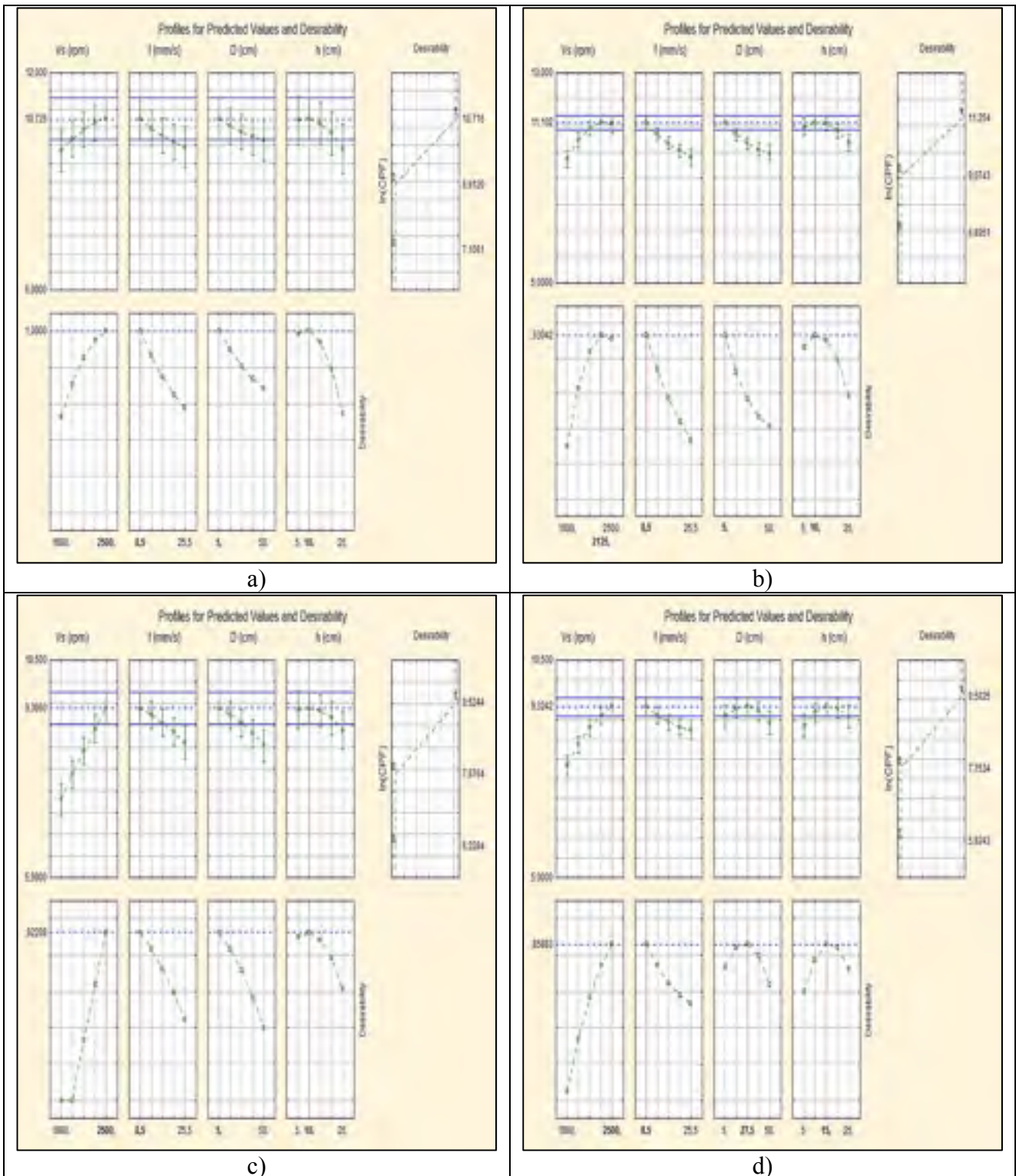


Figure-A VI-1 Détermination du point de concentration maximale des PF. a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

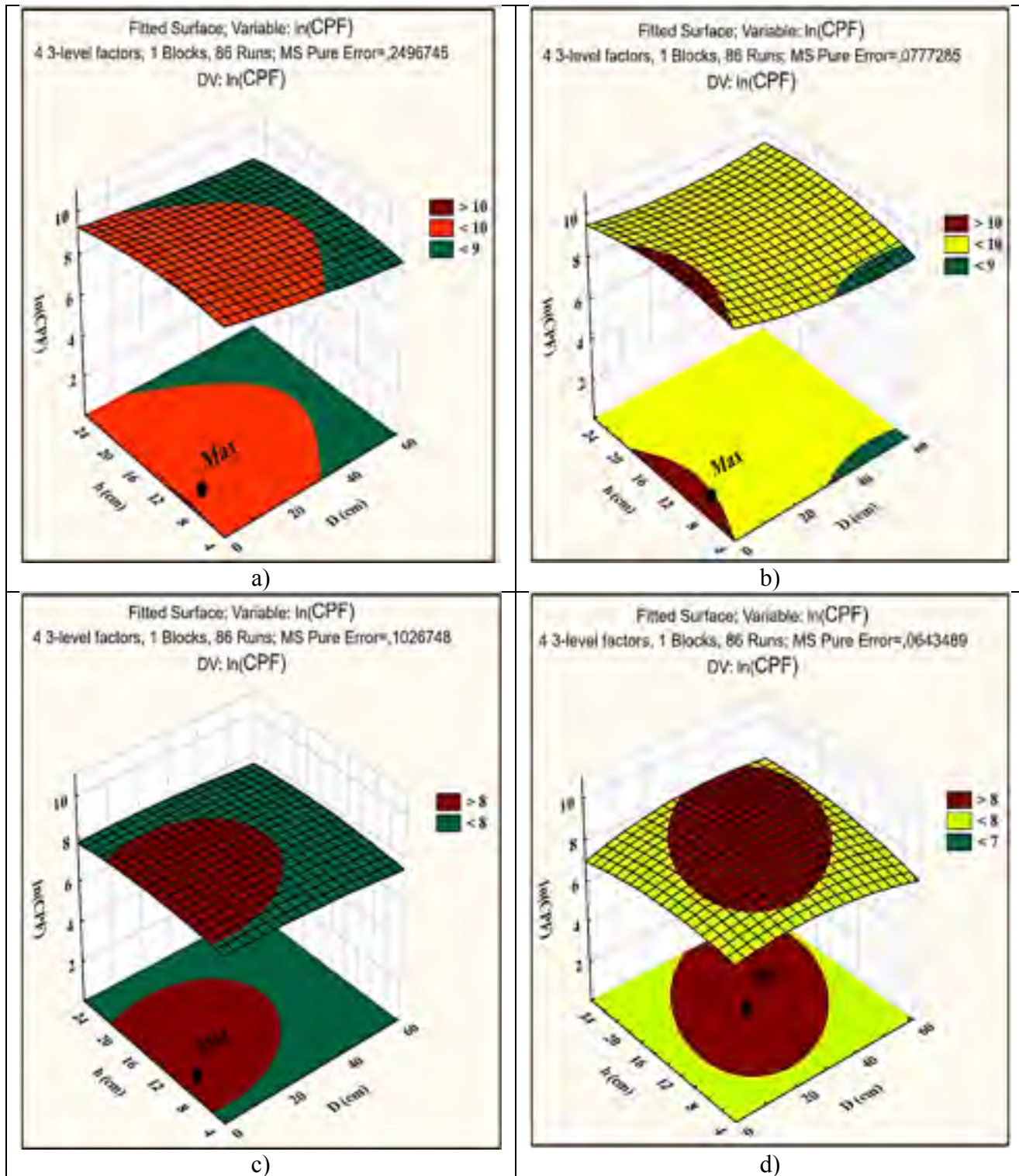


Figure-A VI-2 Dispersion des PF. a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANNEXE VII

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE DE LA DISPERSION DES PUF LORS DU POLISSAGE DE GRANIT

Tableau-A VII-1 Tableaux ANOVA pour l'analyse de la dispersion des PUF. a) Ébauche
granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

ANOVA: Var. ln(CPUF), R-sq= 94218; Adj. 91166 4 3-level factors, 1 Blocks, 95 Runs; MS Pure Error: 1400478 Dv: ln(CPUF)						
Factor	SS	df	MS	F	p	
(1)V _g (rpm)(L)	5.36573	1	5.36573	38.23970	0.001512	
V _g (rpm)(Q)	0.00192	1	0.00192	0.00138	0.999999	
(2)f (mm/s)(L)	1.23627	1	1.23627	8.92744	0.001111	
f (mm/s)(Q)	0.00226	1	0.00226	0.01613	0.903990	
(3)D (cm)(L)	6.20847	1	6.20847	44.33110	0.001513	
D (cm)(Q)	0.32910	1	0.32910	2.34952	0.126865	
(4)h (cm)(L)	2.10453	1	2.10453	15.02722	0.001593	
h (cm)(Q)	0.00021	1	0.00021	0.00148	0.970549	
1L by 2L	0.00002	1	0.00002	0.00015	0.999982	
1L by 3L	0.00073	1	0.00073	0.00515	0.999999	
1L by 4L	0.01047	1	0.01047	0.07473	0.785507	
2L by 3L	0.04758	1	0.04758	0.33974	0.565277	
2L by 4L	0.16370	1	0.16370	1.16047	0.288333	
3L by 4L	0.20153	1	0.20153	1.43877	0.230931	
Lack of Fit	2.38323	66	0.03611	0.25764	0.996181	
Pure Error	0.72074	5	0.142048			
Total SS	19.53752	95				

a)

ANOVA: Var. ln(CPUF), R-sq= 75270; Adj. 70783 4 3-level factors, 1 Blocks, 95 Runs; MS Pure Error: 1100447 Dv: ln(CPUF)						
Factor	SS	df	MS	F	p	
(1)V _g (rpm)(L)	6.73017	1	6.73017	37.28718	0.000893	
V _g (rpm)(Q)	0.08575	1	0.08575	0.47407	0.521750	
(2)f (mm/s)(L)	2.43567	1	2.43567	13.30070	0.001402	
f (mm/s)(Q)	0.10431	1	0.10431	0.57036	0.480971	
(3)D (cm)(L)	6.8525	1	6.8525	37.6444	0.001626	
D (cm)(Q)	0.22624	1	0.22624	1.26787	0.271054	
(4)h (cm)(L)	4.58801	1	4.58801	25.29155	0.000979	
h (cm)(Q)	0.01994	1	0.01994	0.10570	0.738025	
1L by 2L	0.69402	1	0.69402	3.65489	0.060331	
1L by 3L	0.65004	1	0.65004	3.61844	0.115846	
1L by 4L	0.07869	1	0.07869	0.42755	0.542294	
2L by 3L	0.00366	1	0.00366	0.02030	0.892261	
2L by 4L	0.16142	1	0.16142	0.89557	0.347181	
3L by 4L	0.14863	1	0.14863	0.81441	0.408189	
Lack of Fit	5.47425	66	0.08280	0.54484	0.802007	
Pure Error	0.90222	5	0.180445			
Total SS	30.18541	95				

b)

ANOVA: Var. ln(CPUF), R-sq= 8001; Adj. 76068 4 3-level factors, 1 Blocks, 85 Runs; MS Pure Error: 0589759 Dv: ln(CPUF)						
Factor	SS	df	MS	F	p	
(1)V _g (rpm)(L)	17.88802	1	17.88802	274.7537	0.000012	
V _g (rpm)(Q)	0.00429	1	0.00429	0.0727	0.798203	
(2)f (mm/s)(L)	5.87336	1	5.87336	82.8801	0.000004	
f (mm/s)(Q)	0.00736	1	0.00736	0.1348	0.738301	
(3)D (cm)(L)	22.07562	1	22.07562	355.7367	0.000003	
D (cm)(Q)	0.03965	1	0.03965	0.6757	0.440474	
(4)h (cm)(L)	5.43803	1	5.43803	82.6665	0.000009	
h (cm)(Q)	0.15776	1	0.15776	2.6748	0.102871	
1L by 2L	0.01823	1	0.01823	0.3092	0.602195	
1L by 3L	0.64780	1	0.64780	10.9805	0.001423	
1L by 4L	0.20422	1	0.20422	3.4626	0.071643	
2L by 3L	0.54359	1	0.54359	9.2170	0.003884	
2L by 4L	0.53427	1	0.53427	9.8415	0.010538	
3L by 4L	0.55986	1	0.55986	9.3965	0.002171	
Lack of Fit	15.74270	66	0.23853	4.0444	0.060247	
Pure Error	0.23486	5	0.04698			
Total SS	80.22611	85				

c)

ANOVA: Var. ln(CPUF), R-sq= 76182; Adj. 71485 4 3-level factors, 1 Blocks, 85 Runs; MS Pure Error: 0638759 Dv: ln(CPUF)						
Factor	SS	df	MS	F	p	
(1)V _g (rpm)(L)	21.30229	1	21.30229	488.8541	0.000000	
V _g (rpm)(Q)	0.32213	1	0.32213	7.0431	0.014981	
(2)f (mm/s)(L)	1.20980	1	1.20980	51.2178	0.000005	
f (mm/s)(Q)	0.00878	1	0.00878	0.1374	0.726640	
(3)D (cm)(L)	7.09459	1	7.09459	171.8077	0.000003	
D (cm)(Q)	0.39800	1	0.39800	8.3627	0.006110	
(4)h (cm)(L)	7.20330	1	7.20330	162.3706	0.000000	
h (cm)(Q)	1.05422	1	1.05422	57.2082	0.000041	
1L by 2L	0.12117	1	0.12117	2.6536	0.211289	
1L by 3L	0.22758	1	0.22758	5.5628	0.117739	
1L by 4L	1.08811	1	1.08811	17.8547	0.000186	
2L by 3L	0.07795	1	0.07795	1.7445	0.193953	
2L by 4L	0.51175	1	0.51175	8.9188	0.003654	
3L by 4L	1.20340	1	1.20340	26.3755	0.000041	
Lack of Fit	17.69802	66	0.26803	4.1961	0.055846	
Pure Error	0.31938	5	0.06388			
Total SS	75.61152	85				

d)

Tableau-A VII-2 Tableaux des effets influençant la dispersion des PUF. a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

Effect Estimates: Var. ln(CPUF) R-sqr= 86218, Adj. 81195 4 3-level factors, 1 Blocks, 85 Runs, MS Pure Error= 1400473 Dv: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(5)	p	Coeff
MeanIntercept	12.83227	0.041748	314.3447	0.000000	12.83227
(1)V _g (rpm)(L)	-1.82983	0.101952	-5.9838	0.000012	-0.714928
V _g (rpm)(Q)	-0.21025	0.084634	-2.5788	0.045606	-0.105128
(2)f (mm/s)(L)	-4.30281	0.101862	-42.9711	0.000000	-0.151214
f (mm/s)(Q)	0.01075	0.084634	0.1270	0.903050	0.00527
(3)D (cm)(L)	-0.87015	0.101952	-8.5002	0.000000	-0.339671
D (cm)(Q)	0.12974	0.084634	1.5329	0.188865	0.064871
(4)h (cm)(L)	-0.35483	0.101862	-3.4785	0.001003	-0.157429
h (cm)(Q)	-0.00324	0.084634	-0.0383	0.979348	-0.001628
1L by 2L	0.00156	0.124743	0.0125	0.990500	0.00078
1L by 3L	-0.03287	0.124743	-0.2635	0.802052	-0.01544
1L by 4L	-0.03410	0.124743	-0.2734	0.795687	-0.01705
2L by 3L	0.01271	0.124743	0.0829	0.938277	0.00636
2L by 4L	0.10734	0.124743	0.8605	0.428833	0.05367
3L by 4L	0.14958	0.124743	1.1999	0.287931	0.07484

a)

Effect Estimates: Var. ln(CPUF) R-sqr= 75570, Adj. 70763 4 3-level factors, 1 Blocks, 85 Runs, MS Pure Error= 1500447 Dv: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(5)	p	Coeff
MeanIntercept	13.75814	0.044201	290.6227	0.000000	13.75814
(1)V _g (rpm)(L)	0.70622	0.115404	6.1153	0.000000	0.35311
V _g (rpm)(Q)	0.06607	0.095062	0.6986	0.521753	0.03304
(2)f (mm/s)(L)	-3.42470	0.115404	-2.9680	0.014322	-0.21338
f (mm/s)(Q)	0.07354	0.095062	0.7612	0.448501	0.03652
(3)D (cm)(L)	-0.70248	0.115404	-6.0880	0.000000	-0.35123
D (cm)(Q)	0.18094	0.095062	1.9258	0.311324	0.09402
(4)h (cm)(L)	-0.53172	0.115404	-4.6072	0.000577	-0.26086
h (cm)(Q)	-0.03112	0.095062	-0.3247	0.750805	-0.01556
1L by 2L	-0.27788	0.141439	-1.9633	0.100831	-0.13885
1L by 3L	-0.25875	0.141439	-1.8981	0.115846	-0.13438
1L by 4L	-0.09242	0.141439	-0.6536	0.542294	-0.04621
2L by 3L	-0.02815	0.141439	-0.1425	0.892261	-0.01008
2L by 4L	0.13335	0.141439	0.9488	0.387181	0.06686
3L by 4L	0.12754	0.141439	0.9024	0.408189	0.06382

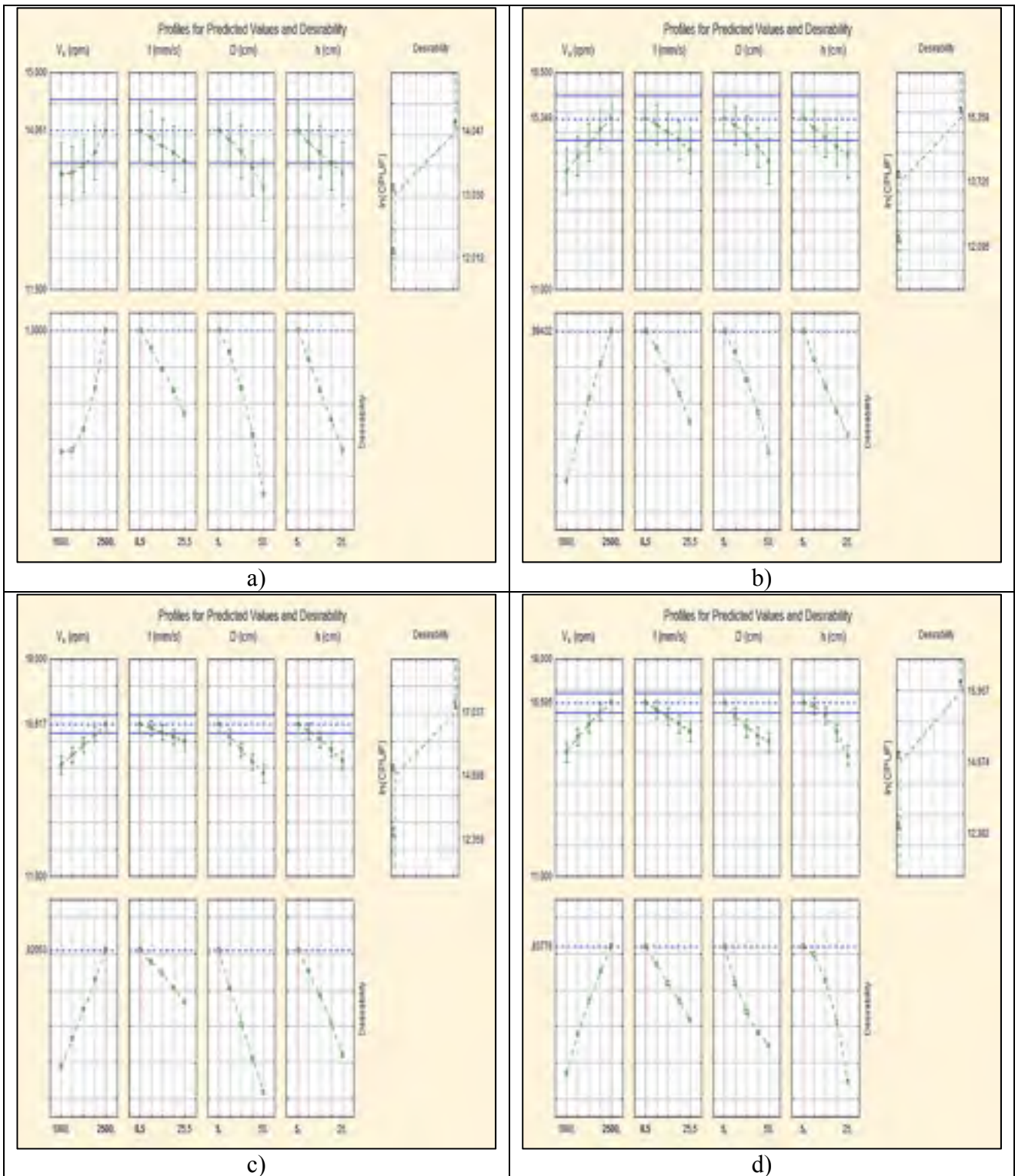
b)

Effect Estimates: Var. ln(CPUF) R-sqr= 8001, Adj. 70050 4 3-level factors, 1 Blocks, 85 Runs, MS Pure Error= 8589769 Dv: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(5)	p	Coeff
MeanIntercept	14.10205	0.026443	540.8716	0.000000	14.10205
(1)V _g (rpm)(L)	1.12478	0.058088	17.1884	0.000012	0.56738
V _g (rpm)(Q)	-3.81481	0.054922	-6.9887	0.798203	-0.00780
(2)f (mm/s)(L)	-3.03572	0.058088	-5.2253	0.000004	-0.31888
f (mm/s)(Q)	0.01940	0.054922	0.3533	0.738301	0.00970
(3)D (cm)(L)	-1.55815	0.058088	-2.6841	0.000003	-0.17087
D (cm)(Q)	-0.04518	0.054922	-0.8220	0.448474	-0.02257
(4)h (cm)(L)	-3.02590	0.058088	-5.2080	0.000004	-0.31783
h (cm)(Q)	0.08887	0.054922	1.6355	0.162871	0.04491
1L by 2L	0.04501	0.080951	0.5560	0.582155	0.02251
1L by 3L	-3.25828	0.080951	-3.3422	0.021143	-0.13444
1L by 4L	-3.15063	0.080951	-3.9038	0.121843	-0.07532
2L by 3L	-3.24578	0.080951	-3.0380	0.028884	-0.12288
2L by 4L	0.30218	0.080951	3.7881	0.010530	0.15110
3L by 4L	0.24754	0.080951	3.0579	0.020571	0.12387

c)

Effect Estimates: Var. ln(CPUF) R-sqr= 78182, Adj. 71405 4 3-level factors, 1 Blocks, 85 Runs, MS Pure Error= 0630759 Dv: ln(CPUF)					
Factor	Effect	Std. Err. Pure Err	t(5)	p	Coeff
MeanIntercept	14.40288	0.027318	526.3214	0.000000	14.40288
(1)V _g (rpm)(L)	1.53275	0.088788	17.1374	0.000000	0.76137
V _g (rpm)(Q)	0.12836	0.057158	2.2457	0.074881	0.06410
(2)f (mm/s)(L)	-4.98735	0.088788	-5.6185	0.000000	-0.24758
f (mm/s)(Q)	0.02119	0.057158	0.3707	0.726040	0.01059
(3)D (cm)(L)	-1.72473	0.088788	-1.9328	0.000003	-0.05206
D (cm)(Q)	-0.17488	0.057158	-3.0590	0.000110	-0.08744
(4)h (cm)(L)	-1.73040	0.088788	-1.9419	0.000120	-0.36523
h (cm)(Q)	1.43032	0.057158	2.5018	0.000411	0.21816
1L by 2L	-0.12073	0.084246	-1.4330	0.211289	0.06036
1L by 3L	0.15602	0.084246	1.8675	0.117732	0.07951
1L by 4L	-0.14771	0.084246	-1.7573	0.099988	-0.17385
2L by 3L	0.31923	0.084246	3.7874	0.013893	0.15616
2L by 4L	-0.08485	0.084246	-1.0065	0.304854	0.11523
3L by 4L	0.37095	0.084246	4.4081	0.000411	0.18047

d)



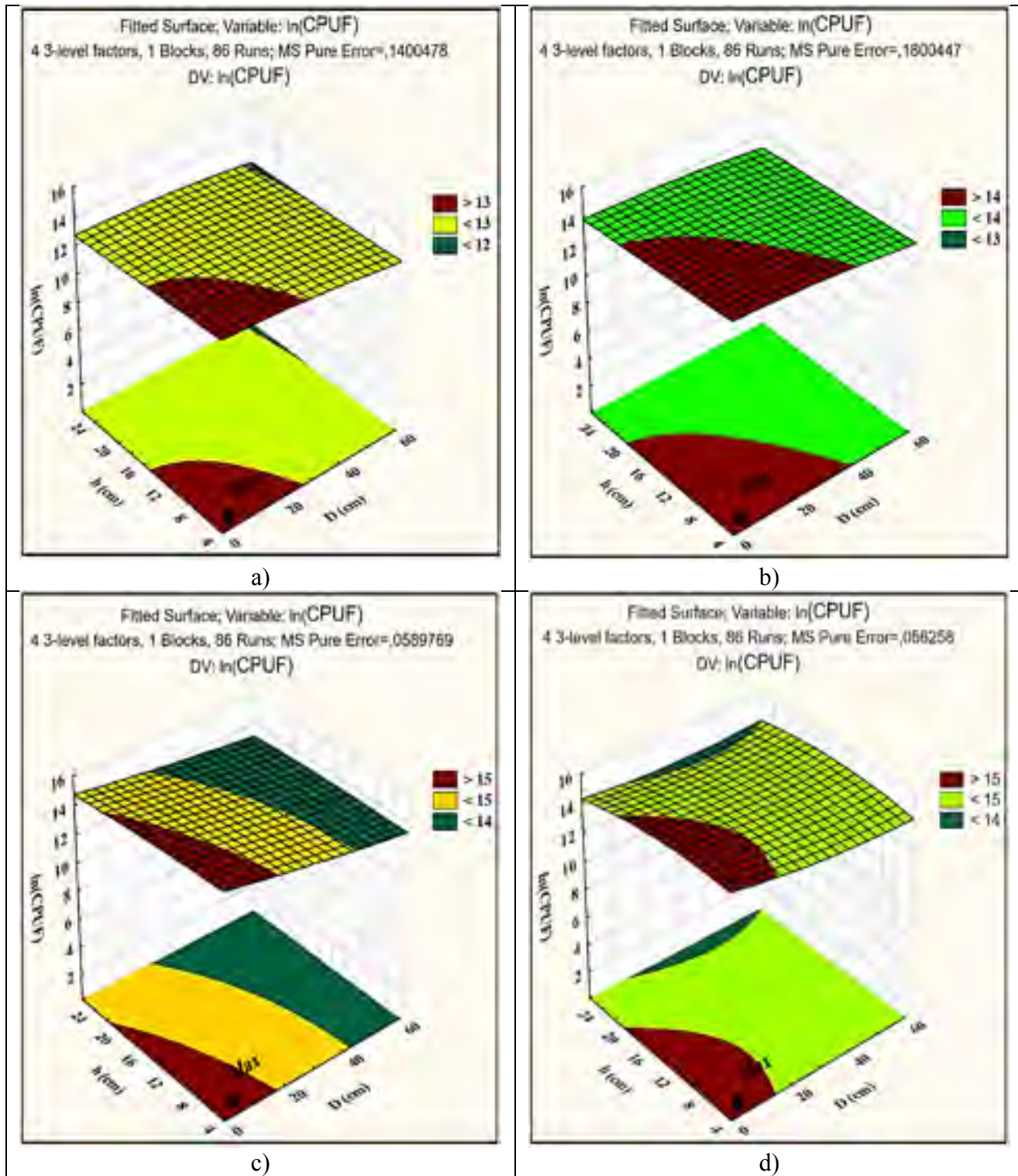


Figure-A VII-2 Dispersion des PUF. a) Ébauche granit blanc b) Ébauche granit noir c) Finition granit blanc d) Finition granit noir.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRESSA. 2015a. « Polissage de chants avec abrasifs métalliques ». < <http://www.abressacanada.ca/indexproduitsGranitlustrechantMetal.html#basdepage2> >. Consulté le 10-05-2015
- ABRESSA. 2015b. « Polissage du chant sur le granit avec le Diamlox ». < <http://www.abressacanada.ca/indexproduitsGranitlustrechantDiamlox.html#basdepage> >. Consulté le 10-05-2015
- ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2010. *Industrial ventilation : a manual of recommended practice for design* (2010), 27th ed. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1 v. (pag. multiple) p.
- Ahmad, I., M. I. Khan et G. Patil. 2011. « Nanotoxicity of Occupational Dust Generated in Granite Stone Saw Mill ». *Nanoscience, Technology and Societal Implications (NSTSI), 2011 International Conference on*, p. 1-6.
- Akbar-Khanzadeh, Farhang, Sheryl Milz, April Ames, Pamela P. Susi, Michael Bisesi, Sadik A. Khuder et Mahboubeh Akbar-Khanzadeh. 2007. « Crystalline Silica Dust and Respirable Particulate Matter During Indoor Concrete Grinding—Wet Grinding and Ventilated Grinding Compared with Uncontrolled Conventional Grinding ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 4, n° 10, p. 770-779.
- AT, Abrasive Technology. 2015. < <http://assets.abrasive-tech.com/literature/StoneBrochure.pdf> >. Consulté le 08-08-2015
- Beaudet, Maurice. 1985. *Hygiène du travail*. Sainte-Foy : Le Griffon d'argile, inc., 706 p.
- Bernard, Pierre. 2006. « Study of the chemical mechanical polishing and modeling of the material removal process ». Ecole Centrale de Lyon, 169 p. < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00632222> >. Consulté le 20-10-2016
- Bin, Zhao, et F. G. Shi. 1999. « Chemical mechanical polishing: threshold pressure and mechanism ». *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 2, n° 3, p. 145-7.

- Cao, Yingxue, Yi Wang, Congcong Li, Jun Ding, Yang Yang et Xiaofen Ren. 2016. « A field measurement study of a parallel-flow push–pull system for industrial ventilation applications ». *International Journal of Ventilation*, vol. 15, no 2, p. 167-181.
- CNESST, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. 2017. « Outil d'identification des risques ». < <http://www.cnesst.gouv.qc.ca/publications/200/Documents/DC200-418web.pdf> >. Consulté le 02-05-2017
- Cox Jr, Louis Anthony Tony. 2011. « An Exposure-Response Threshold for Lung Diseases and Lung Cancer Caused by Crystalline Silica ». *Risk Analysis*, vol. 31, n° 10, p. 1543-1560.
- Croteau, G. A., S. E. Guffey, M. E. Flanagan et N. S. Seixas. 2002. « The effect of local exhaust ventilation controls on dust exposures during concrete cutting and grinding activities ». *AIHA J (Fairfax, Va)*, vol. 63, n° 4, p. 458-67.
- DeCarlo, Peter F., Jay G. Slowik, Douglas R. Worsnop, Paul Davidovits et Jose L. Jimenez. 2004. « Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory ». *Aerosol Science and Technology*, vol. 38, no 12, p. 1185-1205.
- DEKATI. 2016a. « Fine Particle Measurement : - Operating Principle ». < <http://www.dekati.com/products/Fine%20Particle%20Measurement/DLPI> >. Consulté le 21-05-2017
- DEKATI. 2016b. « Products : Classic ELPI® ». < <http://www.dekati.com/products/Discontinued%20Products/Classic%20ELPI%C2%AE> >. Consulté le 15-12-2016
- Djebara, Abdelhakim. 2012. « Métrologie des particules ultrafines d'usinage : optimisation de la caractérisation et de la mesure ». École de technologie supérieure, 148 p. < http://espace.etsmtl.ca/1014/1/DJEBARA_Abelhakim.pdf >. Consulté le 30-10-2016
- Drolet, Daniel, et Guylaine Beauchamp. 2012. *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail*. GUIDE TECHNIQUE T-06: IRSST, 140 p.
- EKC, Eastman Kodak Company. 2004. *Kodak's ergonomic design for people at work* (2004), 2nd ed. Coll. « Ergonomic design for people at work ». Hoboken, N.J.: Wiley, 704 p.

- FEPA, Fédération Européenne des Fabricants de Produits Abrasifs. 2015. < <https://www.fepa-abrasives.com/abrasive-products/grains> >. Consulté le 18-09-2015
- Goodman, Richard E. 1993. *Engineering geology : rock in engineering construction* (1993). New York, N.Y.: J. Wiley and Sons, xviii, 412 p. p.
- Görner, P., et J. F. Fabriès. 1990. *Techniques de mesure automatique des aerosols atmosphériques*. ND 1794: INRS, 32 p.
- Goyer, N., A. Bahloul et C. Veillette. 2010. *Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice*. Coll. « Guide des bonnes pratiques »: IRSST, 16 p.
- GPP, Granite polishing pads. 2015. « Dry Polishing Pads User Guide ». < http://granitepolishingpads.com/Dry_Pads_User_Guide.pdf >. Consulté le 10-11-2016
- Hinds, William C. 1999. « Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles ». In, 2e éd., p. 483. New York, Chichester: Wiley.
- Homand, F., et P. Duffaut. 2000. *Manuel de mécanique des roches*. vol. 1. Les Presses de l'Ecole des Mines, 280 p.
- Huang, RF, SY Lin, S-Y Jan, RH Hsieh, Y-K Chen, C-W Chen, W-Y Yeh, C-P Chang, T-S Shih et C-C Chen. 2004. « Aerodynamic characteristics and design guidelines of push-pull ventilation systems ». *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 49, no 1, p. 1-15.
- IG, IMBOTEC GROUP. 2017. « Gloss Introduction ». < <http://www.gloss-meters.com/GlossIntro2.html> >. Consulté le 25-08-2017
- Johnson, David L, Margaret L Phillips, Chaolong Qi, Anthony T Van et Danielle A Hawley. 2017. « Experimental evaluation of respirable dust and crystalline silica controls during simulated performance of stone countertop fabrication tasks with powered hand tools ». *Annals of work exposures and health*, vol. 61, no 6, p. 711-723.
- Kouam, J., V. Songmene et A. Bahloul. 2013. « Experimental investigation on PM2.5 particle emission during polishing of granite ». *Health*, vol. 05, n° 10, p. 29-35.
- Kulkarni, Pramod, Paul A. Baron et Klaus Willeke. 2011. *Aerosol Measurement : Principles, Techniques, and Applications*, Third Edition. John Wiley & Sons US, 904 p.

- Kusaka, Toshimasa, Masafumi Nakayama, Kyohei Nakamura, Mai Ishimiya, Emi Furusawa et Kouetsu Ogasawara. 2014. « Effect of Silica Particle Size on Macrophage Inflammatory Responses ». *PLOS ONE*, vol. 9, n° 3, p. e92634.
- Li, Y., H. Huang et X. P. Xu. 2006. « Gloss formation and its relationship with roughness in granite grinding ». *Key Engineering Materials*, vol. 304-305, p. 413-16.
- Malkin, S., et C. Guo. 2008. *Grinding technology : theory and application of machining with abrasives*, 2nd ed. New York: Industrial Press, 372 p.
- Martínez, C., A. Prieto, L. García, A. Quero, S. González et P. Casan. 2010. « Silicosis: a Disease with an Active Present ». *Archivos de Bronconeumología ((English Edition))*, vol. 46, n° 2, p. 97-100.
- McDonald, J. Corbett, Alison D. McDonald, Janet M. Hughes, Roy J. Rando et Hans Weill. 2005. « Mortality from Lung and Kidney Disease in a Cohort of North American Industrial Sand Workers: An Update ». *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 49, n° 5, p. 367-373.
- Migan, Emmanuel. 2015. « Étude du polissage des granits : pratiques industrielles, fini de surface et émission des poussières ». École de technologie supérieure, 136 p.
< <http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1456> >. Consulté le 09-12-2016
- OSHA, Occupational Safety and Health Administration. 2016a. « Assigned Protection Factors for the Revised Respiratory Protection Standard ». < <https://www.osha.gov/Publications/3352-APF-respirators.html> >. Consulté le 12-04-2017
- OSHA, Occupational Safety and Health Administration 2016b. « Silica, Crystalline Quartz (Respirable Fraction) ». < https://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_266740.html >. Consulté le 23-07-2017
- Phillips, Margaret L., David L. Johnson et Andrew C. Johnson. 2013. « Determinants of Respirable Silica Exposure in Stone Countertop Fabrication: A Preliminary Study ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 10, n° 7, p. 368-373.
- Plog, Barbara A., et Patricia Quinlan. 2012. *Fundamentals of industrial hygiene*, 6th edition. Itasca : National Safety Council, 1225 p.

- Preston, F. W. 1929. « The theory and design of plate glass polishing machines ». *Society of Glass Technology -- Journal*, vol. 13, n° 50, p. 111-123.
- Ricaud, M., et O. Witschger. 2012. *Les nanomatériaux. Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention*. ED 6050: INRS, 48 p.
- Rosenberg, David M. 2000. « Silica exposure and silicosis ». *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 79, n° 8, p. 60-62.
- RSST, Règlement sur la santé et la sécurité du travail. 2017. < <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013> >. Consulté le 15-09-2017
- Rushton, L. 2007. « Chronic Obstructive Pulmonary Disease and Occupational Exposure to Silica ». *Reviews on Environmental Health*, vol. 22, n° 4, p. 255.
- Sabourin, G. 2012. « Silice cristalline : La poussière invisible qu'on a à l'œil ». <<http://preventionautravail.com/reportages/71-silice-cristalline-la-poussiere-invisible-qu-on-a-a-l-oeil.html>>. Consulté le 05-05-2016
- Saidi, M. N., V. Songmene, J. Kouam et A. Bahloul. 2018. « Rotational and translation-free polishing of granite: surface quality and dust particles emission and dispersion ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no 1, p. 289-303. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2247-8>.
- Saidi, M. N., V. Songmene, J. Kouam et A. Bahloul. 2015. « Experimental investigation on fine particle emission during granite polishing process ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, p. 2109-2121.
- Sánchez Delgado, N., A. Rodríguez-Rey, L. M. Suárez del Río, I. Díez Sarriá, L. Calleja et V. G. Ruiz de Argandoña. 2005. « The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain) ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 42, n° 1, p. 161-166.
- Simcox, N. J., D. Lofgren, J. Leons et J. Camp. 1999. « Silica exposure during granite countertop fabrication ». *Appl Occup Environ Hyg*, vol. 14, n° 9, p. 577-82.

- Songmene, V., J. Kouam et A. Balhoul. 2018. « Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on fine and ultrafine particle emission and distribution during polishing of granite ». *Measurement*, vol. 114, p. 398-408.
- Steenland, K., et E. Ward. 2014. « Silica: A lung carcinogen ». *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, vol. 64, n° 1, p. 63-69.
- Streckeisen, A. 1976. « To each plutonic rock its proper name ». *Earth-Science Reviews*, vol. 12, n° 1, p. 1-33.
- Toenshoff, H. K., B. Karpuschewski et T. Glatzel. 1997. « Particle emission and immission in dry grinding ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 46, n° 2, p. 693-695.
- TSI. 2016a. « Model 3321 Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer ». <http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Spec_Sheets/3321.pdf>. Consulté le 26-06-2016
- TSI. 2016b. « Scanning mobility particle sizer (SMPS) Model 3938 ». <http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3938%20SMPS_US_5001531_RevA_Web.pdf>. Consulté le 26-06-2016
- Vacek, Pamela M, Dave K Verma, William G Graham, Peter W Callas et Graham W Gibbs. 2011. « Mortality in Vermont granite workers and its association with silica exposure ». *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 68, n° 5, p. 312-318.
- Washington Mills, AS. 2015. « Grit size to micron comparison chart ». <<http://www.washingtonmills.no/products/grit-sizes.html>>. Consulté le 11-10-2015
- WehaUSA. 2015. « Weha Dry Diamond Polishing Pads ». <<https://www.wehausa.com/Dry-Diamond-Polishing-Pads-Granite-Marble-Stone-s/1861.htm>>. Consulté le 19-12-2015
- Weis, David D, et George E Ewing. 1999. « Water content and morphology of sodium chloride aerosol particles ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, no D17, p. 21275-21285.
- Xie, J., et J. Tamaki. 2007. « Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, n° 1-3, p. 253-8.

- Xu, X. P., H. Huang et Y. Li. 2003. « Material removal mechanisms in diamond grinding of granite, Part 1: The morphological changes of granite from sawing to grinding ». *Key Engineering Materials*, vol. 250, p. 215-221.
- Yaonan, Cheng, Liu Li, Wang Haiting, Wu Mingyang et Liu Yizhi. 2014. « Investigations on the dust distribution characteristics of dry milling using inserts with various groove profiles ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74, n° 1-4, p. 551-62.
- Yavuz, H., T. Ozkahraman et S. Demirdag. 2011. « Polishing experiments on surface quality of building stone tiles ». *Construction & Building Materials*, vol. 25, n° 4, p. 1707-11.
- Zaghbani, Imed, Victor Songmene et Riad Khettabi. 2009. « Fine and ultrafine particle characterization and modeling in high-speed milling of 6061-T6 aluminum alloy ». *Journal of materials engineering and performance*, vol. 18, no 1, p. 38-48.
- Zhang, Z., C. Kleinstreuer, J. F. Donohue et C. S. Kim. 2005. « Comparison of micro- and nano-size particle depositions in a human upper airway model ». *Journal of Aerosol Science*, vol. 36, n° 2, p. 211-233.