

**Transformation du granit
Caractérisation et contrôle
de la poussière de la silice émise
par le polissage**

Ali Bahloul
Rafael Francisco Vanterpool Jorge
Abdelhakim Djebara
Victor Songmene
Mohamed Nejib Saidi
Jules Kouam
Marcelo Reggio
Fernando Villalpando

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1054

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2019
ISBN : 978-2-89797-062-8
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
juin 2019

Transformation du granit Caractérisation et contrôle de la poussière de la silice émise par le polissage

Ali Bahloul, Rafael Francisco Vanterpool Jorge,
Abdelhakim Djebara
IRSST

Victor Songmene, Mohamed Nejib Saidi, Jules Kouam
École de technologie supérieure

Marcelo Reggio, Fernando Villalpando
Polytechnique Montréal

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1054



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document.

En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.





ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier la compagnie Lacroix Granit pour les informations, le soutien et la fourniture des échantillons de granit. Ils expriment leur gratitude envers le personnel des laboratoires de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et de l'organisme IOS Services Géoscientifiques inc. pour les analyses minérales des différents échantillons de granit et de poussières prélevés lors des essais expérimentaux. Ils remercient également le technicien, monsieur Christian Sirard, pour son support technique ainsi que madame Nicole Goyer pour sa contribution à la mise en place du projet.

SOMMAIRE

Les régions de l'Estrie et de Montréal regroupent un nombre important d'établissements œuvrant dans le secteur de la fabrication de produits en granit contenant de la silice cristalline (SiO_2). La poussière émise lors de la transformation de ce matériau peut contenir un pourcentage élevé de quartz et représenter ainsi un risque élevé pour la santé des travailleurs exposés. En effet, le polissage manuel à sec ou par voie humide des matériaux graniteux présente le pire scénario d'exposition des travailleurs à de la poussière lors de la transformation du granit. Cette poussière est projetée dans toutes les directions sous l'effet des mouvements d'air causés par la rotation de l'outil abrasif de polissage. La poussière de forte taille finit par se déposer sous l'action de la gravité. Par contre, les poussières fines et ultrafines sont entraînées dans le tourbillon créé par la rotation de l'outil et se retrouvent dans la zone respiratoire du travailleur. La force centrifuge entraîne la dispersion de cette poussière au-delà de la zone de polissage; elle se répand ainsi dans l'environnement de travail. Au fur et à mesure que la vitesse de rotation de l'outil augmente, les poussières fines et ultrafines se dispersent davantage allant même jusqu'à contaminer des espaces encore plus éloignés. Dans une telle situation, les travailleurs se trouvant à proximité de l'outil ne sont pas les seuls exposés. En outre, le sillage rotatif présente une complexité dans l'élaboration d'un système de réduction à la source. L'inefficacité de la mise en place d'une hotte d'aspiration à proximité du procédé de polissage a d'ailleurs déjà été démontrée.

La présente étude contribue à l'avancement des connaissances nécessaires pour déterminer des moyens d'élimination et de réduction à la source des poussières fines et ultrafines contenant de la silice cristalline et qui sont émises lors de la transformation du granit. L'élimination et la réduction à la source des émissions sont les moyens privilégiés pour assurer un environnement de travail sain et sécuritaire; l'utilisation des équipements de protection individuelle demeurant la dernière solution à adopter en milieu de travail.

Pour parvenir à des solutions efficaces, une étude a d'abord été réalisée en laboratoire, portant sur 1) la caractérisation, 2) le contrôle de la poussière de silice cristalline émise par les opérations de polissage à sec et humide. La caractérisation des poussières fines et ultrafines émises par le polissage était nécessaire puisque les solutions de contrôle des émissions dépendent de la granulométrie et de la concentration des polluants émis par le procédé de polissage. Les moyens de contrôle des émissions incluaient la modification de certains paramètres de travail (vitesse de rotation et vitesse d'avance du procédé de polissage, polissage à sec ou par voie humide, quantité d'eau).

Deux blocs de granit ont été choisis pour la présente recherche : un granit noir et un granit blanc. Le granit noir se caractérisait par sa très faible teneur en silice cristalline, contrairement au granit blanc dont la teneur était plus forte. Les opérations de polissage à sec et par voie humide du granit ont été effectuées avec une machine-outil dans un environnement contrôlé. En absence de moyens de contrôle et en isolant l'opération de polissage, l'émission, la dispersion et le taux de silice cristalline de la poussière émise par l'opération de polissage des matériaux graniteux ont été caractérisés selon des paramètres de procédé de polissage variables. Cette caractérisation a permis d'établir des relations entre les paramètres du procédé (vitesse, abrasif utilisé, taille du disque, nature du granit, opération à sec ou par voie humide, quantité d'eau) et les émissions de poussières fines et ultrafines, sans compromettre la qualité du produit final. Pour cette raison, l'état de fini de surface a aussi été évalué. Le granit noir émet plus de poussière que le granit blanc. Les particules ultrafines sont émises en plus grand

nombre que celles fines. Le polissage de finition du granit génère essentiellement des particules ultrafines.

Par la suite, des simulations expérimentales et numériques ont permis d'analyser la dispersion de la poussière sous l'effet de la rotation d'un disque, reconstituant ainsi une opération de polissage sans déplacement de l'outil de polissage. En utilisant des particules générées à base d'une solution de sel (NaCl), ces simulations ont permis de comprendre l'effet de la rotation sur la répartition spatiale des aérosols autour du disque rotatif, selon la granulométrie des particules et la vitesse de rotation. L'analyse de la dispersion des particules ultrafines montre que les concentrations de ces particules sont très élevées dans toute la zone de mesure proche ou éloignée du disque rotatif.

À l'aide de ces simulations, trois concepts de réduction à la source ont été analysés pour déterminer leur degré d'adaptation aux opérations de polissage. Ces concepts étaient : 1) le soufflage-aspiration, 2) le carter d'aspiration, 3) les fentes d'aspiration intégrées au disque. Cette analyse paramétrique a permis de déterminer l'efficacité de ces trois concepts selon les paramètres de ventilation. Le comportement des particules a parallèlement été comparé à celui d'un gaz traceur. Le gaz traceur présente une technique intéressante de prédiction du comportement des poussières et de l'efficacité de la ventilation en espace de travail. Le carter d'aspiration et les fentes d'aspiration intégrées au disque permettent de retirer efficacement la poussière émise par le disque rotatif.

En somme, cette étude a permis de comprendre les mécanismes de génération et de dispersion des particules lors des opérations de polissage à sec et par voie humide des matériaux granitiques, afin de mieux contrôler le comportement des poussières fines et ultrafines, tant par le procédé industriel lui-même que par la ventilation de l'espace de travail.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
1. INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	5
2.1 Réduction à la source	5
2.2 Effet du procédé de transformation	7
2.3 Simulation numérique (CFD).....	8
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	11
4. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU PROCÉDÉ DE POLISSAGE	13
4.1 Méthodologie	13
4.1.1 Échantillons de granit à l'étude	13
4.1.2 Banc d'essai	16
4.1.3 Outil de contrôle de pression	17
4.1.4 Analyse de l'état de fini de surface	20
4.1.5 Caractérisation de la poussière	22
4.1.6 Plan d'expérience de l'étude paramétrique de polissage à sec.....	25
4.1.7 Procédés de polissage humide	27
4.2 Résultats.....	28
4.2.1 Polissage sans translation	28
4.2.2 Polissage régulier (avec translation).....	33
4.2.3 Travail humide	47
4.3 Récapitulation	53
5. SIMULATION EXPÉRIMENTALE	55
5.1 Méthodologie	55
5.1.1 Généralité.....	55
5.1.2 Dispersion	56
5.1.3 Concepts de réduction à la source	56
5.2 Résultats.....	58

5.2.1	Dispersion	59
5.2.2	Réduction à la source	61
5.3	Récapitulation	66
6.	SIMULATION NUMÉRIQUE	69
6.1	Méthodologie	69
6.1.1	Généralité	69
6.1.2	Dispersion	69
6.1.3	Réduction à la source	71
6.2	Résultats	71
6.2.1	Dispersion des particules autour du procédé de polissage	71
6.2.2	Réduction à la source	74
6.3	Récapitulation	80
7.	DISCUSSION	81
7.1	Polissage du granit	81
7.1.1	Matériau granit	81
7.1.2	Procédé de polissage	82
7.2	Réduction à la source : ventilation	87
7.2.1	Soufflage-aspiration	88
7.2.2	Carter d'aspiration	88
7.2.3	Fentes d'aspiration intégrées au disque	89
8.	CONCLUSION	91
	BIBLIOGRAPHIE	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Taux de silice cristalline selon le matériau	2
Tableau 2.	Composition chimique des granits étudiés (% massique).....	13
Tableau 3.	Minéralogie d'une lame mince polie de granit blanc	15
Tableau 4.	Minéralogie d'une lame mince polie de granit noir.....	16
Tableau 5.	Classification des abrasifs selon les types de grains.....	20
Tableau 6.	Correspondance entre la taille et le diamètre des grains.....	21
Tableau 7.	Position des emplacements d'échantillonnage	23
Tableau 8.	Coefficients du modèle statistique d'émission des PF pour les deux phases du procédé de polissage et les deux types de granit (R^2 entre 86 et 97 %)......	84
Tableau 9.	Optimisation des paramètres de polissage pour réduire l'émission des PF lors du polissage régulier, pour une désirabilité entre 94 et 100 %.....	84
Tableau 10.	Coefficients du modèle statistique d'émission des PUF pour les deux phases de polissage et les deux types de granit (R^2 entre 87 et 98 %).	85
Tableau 11.	Optimisation des paramètres de polissage pour réduire l'émission des PUF lors du polissage régulier, pour une désirabilité entre 81 et 100 %.....	85
Tableau 12.	Coefficient du modèle statistique de la rugosité de la surface pour les deux phases de polissage et les deux types de granit (R^2 entre 86 et 99 %).	86
Tableau 13.	Optimisation des paramètres de polissage pour réduire la rugosité de la surface lors du polissage régulier, pour une désirabilité entre 91 et 100 %	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Scénario de dispersion des particules lors du polissage. Source : Goyer <i>et al.</i> , 2010.....	6
Figure 2.	a) granit blanc, b) granit noir.	13
Figure 3.	Échantillon de granit blanc, image en électrons rétrodiffusés.....	14
Figure 4.	Distribution minérale de l'échantillon de granit blanc.....	14
Figure 5.	Échantillon de granit noir, image en électrons rétrodiffusés.....	15
Figure 6.	Distribution minérale de l'échantillon de granit noir.....	16
Figure 7.	Outil de polissage : a) dessin d'ensemble du porte-outil; b) photo de l'outil assemblé.	18
Figure 8.	Calibration de la force et de la pression appliquées sur le contact abrasif-pièce par la compression d des ressorts disques Belleville.	19
Figure 9.	Fini de surface en fonction de la taille des grains abrasifs.....	19
Figure 10.	Schéma du dispositif expérimental servant à prélever la poussière respirable émise par le procédé de polissage du granit.....	23
Figure 11.	Sites de mesure de l'émission et de la dispersion des poussières en périphérie du dispositif expérimental du procédé de polissage du granit.....	26
Figure 12.	Schéma du modèle statistique.	27
Figure 13.	Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage sans translation du granit blanc, à l'ébauche et à la finition.....	29
Figure 14.	Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage sans translation du granit noir, à l'ébauche et à la finition.	29
Figure 15.	Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit blanc.....	30
Figure 16.	Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit noir.	30
Figure 17.	Répartition radiale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.	31
Figure 18.	Répartition radiale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.....	31
Figure 19.	Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.....	32
Figure 20.	Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.	32
Figure 21.	Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage régulier du granit blanc, à l'ébauche et à la finition.	33
Figure 22.	Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage régulier du granit noir, à l'ébauche et à la finition.....	34

Figure 23.	Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit blanc.....	34
Figure 24.	Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit noir.....	35
Figure 25.	Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse d'avance – Granit blanc.....	35
Figure 26.	Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse d'avance – Granit noir.....	36
Figure 27.	Répartition horizontale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.....	37
Figure 28.	Répartition horizontale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.....	37
Figure 29.	Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.....	38
Figure 30.	Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.....	38
Figure 31.	Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit blanc.....	39
Figure 32.	Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit noir.....	39
Figure 33.	Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit blanc.....	40
Figure 34.	Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit noir.....	40
Figure 35.	Concentration totale en nombre des PF en fonction du diamètre du disque abrasif lors du polissage régulier des granits (a) blanc et (b) noir.....	41
Figure 36.	Concentration totale en nombre des PUF en fonction du diamètre du disque abrasif lors du polissage régulier des granits (a) blanc et (b) noir.....	42
Figure 37.	Concentration en masse de la poussière respirable en fonction de la distance horizontale pour (a) le granit blanc et (b) le granit noir.....	43
Figure 38.	Concentration en masse du quartz en fonction de la distance – Granit blanc.....	44
Figure 39.	Morphologie des particules obtenues par MEB sur les différents étages de l'ELPI.....	45
Figure 40.	Granulométrie des particules lors du polissage régulier des granits (a) blanc et (b) noir.....	46
Figure 41.	Exemple de spectre EDS de la composition chimique du granit blanc.....	46
Figure 42.	Pourcentage en masse de Si obtenu à partir de l'EDS des particules recueillies sur l'ELPI, lors du polissage des granits noir et blanc.....	47
Figure 43.	Concentration en nombre des PUF, lors du polissage à 1500 tr/min, à différents débits d'eau pour les granits (a) blanc et (b) noir.....	48

Figure 44.	Concentration en nombre des PUF, lors du polissage à 2500 tr/min, à différents débits d'eau, pour les granits (a) blanc et (b) noir.	49
Figure 45.	Concentration en nombre des PF fines de granit blanc (a) et noir (b), à 1500 tr/min et à différents débits d'eau.	50
Figure 46.	Concentration en nombre des PF de granit blanc (a) et noir (b), à 2500 tr/min et à différents débits d'eau.	51
Figure 47.	Concentration totale en nombre des particules (PUF et PF) de granit blanc (a) et noir (b), à différents débits d'eau.....	52
Figure 48.	Concentration totale en masse des particules (PUF et PF) de granit blanc (a) et noir (b), à différents débits d'eau.....	53
Figure 49.	Banc d'essai avec indication des points de mesure.	55
Figure 50.	Schéma d'alimentation des particules ou des gaz traceurs.	56
Figure 51.	Système soufflage-aspiration.	57
Figure 52.	Carter d'aspiration.....	57
Figure 53.	Aspiration par le disque.....	58
Figure 54.	Granulométrie des particules de NaCl à différentes distances horizontales.	59
Figure 55.	Dispersion des particules de NaCl dans la direction horizontale à différentes vitesses de rotation.	60
Figure 56.	Dispersion des particules de NaCl dans la direction verticale à différentes vitesses de rotation.	61
Figure 57.	Comparaison de la dispersion du CO ₂ et des particules de NaCl selon la direction horizontale, à différentes vitesses de rotation.	61
Figure 58.	Efficacité du système soufflage-aspiration à différentes vitesses de rotation et à différents débits de soufflage et d'aspiration.....	62
Figure 59.	Débit de soufflage ayant une efficacité de 95 % en fonction de la vitesse de rotation, à différents débits d'aspiration.....	63
Figure 60.	F(D _a) est tracée en fonction du débit d'aspiration.	64
Figure 61.	Efficacité du système de carter d'aspiration à différentes vitesses de rotation. ..	64
Figure 62.	Comparaison de l'efficacité des systèmes de fentes d'aspiration intégrées au disque, en utilisant les particules de NaCl.	65
Figure 63.	Efficacité du système de fentes d'aspiration intégrées au disque en fonction du débit d'aspiration, à différentes vitesses de rotation et en utilisant les particules de NaCl.....	66
Figure 64.	Comparaison de l'efficacité du système de fentes circulaires d'aspiration intégrées au disque utilisant le gaz de CO ₂ ou les particules de NaCl.....	66
Figure 65.	Banc d'essai simplifié.....	70
Figure 66.	Domaine physique de calcul.	71
Figure 67.	Iso-contours de vitesse (données expérimentales et numériques).	72

Figure 68.	Comparaison des données numériques et expérimentales de dispersion des particules, à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.	72
Figure 69.	Comparaison des données numériques et expérimentales de dispersion du CO ₂ et de la poussière, à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.	73
Figure 70.	Comparaison des données numériques de dispersion du CO ₂ et des particules, à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.	73
Figure 71.	Isocontours de concentration à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.	74
Figure 72.	Efficacité du soufflage-aspiration en fonction du débit de soufflage pour différentes vitesses de rotation du disque.	75
Figure 73.	Isocontours de concentration à différents débits de soufflage, avec une vitesse de rotation de a) 1000 tr/min et b) 2500 tr/min.	76
Figure 74.	Efficacité du soufflage-aspiration obtenue par simulations numériques.....	77
Figure 75.	Débit de soufflage à 95 % d'efficacité pour les simulations numérique et expérimentale.	77
Figure 76.	Efficacité du carter d'aspiration en fonction du débit d'aspiration pour différentes vitesses de rotation du disque.	78
Figure 77.	Isocontours de concentration de gaz traceur à différents débits d'aspiration, pour une vitesse de rotation du disque de a) 1000 tr/min et b) 2500 tr/min.	79
Figure 78.	Efficacité du carter d'aspiration en fonction du débit d'aspiration, à différentes vitesses de rotation du disque.....	79

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les régions de l'Estrie et de Montréal regroupent un nombre important d'établissements œuvrant dans le secteur de la fabrication de produits en granit et en matériaux composites contenant de la silice cristalline. La poussière émise lors de la transformation de ces matériaux peut contenir un pourcentage élevé de silice cristalline, aussi appelée quartz, qui représente un risque significatif pour la santé des travailleurs. Sur le terrain, les différents paramètres influençant les émissions interagissent entre eux et fluctuent selon les différents postes de travail, ce qui complexifie la recherche de solution en entreprise.

Préoccupés par le problème d'exposition à la silice cristalline dans ce secteur, la direction régionale de l'Estrie de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST)¹ et ses partenaires du réseau de la santé ont mis en place un programme d'intervention régional (PIR) auprès des milieux industriels, lequel a débuté en 2004 et s'est étendu sur une période de 5 ans (Couture *et al.*, 2010).

Face à la complexité de cette problématique, un comité a aussi été mis en place en 2007 par la CSST pour répondre à la demande de soutien des régions de l'Estrie et de Montréal. Ce comité était composé de chercheurs de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), et de représentants de la CSST et du réseau de la santé. Les premières rencontres ont permis d'échanger les informations acquises par le réseau lors de ses multiples interventions auprès des entreprises de transformation du granit et de matériaux composites. Une revue de la littérature, réalisée par la CSST et complétée par plusieurs visites en entreprise dans les régions de Montréal et de l'Estrie auxquelles a participé l'IRSST, a permis de mieux cerner la problématique et de répertorier les équipements et les façons de faire. Le partage des connaissances et des expériences en entreprise a permis l'identification des postes et des procédés de transformation du granit et des matériaux composites ayant une influence considérable sur les émissions de poussières.

Une première étape d'intervention fut l'élaboration d'un guide de bonnes pratiques destiné au secteur de la transformation du granit et autres matériaux contenant du quartz (Goyer *et al.*, 2010). Toutefois, les membres de ce comité ont tous reconnu la nécessité d'acquérir des connaissances complémentaires relatives à : 1) la caractérisation des émissions de poussières, en particulier lors des opérations de finition, 2) l'usage de l'eau, 3) les moyens adéquats de réduction de ces émissions.

La caractérisation de la poussière de silice cristalline est une tâche importante puisque les solutions de contrôle des émissions de ce contaminant dépendent de la granulométrie et de la concentration des poussières émises lors des opérations de finition. Les particules de fortes tailles sont projetées et se déposent sur de courtes distances, alors que les particules fines se dispersent davantage et contaminent des espaces plus éloignés de leur lieu d'émission. Un meilleur contrôle des émissions à la source permettrait de protéger à la fois les travailleurs qui polissent le granit et ceux qui sont éloignés de la zone d'émission. La caractérisation de la poussière émise permettrait aussi d'évaluer les risques pour la santé des travailleurs puisque la

¹ La CSST est devenue la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) en 2016 à la suite d'une fusion de trois organismes.

toxicité de la poussière dépend de la nature, de la taille et de la concentration des particules émises par les opérations effectuées en milieu de travail.

Ainsi, dans une deuxième étape, il a été proposé que l'IRSST réalise une étude sur les situations de travail qui demeurent problématiques soit celles du polissage manuel à sec et humide, en particulier le polissage d'un composite à forte teneur en quartz. Pour parvenir à des solutions efficaces, il s'avérerait essentiel de mener une étude en laboratoire sur la caractérisation et sur les moyens de contrôle de la poussière de silice cristalline émise lors des opérations de polissage à sec et humide.

1.2 Problématique

La transformation du granit, du marbre ou de matériaux composites entraîne l'émission et la dispersion dans l'air de poussière contenant de la silice cristalline. La teneur en silice cristalline dépend du matériau utilisé (tableau 1). Les matériaux naturels contiennent moins de silice cristalline que les matériaux synthétiques. À titre d'exemple, le granit peut en contenir jusqu'à 45 % alors que le taux de silice cristalline des matériaux synthétiques peut dépasser 93 % (Worthington *et al.*, 2014).

Tableau 1. Taux de silice cristalline selon le matériau

Pierre	Proportion de silice (%)
Matériaux synthétiques	≥93
Quartzite	95
Quartz, Grès	90
Grès	60
Granit	10 – 45
Ardoise	Variable
Stéatite	Variable

Tiré de: Silica Hazards from Engineered Stone Countertops, NIOSH Science Blog, Mars 2014; ASTM C616, Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone; American Geological Institute, Dictionary of Geological Terms.

Les taux d'émission, la granulométrie et la concentration de la poussière varient en fonction des équipements, des opérations, des paramètres de ventilation, des matériaux transformés et des outils utilisés pour couper, tailler, scier ou polir ces matériaux. Les matériaux utilisés pour le polissage peuvent aussi contenir de la silice cristalline et, par conséquent, en émettre davantage. Le travail par voie humide permet de réduire l'exposition des travailleurs à la silice cristalline; le niveau d'exposition peut toutefois demeurer élevé dans certaines situations de travail. Les travaux de finition et de polissage sont les activités qui présentent le plus de risque (American Thoracic Society, 1997).

Aux États-Unis, l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) et le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ont publié une alerte sur la fracturation hydraulique des matériaux en granit entraînant une exposition à la silice cristalline (OSHA/NIOSH, 2012). Récemment, ces mêmes organismes ont publié une nouvelle alerte sur l'exposition à la silice cristalline des travailleurs du secteur de la transformation du granit durant la fabrication et

l'installation des matériaux granitiques et synthétiques (OSHA/NIOSH, 2015). Malgré la mise en place de moyens de contrôle de la poussière pour prévenir l'exposition des travailleurs à la silice cristalline (Marble Institute of America, 2008; Phillips *et al.*, 2013), des analyses sur le terrain et des inspections menées par l'OSHA ont indiqué que le contrôle des niveaux d'exposition demeure inadéquat. L'usage de l'eau comme moyen de réduction de l'exposition a également déjà été étudié (Phillips *et al.*, 2013); toutefois, le niveau d'exposition peut dépasser les valeurs limites malgré le travail par voie humide.

En 2016, l'OSHA a révisé le règlement sur l'exposition à la silice cristalline à cause de ses effets néfastes sur la santé des travailleurs américains. La valeur d'exposition moyenne pondérée sur 8 h (VEMP) a été réduite de moitié, passant de 0,1 mg/m³ à 0,05 mg/m³ de poussières respirables de silice cristalline en se basant sur diverses analyses toxicologiques et des données-terrains (American Federal Register, 2016). En outre, l'OSHA estime que ce nouveau seuil d'exposition à la silice cristalline est la valeur limite qui pourrait être atteinte dans l'industrie. Le [Règlement sur la santé et la sécurité du travail](#) (RSST, 2007) établit la valeur d'exposition moyenne pondérée sur 8 h (VEMP) applicable aux travailleurs exposés à la silice sous forme de quartz à 0,1 mg/m³, en fonction d'une semaine de travail de 40 heures. À l'instar de l'OSHA, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) recommande, pour la poussière de quartz, une valeur plus basse, soit 0,05 mg/m³ (ACGIH, 2010).

La nature, la granulométrie et la teneur en silice cristalline de la poussière sont les paramètres importants dans l'évaluation du risque. La poussière inerte entraîne une surcharge pulmonaire et une réduction de la capacité respiratoire, tandis que la poussière contenant de la silice cristalline peut provoquer la silicose, une maladie qui entraîne une inflammation chronique et une fibrose pulmonaire. Elle se traduit par une réduction progressive et irréversible de la capacité respiratoire, même après l'arrêt de l'exposition aux poussières (ACGIH, 2010). La silicose peut même conduire à la tuberculose. Il existe aussi une période de latence, parfois très longue, entre l'exposition à la silice cristalline et l'apparition des premiers symptômes. En outre, comme les symptômes ne lui sont pas propres, le développement de la maladie peut passer inaperçu jusqu'à un stade avancé. La silice cristalline occupe le deuxième rang dans le classement des poussières toxiques causant des décès, tout de suite après l'amiante.

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) considère la silice cristalline comme un cancérogène démontré chez l'humain (CIRC, 1997). C'est la raison pour laquelle l'exposition des travailleurs doit être réduite au minimum, même lorsqu'elle demeure à l'intérieur des normes prescrites. D'autres rapports provenant d'Europe et d'Asie présentent des cas de silicose liés à l'exposition des travailleurs du secteur de la transformation du granit (Vadillo *et al.*, 2011; Martinez *et al.*, 2010; Kramer *et al.*, 2012; Lacasse *et al.*, 2010). Entre autres, en France, la silicose est reconnue depuis une décennie comme une maladie professionnelle redoutable (Le Bacle, 2010). La silicose fait également partie des maladies pulmonaires professionnelles que reconnaît la CNESST, après l'asthme professionnel et l'amiantose. Cette maladie est irréversible et peut entraîner l'invalidité et la mort. Entre 2004 et 2008, la CSST a reconnu 157 cas de maladie de silicose (Sabourin, 2013). Ajoutons que l'inhalation de particules de silice cristalline peut aussi engendrer d'autres maladies pulmonaires, telles que la bronchite chronique et le cancer.

Au Québec, plus de 200 établissements qui exercent des activités de transformation de ces matériaux ont été recensés, dont 30 seulement en Estrie, où plus de 800 travailleurs œuvrent (Goyer *et al.*, 2010). Selon un rapport de conférence du Centre de santé et de services sociaux

(CSSS) du Haut-Saint-François et de la Direction de la santé publique (DSP) de l'Estrie, au congrès de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail (AQHSST), au moins 9 cas de silicose ont été acceptés par la CSST de l'Estrie, de 1994 à 2004, pour des travailleurs actifs ou retraités du secteur de la transformation du granit (Couture *et al.*, 2010). Ce rapport donne aussi un portrait résumé de l'exposition aux poussières de quartz selon le poste de travail. À titre d'exemple, le travailleur du granit peut être exposé à $0,21 \text{ mg/m}^3$ alors que celui qui transforme des matériaux synthétiques peut être exposé à $0,64 \text{ mg/m}^3$. Même si des moyens de réduction de l'exposition ont été mis en place telle l'aspiration à la source dans la zone respiratoire des travailleurs, ces derniers demeurent souvent nettement surexposés à la poussière de quartz. Malgré la mise en place de ces correctifs dans le cadre du programme d'intervention régional, des postes comme celui du taillage ou celui du polissage sont encore caractérisés par des concentrations de poussières de quartz supérieures à $0,1 \text{ mg/m}^3$ (Couture *et al.*, 2010). Pour ces situations, il est donc essentiel de bien comprendre les mécanismes de génération et de dispersion de la poussière afin de proposer des correctifs adéquats et efficaces.

Les postes de travail en usine interagissent entre eux, rendant ainsi difficile la caractérisation des émissions d'une opération de transformation du granit et des matériaux composites sur le terrain. Il est donc important d'étudier isolément l'opération de la transformation en laboratoire. La présente étude a ciblé le polissage pour analyser la génération et la dispersion des poussières parce qu'il représente le pire scénario d'opération de transformation. Une meilleure compréhension des mécanismes de génération des émissions de la poussière lors de cette opération permet d'identifier les moyens appropriés de réduction de l'émission de la poussière.

Le port d'un appareil de protection respiratoire (APR) est un moyen de prévention de l'exposition des travailleurs à la poussière de silice cristalline, surtout si la concentration de poussières respirables excède $0,1 \text{ mg/m}^3$ (Lara et Vennes, 2002). Cependant, le RSST stipule que la disposition relative aux équipements individuels de protection respiratoire « ne diminue en rien l'obligation de l'employeur de réduire à la source même les dangers pour la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs » (art. 45 du *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* 2016)². Dans l'esprit de la [Loi sur la santé et la sécurité du travail](#) (LSST) et des règlements, l'utilisation des équipements de protection individuelle représente la dernière solution à adopter en milieu de travail. De plus, le port d'un tel équipement est non seulement inconfortable pour les travailleurs, mais il doit de surcroît être adéquatement utilisé, fréquemment ajusté et correctement adapté aux conditions de travail (Mostofi *et al.*, 2011, 2012; Bahloul *et al.*, 2014a, 2015, 2016; Mahdavi *et al.*, 2015, Brochet *et al.*, 2015).

² <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013?langCont=fr#ga:l-vi-h1>

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Réduction à la source

Dans le secteur de la transformation des matériaux de granit, l'utilisation des machines automatisées confinées dans un espace contrôlé fait relativement peu appel aux travailleurs et permet une élimination efficace des émissions de poussières de silice cristalline. Or, les travaux de finition exigent souvent un travail manuel de précision. Dans ce contexte, il est nécessaire de faire appel à des techniques de réduction à la source des émissions de poussières générées lors de la transformation du matériau. Comme mentionné auparavant, les équipements et les outils de travail utilisés dans le secteur du granit font appel à des mouvements de rotation à grande vitesse qui génèrent un écoulement turbulent d'air rotatif autour de l'outil, favorisant une accumulation et une dispersion forcées de poussières fines dans l'environnement de travail. En outre, le travailleur, toujours en mouvement, manipule ses outils dans différentes directions. Par conséquent, les moyens classiques de réduction à la source (les hottes ou les tables d'aspiration) sont souvent difficilement applicables à de telles situations.

Quelques recherches se sont intéressées à la problématique de l'élimination ou de la réduction de l'exposition des travailleurs du secteur du granit. En France, l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) recommande l'utilisation de cabines ventilées pour le contrôle de la poussière dégagée au cours du procédé de transformation de la pierre (INRS, 2006). En usine, les matériaux à transformer sont généralement de grande taille; ils sont alors transportés par des chariots ou sur un rail. Par conséquent, les cabines ventilées sont généralement inadaptées à de telles conditions en raison de la dimension des pièces. En outre, ces cabines consomment beaucoup d'énergie et sont très coûteuses à installer et à entretenir, particulièrement pour les petites et moyennes entreprises (PME) très présentes dans ce secteur. Il existe aussi d'autres moyens pour réduire les émissions de poussières, par l'utilisation d'outils à jet d'eau ou d'un système de captage à la source. Bien que les jets d'eau réduisent substantiellement les émissions de particules, les concentrations de la silice cristalline dans l'air demeurent problématiques pour certaines opérations, notamment celles effectuées avec des matériaux composites. La combinaison du travail humide à celui d'un système de captage à la source permettrait de diminuer l'exposition des travailleurs à la silice cristalline. L'accroissement de l'efficacité de ces moyens combinés a été démontré dans certaines études entreprises lors de la transformation du granit et du marbre (Health and Safety Executive, 2001; Akbar-Khanzadeh, 2007; Oberbeck et Fairfax, 2008; Phillips et Johnson, 2012); mais certains contextes de travail demeurent problématiques.

Au Québec, un comité de travail réunissant du personnel de la CSST et de l'IRSST a préparé et publié un guide de bonnes pratiques intitulé *Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice à l'intention des entreprises du secteur de la transformation du granit et autres matériaux contenant du quartz* (Goyer et al., 2010). Ce guide présente les concepts généraux de base des systèmes de contrôle de la poussière industrielle, en suggérant des méthodes de travail pouvant améliorer la qualité de l'air. Cependant, il ne répond pas spécifiquement à tous les problèmes identifiés par le Réseau de santé publique en santé au travail dans le secteur de la transformation du granit. Les solutions proposées sont coûteuses ou insuffisantes pour garantir un milieu de travail sanitaire dans toutes les situations, notamment lors du polissage à sec ou par voie humide de matériaux à très haute teneur en silice cristalline.

Le polissage nécessite souvent l'utilisation d'outils rotatifs où la vitesse de rotation joue un rôle prépondérant dans la dispersion des particules dans le milieu de travail. Les particules émises sont soumises sans arrêt aux chocs des molécules d'air, de sorte que le parcours s'apparente davantage à une série de courbes planes plutôt qu'à une ligne droite. Elles sont freinées par les molécules d'air et finissent par suivre les mouvements de l'air ambiant ou par se sédimer sur des distances supérieures à celles du libre parcours moyen³ apparent de la particule. Ce parcours est tributaire de la masse volumique et du diamètre de la particule. Les particules fines, celles qui sont les plus nuisibles à la santé des travailleurs, sont entraînées dans le tourbillon créé par la rotation de l'outil pour se retrouver dans la zone respiratoire du travailleur. Sous l'effet des forces centrifuges, ces particules sont de plus en plus concentrées en périphérie de la zone d'écoulement de rotation, avant de se disperser plus largement dans l'environnement de travail. Une portion de ces particules fines peut aussi être entraînée dans le sillage de plus grosses particules ou par de grosses gouttelettes projetées par l'outil de travail. Avant de se déposer ou de se fractionner plus loin, ces grosses particules libèrent généralement les petites. Ces dernières peuvent alors voyager et contaminer des espaces encore plus éloignés (Figure 1). Dans une telle situation, les travailleurs se trouvant à proximité de l'outil ne seront pas les seuls exposés.



Figure 1. Scénario de dispersion des particules lors du polissage.
Source : Goyer et al., 2010.

D'autres paramètres influencent aussi la dispersion de la poussière de silice cristalline en milieu de travail tels que le degré d'inclinaison du plan de travail (habitudes de travail adoptées par le travailleur) et les perturbations dans l'environnement de travail causées notamment par la présence d'objets, de travailleurs, de structures ou par tout système de ventilation ou de flux d'air pouvant affecter la trajectoire des particules dans l'espace environnant.

Les mesures d'ingénierie de prévention nécessitent l'élimination du danger par le remplacement du produit ou à défaut, par la modification des procédés de fabrication. L'utilisation des matériaux à faible teneur en quartz doit être privilégiée pour réduire le danger. Si l'élimination est impossible, des mesures de contrôle de l'émission et de la dispersion des particules par le confinement, le contrôle à la source ou la ventilation générale doivent être prises.

³ Le libre parcours moyen se définit comme la distance moyenne parcourue par une particule dans une direction donnée, avant que sa vitesse, suivant cette direction, devienne nulle.

2.2 Effet du procédé de transformation

Faute de pouvoir procéder à un tel remplacement, un autre moyen de prévenir l'exposition à la silice cristalline est de revoir le procédé de transformation. À titre d'exemple, l'usage de l'eau permet de réduire la poussière engendrée par certaines tâches de finition comme le taillage, le coupage ou le polissage, mais il peut à l'inverse créer de l'aérosolisation.

Les effets des paramètres du procédé et des stratégies de polissage ont déjà été étudiés. En fait, des essais d'usinage conduits au Laboratoire de fabrication et de caractérisation de matériaux composites de l'École de technologie supérieure (ÉTS) ont montré qu'il est possible de réduire à la source la formation de particules de tailles micrométriques (Balout *et al.*, 2007; Songmene *et al.*, 2008; Zaghbani *et al.*, 2009; Khettabi *et al.*, 2010a; Saidi *et al.*, 2015; Djebara *et al.*, 2013; Kouam *et al.*, 2013). Khettabi *et al.* (2010b) ont montré que les émissions de particules fines (PF) et de particules ultrafines (PUF) en usinage sont affectées par la géométrie de l'outil et son état de surface, le matériau de la pièce, les conditions et le procédé de coupe. En particulier, la vitesse de coupe a une influence significative sur la génération de poussières en usinage. Ils ont alors proposé un modèle de prévision, basé sur une nouvelle théorie hybride qui intègre les approches énergétiques et tribologiques (microfriction), et la déformation plastique (Khettabi *et al.*, 2010c). Ce modèle a été validé lors du tournage sur l'alliage d'aluminium 6061-T6, des aciers AISI 1018 et AISI 4140, et de la fonte grise. Cependant, il convient de noter que la plupart de ces essais concernaient les opérations comme le perçage, le fraisage et le tournage réalisés sur des alliages métalliques ductiles. Les composites et les matériaux fragiles n'ont pas été étudiés.

Des travaux faits par Tönshoff et ses collègues (1997) en Allemagne ont montré que, sans un système d'aspiration, les poussières fines émises lors de la rectification (polissage) représentent un réel danger pour la santé des opérateurs puisque les émissions dépassent de 100 % la valeur limite permise dans ce pays, soit 6 mg/m^3 (norme DIN EN 482 datant de 1991). De même, Kouam *et al.* (2011) ont établi que le frottement à faible charge (polissage) émet plus de particules ultrafines (de l'ordre de $3 \cdot 10^8$ particules/cm³ pour celles ayant un diamètre aérodynamique variant de 10 à 100 nm) que de particules fines (une dizaine par cm³ pour celles dont le diamètre aérodynamique varie entre 0,5 et 3 µm). Ils ont démontré que le frottement produit beaucoup moins de particules ultrafines que les procédés d'usinage pour les alliages d'aluminium (6061-T6 et 7075-T6) testés. Ces résultats ne permettent cependant pas de savoir ce que serait la situation lors du polissage du granit.

Songmene *et al.* (2014) ont montré que les particules métalliques émises lors de l'usinage ont des formes variées et que leur degré d'agglomération est très affecté par le procédé de transformation (vitesse de coupe). Dans ce projet, l'opération de polissage humide avait été étudiée en fonction de la quantité d'eau à utiliser. Les vitesses de rotation et d'avance de polissage sont également susceptibles d'avoir un effet sur les émissions et sur la taille de la poussière émise. Une autre solution est donc de modifier le procédé de polissage en déterminant la vitesse de rotation optimale permettant de générer une poussière de taille plus grossière et donc moins dangereuse.

2.3 Simulation numérique (CFD)

La simulation numérique en dynamique des fluides ou CFD (Computational Fluid Dynamics) est de plus en plus employée en modélisation des systèmes de ventilation naturelle ou mécanique. Son principal avantage est sa capacité à visualiser en 3 dimensions l'écoulement et la répartition spatio-temporelle des contaminants, ce qui facilite la compréhension des phénomènes physiques et favorise la recherche du concept de ventilation des espaces de travail le plus efficace. La CFD permet de proposer une configuration adéquate des espaces de travail afin de réduire l'exposition des opérateurs aux contaminants générés par les procédés industriels. De plus, les simulations numériques peuvent être déployées pour comprendre les accidents professionnels liés à l'exposition aux substances chimiques ou biologiques, permettant, par la suite, de redresser la situation.

Les systèmes de ventilation et de réduction à la source ont un rôle primordial dans la protection des travailleurs exposés à des gaz ou à des poussières nuisibles. Garantir un environnement de travail sanitaire et sécuritaire est un défi auquel les concepteurs de systèmes de ventilation font face. Pour ce faire, la CFD est un outil efficace pour l'étude des mécanismes complexes et variés de la dispersion des contaminants dans l'air. Par exemple, la déposition des aérosols dans les voies respiratoires a été analysée par Alzahrany *et al.* (2016); cette étude montre la souplesse de la CFD dans l'analyse de modèles complexes. Dahal *et al.* (2016) ont étudié la dispersion de la fumée de soudage à l'intérieur d'un espace clos à l'aide de la CFD. Gubler (2002) a, quant à lui, optimisé un système de réduction à la source pour contrôler la fumée de soudage. Dans le domaine médical, Ahmed et Rahman (2012) ont étudié la performance du système de ventilation dans la salle de patients d'un hôpital. Dans une étude similaire, Kermani (2015) a examiné la dispersion des bactéries émises par la toux d'un patient dans sa chambre. La CFD facilite aussi l'analyse des espaces complexes et de grandes dimensions comme les mines (Ranjan *et al.*, 2013; Liming *et al.*, 2006) ou encore une station de métro de Tianjin en Chine (Yuan et You, 2007).

En modélisation, le gaz traceur est utilisé pour suivre des aérosols submicroniques, loin de tout obstacle ou paroi (Bemer *et al.*, 2002), alors que le traçage particulaire, lui, permet l'étude du transport des particules selon leur granulométrie, en absence ou en présence d'obstacles. Ces techniques de modélisation permettent de comprendre que la dispersion des particules dans l'écoulement d'air varie en fonction de plusieurs facteurs tels que :

- la diffusion moléculaire;
- la diffusion turbulente;
- la densité;
- la sédimentation;
- l'impaction.

En ingénierie, pour la résolution des déplacements d'air turbulents, les équations Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS), qui caractérisent la turbulence sur la base des effets moyens, constituent un bon compromis entre précision et effort de calcul. Le modèle de turbulence k- ω est le modèle approprié pour la configuration de la présente étude (Belut *et al.*, 2005). D'autres approches pour représenter la turbulence, telles que la Large Eddy Simulation (LES) [36], sont aussi envisageables. Cependant, celles-ci demandent un temps de calcul plus important et leur utilisation ne serait justifiée que lorsque les équations RANS ne permettent pas d'atteindre les objectifs souhaités.

Bahloul *et al.* (2009, 2010, 2012 et 2014b) ont utilisé la technique du gaz traceur pour valider des calculs de simulations numériques de la ventilation dans les silos-tours à fourrage. Les simulations numériques ont été réalisées dans un régime transitoire en 3D. La formulation RANS pour simuler les écoulements turbulents a donné des résultats très satisfaisants par rapport aux données obtenues lors d'essais expérimentaux.

Le comportement des particules en circulation dans l'air fait partie des écoulements diphasiques constitués d'une phase continue ou phase porteuse (air) et d'une phase dispersée (aérosols). Les méthodes utilisées pour simuler numériquement ces écoulements sont :

- la méthode Euler-Lagrange, avec laquelle chaque particule est suivie individuellement (équation de la trajectoire pour chaque particule);
- la méthode Euler-Euler, avec laquelle la phase dispersée est traitée numériquement comme une seconde phase. Les équations de bilan sont écrites en formulation eulérienne pour chaque phase.

Les deux approches ont été utilisées dans plusieurs travaux de recherche (Bouilly *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2014a, 2014b, 2008; Lai *et al.*, 2008; Bahloul *et al.*, 2015). Phuong et Kazuhide (2012) ont modélisé la dispersion de particules à l'intérieur des conduits de ventilation. Quant à Ardkapan et Nielsen (2014), ils ont analysé l'effet d'une source de chaleur sur la distribution de la concentration de particules ultrafines dans une salle fermée. D'après ces études, dans le cas d'une approche Euler-Lagrange couplée à un modèle de turbulence de type RANS, l'influence de la turbulence de l'air sur le mouvement des particules n'est pas correctement considérée. En effet, la résolution de l'équation lagrangienne fait intervenir la vitesse instantanée de l'écoulement d'air. Or, les modèles de turbulence de type RANS donnent uniquement la vitesse moyenne des particules fluides. L'approche Euler-Lagrange peut convenir si elle est utilisée dans des calculs de simulation numérique directe (DNS). Cependant, les méthodes DNS, très coûteuses en temps de calcul et en ressources informatiques, ne sont envisageables que pour des configurations d'études très simples. L'approche Euler-Euler permet plus facilement d'utiliser les modèles de turbulence RANS.

Dans la présente étude, différents dispositifs de réduction à la source des émissions des particules autour d'un disque rotatif ont été évalués en simulant le procédé de polissage du granit. Pour ce faire, des simulations numériques ont été réalisées pour étudier la dispersion des aérosols à la suite d'un mouvement de rotation d'un disque en l'absence et en la présence d'un dispositif de réduction à la source. Ces calculs numériques sont accompagnés par des essais expérimentaux en utilisant des techniques de traçage permettant de suivre les particules dans la dispersion de l'air (Bahloul *et al.* 2010, 2012, 2014b). Une méthode eulérienne simplifiée, basée sur les équations de transport des concentrations en particules, a été utilisée pour étudier la dispersion des particules autour d'un disque rotatif, en présence d'un dispositif de réduction des dangers à la source.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif principal de cette étude était de comprendre les mécanismes de génération et de dispersion des particules lors des opérations de polissage à sec et par voie humide des matériaux graniteux afin de mieux les contrôler et ainsi tendre vers le respect des normes d'exposition des travailleurs à la silice cristalline. Pour répondre à cet objectif, la présente recherche a été réalisée en trois volets :

1) Étude expérimentale du procédé de polissage (volet 1, chapitre 4)

Ce premier volet a utilisé une machine-outil pour transformer deux types de granit dans un environnement contrôlé. Il a permis :

- a) de caractériser les particules générées lors des opérations de polissage à sec et par voie humide;
- b) de paramétrer la génération et la dispersion de ces particules en fonction des caractéristiques du procédé de polissage (vitesse de rotation, vitesse d'avance, quantité d'eau utilisée);
- c) de vérifier l'effet des paramètres liés au procédé de polissage sur l'état de fini de surface;
- d) de fournir les variables opérationnelles nécessaires à la réalisation des simulations expérimentale et numérique du 2^e volet.

2) Simulations expérimentales de l'opération de polissage (volet 2, chapitre 5)

Ce deuxième volet consistait à simuler en laboratoire le comportement de particules et les moyens de contrôle des contaminants dans un écoulement de rotation (autour d'un disque), en faisant appel au concept des particules et gaz traceurs.

3) Simulations numériques de l'opération de polissage (volet 3, chapitre 6)

Ce troisième volet consistait à évaluer les différents concepts de réduction à la source à l'aide de la simulation numérique en dynamique des fluides (CFD), afin de déterminer le concept le mieux adapté aux opérations de polissage à sec.

4. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU PROCÉDÉ DE POLISSAGE

4.1 Méthodologie

Les essais expérimentaux du procédé de transformation du granit ont été réalisés en environnement contrôlé au Laboratoire de fabrication et de caractérisation de matériaux composites de l'École de technologie supérieure (ÉTS), pour déterminer la dispersion de la poussière émise lors d'une opération de polissage en absence de tout système de ventilation ou de réduction à la source. Le but de ces essais était de caractériser la granulométrie, la teneur en silice cristalline, l'état d'agglomération, la répartition dans l'espace et la concentration de la poussière lors de l'opération de polissage à sec ou par voie humide. L'influence des paramètres suivants a également été considérée : la vitesse de rotation et celle d'avance du disque, la nature du matériau utilisé (granit de différentes teneurs en silice cristalline) et la quantité d'eau nécessaire pour le polissage humide.

4.1.1 Échantillons de granit à l'étude

Le taux de silice a aussi été analysé pour établir le lien entre le taux de silice du matériau graniteux et celui de la poussière émise dans l'espace de travail. Deux types de granit, le granit noir (figure 2b) avec un faible taux de Si à 10,94 % et le granit blanc (figure 2a) avec un fort taux de Si à 52,11 %, ont été choisis pour cette analyse. Le tableau 2 montre la composition chimique des deux granits ayant des taux de Si différents.

Tableau 2. Composition chimique des granits étudiés (% massique)

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



Figure 2. a) granit blanc, b) granit noir.

Le taux de quartz (SiO_2) des granits blanc et noir a été analysé par la firme IOS Services Géoscientifiques inc. L'imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB) a été effectuée avec un appareil de marque Zeiss MA15 à l'aide du détecteur d'électrons rétrodiffusés sur un échantillon de granit. Ce dernier consistait en une plaque polie de 15,3 mm x 15,1 mm x 2,7 mm. L'imagerie par MEB de l'échantillon de granit blanc est représentée à la Figure 3. Chaque ton de gris est catégorisé selon son espèce minérale. Le quartz est bleu pâle.

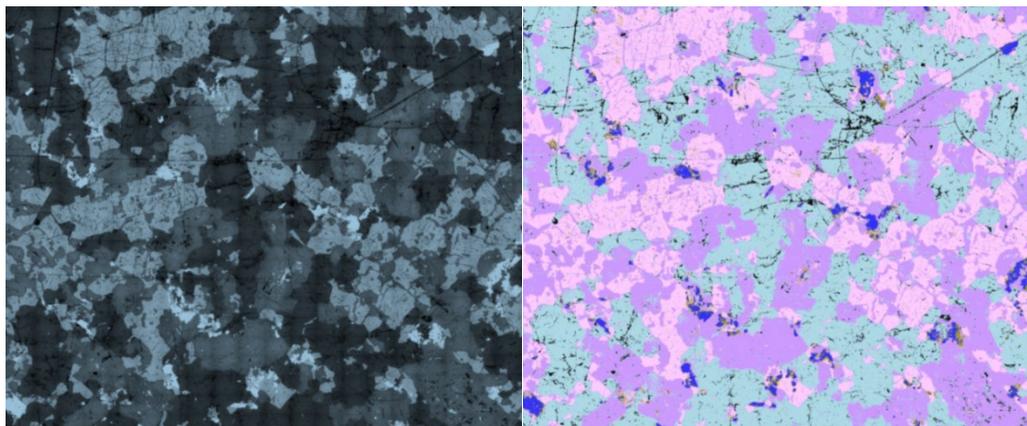


Figure 3. Échantillon de granit blanc, image en électrons rétrodiffusés
(IOS Services Géoscientifiques inc.).

La Figure 4 donne la distribution minérale pour l'échantillon de granit blanc. Ce dernier était constitué de grains de tailles moyennes à grossières à textures automorphes granulaires. La roche était constituée de 40 % de quartz. Le quartz forme des agrégats granulaires de taille millimétrique à centimétrique. La taille des grains du quartz est de 1 à 5,5 mm (tableau 3). Les éléments principaux du granit blanc sont le quartz, le plagioclase et le feldspath-K. La taille des grains de ses trois éléments varie entre 0,5 et 7 mm. Le quartz est un matériau dur, sa dureté étant de 7 sur l'échelle de Mohs, comparativement à 10 pour le diamant.

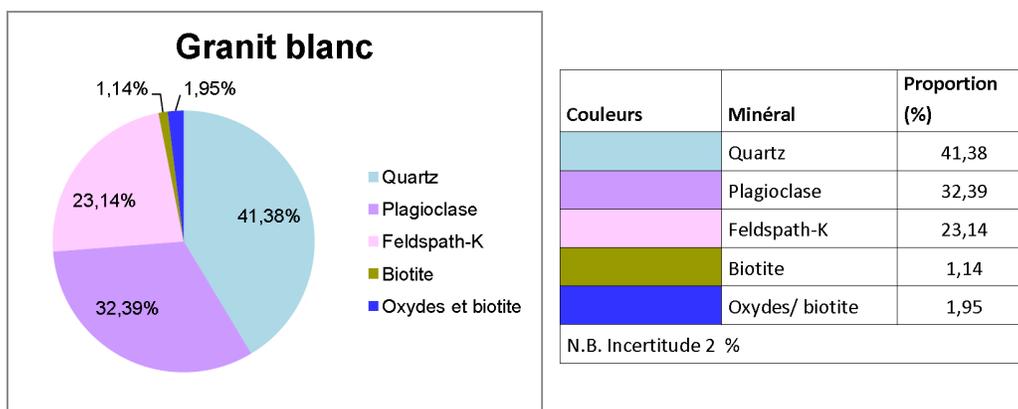


Figure 4. Distribution minérale de l'échantillon de granit blanc
(IOS Services Géoscientifiques inc.).

Tableau 3. Minéralogie d'une lame mince polie de granit blanc
 (IOS Services Géoscientifiques inc.).

Minéral	%	Taille	Texture
Quartz	40	1 à 5,5 mm	Agrégat granulaire, subautomorphe, fissuré
K-feldspath perthitique	38	0,5 à 7 mm	Subautomorphe, kaolinitisé
Plagioclase	19	1 à 6 mm	Automorphe, zoné, ± saussuritisé
Albite	≤2	0,1 à 0,35mm	Xénomorphe intergranulaire, en bordure du plagioclase
Biotite	2	0,4 à 2 mm	Paillettes intergranulaires
Chlorite	tr	0,5 mm	En altération de la biotite
Zircon	tr	≤0,12 mm	Automorphe
Apatite	tr	≤0,15 mm	Automorphe
Allanite?	tr	0,02 à 0,4 mm	Prisme allongé orange, isotrope
Oxydes de fer ± titane	0,3	0,08 à 0,4 mm	Automorphe à xénomorphe
Sulfure	tr	0,2 mm	Xénomorphe interstitielle

L'imagerie par MEB de l'échantillon de granit noir est représentée à la Figure 5. La roche était noire, massive, à grains grossiers, et elle était principalement constituée de plagioclase.

La Figure 6 donne la distribution minérale pour l'échantillon de granit noir. Cet échantillon de granit noir ne contenait pas de quartz; les principaux éléments qui le composaient sont le plagioclase (67 %) et l'orthopyroxène (21 %). Le tableau 4 détaille la minéralogie du granit noir. La taille de grains de ses 2 éléments variait de 0,2 à 17 mm. Le granit noir présentait une gamme plus large de tailles de grains que celle du granit blanc. La dureté du plagioclase, élément principal du granit noir, était inférieure à celle du quartz, élément principal du granit blanc. La dureté du granit blanc était alors supérieure à celle du granit noir. La taille des grains, la dureté des éléments et la minéralogie des granits noir et blanc ont un effet sur l'état de fini de surface et la quantité de poussières émises lors de leur transformation.

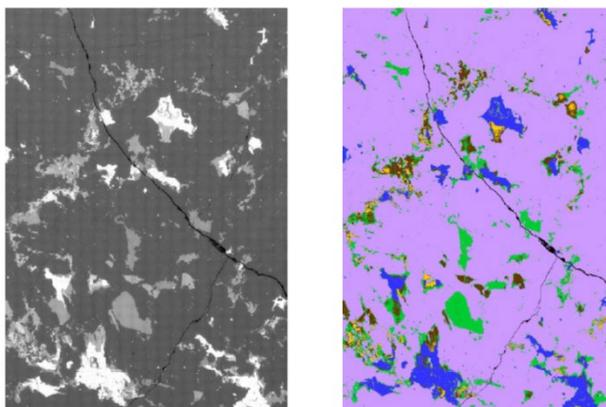
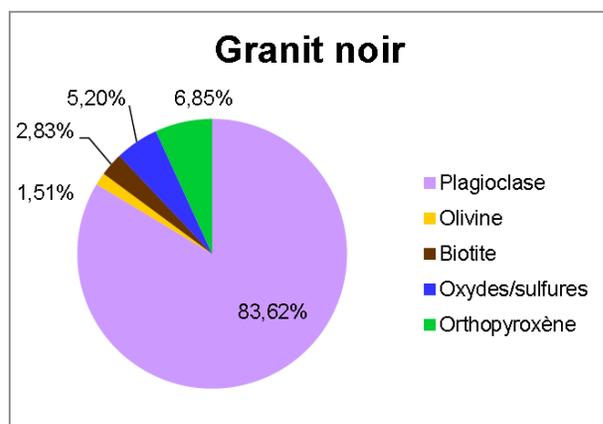


Figure 5. Échantillon de granit noir, image en électrons rétrodiffusés
 (IOS Services Géoscientifiques inc.).

Tableau 4. Minéralogie d'une lame mince polie de granit noir
(IOS Services Géoscientifiques inc.).

Minéraux	%	Taille	Texture
Plagioclase	67	0,2 à 17 mm	En lattes jointives, non orientées
Orthopyroxène 1 (Ferrosilite)	21	1 à 10 mm	Intergranulaire,
Biotite	<4	0,2 à 2 mm	Paillettes en bordure de l'orthopyroxène et des oxydes de fer
Olivine (fayalite)	1	0,6 à 4 mm	Xénomorphe
Chlorite	1		Amas feutré après l'olivine
Orthopyroxène 2 (hypersthène)	tr	3 mm	En liséré entre l'olivine et le plagioclase
Clinopyroxène (diopside)	tr	35 µm	Inclusion dans le plagioclase
Amphibole (hornblende)	tr	0,1 mm	Xénomorphe
Apatite	1	1 à 3 mm	Granulaire
Oxydes de fer ± titane	4.5	0,8 à 4 mm	Xénomorphe granulaire
Sulfures	tr	<0,3 mm	En plage, associée à oxydes de fer et biotite



Couleurs	Minéral	Proportion (%)
	Plagioclase	83,61
	Olivine	1,51
	Biotite	2,83
	Oxydes/sulfures	5,20
	Orthopyroxène	6,85
N.B. Incertitude 2 %		

Figure 6. Distribution minérale de l'échantillon de granit noir
(IOS Services Géoscientifiques inc.).

4.1.2 Banc d'essai

L'analyse du procédé de polissage du granit a été réalisée à l'aide d'une machine de calibre industriel de la compagnie Huron : une machine-outil à haute vitesse. Cette machine est particulièrement performante grâce à sa structure rigide et à une dynamique de déplacement élevée. Elle permet un polissage performant en phase d'ébauche, une très grande qualité d'état de la surface en finition et une très grande précision dans l'exécution des contours. Sa tête rotative à entraînement direct (moteurs à couple) permet des vitesses de rotation élevées (30 000 tours par minute), une force de couple de 50 Nm et une grande précision de positionnement. Cette machine a été placée dans une cabine étanche, permettant le contrôle de la poussière émise lors des opérations afin d'éviter la contamination de l'environnement extérieur. Le volume de la cabine a été choisi de manière à ne pas perturber la dispersion des particules dans l'espace, attribuable à l'opération de polissage. Cette situation a permis d'avoir une configuration plus représentative de celle que l'on trouve en usine. Le nettoyage de cet espace se faisait facilement par le biais d'un système de décontamination et d'aspiration intégré

à la cabine. Cette méthode d'aspiration disposait d'un système de filtration pour collecter les particules émises lors de l'expérimentation. La machine-outil comportait une table de surface utile de 1,15 m x 0,8 m, ce qui a permis de façonner des pièces ou des échantillons de près de 1 mètre carré.

Cette machine est capable de travailler à sec, en mode de lubrification abondante avec un débit pouvant atteindre 30 L/min et une pression maximale de 3 bars ou en mode de micro pulvérisation (débit réglable variant de 3 à 30 mm³ par cycle). Cette dernière technique de lubrification, aussi appelée technique de lubrification minimale (*minimal quantity lubrication* ou MQL), en est une de lubrification par projection de microgouttelettes par des buses d'arrosage au point de contact de l'outil et de la matière polie ou usinée. Elle permet une amélioration des conditions d'usinage, une augmentation de la durée de vie des outils, un meilleur état de fini de surface et des économies de lubrifiant.

Les paramètres de fonctionnement de la machine utilisée dans cette étude expérimentale du procédé de polissage étaient :

- Vitesse d'avance, f : 8,5, 17 et 25,5 mm/s et de 0 mm/s pour le polissage stationnaire;
- Vitesses de rotation de l'abrasif, V_s : 1000, 1750 et 2500 tr/min.

L'émission, la dispersion et le taux de silice cristalline (SiO₂) de la poussière émise lors du polissage de granit à sec et par voie humide ont été étudiés dans des conditions proches de celles du polissage manuel dans un contexte industriel. Les paramètres du procédé de polissage ont été étudiés sur le plan de la qualité de fini de surface et de l'émission des particules fines et ultrafines.

4.1.3 Outil de contrôle de pression

Pour comprendre l'émission et la dispersion des particules lors du polissage de granit à sec, il est important de commencer par l'étude de ce procédé d'usinage dans son contexte industriel. Dans l'industrie, le procédé de polissage est pratiqué sur le granit de façon graduelle. Dans ce cas, le fini de surface est obtenu par le passage successif de plusieurs outils dont les grains abrasifs sont de diverses tailles. Les outils abrasifs sont appliqués en commençant par celui qui dispose des plus gros grains et en finissant par celui doté des grains les plus fins. Un outil de contrôle de pression est mis en place pour simuler le travail manuel. La pression de polissage est appliquée sur la pièce en granit par un porte-outil adaptable à la machine-outil (Figure 7).

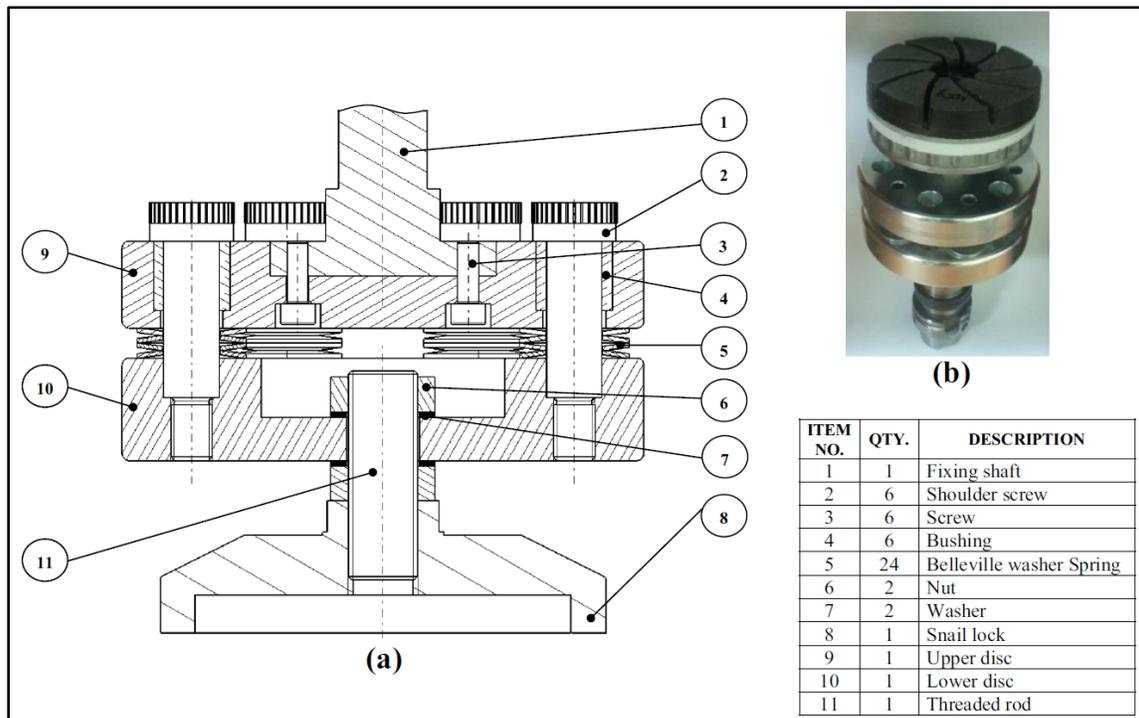


Figure 7. Outil de polissage : a) dessin d'ensemble du porte-outil; b) photo de l'outil assemblé.

La mesure des forces de coupe durant le procédé de polissage a été établie par une table dynamométrique Kistler de modèle 9255B. Cette table était constituée d'un dynamomètre à cristal de quartz. Celui-ci a permis de déterminer la valeur des trois composantes orthogonales d'une force : F_x , F_y , et F_z . Le dynamomètre possédait une fréquence propre élevée de 3 kHz, attribuable à sa grande rigidité et qui lui a permis de mesurer les petites variations de larges forces. La table Kistler était fixée sur celle de la machine-outil. Sur cette table était fixé un étai qui servait à maintenir la pièce en granit lors du polissage. Les forces de coupe F_x , F_y , et F_z appliquées par l'outil abrasif sur la pièce ont été détectées par le dynamomètre de la table Kistler. Ensuite, ces forces ont été transmises vers une station d'acquisition par l'intermédiaire d'un câble de connexion servant d'interface. Les valeurs maximales des forces pouvant être mesurées par la table dynamométrique étaient de -20 à 20 kN pour F_x et F_y et de -10 à 40 kN pour F_z .

La calibration de la pression de l'outil abrasif sur le matériau de granit en fonction de la profondeur de passe d (d : compression des ressorts) fait l'objet de la Figure 8. Des essais de calibration de l'outil ont été menés pour maîtriser le fonctionnement du dispositif expérimental et reproduire les conditions similaires à celles observées dans l'industrie de transformation du granit. Le polissage à sec graduel a été appliqué pour établir des relations entre la taille des grains de l'outil et la qualité de fini de surface des pièces (Figure 9).

Les conditions et les paramètres de polissage graduel utilisés pour ces essais de calibration étaient :

- Outils abrasifs en diamant;
- Séquence de polissage des abrasifs G : 80, 120, 220, 400, 800 et 1200;

- Pièces à polir en granits blanc et noir;
- Vitesse de rotation V_s à 1000 tr/min;
- Vitesse d'avance f à 0,5 mm/rev (8,5 mm/s);
- Pression P_{th} à 0,23 bar (obtenue par une compression d à 0,05 mm);
- Temps de polissage t de 72 s;
- Rugosité arithmétique R_a initiale obtenue par polissage avec l'outil abrasif ayant des grains de grandeur G 46.

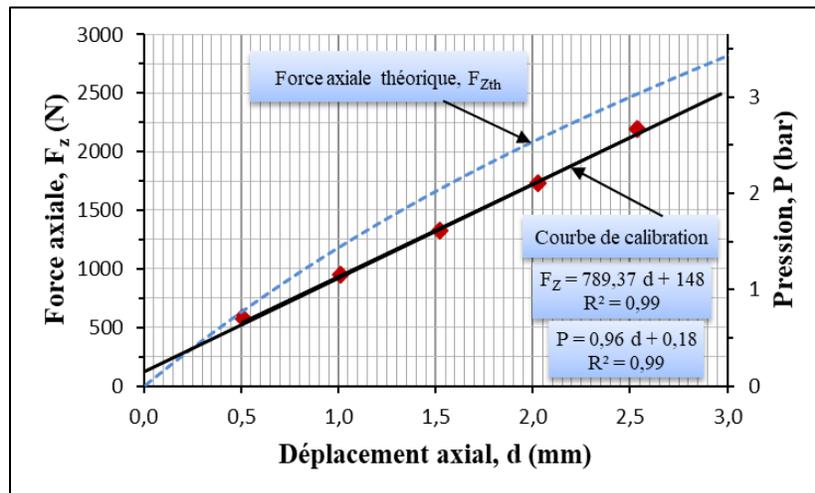


Figure 8. Calibration de la force et de la pression appliquées sur le contact abrasif-pièce par la compression d des ressorts disques Belleville.

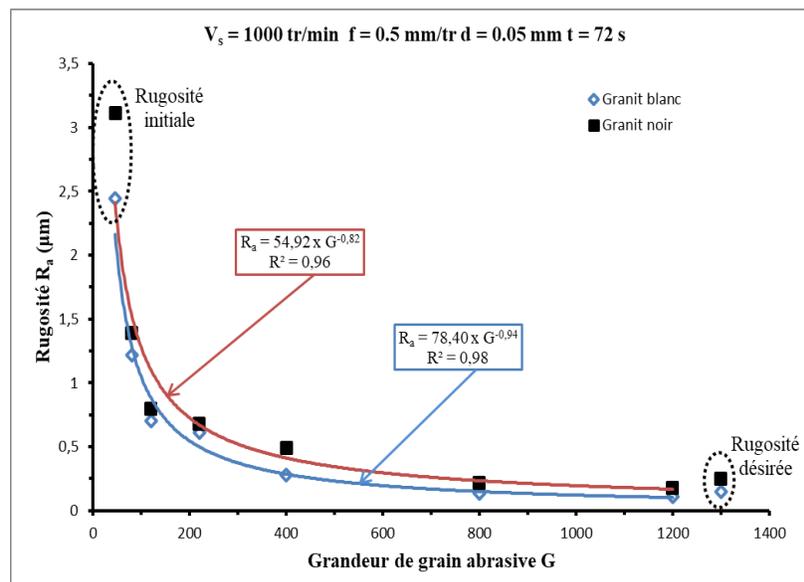


Figure 9. Fini de surface en fonction de la taille des grains abrasifs.

4.1.4 Analyse de l'état de fini de surface

4.1.4.1 Outil abrasif

Le polissage du granit a été exécuté par des outils constitués des grains abrasifs, d'un liant et d'un support. Selon les standards de la Fédération européenne des fabricants de produits abrasifs, les grains utilisés dans le polissage peuvent être des particules de diamant (synthétique), d'oxyde d'aluminium ou de carbure de silicium. Le liant des abrasifs utilisés peut être un métal, une céramique ou de la résine. 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. Le support de l'outil abrasif peut comporter une serrure escargot, un taraudage ou une fermeture autoagrippante (velcro) pour permettre sa fixation sur la machine-outil.

Dans cette étude, le choix a porté sur les grains abrasifs diamantés appelés super-abrasifs. Ces derniers ont une dureté et une durée de vie supérieures aux autres abrasifs conventionnels et permettent le polissage de matériaux difficilement usinables tels que le granit. De plus, le diamant a la particularité d'avoir une grande conductivité thermique et, surtout, de ne pas présenter de microfissures.

Le polissage a été réalisé de façon graduelle selon la classification des grains selon leur taille (Tableau 5), en commençant par les abrasifs qui ont les plus gros grains et en finissant par ceux qui ont les grains les plus fins. La séquence de polissage fut choisie parmi les 5 classes, de l'abrasif 36 à l'abrasif 2000. Le Tableau 6 donne la correspondance entre la taille des grains et leur diamètre moyen. 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 (Malkin et Guo, 2008).

Tableau 5. Classification des abrasifs selon les types de grains
(traduit de Unified Abrasives Manufacturers Association).

Taille du grain	Description
36, 46, 50, 60	Grain plaqué
80, 100, 120	Gros grain
150, 180, 220, 240	Grain médium
320, 400, 500	Grain fin
600, 800, 1200, 1800, 2000	Micron

Tableau 6. Correspondance entre la taille et le diamètre des grains
 (American National Standards Institute (ANSI), adapté de Universal Photonics Inc.)

Taille des grains	Diamètre moyen des grains (µm)
36	674
46	483
54	407
60	345
70	288
80	233
90	197
100	172
120	139
150	116
180	93
220	74
240	62
280	59
320	36
360	28
400	22
500	16
600	14
800	8,5
1000	6,33
1200	4,5

4.1.4.2 Fini de surface

La rugosité de la surface a été mesurée à l'aide de la machine Mitutoyo S-J400. Cette machine peut mesurer une gamme de rugosité allant jusqu'à 800 µm avec une résolution de 0,000125 µm (sur une gamme de 8 µm). Elle peut évaluer 36 paramètres de rugosité conformément à plusieurs standards tels que l'ISO 1997 et JIS 1994. Le palpeur de la machine qui parcourt la surface à contrôler possède une vitesse d'aller de 0,05 à 1 mm/s et une vitesse de retour de 0,5 à 2 mm/s. Lors du contrôle du fini d'une surface, le palpeur effectue une passe (aller-retour) préliminaire de référence puis une passe pour l'enregistrement du profil final. La longueur maximale de l'échantillon de la surface mesurée variait entre 0,08 et 8 mm. Avant chaque mesure, la machine était calibrée par le moyen d'une cale étalon.

Pour la mesure de la brillance, la machine Weha Gloss Meter fut retenue. Cet instrument de mesure de la brillance peut afficher des valeurs allant jusqu'à 100 unités de brillance (UB). L'appareil est conforme au standard de mesure de brillance ISO 2813. La calibration avant chaque utilisation se fait avec deux échantillons de référence, un blanc de brillance 16,8 UB pour mesurer les pièces de basse brillance et un noir de brillance 93,4 UB pour les pièces de haute brillance. Positionné sur la pièce à contrôler, l'appareil émet une lumière avec un angle

incident de 60° qui est réfléchi sur la surface et dirigée vers un capteur de luminosité. Cette luminosité est traduite en une valeur de brillance par la machine. Les lentilles de l'appareil ainsi que les échantillons de référence étaient nettoyés avant et après chaque utilisation.

4.1.5 Caractérisation de la poussière

Les prélèvements de l'air étaient effectués à différents points de mesures autour du procédé de polissage dans la cabine étanche. Des instruments de mesure à lecture directe étaient utilisés afin de déterminer la concentration de la poussière selon la granulométrie des aérosols. En parallèle, des échantillons étaient prélevés pour analyser la composition chimique et la morphologie des poussières recueillies.

4.1.5.1 Mesure de concentration

La concentration granulométrique des particules ultrafines (PUF) a été obtenue en utilisant le spectromètre à mobilité (Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS) de la compagnie TSI Incorporated. Le SMPS mesure la distribution de la taille des particules selon leur mobilité électrique liée à leur diamètre, soit entre 2,5 et 1000 nm. Le SMPS couple une technique de sélection des particules suivant leur mobilité à l'aide d'un analyseur de mobilité différentiel (DMA) et d'un compteur de particules à noyau de condensation (CPC). L'aérosol pénètre dans l'analyseur différentiel de mobilité (DMA) qui classe les particules en fonction de leur mobilité électrique (proportionnel au diamètre de la particule). Le DMA existe en deux types de colonnes de classification : une longue colonne de classification (LDMA) ou une petite colonne de classification (NDMA). Après la sortie de l'échantillon monodispersé du classificateur DMA, l'aérosol monodispersé se dirige vers le compteur de particules (CPC) qui mesure la concentration en nombre des particules.

L'appareil Aerodynamic Particle Sizer (APS) de la compagnie TSI a été utilisé pour mesurer la concentration granulométrique des particules fines (PF) de la poussière émise par le procédé de polissage. Il a permis d'obtenir la concentration (en nombre, en masse et en surface spécifique des particules) selon la taille des aérosols de diamètre entre 0,5 et 20 µm.

Le compteur de poussières DUST-TRAK de la compagnie TSI a servi d'instrument de diagnostic et d'investigation au cours de l'exécution des essais expérimentaux. Utilisé en hygiène industrielle, cet appareil portable et léger est conçu pour mesurer la qualité de l'air intérieur en déterminant la concentration en poussière au poste de travail. Il permet une lecture directe de la concentration relative en poussière (mg/m³) et une mesure des poussières de la fraction inhalable ou PM1 ou PM2,5 ou PM10.

4.1.5.2 Caractérisation granulométrique

L'échantillonnage de la poussière selon la granulométrie des aérosols a été effectué par le biais de l'instrument de mesure Electrical Low Pressure Impactor (ELPI). Ce système de mesure de la granulométrie fonctionne sur la base des impacteurs en cascade. Les particules sont chargées à l'entrée de l'impacteur et un électromètre enregistre les charges induites sur chacun des étages lors de l'impaction des particules. Le signal est alors analysé et inversé pour avoir accès à la granulométrie, de 15 nm à 10 µm. Un programme d'acquisition a permis de visualiser, en temps réel, les distributions en nombre, en volume et en masse des particules. Un substrat était déposé à chaque étage d'impaction.

Les particules étaient ensuite collectées par précipitation électrostatique sur les substrats pour être analysées par la spectrométrie à dispersion d'énergie (EDX), couplée au microscope électronique à balayage (MEB - balayage, effets de champs, force atomique). Ce couplage a permis de déterminer la composition chimique de la surface examinée, le degré d'agglomération, ainsi que la confirmation de la taille et de la forme des particules collectées.

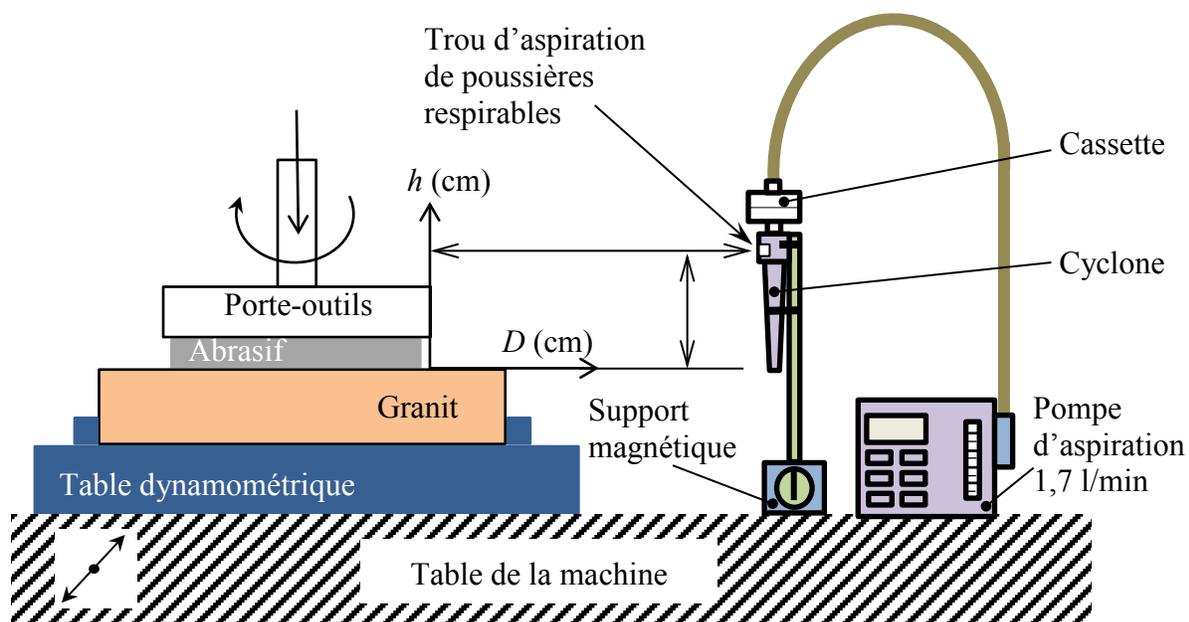
4.1.5.3 Analyse du quartz

L'analyse du quartz par modélisation Rietveld a été utilisée pour déterminer la masse ou le taux de quartz dans la poussière respirable émise par le procédé de polissage. Le temps de prélèvement moyen accumulé était de 7 h par jour par cassette. Trois emplacements (trains) furent déterminés et l'échantillonnage s'est effectué simultanément comme décrit au Tableau 7 et à la Figure 10.

Tableau 7. Position des emplacements d'échantillonnage

	Train n°1	Train n°2	Train n°3
Hauteur (cm)	5	25	15
Distance (cm)	58	41	57

Figure 10. Schéma du dispositif expérimental servant à prélever la poussière respirable émise par le procédé de polissage du granit.



Trois pompes Universel PCXR4 SKS à débit d'aspiration réglé à 1,7 l/min ont été utilisées pour aspirer l'air dans des cyclones en série avec des filtres en chlorure de polyvinyle n° Omega P-08370K.

L'analyse du quartz des échantillons recueillis était effectuée au laboratoire de l'IRSST par application de la méthode Rietveld quantitative sur des échantillons de poudre. Des études précédentes ont d'ailleurs démontré que la taille des particules optimales varie entre 2 et 10 μm (Bish *et al.*, 1989).

Afin de se rapprocher de cette taille de particules, les échantillons étaient écrasés pendant 7 minutes dans un broyeur à mortier automatique. Généralement, la distribution des tailles des particules obtenues par cette méthode est autour de 1 μm ; mais elle est restée plutôt large et certaines particules de plus de 300 μm pouvaient encore être présentes. Trois g de l'échantillon étaient donc broyés à nouveau dans un moulin micronisant (McCrone Micronizing Mill) pendant 1 minute dans 20 ml de méthanol. L'échantillon était ensuite récupéré par des lavages successifs avec du méthanol; puis il était séché à l'étuve à 100 °C pendant environ 1 heure. Des particules d'environ 0,69 μm ont été obtenues par cette méthode; la distribution était beaucoup moins large et les particules de grosses tailles étaient très majoritairement réduites.

Lorsque la poudre était broyée et séchée, un standard interne lui était ajouté. Le premier choix était le corindon (Al_2O_3). S'il était déjà présent dans l'échantillon ou si la position des pics causait des chevauchements, le rutile (TiO_2) pouvait servir de standard interne. Si ce dernier ne convenait pas, il était aussi possible d'utiliser la zincite (ZnO). Ces trois produits étaient disponibles commercialement à de très hauts niveaux de pureté chimique et cristallographique.

Les masses du standard interne et de l'échantillon étaient pesées au dixième de milligramme sur une balance analytique. La proportion de standard interne dans l'échantillon était toujours près de 10 % p/p. Ce ratio montre généralement de bons résultats (Gonzalez *et al.*, 2002) et ne crée pas une trop grande dilution des phases minoritaires. Le standard et l'échantillon étaient homogénéisés en deux étapes : ils étaient mélangés, dans un premier temps, à l'aide d'un broyeur à mortier manuel, puis cette poudre était mélangée à nouveau dans un mélangeur à poudre manuel tridimensionnel. Le mélange était ensuite placé dans le porte-échantillon PW1811/xx, selon la méthode de remplissage arrière, en appliquant une certaine pression afin d'augmenter la densité sans causer trop d'orientation préférentielle. Cette méthode s'est avérée être la plus reproductible pour les analyses de routine en plus d'être simple, rapide et de permettre la récupération de l'échantillon à la suite de l'analyse.

Les données de DRX étaient ensuite collectées à l'aide du diffractomètre PANalytical Cubix Pro, équipé d'un chargeur rotatif et d'un détecteur sensible à la position (position-sensitive detector), utilisant la raie $\text{K}\alpha_1$ du cuivre, en géométrie Bragg-Brentano (θ - θ).

L'acquisition de données a été réalisée entre 5° et 80°, 2θ , avec des pas de 0,02 à 50 secondes par pas, à la température de la pièce. Le détecteur PANalytical X'celerator utilise la technologie à bandes multiples en temps réel (real-time multiple strip, RTMS) ce qui permet une analyse très fine tout en gardant des temps d'acquisition assez courts. Des fentes de Soller de 0,04 rad ont été utilisées dans les faisceaux incidents et diffractés. Entre le tube et l'échantillon, une fente de divergence était fixée à $\frac{1}{4}^\circ$ et la fente d'anti-diffusion était fixée à $\frac{1}{2}^\circ$. Un filtre de nickel était appliqué sur le faisceau diffracté afin d'éliminer les radiations $\text{CuK}\beta$. Le tube fonctionnait à une tension de 45 kV et un courant de 40 mA, et l'échantillon tournait sur lui-même à une vitesse de 1 $\text{rev}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le plan de la surface pendant l'analyse.

Le logiciel utilisé pour l'analyse de données et pour l'affinement de Rietveld est le HighScore Plus de PANalytical. Le bruit de fond était déterminé manuellement. Les bases de données PDF-2 de l'International Centre for Diffraction Data (ICDD) et Inorganic Crystal Structure

Database (ICSD) pour le logiciel HighScore Plus étaient utilisées pour l'identification des phases et l'obtention de patrons de diffraction pour la construction du modèle. La fonction de profil Pseudo Voigt et la méthode non linéaire des moindres carrés de Newton–Raphson furent retenues pour l'affinement. L'inspection visuelle combinée aux valeurs des indices de qualité de l'affinement permettent généralement une bonne évaluation du modèle (Martin *et al.*, 2012).

4.1.6 Plan d'expérience de l'étude paramétrique de polissage à sec

Les paramètres des procédés de polissage analysés étaient :

- 2 granits, *S* : blanc (52,11 % de Si) et noir (10,94 % de Si)
- 2 abrasifs, *G* : n°100 (ébauche) et n°800 (finition)
- 4 vitesses d'avance, *f* : 8,5, 17, 25,5 et 0 mm/s
- 3 vitesses de rotation, V_s : 1000, 1750 et 2500 tr/min
- 3 diamètres de l'outil abrasif : 4, 5 et 6 po
- 1 pression fixe de polissage, *P* : 0,23 bar

Le point de mesure de l'émission était :

- Distance horizontale, *D* : 5 cm
- Distance verticale, *h* : 5 cm

Les points de mesure de la dispersion étaient :

- Distances horizontales, *D* : 5, 27,5 et 50 cm
- Distances verticales, *h* : 5, 15 et 25 cm

Les mesures étaient :

- Concentration en nombre des particules fines, CPF en $dN/d\log D_p$ (n°/cm^3)
- Concentration en nombre des particules ultrafines, CPUF en $dN/d\log D_p$ (n°/cm^3)
- Granulométrie des PF et des PUF
- Rugosité de la surface R_a en μm
- Brillance de la surface B_r en Gloss
- Poussière respirable
- Taux de silice cristalline

La Figure 11 présente les points de mesure autour du dispositif expérimental ayant permis l'analyse de l'émission et de la dispersion des poussières lors du procédé de polissage du granit.

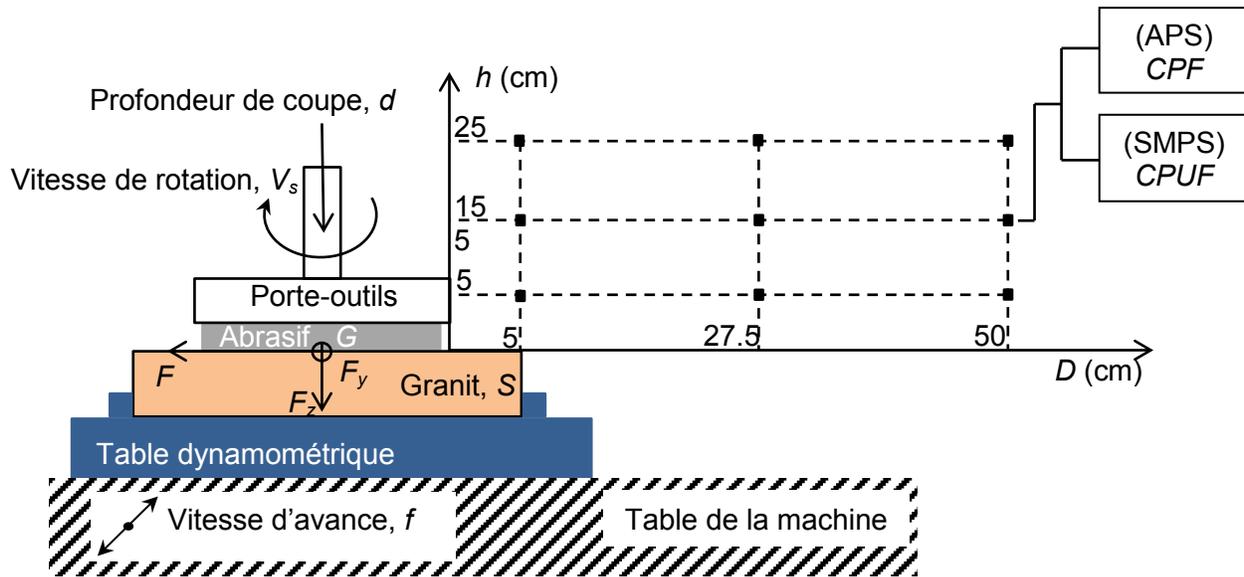


Figure 11. Sites de mesure de l'émission et de la dispersion des poussières en périphérie du dispositif expérimental du procédé de polissage du granit.

L'effet de certains paramètres du procédé de polissage sur l'émission de la poussière a été analysé au moyen d'une étude statistique. Celle-ci a été effectuée, d'une part, sur l'émission des particules fines (PF) et des particules ultrafines (PUF) et, d'autre part, sur la rugosité de la surface. L'objectif était d'optimiser les paramètres de polissage susceptibles de diminuer l'émission de poussières, tout en assurant un bon état de surface (rugosité). L'effet de la rotation isolée a aussi été abordé en analysant le procédé de polissage rotatif stationnaire et son influence sur l'émission des PF et des PUF, ainsi que sur la rugosité de la surface. Cette situation décrit également le scénario étudié lors des simulations numériques et expérimentales. La Figure 12 montre le schéma du modèle statistique. Ce modèle a permis de lier les variables d'entrée et de sortie mises en jeu dans le contexte de cette étude.

La mesure de l'émission à la source a été effectuée au point de coordonnées $D = 5 \text{ cm}$ et $h = 5 \text{ cm}$ (Figure 11). Le plan d'expérience a été réalisé pour les 4 configurations granit-abrasif suivantes : blanc-G100, blanc-G800, noir-G100 et noir-G800. Le nombre d'essais accomplis pour chaque configuration en variant la vitesse de rotation (3 niveaux : 1000, 1750 et 2500 tr/min) et la vitesse d'avance (3 niveaux : 8,5, 17 et 25,5 mm/s) est donné par la formule suivante :

$$\prod (\text{nombre de niveaux})^{(\text{nombre de paramètres})} = 3^2 = 9 \text{ essais} \quad (4)$$

Pour une bonne robustesse du modèle statistique, les essais ont été répétés 3 fois avec 3 répétitions au centre. Un point arbitraire a été exécuté pour valider le modèle statistique retenu. À chaque configuration, le modèle statistique liait les paramètres d'entrée que sont la vitesse de rotation (V_s) et la vitesse d'avance (f) aux paramètres de sortie : la concentration en nombre des particules fines (CPF), la concentration en nombre des particules ultrafines (CPUF) et la rugosité (R_a). Le modèle choisi était quadratique avec des interactions doubles (logiciel Statistica version 13.2 de StatSoft, Inc.). Les équations étaient établies sous la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i \times X_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j \geq i}^4 \beta_{ij} \times X_i \times X_j \quad (5)$$

où

Y : variables de sortie

X_i et X_j : variables d'entrée

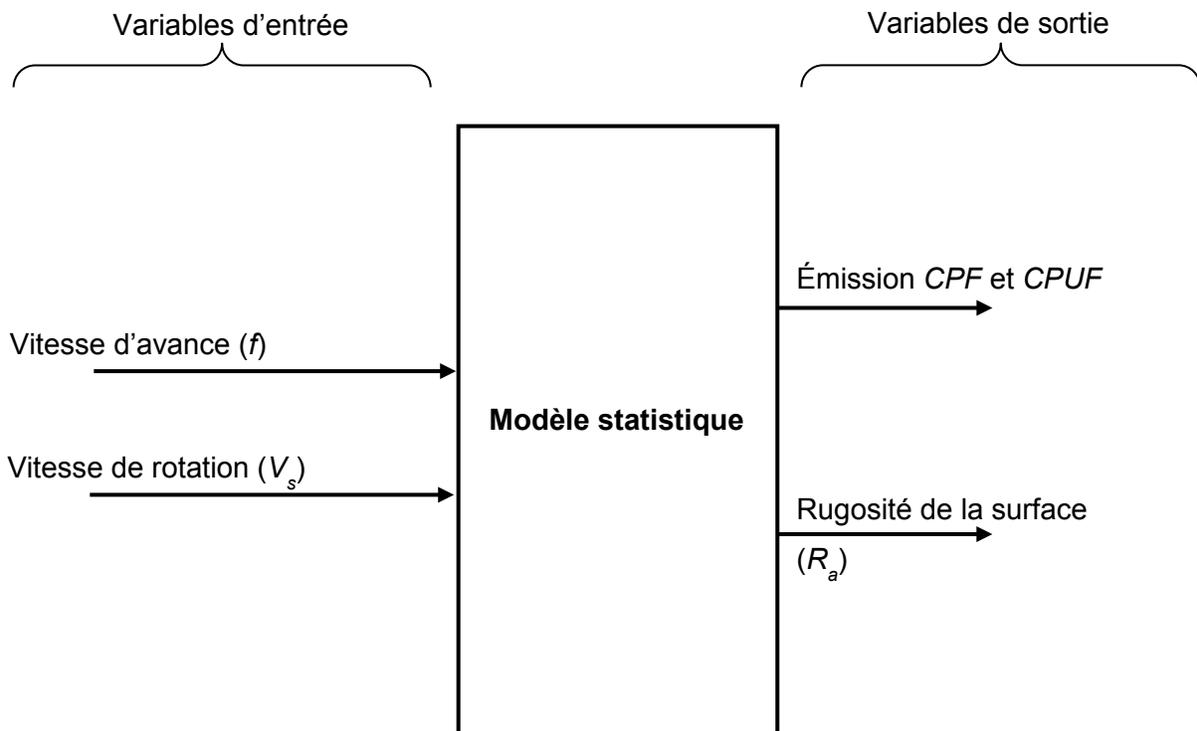
β_0 : coefficient de l'effet général

β_i : coefficient des effets des facteurs principaux

β_{ij} : coefficient des effets quadratiques et des effets des interactions des facteurs principaux

Figure 12. Schéma du modèle statistique.

4.1.7 Procédés de polissage humide



Un dispositif d'arrosage a été intégré au procédé de polissage pour simuler le travail humide de transformation du granit. Ce dispositif de jet d'eau était constitué d'un contenant d'eau à pression d'air et de débit d'eau, et de quatre buses permettant ainsi de lubrifier le matériau au cours du polissage. Le variateur de pression d'eau permettait de transformer l'eau en aérosol ou en brouillard. Ce dispositif offrait la flexibilité de varier le débit de jet d'eau pour évaluer l'effet de la quantité d'eau sur la poussière émise par le procédé de polissage dans l'air.

Les prélèvements de poussières émises par le procédé de polissage étaient effectués au point d'émission de distance horizontale, D : 5 cm et de hauteur, h : 5 cm (Figure 11). La poussière

prélevée était ensuite séchée en utilisant du gel de silice. Les instruments de mesure utilisés pour cette analyse étaient le SMPS, l'APS et le Dustrack.

L'abrasif G60 (ébauche) fut retenu pour l'étude de polissage humide. Cet état de polissage génère beaucoup de poussières et permet, par conséquent, de bien évaluer l'effet du lubrifiant (de l'eau) sur les émissions de poussières de silice cristalline dans l'environnement de travail. Les deux granits blanc et noir ont été étudiés dans cette sous-section.

4.2 Résultats

La caractérisation a été faite selon la catégorie de la poussière émise par 2 granits (blanc et noir). Les émissions et les dispersions des PUF et des PF ont été analysées séparément et leur comportement a été comparé selon les paramètres du procédé de polissage (vitesse de rotation, vitesse d'avance et abrasif). Parallèlement, l'état de fini de surface du granit a aussi été analysé par rapport à ces paramètres.

4.2.1 Polissage sans translation

Tout d'abord, l'effet de la vitesse de rotation du disque de polissage sur les émissions et la dispersion des PUF et des PF, et sur l'état de fini de surface du granit a été analysé en absence de vitesse d'avance : polissage sans translation. L'intérêt du polissage sans translation était d'isoler l'effet de la rotation sur la génération et sur le comportement aérodynamique de la poussière.

4.2.1.1 Émission

L'analyse du polissage sans translation a été réalisée en utilisant les abrasifs G100 (ébauche) et G800 (finition). Le temps de polissage était de 40 s. Les vitesses de rotation analysées étaient : 1000, 1750 et 2500 tr/min.

Les figures 13 et 14 montrent la granulométrie des PUF et des PF générées lors des phases d'ébauche et de finition des deux granits, blanc (Figure 13) et noir (Figure 14). Les concentrations présentées dans les figures sont une moyenne des concentrations pour les 3 vitesses de rotation. L'émission des PUF était maximale à des tailles comprises entre 60 et 100 nm pour les deux granits blanc et noir, et pour les deux phases de polissage. Le maximum de la concentration des PF a été atteint à des tailles de particules submicroniques pour les deux granits et les deux phases de polissage.

Ces figures montrent que la quantité de PUF produites lors de la phase de finition était plus grande que lors de celle d'ébauche pour les 2 granits, alors que la quantité de PF était plus élevée pour la phase d'ébauche que pour celle de finition. Le granit noir émettait plus de poussières fines et ultrafines que le granit blanc.

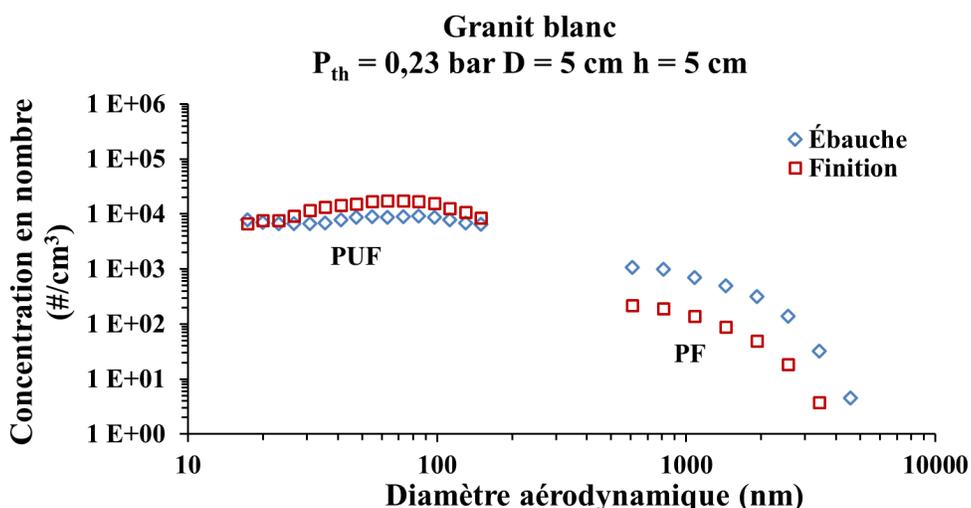


Figure 13. Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage sans translation du granit blanc, à l'ébauche et à la finition.

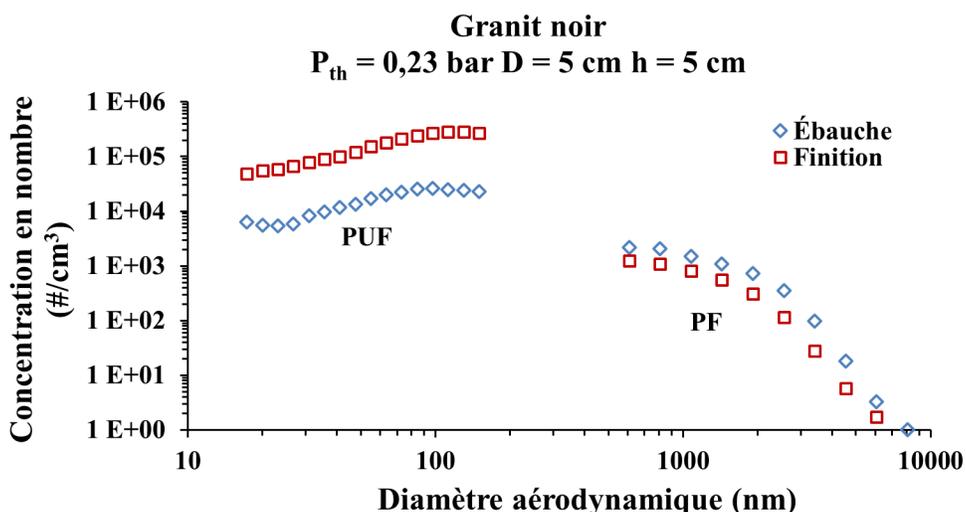


Figure 14. Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage sans translation du granit noir, à l'ébauche et à la finition.

Les figures 15 et 16 présentent les concentrations totales en nombre des PUF et de PF pour les 2 granits, blanc (Figure 15) et noir (Figure 16), et pour les phases d'ébauche et de finition. Ces figures montrent que le granit noir générait légèrement plus de PUF et de PF que le granit blanc.

La phase d'ébauche a généré plus de PF que celle de finition. À l'opposé des PF, la phase de polissage de finition a généré plus de PUF que celle d'ébauche. Les concentrations totales en nombre des PUF et des PF à l'ébauche et à la finition ont augmenté avec la vitesse de rotation du disque.

L'analyse des concentrations en masse de la poussière totale a montré que les PF prédominaient. La poussière générée en matière de masse était alors plus importante à l'ébauche qu'à la finition. Par conséquent, l'analyse massique de la poussière n'a pas permis d'évaluer l'importance en nombre de la poussière générée lors du procédé industriel.

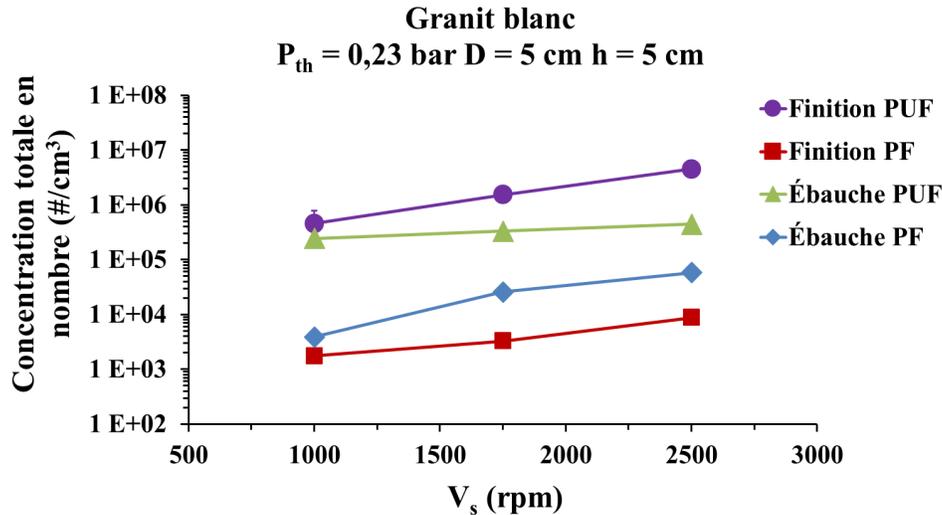


Figure 15. Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit blanc.

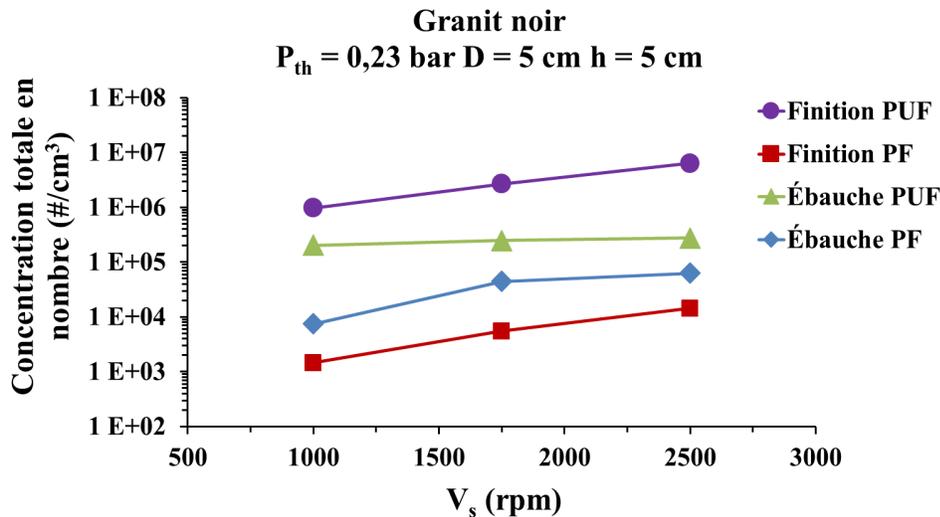


Figure 16. Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit noir.

4.2.1.2 Dispersion

La dispersion des PF et PUF a été réalisée selon le schéma du dispositif expérimental du procédé de polissage du granit de la Figure 11. Pour les 3 vitesses de rotation, les concentrations présentées dans les figures sont une moyenne des concentrations selon la direction verticale. Les Figures 17 et 18 présentent la répartition des PUF et des PF des phases d'ébauche et de finition dans la direction radiale du disque de polissage des 2 granits, blanc

(Figure 17) et noir (Figure 18). Les concentrations des PUF et des PF étaient quasi uniformes autour du procédé de polissage. La rotation du disque uniformise les concentrations des PUF et des PF dans la direction radiale pour les deux phases de polissage (ébauche et finition).

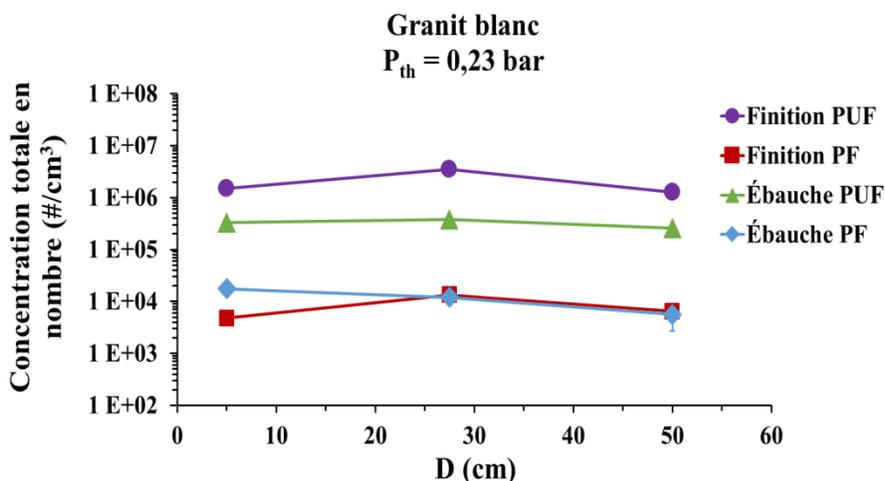


Figure 17. Répartition radiale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.

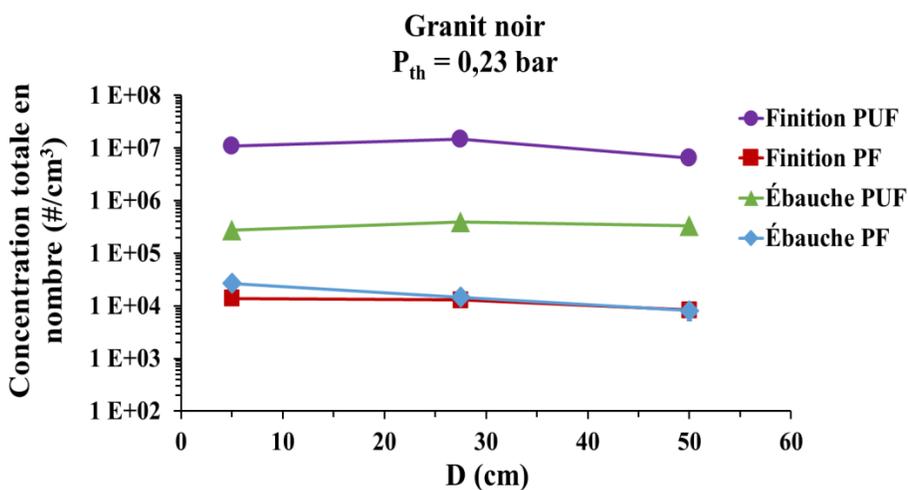


Figure 18. Répartition radiale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.

Les Figures 19 et 20 présentent la répartition des PUF et des PF des phases d'ébauche et de finition dans la direction verticale des 2 granits, blanc (Figure 19) et noir (Figure 20). Les concentrations illustrées sont une moyenne des concentrations selon la direction horizontale et pour les 3 vitesses de rotation. Les concentrations des PUF et des PF étaient quasi uniformes à différentes hauteurs. Les PUF et les PF ont contaminé ainsi toute la zone de travail dans les directions radiale et verticale.

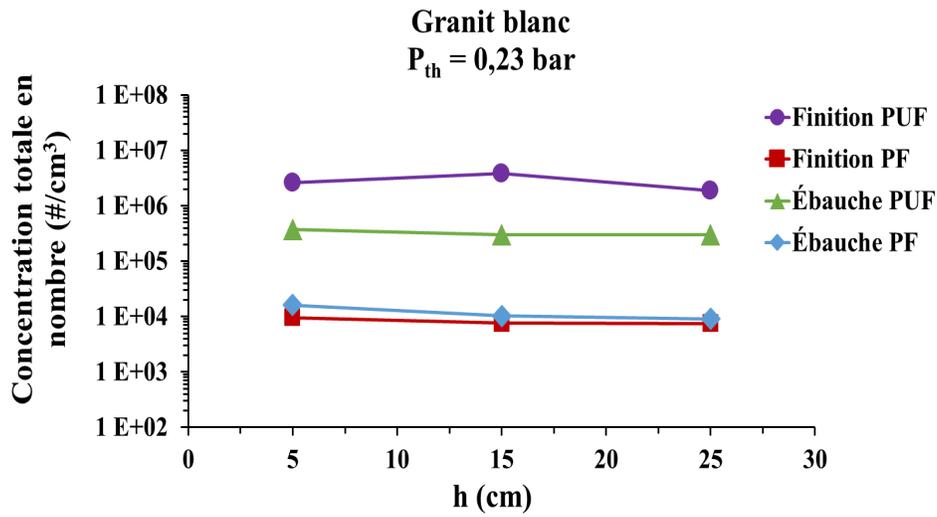


Figure 19. Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.

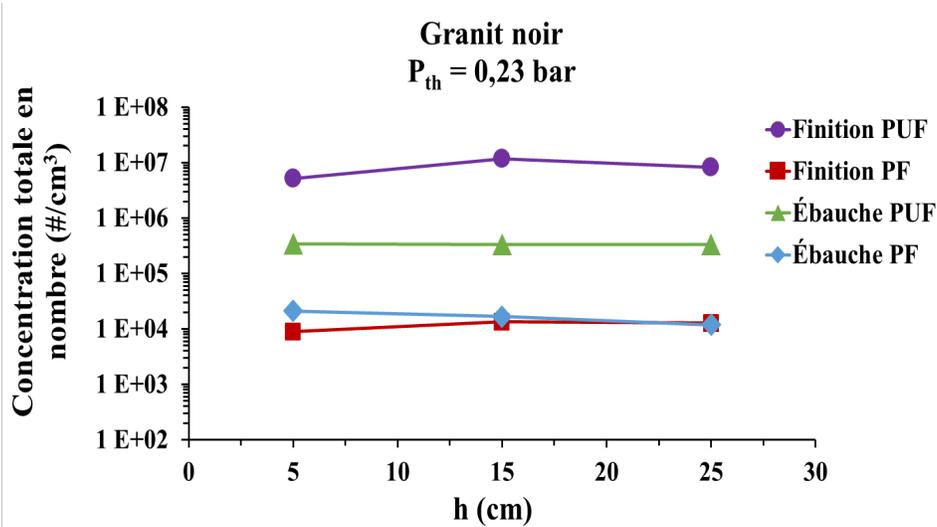


Figure 20. Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.

4.2.2 Polissage régulier (avec translation)

La caractérisation de la poussière s'est effectuée selon la catégorie de la poussière (fine et ultrafine) sur les 2 granits (blanc et noir). Les émissions et les dispersions des PUF et des PF ont été analysées séparément et leur comportement a été comparé selon les paramètres du procédé de polissage (vitesse de rotation, vitesse d'avance et abrasif). Parallèlement, l'état de fini de surface du granit a aussi été analysé par rapport à ces paramètres.

4.2.2.1 Émission

Le polissage régulier a été réalisé en utilisant les abrasifs G100 (ébauche) et G800 (finition). Les vitesses de rotation analysées étaient : 1000, 1750 et 2500 tr/min. Les vitesses d'avance analysées étaient : 8,5, 17 et 25,5 mm/s.

Les Figures 21 et 22 présentent la granulométrie des PUF et des PF générées lors des phases d'ébauche et de finition des deux granits, blanc (Figure 21) et noir (Figure 22). Les concentrations sont des moyennes des concentrations pour les 3 vitesses de rotation et les 3 vitesses d'avance. Le polissage à sec du granit noir a généré plus de PUF et de PF que celui du granit blanc. L'émission des PUF était maximale à des tailles comprises entre 60 et 100 nm pour les granits blanc et noir. L'émission des PF était maximale lorsque leur taille était inférieure à 1 µm pour les granits blanc et noir, et ce, pour les deux phases de polissage. Ces figures montrent aussi que les PF étaient plus importantes lors de la phase d'ébauche que lors de la phase de finition, alors que les PUF étaient émises en plus grande quantité à la phase de finition qu'à celle d'ébauche.

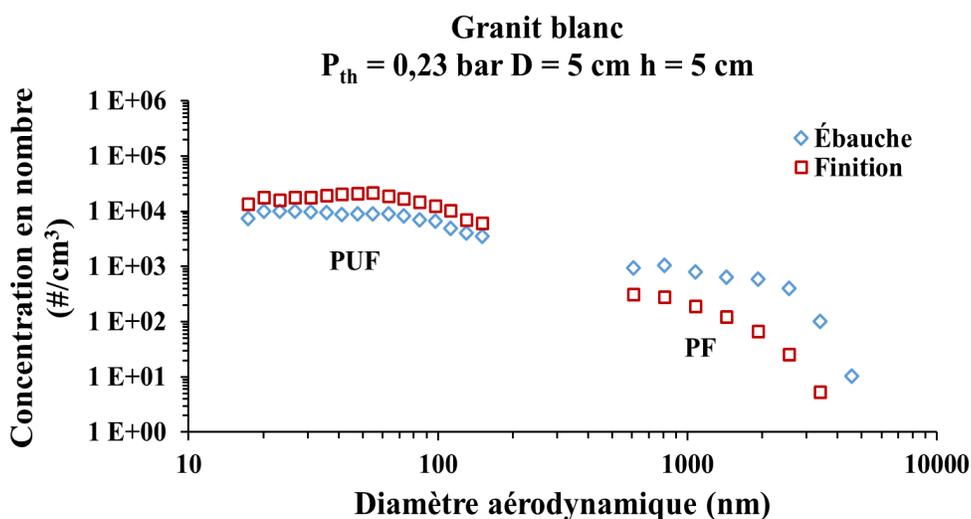


Figure 21. Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage régulier du granit blanc, à l'ébauche et à la finition.

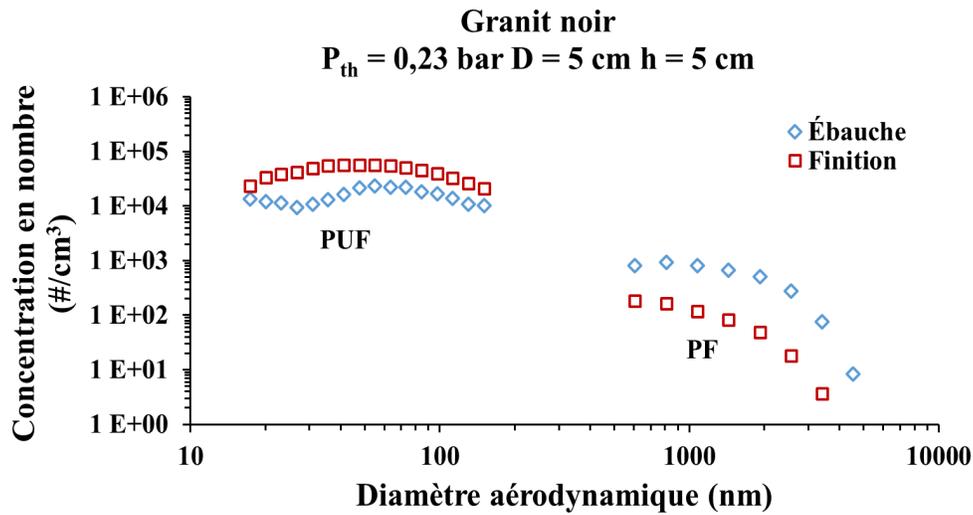


Figure 22. Granulométrie des PUF et des PF émises par le polissage régulier du granit noir, à l'ébauche et à la finition.

Les Figures 23 et 24 présentent la concentration totale en nombre des PUF et des PF pour les deux granits, blanc (Figure 23) et noir (Figure 24), et pour les phases d'ébauche et de finition, à différentes vitesses de rotation. Ces concentrations sont des moyennes obtenues pour les 3 vitesses d'avance. La concentration totale en nombre des PF à l'ébauche et à la finition a augmenté avec la vitesse de rotation du disque. La phase d'ébauche a généré plus de PF et moins de PUF que celle de finition.

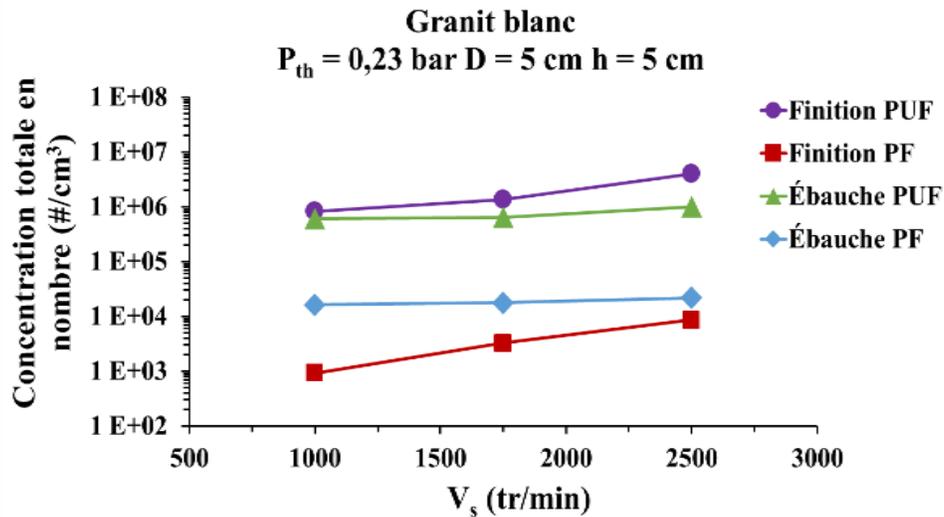


Figure 23. Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit blanc.

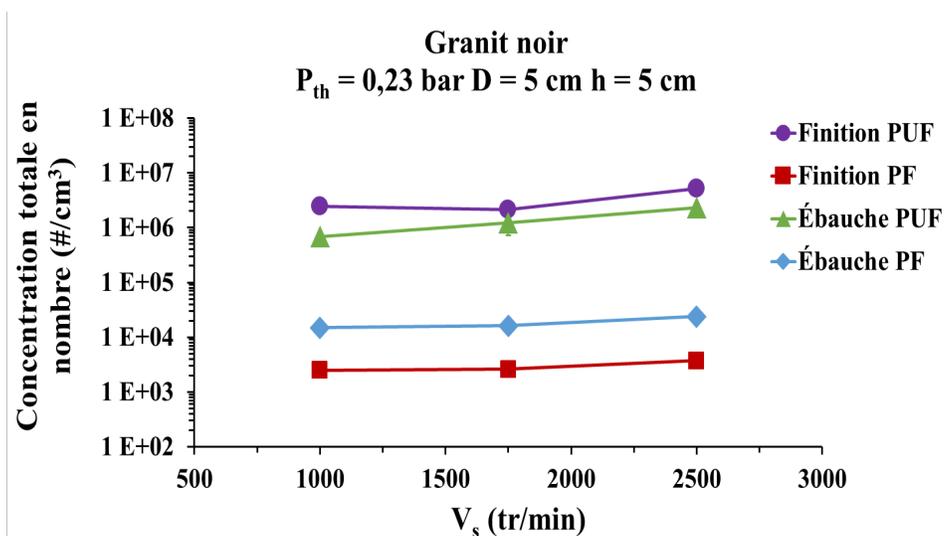


Figure 24. Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse de rotation – Granit noir.

Les Figures 25 et 26 présentent la concentration totale en nombre des PUF et des PF pour les deux granits, blanc (Figure 25) et noir (Figure 26), et pour les phases d'ébauche et de finition, à différentes vitesses d'avance. Ces concentrations représentent des moyennes obtenues pour les 3 vitesses de rotation. La concentration totale en nombre des PUF et des PF à l'ébauche et à la finition a diminué avec la vitesse d'avance du disque.

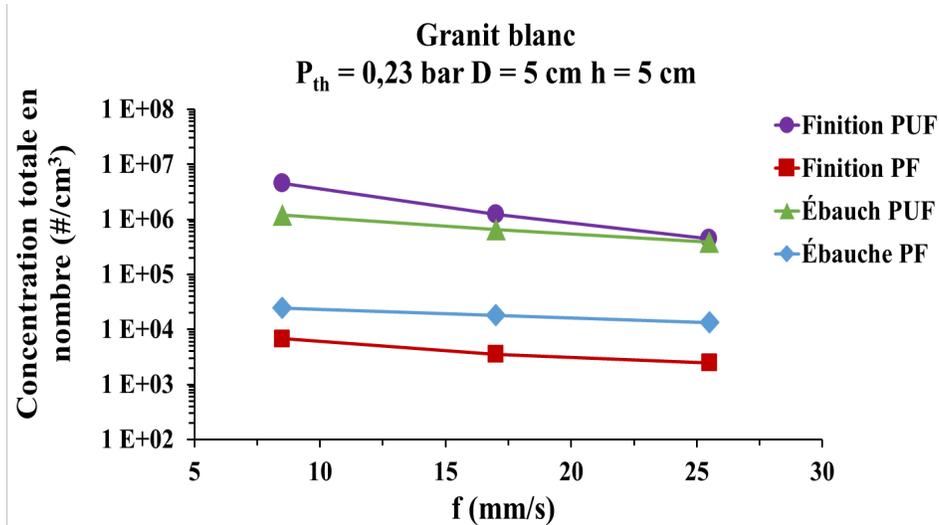


Figure 25. Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse d'avance – Granit blanc.

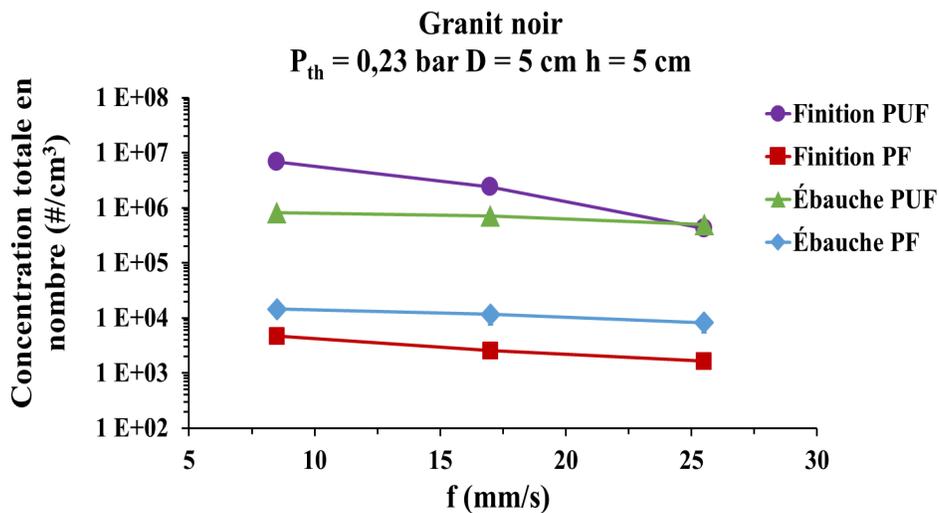


Figure 26. Concentration totale en nombre des PUF et des PF en fonction de la vitesse d'avance – Granit noir.

Les vitesses de rotation et d'avance du disque agissaient de la même façon pour les PF et les PUF. L'augmentation de la vitesse de rotation avait tendance à accroître les émissions de poussières tandis que l'augmentation de la vitesse d'avance avait tendance à les diminuer. De même que pour le polissage stationnaire, le polissage régulier a généré plus de PUF que de PF, en nombre de particules. Toutefois, la masse totale des PF prédominait. L'analyse de la masse totale de PUF et de PF montre cependant que la poussière générée en masse était plus importante à l'ébauche qu'à la finition. L'analyse massique de la poussière n'a pas permis, par conséquent, d'évaluer l'importance en quantité de la poussière générée lors du procédé industriel.

4.2.2.2 Dispersion

Les Figures 27 et 28 présentent la répartition des poussières des phases d'ébauche et de finition dans la direction radiale du disque de polissage des granits blanc (Figure 27) et noir (Figure 28). Les concentrations sont des moyennes selon la direction verticale, ainsi que pour les 3 vitesses de rotation et les 3 vitesses d'avance. Les concentrations de PUF et de PF étaient réparties uniformément autour du procédé de polissage. La concentration en nombre des PUF était plus élevée que celle des PF pour les phases d'ébauche et de finition et ce, pour les 2 granits. La finition a généré plus de PUF et moins de PF que l'ébauche.

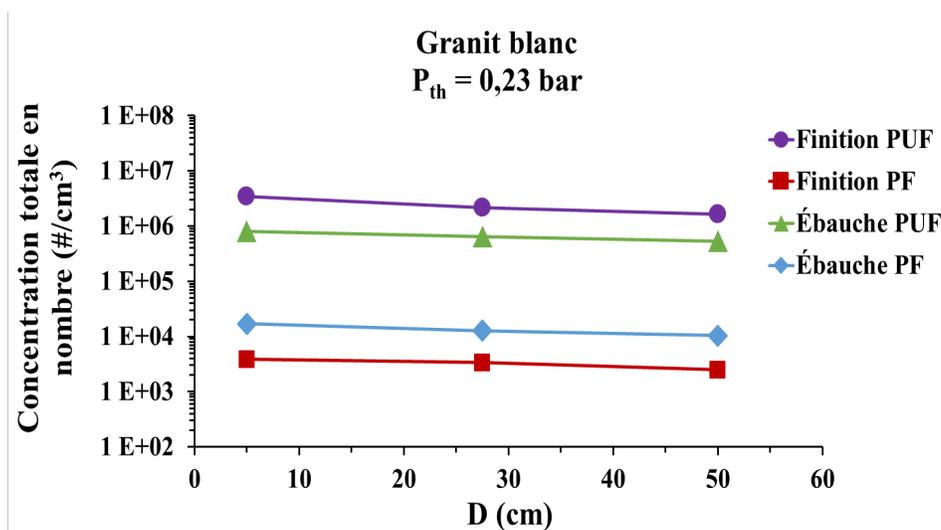


Figure 27. Répartition horizontale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.

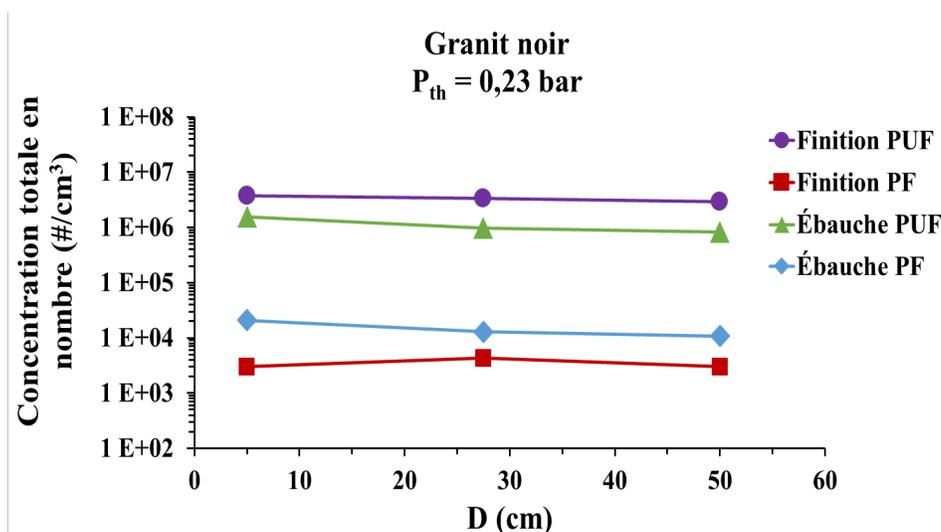


Figure 28. Répartition horizontale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.

Les Figures 29 et 30 présentent la répartition des poussières des phases d'ébauche et de finition dans la direction verticale du disque de polissage rotatif des granits blanc (Figure 29) et noir (Figure 30). Les concentrations sont des moyennes selon la direction verticale, ainsi que pour les 3 vitesses de rotation et les 3 vitesses d'avance. Les concentrations de PUF et de PF étaient quasi uniformes à différentes hauteurs. Les mêmes observations avaient été obtenues par rapport à la dispersion radiale des PUF et des PF lors du polissage des 2 granits. Comme observé dans le cas du polissage sans translation, les PUF et les PF ont contaminé toute la zone de travail, dans les directions radiale ou verticale.

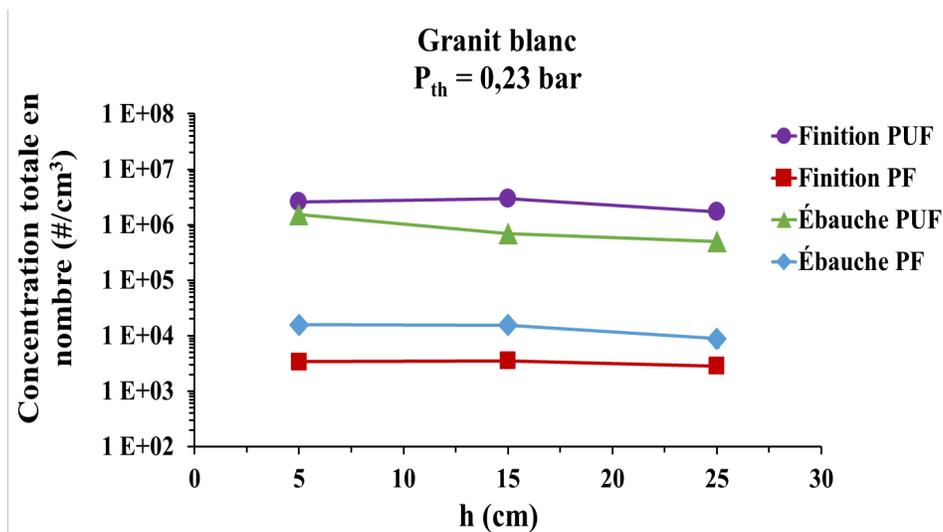


Figure 29. Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit blanc.

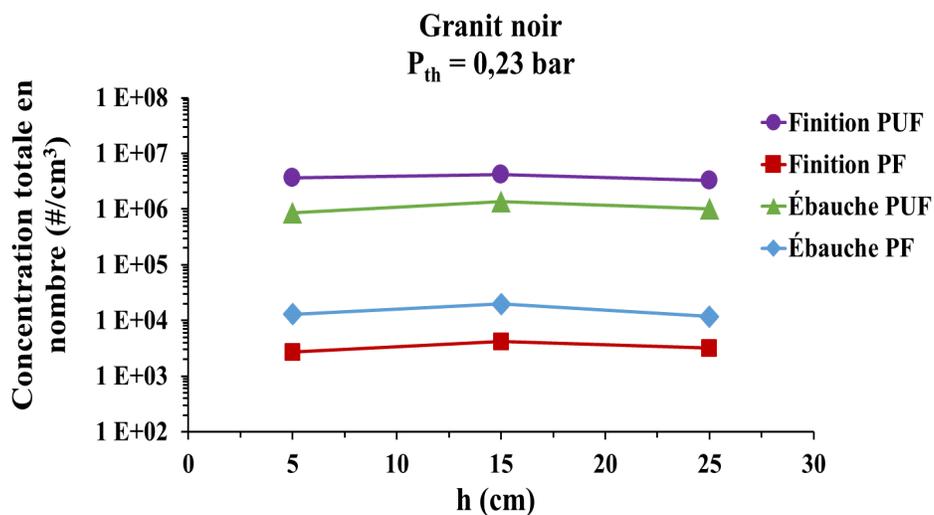


Figure 30. Répartition verticale de la concentration totale en nombre des PUF et des PF de granit noir.

4.2.2.3 Fini de surface

Les Figures 31 et 32 illustrent la rugosité et la brillance de la surface des granits blanc (Figure 31) et noir (Figure 32), pour les phases d'ébauche et de finition, en fonction de la vitesse de rotation. Les rugosités et les brillances arithmétiques de la surface des granits sont des moyennes des rugosités et des brillances obtenues pour les 3 vitesses d'avance. Dans l'ensemble, le fini de surface (incluant à la fois la rugosité et la brillance) du granit blanc (Figure 31) a évolué de la même façon que celui du granit noir (Figure 32). De plus, le fini de surface de la phase de finition était nettement meilleur que celui de la phase d'ébauche, avec une rugosité moins élevée et une brillance plus élevée. Les deux figures montrent que l'augmentation de la

vitesse de rotation de 1000 à 1750 tr/min a fait décroître très légèrement la rugosité de surface lors de la phase d'ébauche de polissage régulier des deux types de granit, alors que la brillance a augmenté lors de la phase de finition. Une augmentation de la vitesse de rotation de 1750 à 2500 tr/min n'a toutefois pas eu d'effet sur la rugosité et la brillance de la surface des deux types de granit, peu importe la phase.

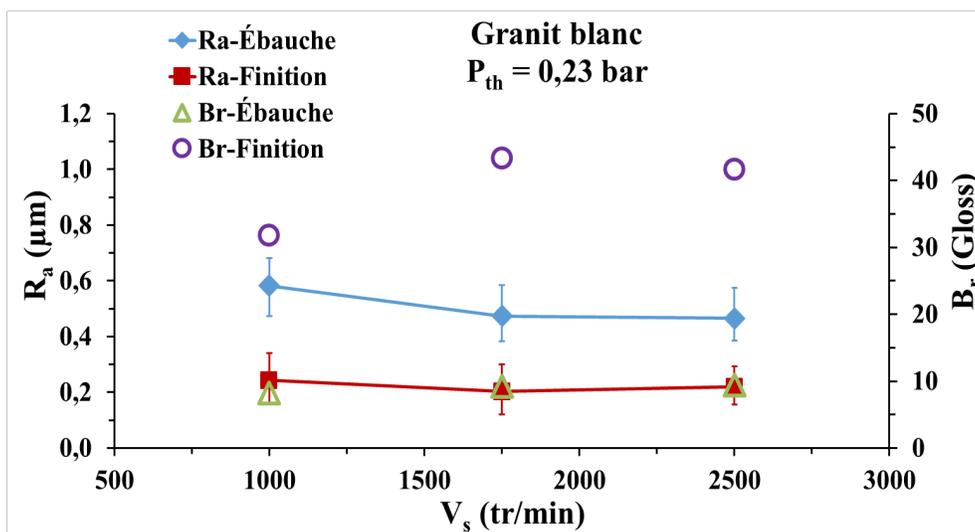


Figure 31. Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit blanc.

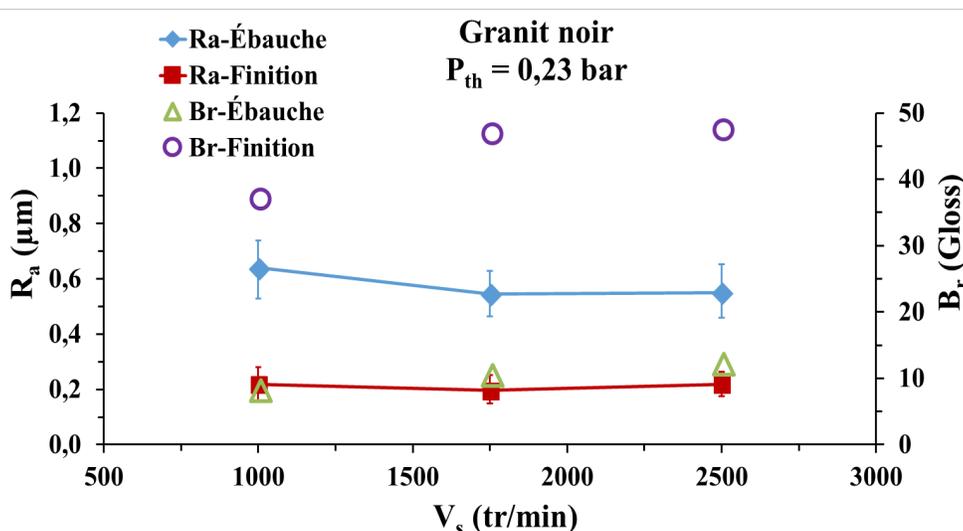


Figure 32. Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit noir.

Les Figures 33 et 34 présentent la rugosité et la brillance de la surface des granits blanc (Figure 33) et noir (Figure 34) pour les phases d'ébauche et de finition, en fonction de la vitesse d'avance. La rugosité arithmétique de la surface des granits est une moyenne des rugosités obtenues pour les 3 vitesses de rotation (même chose pour la brillance arithmétique). Elles montrent que la vitesse d'avance a peu d'effet sur le fini de surface des granits noir et blanc.

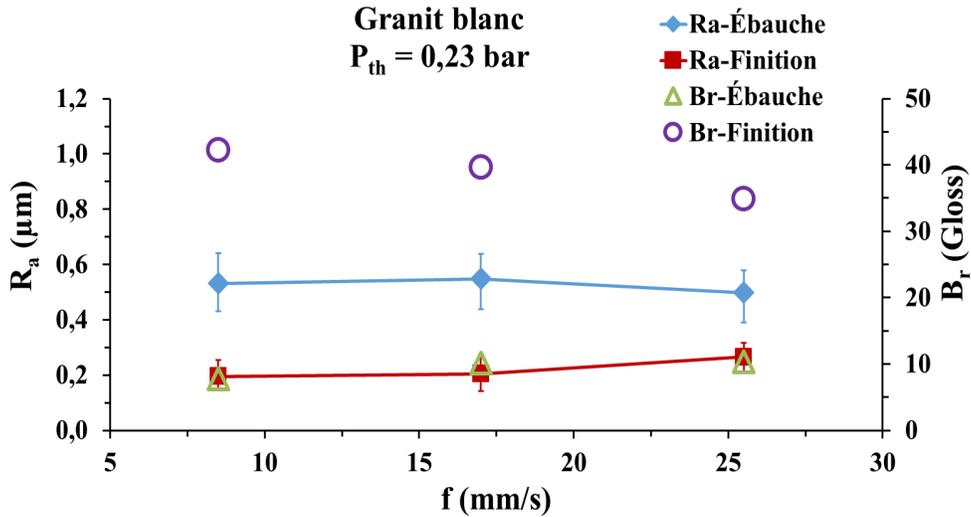


Figure 33. Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit blanc.

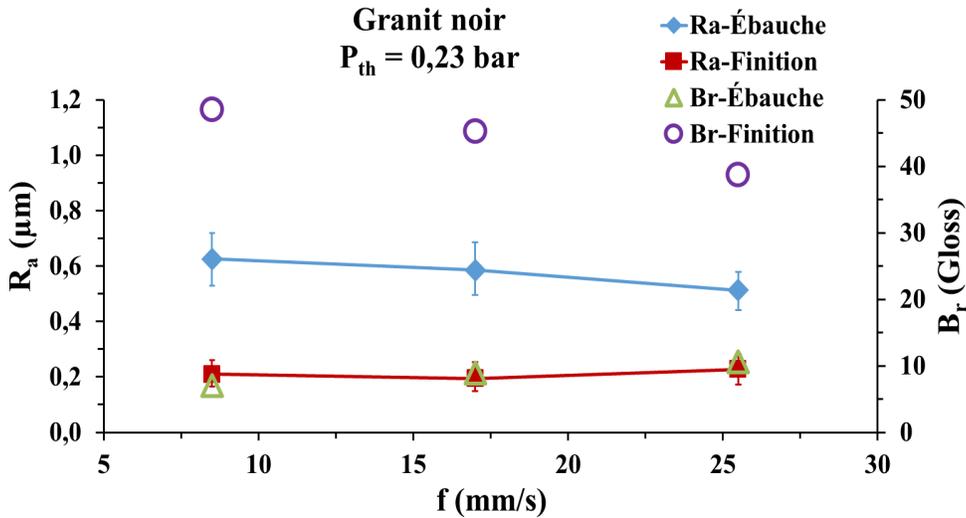
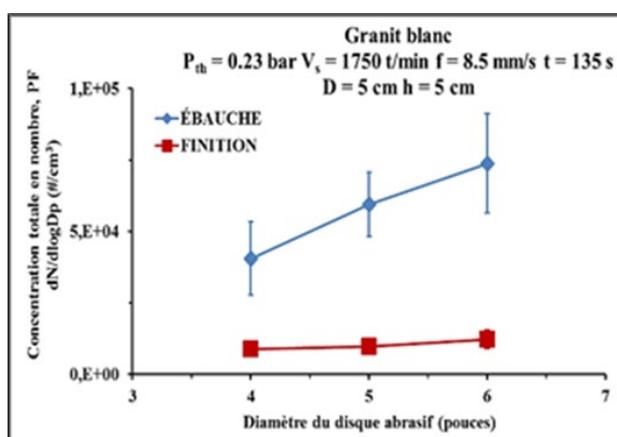


Figure 34. Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité et la brillance de la surface lors du polissage régulier du granit noir.

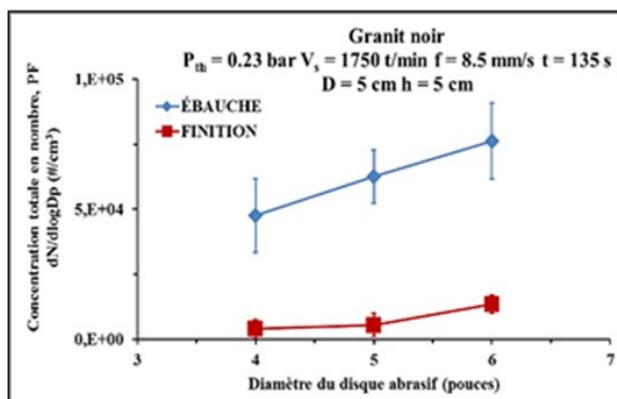
4.2.2.4 Effet de la taille de l'outil abrasif

L'influence du diamètre de l'outil abrasif sur l'émission des PUF et des PF a été analysée lors du polissage régulier du granit. Les abrasifs dont les grains étaient de taille G120 ont été utilisés lors de la phase d'ébauche, tandis que ceux dont les grains étaient de taille G800 ont servi lors de la phase de finition. Les diamètres de l'outil abrasif étaient de 4, 5 et 6 pouces. Les vitesses de rotation et d'avance étaient respectivement 1750 tr/min et 8,5 mm/s, avec un temps de polissage de 135 s. Les mesures de concentrations des PUF et des PF ont été effectuées au point de coordonnées 5 cm suivant la direction horizontale (D) et 5 cm suivant la direction verticale (h).

La Figure 35 donne la variation de la concentration totale en nombre des PF en fonction du diamètre de l'outil abrasif pour les granits blanc et noir. Pour les deux types de granit, la concentration en nombre des PF a doublé quand le diamètre de l'outil abrasif est passé de 4 à 6 pouces. La Figure 36 montre la variation de la concentration totale en nombre des PUF en fonction du diamètre de l'outil abrasif pour les granits blanc et noir. Pour les deux types de granit, la concentration en nombre des PUF a cru de 100 fois quand le diamètre de l'outil abrasif a passé de 4 à 6 pouces.

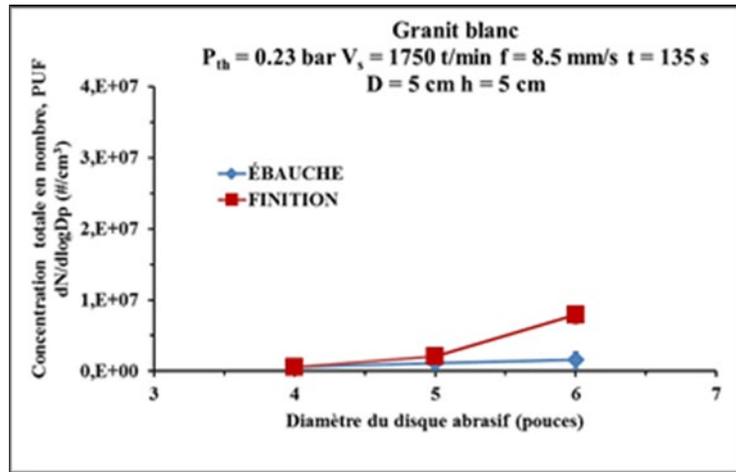


a)

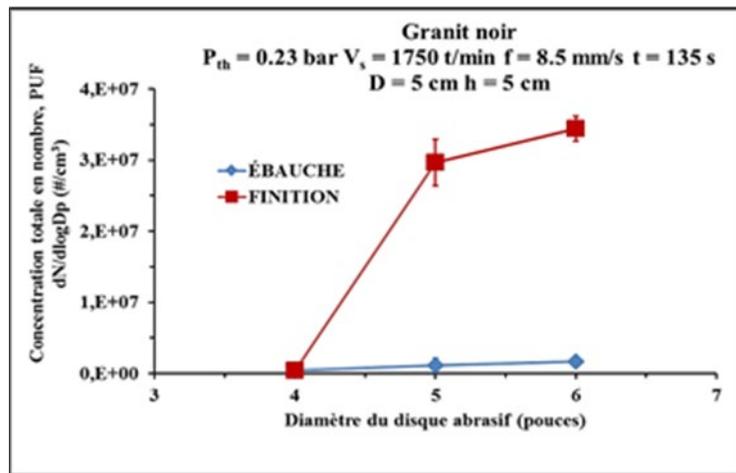


b)

Figure 35. Concentration totale en nombre des PF en fonction du diamètre du disque abrasif lors du polissage régulier des granits (a) blanc et (b) noir.



a)



b)

Figure 36. Concentration totale en nombre des PUF en fonction du diamètre du disque abrasif lors du polissage régulier des granits (a) blanc et (b) noir.

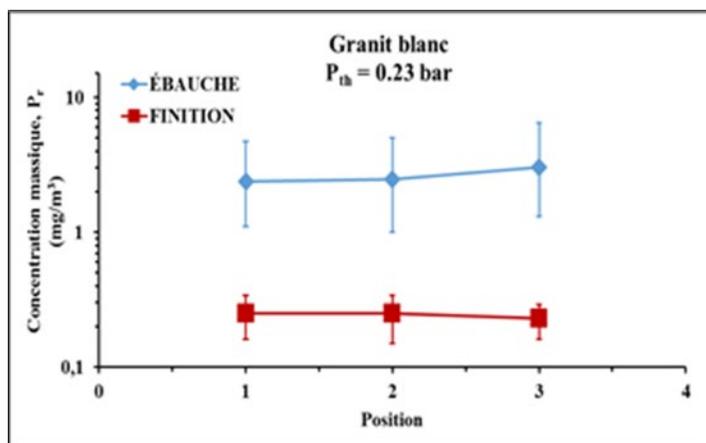
L'augmentation des concentrations des PF en fonction de la taille de l'outil abrasif au point de mesure était quasi linéaire (Figure 35). Toutefois, la variation des concentrations des PUF en fonction du diamètre du disque abrasif était non linéaire, particulièrement pour le granit noir; on note une augmentation rapide des concentrations des PUF pour des abrasifs d'un diamètre entre 4 et 5 pouces et une augmentation moins importante de ces concentrations pour les diamètres supérieurs à 5 pouces (Figure 36b).

4.2.2.5 Poussières respirables

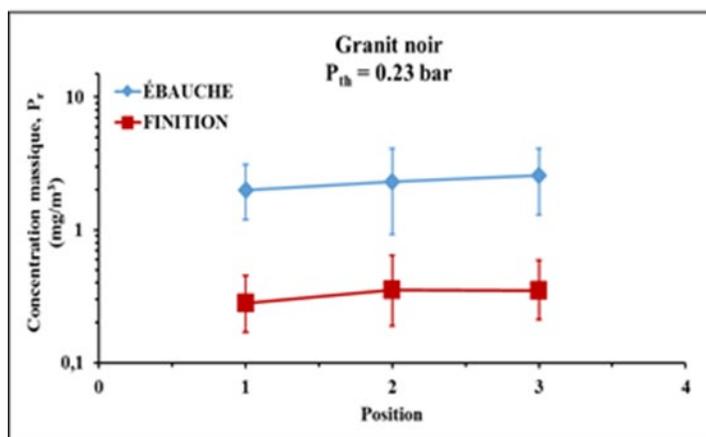
Le prélèvement des poussières respirables a été réalisé tout au long de l'analyse du procédé de polissage des granits blanc et noir et de ses effets sur l'émission et sur la dispersion des PUF et des PF. Des échantillonnages à trois emplacements étaient effectués simultanément, comme décrits à la Figure 10 et au Tableau 7. Les concentrations massiques de la poussière totale

respirable et du quartz (SiO_2) ont été déterminées selon le type de granit (blanc ou noir) et selon la phase de polissage (ébauche ou finition). La durée d'échantillonnage était d'environ 8 h.

La Figure 37 donne la variation de la concentration en masse de la poussière respirable émise par le procédé de polissage à différentes positions d'échantillonnage pour les granits blanc et noir. La répartition de la concentration massique de la poussière respirable était quasi uniforme pour les 3 points de prélèvement. La phase d'ébauche a émis une masse de poussières respirables plus élevée que celle qui se dispersait lors de la finition, et ce, pour les 2 types de granit.



a)



b)

Figure 37. Concentration en masse de la poussière respirable en fonction de la distance horizontale pour (a) le granit blanc et (b) le granit noir.

La Figure 38 présente la concentration en masse du quartz (SiO_2) émise par le procédé de polissage à différentes positions d'échantillonnage pour le granit blanc. La phase d'ébauche a généré plus de quartz que celle de finition. Les analyses des échantillons issus du granit noir montrent que celui-ci n'a pas émis de quartz. La concentration massique du quartz émise par le granit blanc dépassait la VEMP pour une période de 8 heures, lors de la phase d'ébauche. Par contre, elle était très faible et non significative (trace) lors de la phase de finition. Pour le granit blanc, l'exposition au quartz est alors considérée comme un risque potentiel pour le polissage lors de la phase d'ébauche; elle ne constitue toutefois pas un risque potentiel lors de la finition.

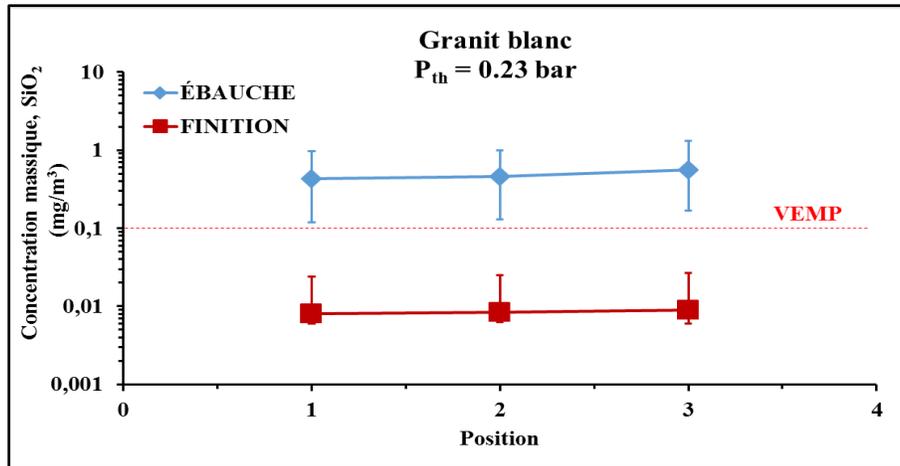


Figure 38. Concentration en masse du quartz en fonction de la distance – Granit blanc.

4.2.2.6 Caractérisation granulométrique

Il existe plusieurs techniques de caractérisation des particules, mais celles utilisées dans la présente étude ont combiné la microscopie électronique à balayage (MEB) pour l'analyse de la morphologie et de la microstructure, avec le spectre de diffraction d'électrons (EDS) pour l'analyse de la composition chimique.

L'ELPI utilisé pour échantillonner la poussière à caractériser selon la granulométrie des particules présentait 12 impacteurs dont les diamètres variaient entre 0,04 et 8 μm . Les échantillons ont été prélevés au cours du polissage à l'aide d'un substrat en carbone double face collant. Une fois les échantillons prélevés, ils ont été métallisés afin d'être analysés pour leur microstructure par le MEB et pour leur composition chimique par l'EDS.

La Figure 39 illustre les microstructures obtenues à partir du MEB des particules recueillies sur l'ELPI lors du polissage du granit noir et du granit blanc. Ce polissage était effectué à une vitesse de rotation de 1000 tr/min, avec une avance de 8,5 mm/s, des grains d'abrasif de taille 45 et une pression de 0,2 bar. Cette figure montre une concentration des particules de plus en plus élevée, au fur et à mesure que le diamètre de l'impacteur augmentait, soit jusqu'à l'étage 7 pour le granit noir et jusqu'à l'étage 9 pour le granit blanc, pour ensuite décroître progressivement jusqu'à l'étage 12. On peut par ailleurs observer que ces particules étaient de plus en plus fines et s'aggloméraient progressivement.

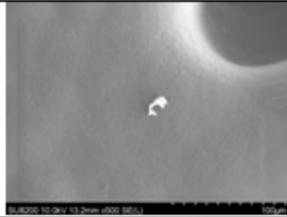
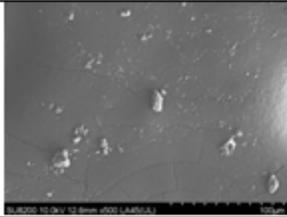
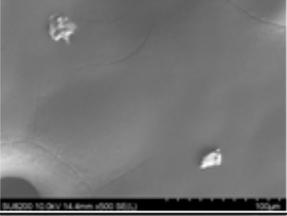
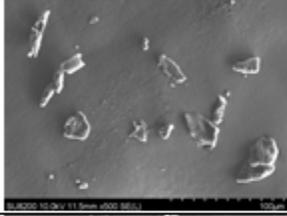
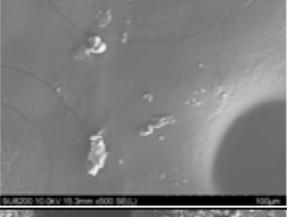
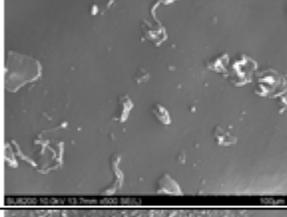
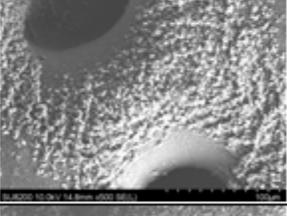
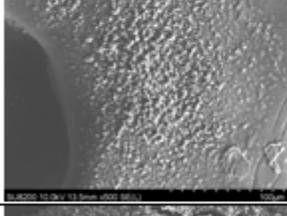
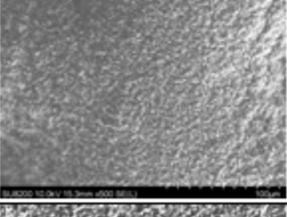
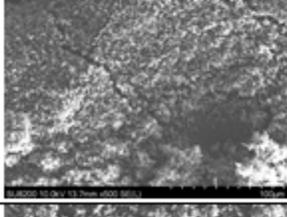
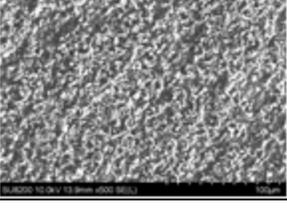
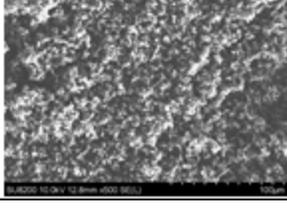
Numéro de l'impacteur (taille des particules)	Matériaux	
	Granit noir (X 500)	Granit blanc (X 500)
1 (0.0393 μm)		
2 (0.0796 μm)		
3 (0.1205 μm)		
6 (0.4864 μm)		
8 (1.2387 μm)		
10 (3.9023 μm)		

Figure 39. Morphologie des particules obtenues par MEB sur les différents étages de l'ELPI.

La Figure 40 donne la concentration en nombre des particules mesurée par l'ELPI durant la phase d'ébauche du polissage des granits blanc et noir. Le granit noir a généré plus de PUF et de PF que le granit blanc. Les PUF étaient émises en nombre plus important que les PF. Deux concentrations maximales en nombre ont été obtenues, dont une pour les PUF et une autre pour les PF.

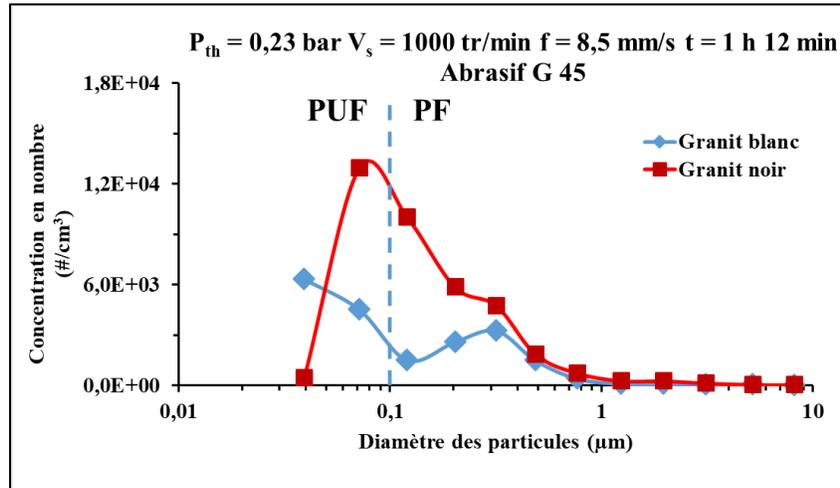


Figure 40. Granulométrie des particules lors du polissage régulier des granits (a) blanc et (b) noir.

La composition chimique des particules émises par le polissage a été obtenue par l'EDS du MEB. La Figure 41 présente un exemple de spectre dans lequel on observe différents éléments chimiques des particules dans le cas du granit blanc.

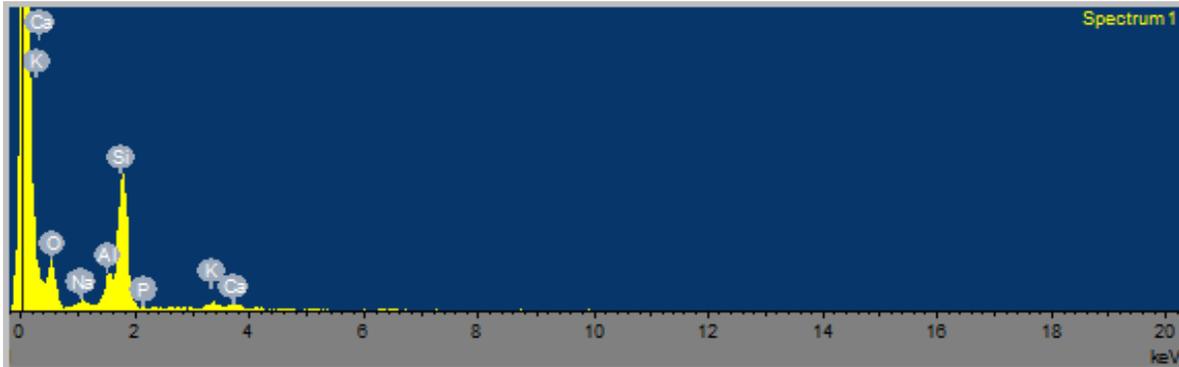


Figure 41. Exemple de spectre EDS de la composition chimique du granit blanc.

Pour un échantillon donné, plusieurs spectres ont été obtenus à différents endroits et l'élément principal, la Si, a été retenu pour l'analyse chimique de la poussière émise lors du polissage des granits blanc et noir.

La Figure 42 montre que, de manière générale, le pourcentage en masse de Si était plus élevé dans les particules issues du granit blanc que dans celles issues du granit noir. Ce pourcentage a augmenté jusqu'à environ 4 µm et a diminué progressivement avec le diamètre des particules émises par le polissage. Le taux maximum de Si (Figure 42) coïncidait avec la concentration maximale de PF à 4 µm (Figure 40). Les résultats obtenus montrent que les particules de tailles plus grandes (PF) contenaient plus de Si que celles de tailles plus petites (PUF). Cela est conforme aux résultats obtenus pour l'analyse du quartz, SiO₂, dans la poussière émise par le procédé de polissage. En effet, il a été démontré que l'ébauche a émis davantage de poussières, en matière de masse, et de quartz que la finition. Alors que la finition a généré davantage de PUF, moins de PF et donc moins de quartz.

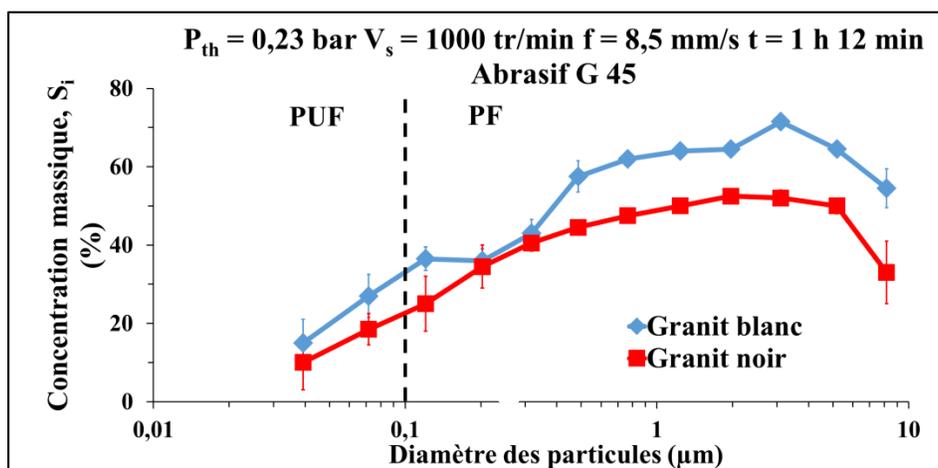


Figure 42. Pourcentage en masse de Si obtenu à partir de l'EDS des particules recueillies sur l'ELPI, lors du polissage des granits noir et blanc.

4.2.3 Travail humide

Dans les laboratoires de l'IRSST, le gel de silice a été analysé pour s'assurer que son effet sur la perte des particules sèches submicroniques est toujours moins que 10 %. Sa capacité à éliminer l'eau des particules humides est constamment plus de 95 %. Au banc d'essai à l'ÉTS, des vérifications ont aussi été faites sur les polissages à sec et humide pour valider cette performance avec les matériaux graniteux blanc et noir. Les pertes de PUF et de PF associées à l'usage du gel de silice se sont montrées négligeables.

Par la suite, des tests de polissage humide ont été effectués sur des granits noir et blanc avec utilisation du gel de silice dans des conditions de lubrification, en faisant varier le débit d'eau. La Figure 43 présente la répartition granulométrique de la concentration en nombre des PUF issues des granits blanc et noir lors du polissage humide à différents débits d'eau, à une vitesse de rotation de 1500 tr/min. Les résultats montrent que l'eau a une influence mineure sur l'émission des PUF par le procédé de polissage humide, à cette vitesse de rotation.

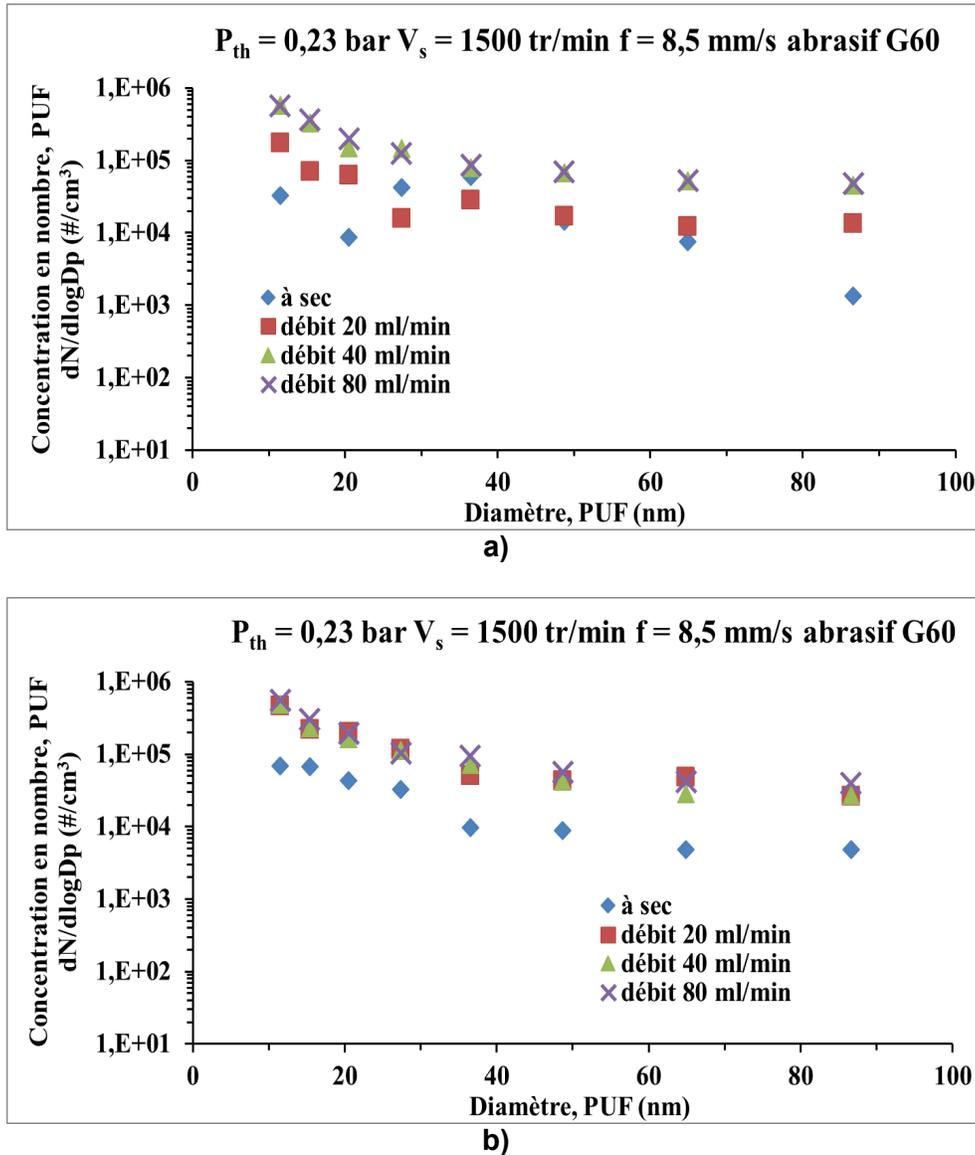


Figure 43. Concentration en nombre des PUF, lors du polissage à 1500 tr/min, à différents débits d'eau pour les granits (a) blanc et (b) noir.

La Figure 44 expose, pour les granits blanc et noir, la répartition granulométrique de la concentration en nombre de PUF lors du polissage humide à différents débits d'eau, à une vitesse de rotation de 2500 tr/min. Le même constat est observé pour cette vitesse de rotation : l'eau a eu une influence mineure sur l'émission des PUF par le procédé de polissage humide.

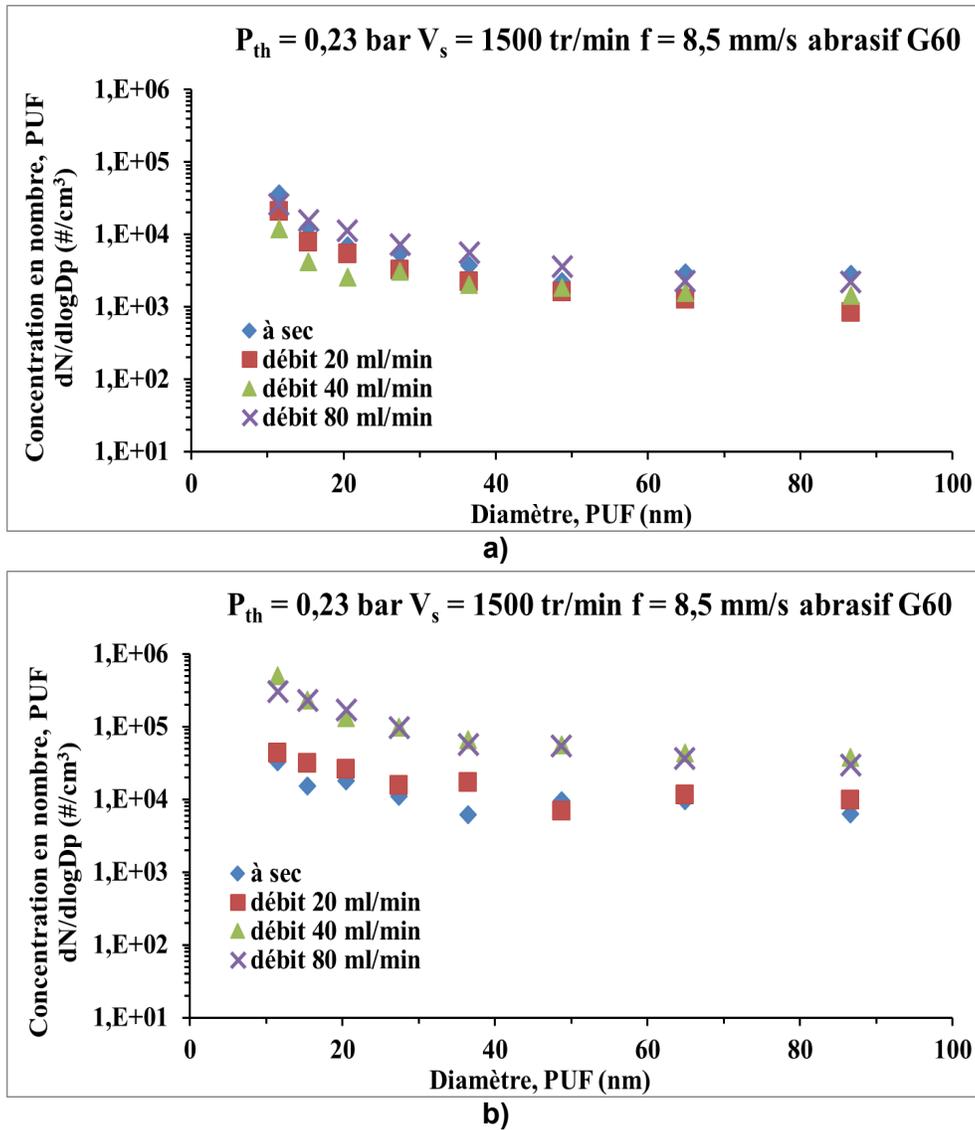


Figure 44. Concentration en nombre des PUF, lors du polissage à 2500 tr/min, à différents débits d'eau, pour les granits (a) blanc et (b) noir.

La répartition granulométrique de la concentration en nombre des PF, à différents débits d'eau, à une vitesse de rotation de 1500 tr/min, est représentée à la Figure 45 pour les granits blanc et noir. La concentration en nombre des PF a été réduite; l'usage de l'eau a donc permis de diminuer l'émission des PF autour du disque abrasif.

Le même constat est observé lorsque la vitesse de rotation est de 2500 tr/min (Figure 46). Ces résultats montrent également que le nombre de PUF était plus important que celui des PF lors des deux types de polissages, à sec et humide.

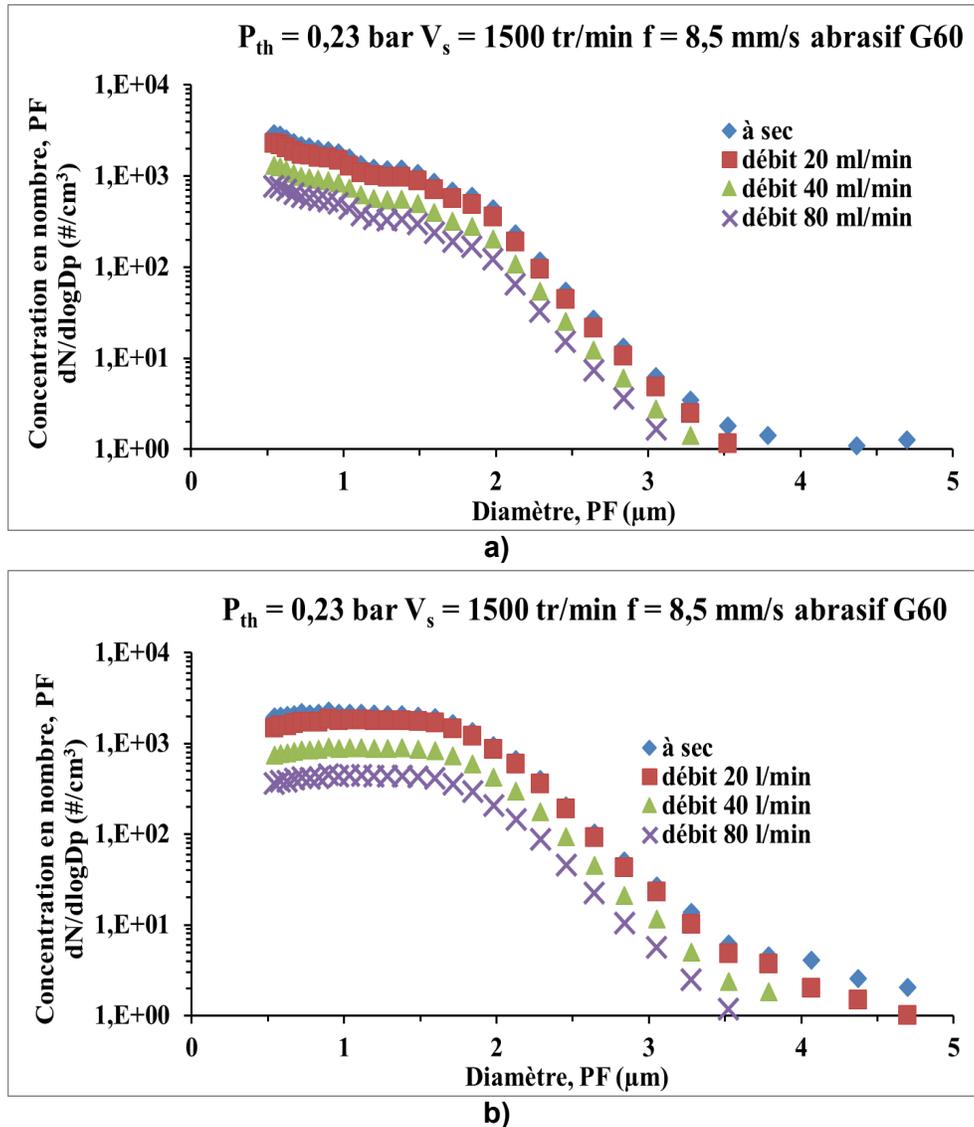


Figure 45. Concentration en nombre des PF fines de granit blanc (a) et noir (b), à 1500 tr/min et à différents débits d'eau.

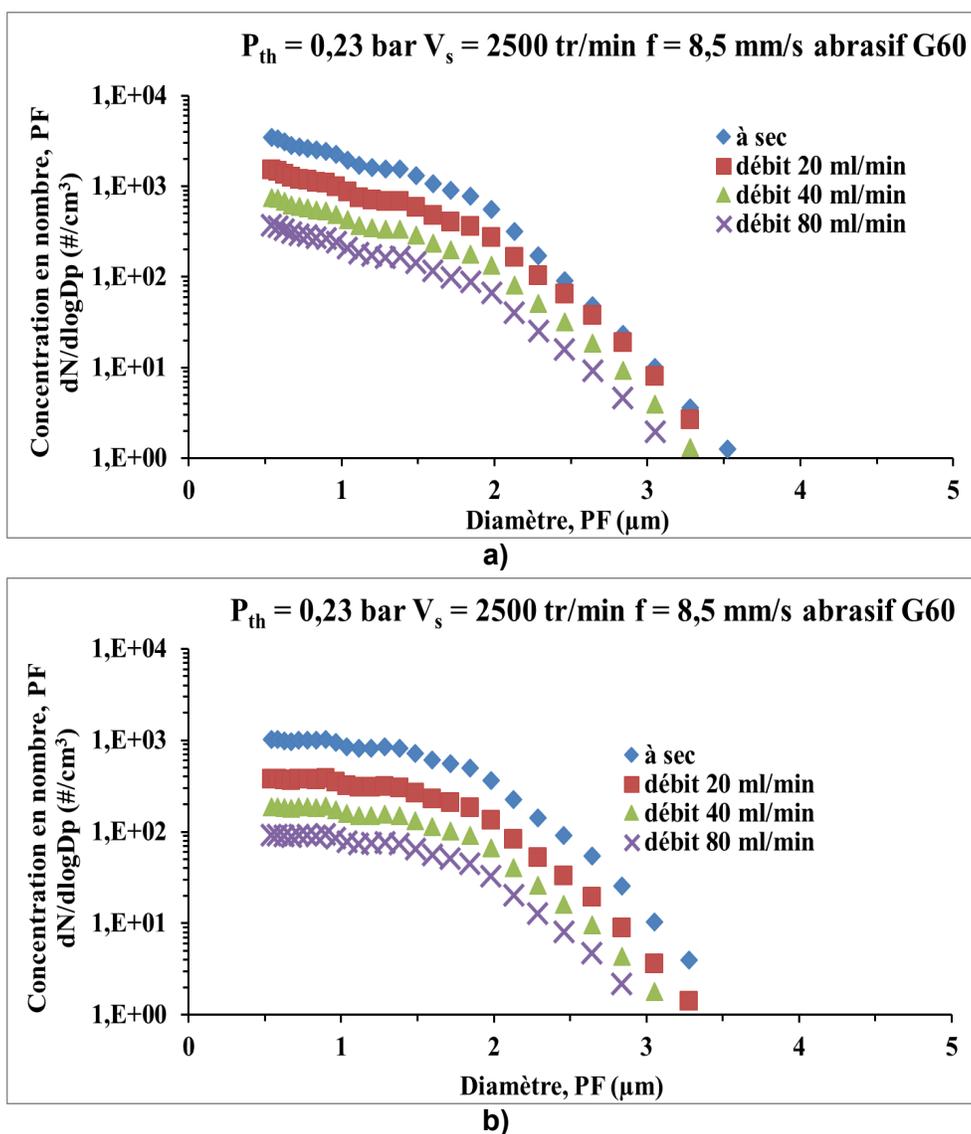
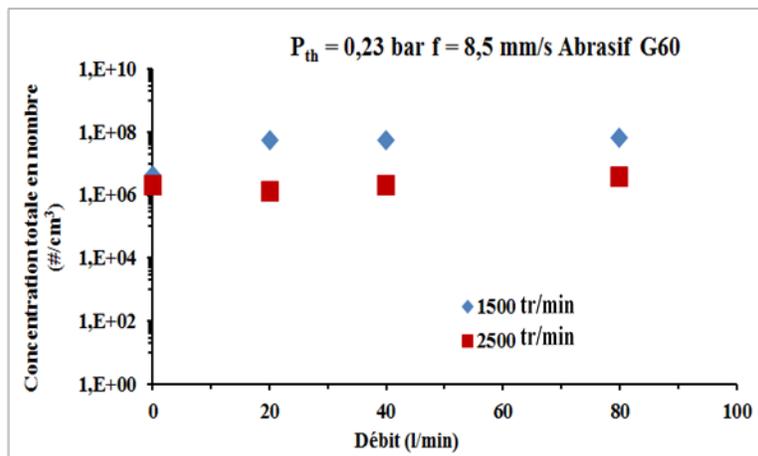


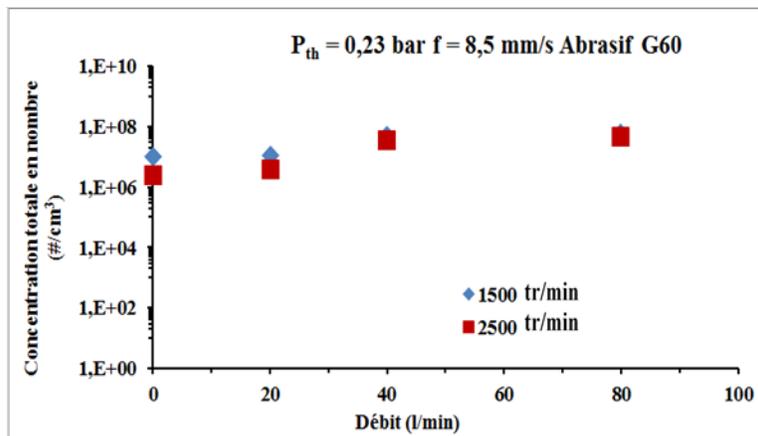
Figure 46. Concentration en nombre des PF de granit blanc (a) et noir (b), à 2500 tr/min et à différents débits d'eau.

Par rapport au polissage à sec, le nombre total des poussières (PUF et PF) a été peu influencé par le polissage par voie humide (Figure 47). Le volume d'eau n'a pas affecté la quantité de poussières en nombre lors du polissage humide. Puisque le nombre total des PUF prédominait au regard du nombre de PF, le polissage humide a eu un effet mineur sur la concentration totale en nombre des poussières émises par le procédé de polissage.

Au point de vue massique, la concentration totale des poussières émises par les procédés de polissage humide et à sec était cette fois-ci dominée par les particules de tailles plus grandes, soit les PF. Or, étant donné que la concentration en nombre de PF a diminué avec l'usage de l'eau dans le procédé de polissage du granit, la concentration massique totale des poussières a été réduite lors du polissage humide par rapport au polissage à sec (Figure 48). On peut avancer que le travail par voie humide réduit l'émission massique des poussières, avec cependant un effet négligeable sur la quantité en nombre des particules émises lors du polissage.



a)



b)

Figure 47. Concentration totale en nombre des particules (PUF et PF) de granit blanc (a) et noir (b), à différents débits d'eau.

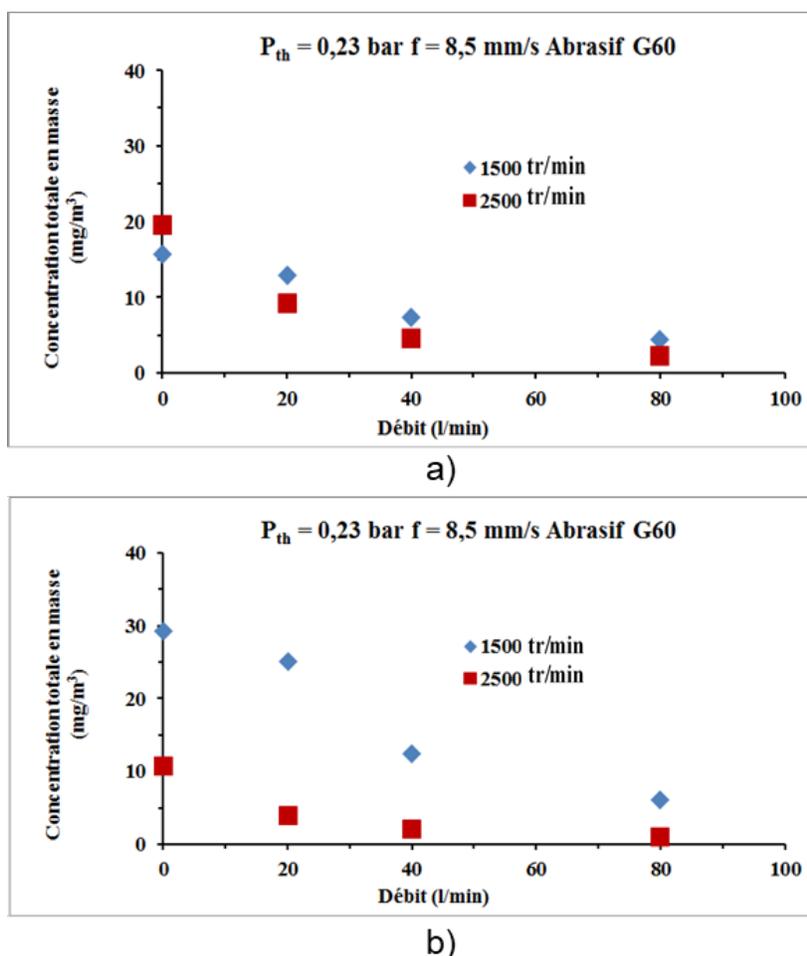


Figure 48. Concentration totale en masse des particules (PUF et PF) de granit blanc (a) et noir (b), à différents débits d'eau.

4.3 Récapitulation

La concentration de la poussière émise par le polissage du granit noir était plus élevée que celle issue du granit blanc. La concentration en nombre des PUF était plus importante que celle des PF. La phase d'ébauche du polissage a émis plus de PF, mais moins de PUF que la phase de finition. La concentration totale des deux types de poussières a été dominée par les PUF sur le plan du nombre et par les PF sur le plan de la masse. L'émission des PUF et des PF a augmenté avec la vitesse de rotation, mais elle a diminué avec la vitesse d'avance. La répartition des poussières émises par le polissage des granits blanc et noir était quasi uniforme dans l'espace environnant ce procédé; les zones rapprochée et éloignée ont été contaminées de façon uniforme. La dispersion des PUF et des PF ne dépendait pas de leur morphologie.

L'augmentation de la vitesse de rotation du disque de polissage a amélioré l'état de fini de surface, mais elle aurait pu l'endommager si la vitesse de rotation avait été très grande. Quant à la vitesse d'avance du disque de polissage, elle n'a pas produit d'effets significatifs sur l'état de fini de surface.

La taille de l'abrasif a provoqué un effet sur l'émission des PUF et des PF. L'abrasif dont le diamètre était important a émis plus de poussières que celui dont le diamètre était petit.

Le granit noir n'a pas émis de poussières de quartz lors des deux phases : ébauche et finition. Par contre, le granit blanc en a émis dans une proportion équivalente à 20 % de la poussière respirable recueillie lors de la phase d'ébauche, alors que l'émission de quartz fut négligeable lors du polissage de finition. L'analyse de la morphologie des PUF et des PF a montré que le taux de Si a augmenté avec la taille des particules émises par le polissage du granit.

Le polissage humide a permis de réduire la concentration totale en masse des poussières. Cependant, il n'a pas produit un effet important sur leur concentration totale en nombre. Le jet d'eau a permis d'entraîner vers le sol les grosses particules comme les particules fines, alors que son effet sur les PUF fut mineur. Le travail humide a alors contribué à réduire le taux de quartz émis par le polissage du granit blanc puisque le quartz est porté par les particules de grande taille. Le travail humide n'a donc pas permis de réduire le nombre de particules, en particulier les PUF, émises dans l'espace par le procédé de polissage du granit.

5. SIMULATION EXPÉRIMENTALE

5.1 Méthodologie

5.1.1 Généralité

Dans ce deuxième volet, la simulation expérimentale a permis d'évaluer l'effet de la rotation du disque sur la dispersion des contaminants, des particules ou des gaz émis entre la table et le disque tournant. Elle utilisait la technique de particules ou gaz traceurs pour simuler la dispersion de la poussière générée par le procédé de polissage. Étant donné que le taux d'émission du contaminant traceur était contrôlé par son système de génération, l'effet de la rotation du disque sur la dispersion des contaminants a été isolé et bien documenté. Ce modèle expérimental simplifié en laboratoire a pu facilement être reproduit par des simulations numériques. Il offre, par conséquent, l'outil idéal pour encadrer les simulations numériques ayant permis l'étude paramétrique des différents concepts de réduction à la source de la poussière émise lors des opérations de la transformation des matériaux (volet 3, chapitre 6).

Dans un laboratoire de l'IRSST, un banc d'essai de simulation expérimentale a été mis en place à l'intérieur d'un enclos de confinement de 3 m par 3 m et d'une hauteur de 2,6 m. Il était constitué d'une mini-fraiseuse (modèle 2000, SHERLINE) dotée d'un moteur de 90 V en CC, à couple élevé et avec commande électronique de la vitesse. La vitesse de la minifraiseuse pouvait varier en permanence de 70 à 2 800 tr/min sans changements d'engrenages ou de courroie. La conception de ce modèle offrait 8 directions de mouvement (4 rotations et 4 mouvements des axes X, Y et Z). La minifraiseuse était installée sur une table métallique offrant une bonne stabilité du dispositif expérimental. Un disque rotatif était monté sur la broche de la minifraiseuse. La face inférieure du disque était positionnée parallèlement à la surface de la table au moyen de 3 dispositifs de contrôle : vertical, horizontal et angulaire (Figure 49).

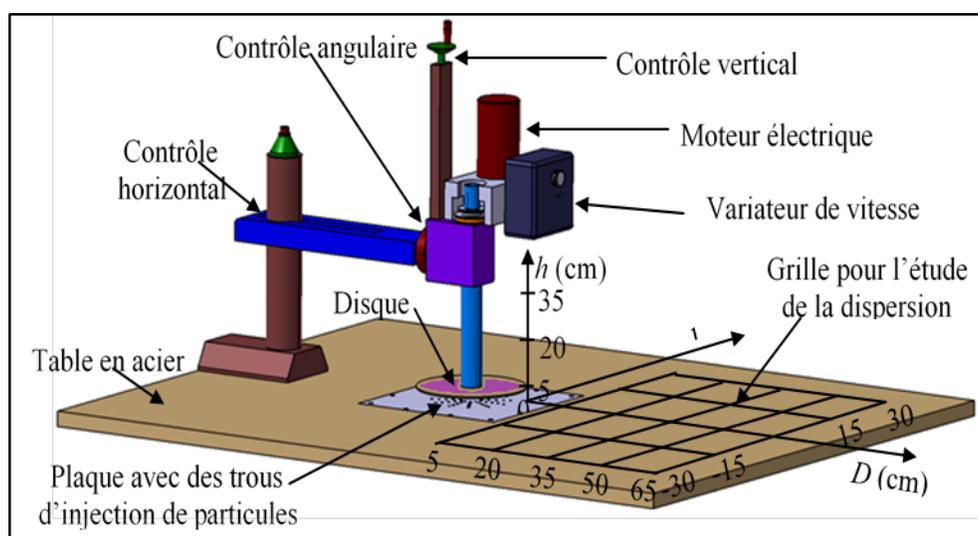


Figure 49. Banc d'essai avec indication des points de mesure.

Le banc d'essai offrait la possibilité d'injecter un gaz (CO_2) ou des particules de NaCl puisque la partie de la table sous le disque était régulièrement perforée, permettant une injection uniforme

de ces substances entre la table et le disque rotatif. La génération des particules de NaCl a été obtenue en utilisant l'atomiseur 6 jets (modèle 9306A, TSI Inc.) à partir d'une solution aqueuse de sel. Les particules générées, de taille submicronique, ont été séchées en utilisant le gel de silice. Ces particules ou du CO₂ ont ensuite été injectés sous le disque rotatif à un taux fixe d'émission à l'aide d'un régulateur de débit. Le schéma d'alimentation des particules ou de gaz traceurs est présenté dans la Figure 50.

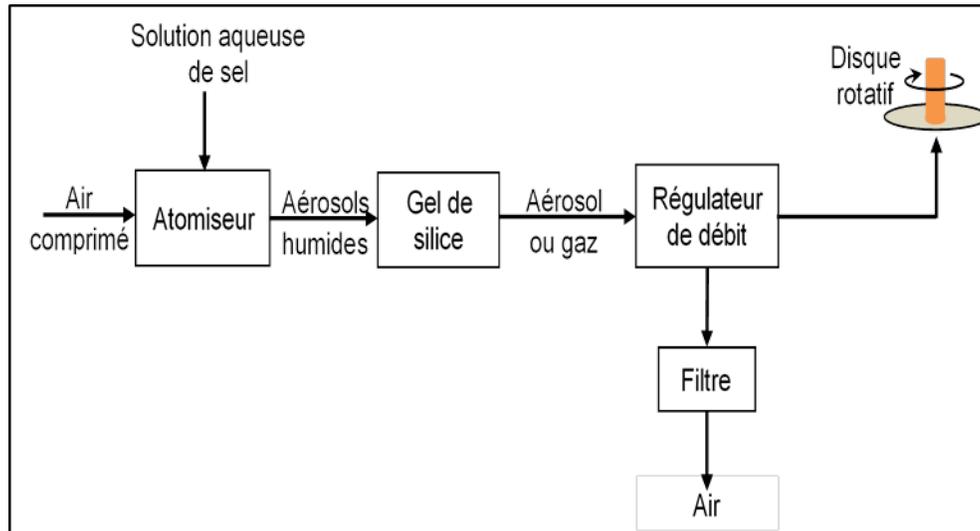


Figure 50. Schéma d'alimentation des particules ou des gaz traceurs.

La mesure de la concentration en nombre des particules et leur granulométrie ont été obtenues à l'aide d'un spectromètre Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). L'instrument à lecture directe de marque ADC modèle LFG20 a été utilisé pour mesurer le CO₂.

5.1.2 Dispersion

La dispersion des particules a été étudiée en effectuant des estimations selon une grille de mesures sur 3 plans horizontaux de hauteur $h = 5, 20$ et 35 cm (Figure 49). Ces mesures (répétées 6 fois pour évaluer l'erreur de lecture) ont servi à comparer la dispersion des particules ou du gaz traceur pour différents concepts de réduction des contaminants à la source. Elles ont aussi permis de valider les simulations numériques présentées au chapitre suivant.

5.1.3 Concepts de réduction à la source

Les performances de trois concepts de réduction à la source ont été étudiées. Le premier concept était un système soufflage-aspiration constitué d'une hotte d'aspiration et d'un souffleur d'air laminaire (à faible débit) permettant d'orienter les contaminants dans la direction de la hotte d'aspiration. Le 2^e concept était un carter d'aspiration faisant appel à un confinement de disque permettant d'intégrer un aspirateur. Le 3^e concept utilisait une aspiration par le disque à travers des trous; l'outil abrasif était utilisé comme une aspiration localisée.

La Figure 51 présente le schéma utilisé dans l'évaluation du concept soufflage-aspiration. Puisque la dispersion des particules sous l'effet de la rotation du disque se fait dans toutes les

directions, il devient compliqué de mettre en place des moyens de réduction à la source des poussières émises lors du polissage des matériaux. À elle seule, une aspiration à la source ne suffit pas à intercepter les particules prises au piège dans l'écoulement dominant de rotation. L'ajout d'un soufflage laminaire de l'air à une aspiration permet donc d'orienter l'écoulement dans la direction de la source d'aspiration et ainsi d'augmenter son efficacité à réduire la concentration des poussières autour du disque. Les paramètres analysés pour l'évaluation du système soufflage-aspiration étaient la vitesse de rotation, le débit d'aspiration et le débit de soufflage laminaire (à faible débit).

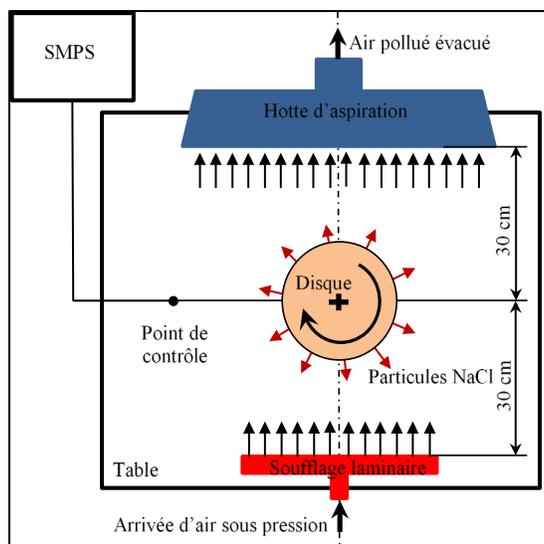


Figure 51. Système soufflage-aspiration.

La Figure 52 présente le schéma utilisé dans l'évaluation du concept de carter d'aspiration. Ce concept utilise un disque confiné par un carter muni d'une hotte d'aspiration. Les paramètres analysés pour l'évaluation du carter d'aspiration étaient la vitesse de rotation et le débit d'aspiration.

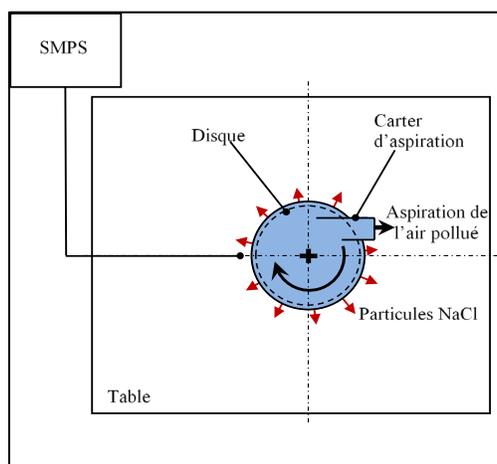


Figure 52. Carter d'aspiration.

La Figure 53 présente une composante du système de fentes d'aspiration intégrées au disque rotatif, alors que celui-ci était perforé selon 4 configurations : des fentes circulaires, des fentes linéaires et des fentes courbées orientées dans le sens de rotation du disque ou dans le sens inverse. Les paramètres analysés pour l'évaluation de l'aspiration intégrée au disque étaient la vitesse de rotation, le débit d'aspiration et la configuration de répartition des trous d'aspiration. Le schéma expérimental adopté pour l'analyse de l'aspiration intégrée au disque est similaire à celui présenté pour le carter d'aspiration.

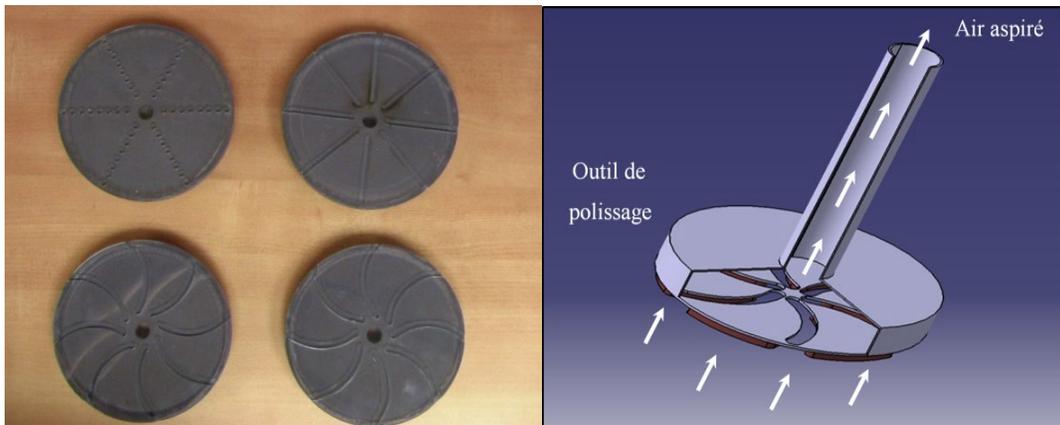


Figure 53. Aspiration par le disque.

Les vitesses de rotation considérées pour l'étude de l'efficacité de chacun des concepts de réduction à la source étaient 1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min. Les particules de NaCl été générées et émises entre le disque et la table pour l'évaluation des 3 concepts. Les mesures de concentration des particules de NaCl avec et sans système de réduction à la source dans l'environnement autour du disque ont permis de calculer l'efficacité de réduction à la source en utilisant la formule suivante :

$$\text{Efficacité (\%)} = \left(1 - \left(\frac{\text{Concentration avec réduction}}{\text{Concentration sans réduction}} \right) \right) * 100 \quad (7)$$

5.2 Résultats

Ces simulations ont été effectuées pour reproduire le polissage stationnaire du granit avec des conditions expérimentales et un taux d'émission contrôlés. Ainsi, les particules de NaCl générées à partir d'une solution de sel ou le CO₂ simulaient les PF et les PUF émises lors du polissage du granit en s'appuyant sur des données préliminaires colligées lors des essais expérimentaux à l'ÉTS. La taille du disque utilisée était de 12,7 cm (4,7 pouces). Cette étude focalisait le comportement des particules submicroniques puisqu'elles sont considérées très nocives pour la santé et la sécurité des travailleurs, et difficiles à extraire de l'écoulement rotatif engendré par le disque de polissage. La dispersion du contaminant traceur (CO₂ ou particules de NaCl) a d'abord été analysée, puis trois concepts de réduction à la source ont été étudiés par rapport à la vitesse de rotation du disque et des paramètres de ventilation.

5.2.1 Dispersion

Le spectre des particules de NaCl a été choisi pour refléter la poussière émise par le polissage du granit obtenu lors des essais expérimentaux à l'ÉTS. En effet, la quantité maximale de PUF émises par le procédé de polissage à sec du granit blanc (à 40 % de quartz) a été obtenue à des tailles de particules voisines des 35 nm. La granulométrie des particules NaCl utilisée dans la présente étude est présentée à la Figure 54. Cette figure montre le comportement des particules de différents diamètres, à des distances horizontales différentes et à diverses vitesses de rotation. La concentration en nombre de particules variait en fonction de la distance horizontale et de la vitesse de rotation. Toutefois, la forme granulométrique du spectre de particules était préservée dans l'espace d'étude. Cela concorde avec le comportement observé lors des essais expérimentaux de polissage à sec dans le laboratoire de l'ÉTS. Les PF et les PUF ont montré des comportements similaires dans l'espace sous l'effet du procédé de polissage. Dans le cas des simulations expérimentales, la vitesse de rotation du disque était le paramètre qui a influencé la répartition des particules dans l'espace, indépendamment de leurs tailles.

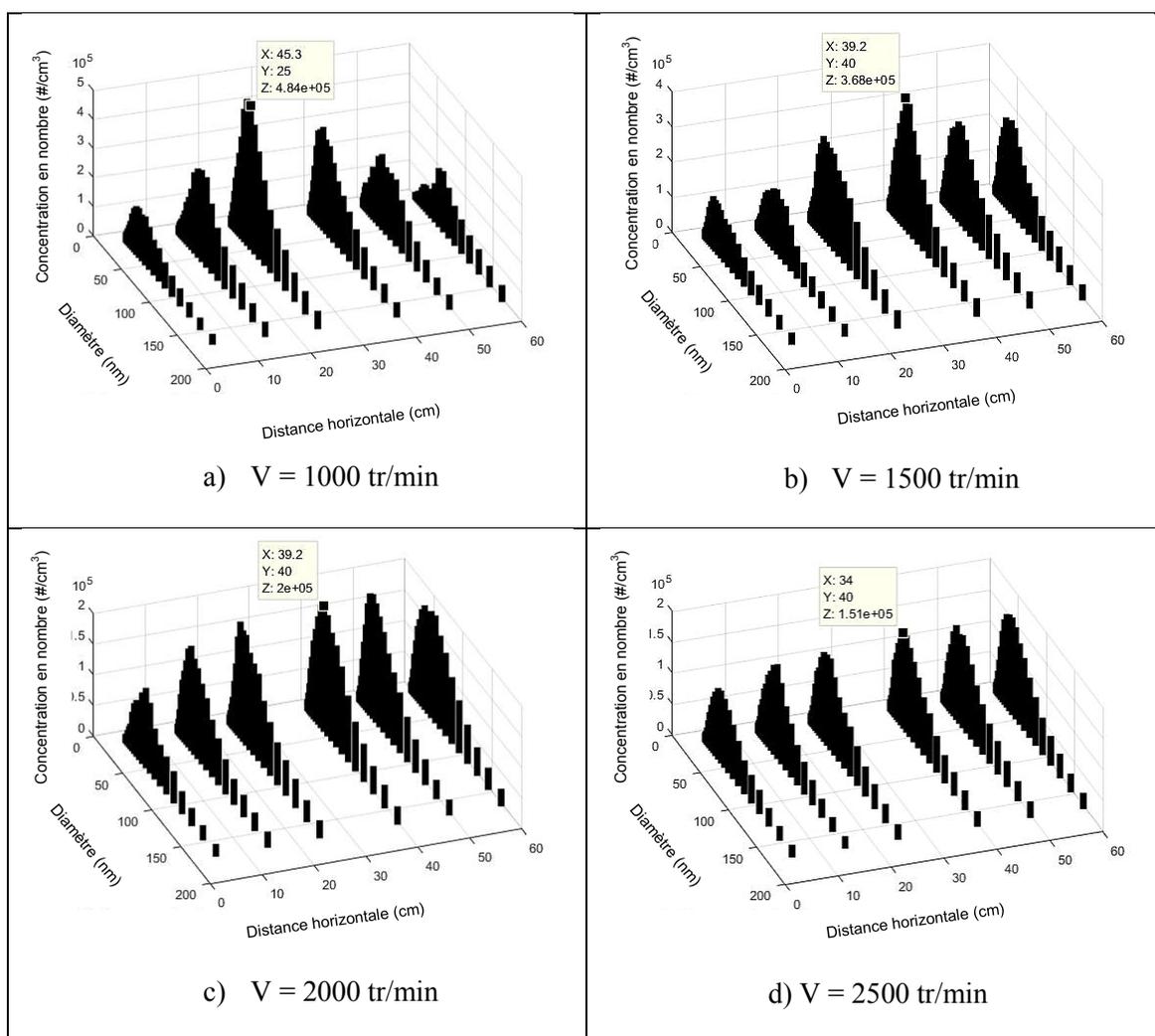


Figure 54. Granulométrie des particules de NaCl à différentes distances horizontales.

La Figure 55 présente la dispersion des particules de NaCl selon la direction horizontale à différentes vitesses de rotation (1000 et 2500 tr/min). À une vitesse de rotation de 1000 tr/min, la concentration de particules de NaCl a augmenté avec la distance pour atteindre un pic à une distance voisine des 25 cm, puis elle a ensuite diminué. À une vitesse de rotation de 2500 tr/min, la concentration des particules était inférieure à celle obtenue à 1000 tr/min. En effet, étant donné que le taux de génération des particules de NaCl était constant, le mélange air-particules était plus dilué à de grandes vitesses de rotation. La concentration des particules traceuses a augmenté légèrement avec la distance horizontale. Quelle que soit la vitesse de rotation (1000 ou 2500 tr/min), les concentrations des particules de NaCl étaient réparties sur toute la distance horizontale.

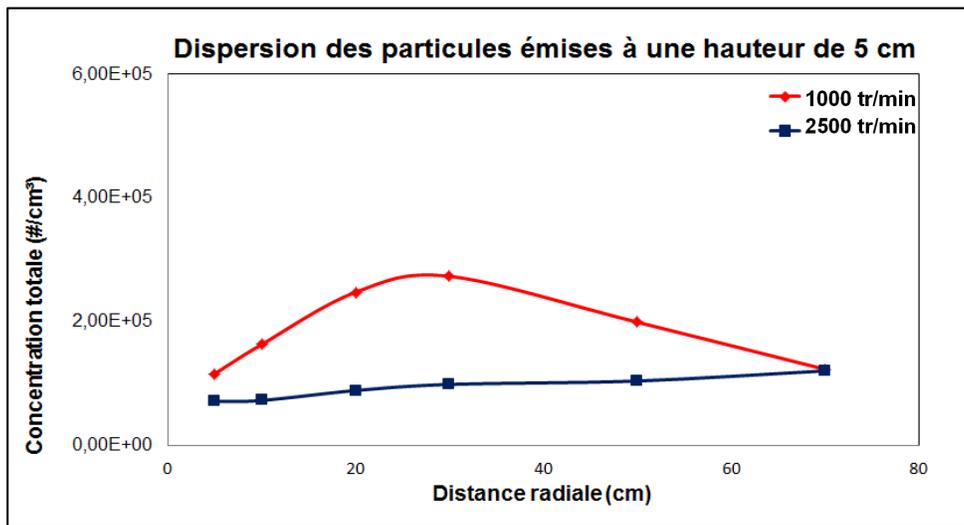


Figure 55. Dispersion des particules de NaCl dans la direction horizontale à différentes vitesses de rotation.

La Figure 56 présente la dispersion des particules de NaCl selon la direction verticale pour deux vitesses de rotation différentes (1000 et 2500 tr/min). La concentration des particules de NaCl a diminué avec la hauteur pour les deux vitesses de rotation. Elle a atteint un niveau plancher à une hauteur de 5 cm. À partir de cette hauteur, la distribution spatiale, selon la distance horizontale et la hauteur, était quasi uniforme. La rotation du disque a ainsi contaminé les zones éloignée et rapprochée avec la même intensité. Une contamination globale a été observée dans l'ensemble de l'espace entourant le disque rotatif. De tels comportements avaient aussi été observés lors des expériences menées à l'aide du banc d'essai de l'ÉTS.

La dispersion du gaz traceur de CO₂ a été analysée et comparée à celle des particules de NaCl, à différentes vitesses de rotation. La Figure 57 illustre la dispersion du gaz traceur de CO₂ pour deux vitesses de rotation, 1000 et 2500 tr/min. À des fins de comparaison, la dispersion des particules de NaCl a été reproduite sur la même figure, avec des concentrations normalisées par rapport à leur valeur maximale. Les résultats montrent que la répartition des concentrations normalisées du gaz dans l'espace, sous l'effet de la rotation du disque, était quasi la même pour les deux vitesses de rotation étudiées. En outre, le comportement du gaz traceur était comparable au comportement des particules de NaCl à la plus grande des deux vitesses de rotation étudiées (V=2500 tr/min).

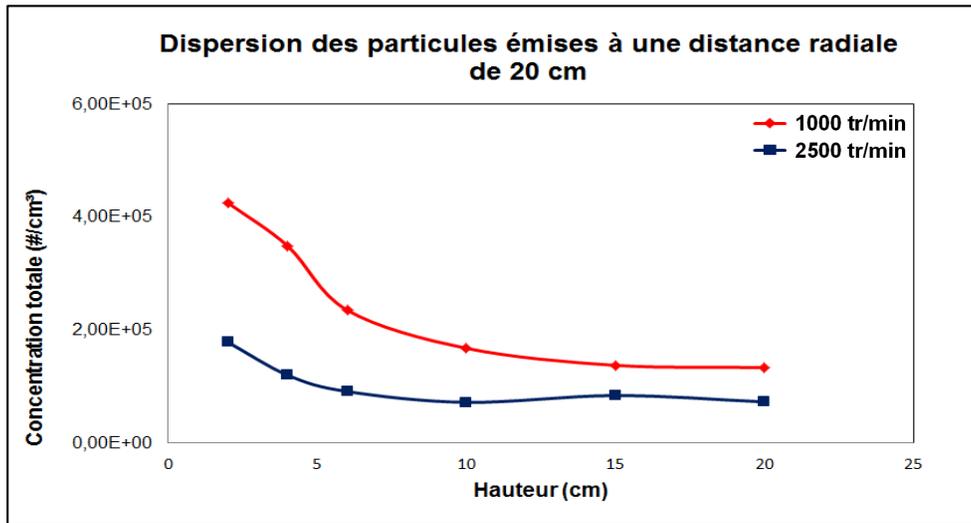


Figure 56. Dispersion des particules de NaCl dans la direction verticale à différentes vitesses de rotation.

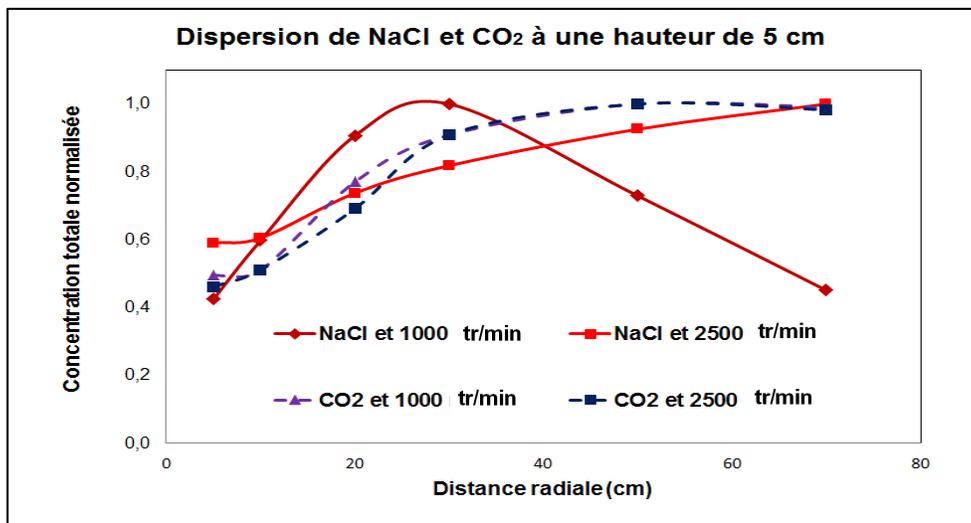


Figure 57. Comparaison de la dispersion du CO₂ et des particules de NaCl selon la direction horizontale, à différentes vitesses de rotation.

5.2.2 Réduction à la source

Dans cette sous-section, 3 concepts de réduction à la source ont été analysés lors de la simulation du polissage d'une surface plane horizontale : 1) soufflage-aspiration, 2) carter d'aspiration, 3) fentes d'aspiration intégrées au disque.

5.2.2.1 Soufflage-aspiration

L'efficacité du concept soufflage-aspiration a été évaluée en fonction du débit de soufflage laminaire, à 4 vitesses de rotation (1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min) et à 3 débits d'aspiration (2250, 1750 et 1250 l/min). Le débit de soufflage laminaire variait entre 0 et 100 l/min avec une incrémentation de 5 l/min. La Figure 58 donne la variation de l'efficacité du système soufflage-aspiration en fonction du débit de soufflage, à différentes vitesses de rotation du disque et à différents débits d'aspiration. Il est constaté qu'en absence de soufflage laminaire, le système d'aspiration n'a pas permis d'extraire les particules de NaCl prises par le sillage rotatif du disque. Le système de soufflage-aspiration était d'ailleurs inefficace à de faibles débits de soufflage, mais son efficacité a augmenté spontanément à partir d'un certain débit de soufflage laminaire, dépendamment de la vitesse de rotation et du débit d'aspiration.

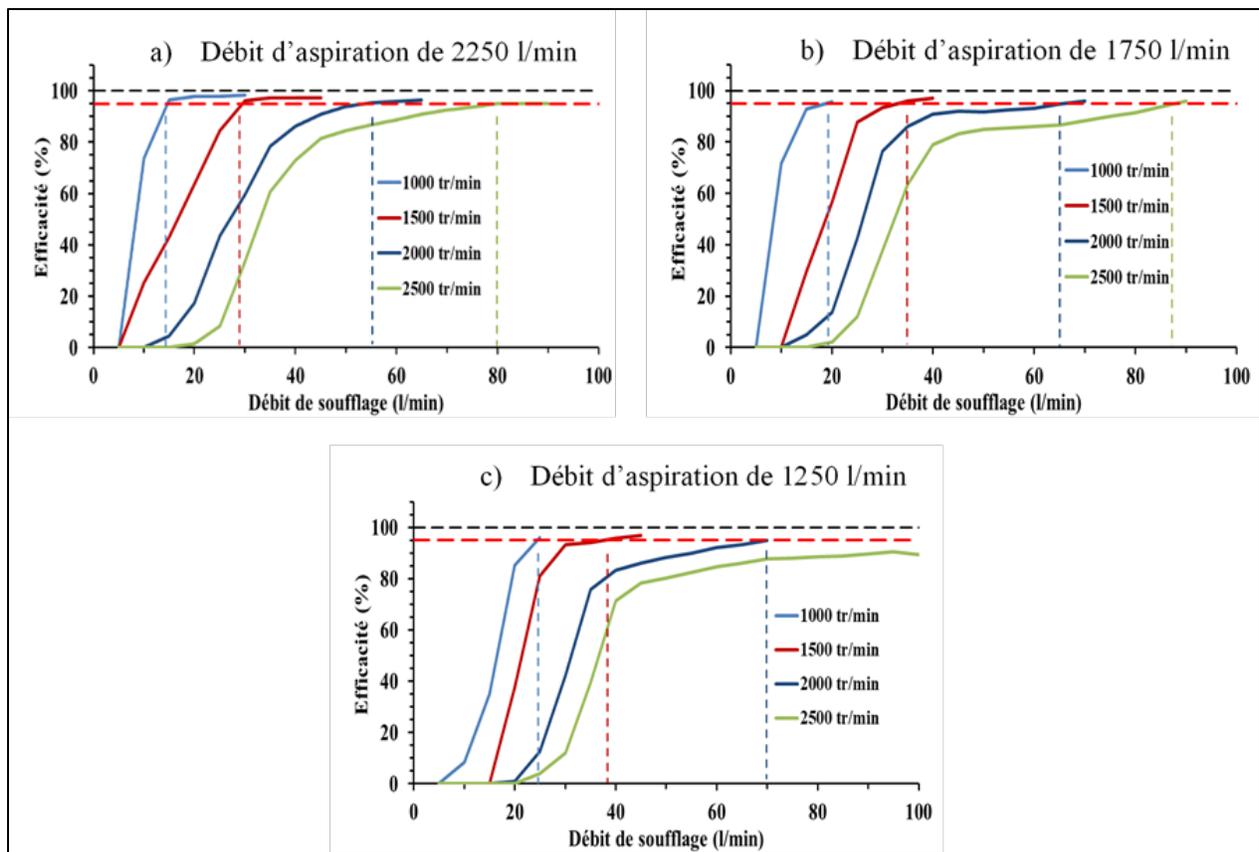


Figure 58. Efficacité du système soufflage-aspiration à différentes vitesses de rotation et à différents débits de soufflage et d'aspiration.

À partir de ces résultats, le débit de soufflage ayant une efficacité de 95 % ou plus a été noté pour chaque vitesse de rotation à différents débits d'aspiration. Ce débit de soufflage a ensuite été tracé en fonction de la vitesse de rotation à différents débits d'aspiration (Figure 59). Le débit de soufflage (D_s) a augmenté linéairement selon la vitesse de rotation (V_s), avec une pente constante de 0,05 l/min/tr/min. Ainsi, la relation entre le débit de soufflage ayant une efficacité de 95 % ou plus et la vitesse de rotation peut s'écrire :

$$D_s = 0,05 V_s - F(D_a) \tag{8}$$

où

D_a est le débit d'aspiration (l/min)

$F(D_a)$ est un terme représenté par une fonction du D_a

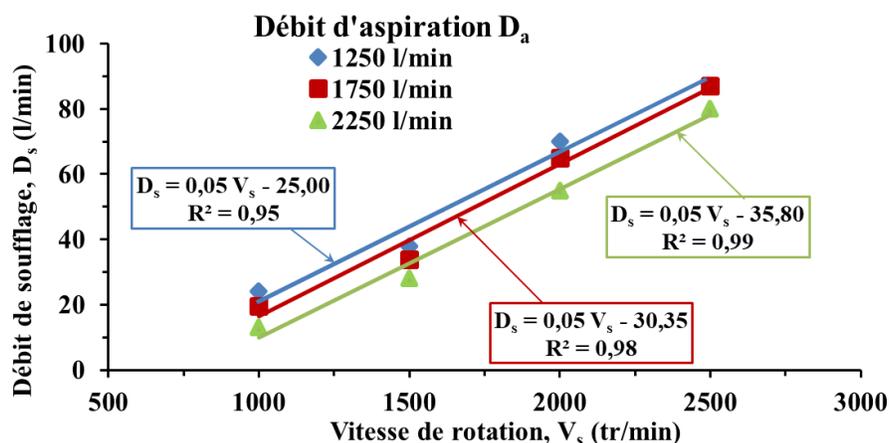


Figure 59. Débit de soufflage ayant une efficacité de 95 % en fonction de la vitesse de rotation, à différents débits d'aspiration.

Lorsque $F(D_a)$ est tracée en fonction du débit d'aspiration (Figure 60), il est constaté qu'elle augmente linéairement d'où la relation :

$$F(D_a) = 0,01 D_a + 11,5 \tag{9}$$

De (8) et (9), une relation entre le débit de soufflage ayant une efficacité de 95 % (D_s), la vitesse de rotation (V_s), et le débit d'aspiration (D_a), a été obtenue :

$$D_s + D_a/100 = 0,05 V_s - 11,5 \tag{10}$$

Pour une vitesse de rotation du disque et un débit d'aspiration connus, ce modèle (10) permet de calculer le débit de soufflage optimal pour obtenir une efficacité de 95 % en utilisant le concept de soufflage-aspiration. Ce modèle n'est toutefois valide que pour des débits d'aspiration supérieurs à 1250 l/min et pour des vitesses de rotation supérieures à 1000 tr/min, dans des conditions similaires à celles de la présente étude de simulation expérimentale. Les

vitesses de rotation du disque ont été choisies conformément à celles utilisées lors du procédé de polissage du granit. À de très faibles vitesses de rotation ou en absence de rotation du disque, des essais de simulation expérimentale ont d'ailleurs montré que l'aspiration seule est suffisante pour réduire les concentrations des particules de NaCl.

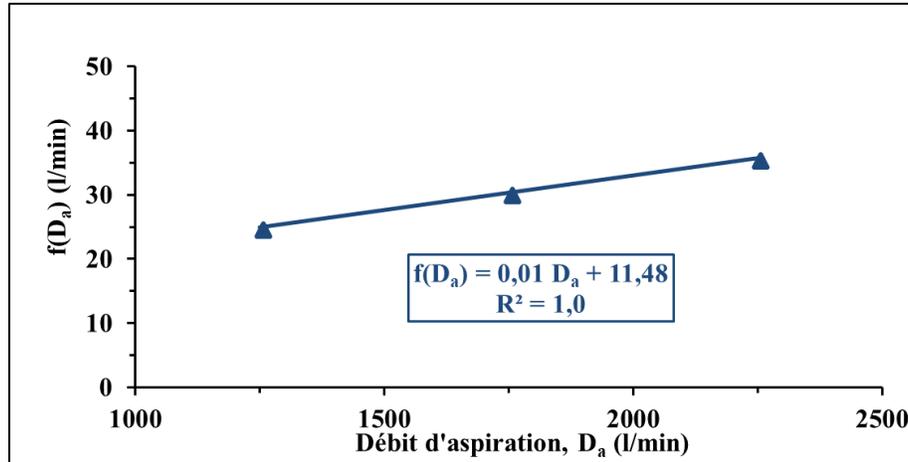


Figure 60. $F(D_a)$ est tracée en fonction du débit d'aspiration.

5.2.2.2 Carter d'aspiration

L'efficacité du concept de carter d'aspiration a été évaluée en fonction du débit d'aspiration variant entre 0 et 20 l/min avec une incrémentation de 5 l/min, à 4 vitesses de rotation (1000, 1500, 2000 et 2500 tr/min) (Figure 61). L'efficacité de ce concept a augmenté avec le débit d'aspiration. Elle a atteint le maximum d'efficacité à un débit d'aspiration de l'ordre de 15 l/min. L'efficacité à 95 % du carter d'aspiration a été atteinte à un débit d'aspiration constant, indépendamment de la vitesse de rotation du disque abrasif. Le concept d'aspiration utilisant le confinement du disque a permis d'intercepter efficacement les particules de NaCl avant qu'elles ne soient dispersées par l'écoulement de rotation induit par le disque.

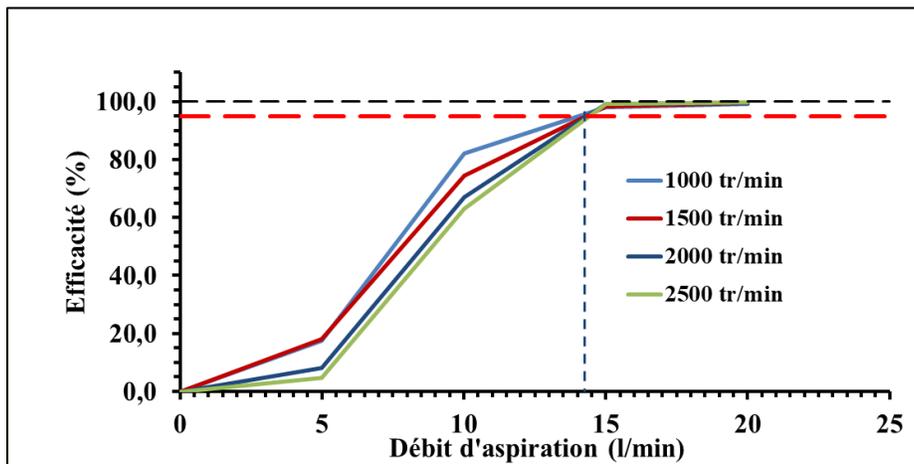


Figure 61. Efficacité du système de carter d'aspiration à différentes vitesses de rotation.

5.2.2.3 Fentes d'aspiration intégrées au disque

L'efficacité du concept de fentes d'aspiration intégrées au disque abrasif a été évaluée en utilisant les particules de NaCl, en fonction du débit d'aspiration pour différentes configurations de fentes, à une vitesse de rotation du disque de 1500 tr/min (Figure 62). Le débit d'aspiration variait entre 0 et 50 l/min avec une incrémentation de 5 l/min.

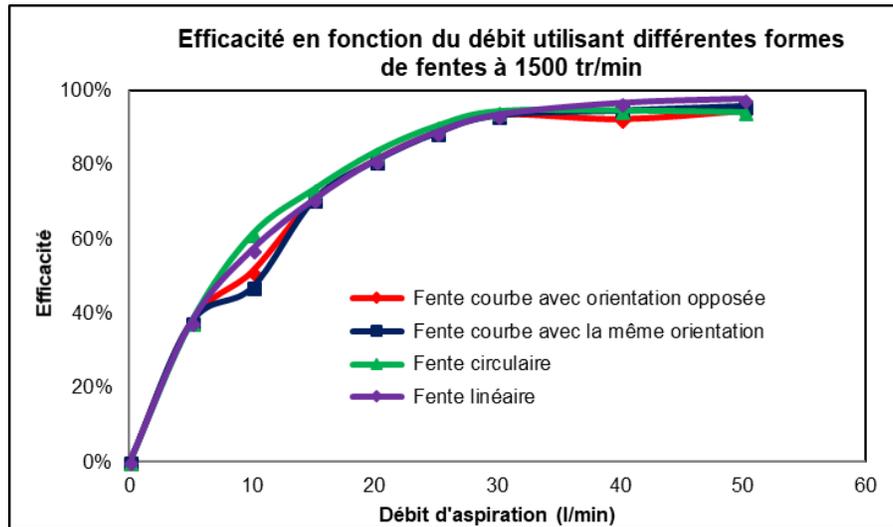


Figure 62. Comparaison de l'efficacité des systèmes de fentes d'aspiration intégrées au disque, en utilisant les particules de NaCl.

Lorsque la vitesse de rotation du disque a été augmentée à une valeur de 2500 tr/min, l'efficacité du système muni de fentes d'aspiration intégrées au disque, en fonction du débit d'aspiration, s'est avérée être moins grande (Figure 63).

Ce système de réduction à la source des poussières a aussi été évalué en utilisant le gaz traceur CO₂, à une vitesse de rotation de 1500 tr/min (Figure 64), pour la configuration de fentes circulaires. Les résultats montrent que l'utilisation du gaz traceur pour évaluer ce type de systèmes est satisfaisante. En effet, l'efficacité obtenue avec un gaz traceur (CO₂) n'était que légèrement inférieure à celle obtenue avec des particules traceuses (NaCl). Le gaz traceur présente donc un cas de pire scénario comparé aux comportements des particules. Le gaz traceur est difficilement extrait de l'écoulement de rotation du disque. Il donne alors un résultat conservateur et permet d'avoir une marge de manœuvre quant à l'évaluation des systèmes de réduction à la source.

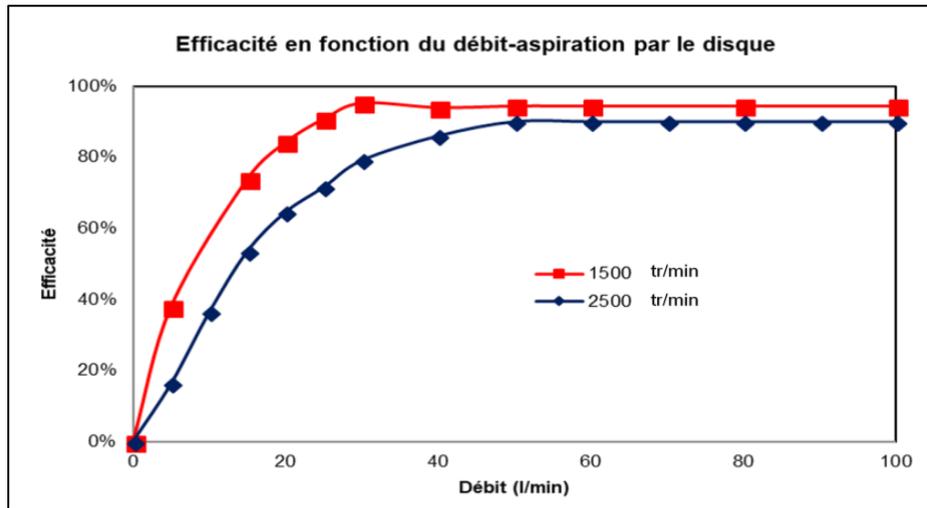


Figure 63. Efficacité du système de fentes d'aspiration intégrées au disque en fonction du débit d'aspiration, à différentes vitesses de rotation et en utilisant les particules de NaCl.

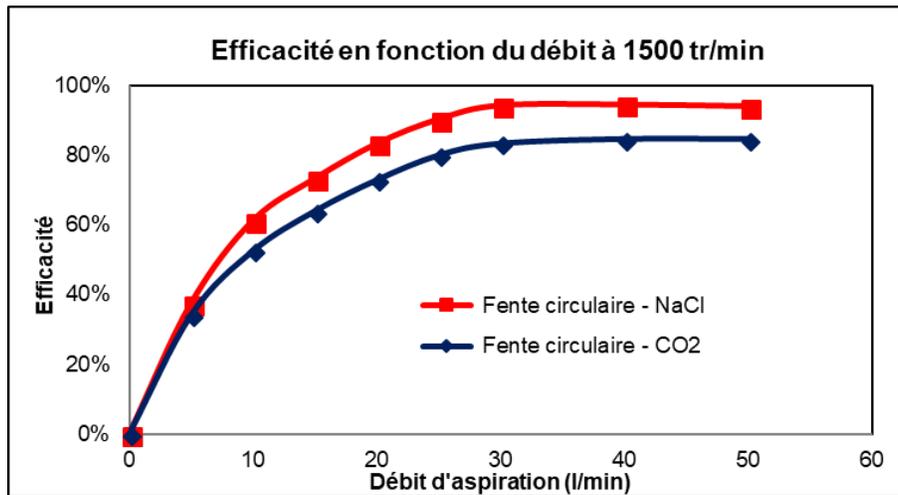


Figure 64. Comparaison de l'efficacité du système de fentes circulaires d'aspiration intégrées au disque utilisant le gaz de CO₂ ou les particules de NaCl.

5.3 Récapitulation

La simulation expérimentale a permis d'analyser la dispersion de particules ou d'un gaz traceurs autour d'un disque rotatif simulant le polissage sans translation. L'effet de la rotation et de la granulométrie des particules émises sur la répartition des émissions dans l'espace a été étudié. Il a été démontré que le gaz traceur simule adéquatement le comportement des particules soumises à de grands écoulements rotatifs. Trois concepts de réduction à la source ont été évalués : 1) le soufflage-aspiration, 2) le carter d'aspiration, 3) les fentes d'aspiration intégrées au disque. L'étude détaillée et paramétrique a montré que les trois concepts ont permis d'atteindre une efficacité de réduction de l'émission supérieure à 95 %. Un modèle de

calcul a été obtenu pour le concept soufflage-aspiration, permettant de déterminer le débit de soufflage laminaire (à faible débit de soufflage) optimal pour atteindre une efficacité de 95 %. Enfin, le gaz traceur a permis d'évaluer la performance d'un système de réduction à la source des émissions de poussières. Il a fourni des résultats comparables à ceux utilisant des particules. Les résultats de son utilisation sont toutefois conservateurs puisque l'efficacité mesurée en utilisant un gaz traceur est légèrement moins élevée que celle utilisant des particules comme marqueur.

6. SIMULATION NUMÉRIQUE

6.1 Méthodologie

6.1.1 Généralité

Ce troisième volet a permis d'étudier la dispersion d'un volume contrôlé de poussières de silice cristalline par la méthode de simulation numérique des écoulements et des transferts de la matière connue (CFD). Un modèle virtuel a été créé pour prédire le comportement de gaz ou de particules dans un écoulement d'air, proposant une alternative intéressante, souple et moins coûteuse que celle offerte par l'approche expérimentale. En effet, puisque la modélisation numérique est une expérimentation virtuelle, elle permet de réaliser un grand nombre d'essais et de reproduire des situations en changeant de manière interactive des paramètres, telles la vitesse de rotation du disque, la taille et la concentration des particules dispersées par le disque en présence d'un système de ventilation locale. Cette flexibilité conduit à une réduction substantielle des délais à l'étape de conception et des coûts d'analyse. Cependant, la modélisation numérique doit toujours être accompagnée d'une validation expérimentale en laboratoire ou sur le terrain, ou par des données tirées de la littérature. Cette validation est essentielle à la crédibilité des résultats numériques.

Pour effectuer les simulations, l'outil CFD commercial, ANSYS Fluent, a été choisi. Ce code permet la résolution des équations de Navier-Stokes qui gouvernent le mouvement des fluides. En plus des écoulements, le logiciel ANSYS Fluent a pu tenir compte des phénomènes de dispersion de contaminants dans un milieu ambiant, ainsi que des transferts de concentrations. Les calculs ont pu être réalisés pour des écoulements turbulents en utilisant l'un des modèles de turbulence proposés par le logiciel commercial : le modèle $k-\omega$ est celui qui a été choisi pour la présente étude. Le schéma de discrétisation était de type 'volumes finis'. Les régimes d'écoulement considérés étaient à faible vitesse (subsoniques). Ainsi, la méthode de résolution du type correction en pression a été employée. Les quantités calculées étaient les composantes de la vitesse, les fractions de chaque espèce chimique et la pression.

Dans une première étape, les calculs CFD ont permis d'identifier le (ou les) moyen(s) efficace(s) de contrôle d'exposition à la silice cristalline durant l'opération de polissage. Ce volet a essentiellement ciblé des particules de petite taille et leur comportement aérodynamique dans un gaz. Les résultats obtenus lors de la caractérisation des émissions lors du polissage à sec (volet 1) ont été utiles pour le choix du modèle numérique et des particules lors des simulations. Ces particules étaient entraînées dans l'écoulement induit par la rotation du disque, simulant ainsi une opération de polissage. Les données obtenues par simulations expérimentales avec particules ou gaz traceurs (chapitre 5) ont permis de valider le modèle CFD présenté dans ce chapitre.

6.1.2 Dispersion

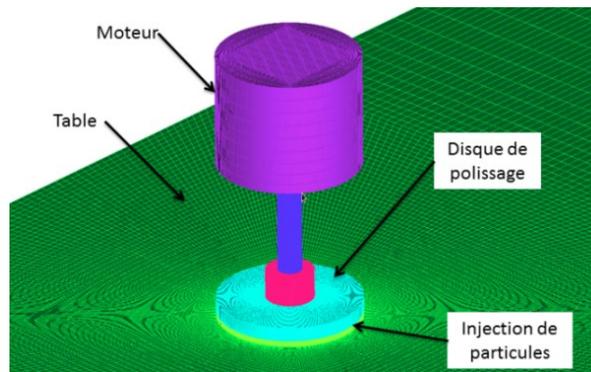
La dispersion des particules était considérée comme un écoulement diphasique dans lequel l'air et les particules ont été analysés séparément. L'air était considéré comme un milieu continu alors que pour les particules, deux approches étaient disponibles : l'approche eulérienne qui considère les particules comme un milieu continu avec une densité équivalente à la masse totale de particules distribuée uniformément dans l'espace qu'elles occupent; et l'approche

lagrangienne qui traitent les particules sur une base individuelle. Dans la présente étude, l'écoulement d'air a été résolu en utilisant les équations de Navier-Stokes. Le logiciel commercial ANSYS Fluent a été utilisé pour la modélisation des particules ainsi que pour la simulation de la dispersion d'un contaminant gazeux.

Une première validation des simulations numériques a été effectuée en reproduisant une configuration analysée dans la littérature (Belut *et al.* 2009). Cette configuration utilise un banc d'essai pour simuler une opération d'usinage; ce banc est composé d'un cylindre tournant de 130 mm de diamètre et d'une tige métallique par laquelle des microbilles sont injectées pour simuler les particules émises durant l'opération. Le dispositif est placé à l'intérieur d'une boîte transparente de 0,40 m x 0,404 m x 0,603 m. La formulation lagrangienne du logiciel a été utilisée et comparée aux données de simulations numérique et expérimentale des travaux de Belut (Belut 2006, Belut *et al.* 2009) en régime transitoire. La comparaison des résultats a été satisfaisante, ce qui a permis d'entreprendre l'étape suivante.

Ensuite, le banc d'essai de simulation expérimentale mis en place dans le laboratoire de l'IRSST a permis d'encadrer les simulations numériques de la dispersion des particules ou gaz traceurs dans la configuration de la présente étude. Tout d'abord, le modèle géométrique du banc d'essai a été simplifié pour faciliter le maillage et les simulations numériques. La table, le moteur électrique et le disque ont été les seuls éléments considérés (Figure 65).

Figure 65. Banc d'essai simplifié.



Des tests préliminaires ont montré que le modèle lagrangien était très exigeant sur le plan des ressources informatiques et du temps alors que le modèle eulérien du logiciel s'est montré très sensible aux paramètres numériques utilisés. La convergence de la simulation numérique avec les simulations expérimentales étant difficile à atteindre, l'utilisation du modèle « mixture » (logiciel ANSYS Fluent) a semblé satisfaire les besoins de la présente étude. La dispersion de particules ayant trois diamètres différents (50, 115 et 205 nm) a donc été analysée dans un domaine de calcul composé de 2,87 millions d'éléments du type hexaédrique.

Parallèlement, le modèle de dispersion des contaminants « Species Transport » du logiciel a été utilisé pour déterminer si le gaz traceur (CO₂) pouvait prédire le mécanisme de dispersion de particules.

Le domaine physique de calcul de la simulation numérique correspondait à la section close où se trouvait le banc d'essai du laboratoire de l'IRSST (Figure 66).

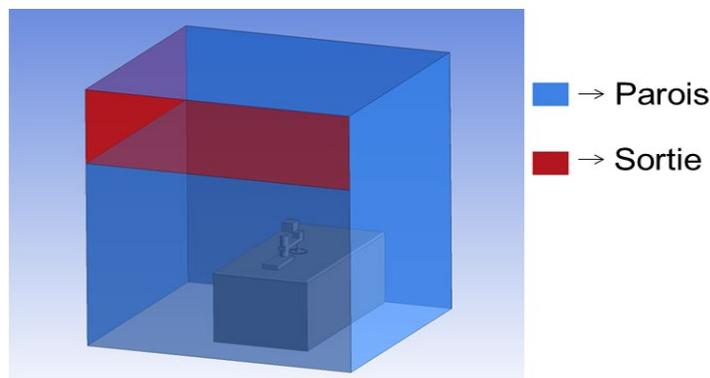


Figure 66. Domaine physique de calcul.

6.1.3 Réduction à la source

Deux des trois concepts de réduction à la source ayant été testés lors des simulations expérimentales ont été analysés numériquement : le soufflage-aspiration (voir Figure 51) et le carter d'aspiration (voir Figure 52).

6.2 Résultats

6.2.1 Dispersion des particules autour du procédé de polissage

La première validation a été réalisée en comparant la présente simulation numérique aux données obtenues par Belut et ses collègues (Belut *et al.*, 2009). La Figure 67 montre la comparaison des champs de vitesses obtenus par Belut et ses collègues (expérimental et numérique, avec les modèles de turbulence LES et $\kappa - \varepsilon$ Realizable) avec les champs de vitesse obtenus par la présente simulation numérique utilisant le modèle $\kappa - \varepsilon$ Realizable. Cette figure illustre les isocontours de vitesse de l'écoulement d'air à l'intérieur de la boîte lorsque le cylindre tournait à 500 tr/min. D'un point de vue qualitatif, on observe que les contours obtenus par la présente étude sont très similaires à ceux de Belut *et al.* (2009).

Ensuite, une comparaison des données des simulations numérique et expérimentale ont été effectuées en utilisant les résultats obtenus avec les particules de NaCl traceuses lors des simulations expérimentales, les résultats obtenus avec les particules de taille de $1 \mu\text{m}$ pour les simulations numériques et les résultats de dispersion de poussières émises par le procédé de polissage de granit noir à une vitesse de rotation de 2500 tr/min obtenus au volet 1. À des fins de comparaison, les concentrations des particules ont été normalisées par rapport à leur valeur maximale (Figure 68). Pour une distance $D > 20 \text{ cm}$, les résultats de la simulation numérique sont en adéquation avec les données expérimentales, démontrant que la répartition des particules est quasi uniforme dans la direction radiale.

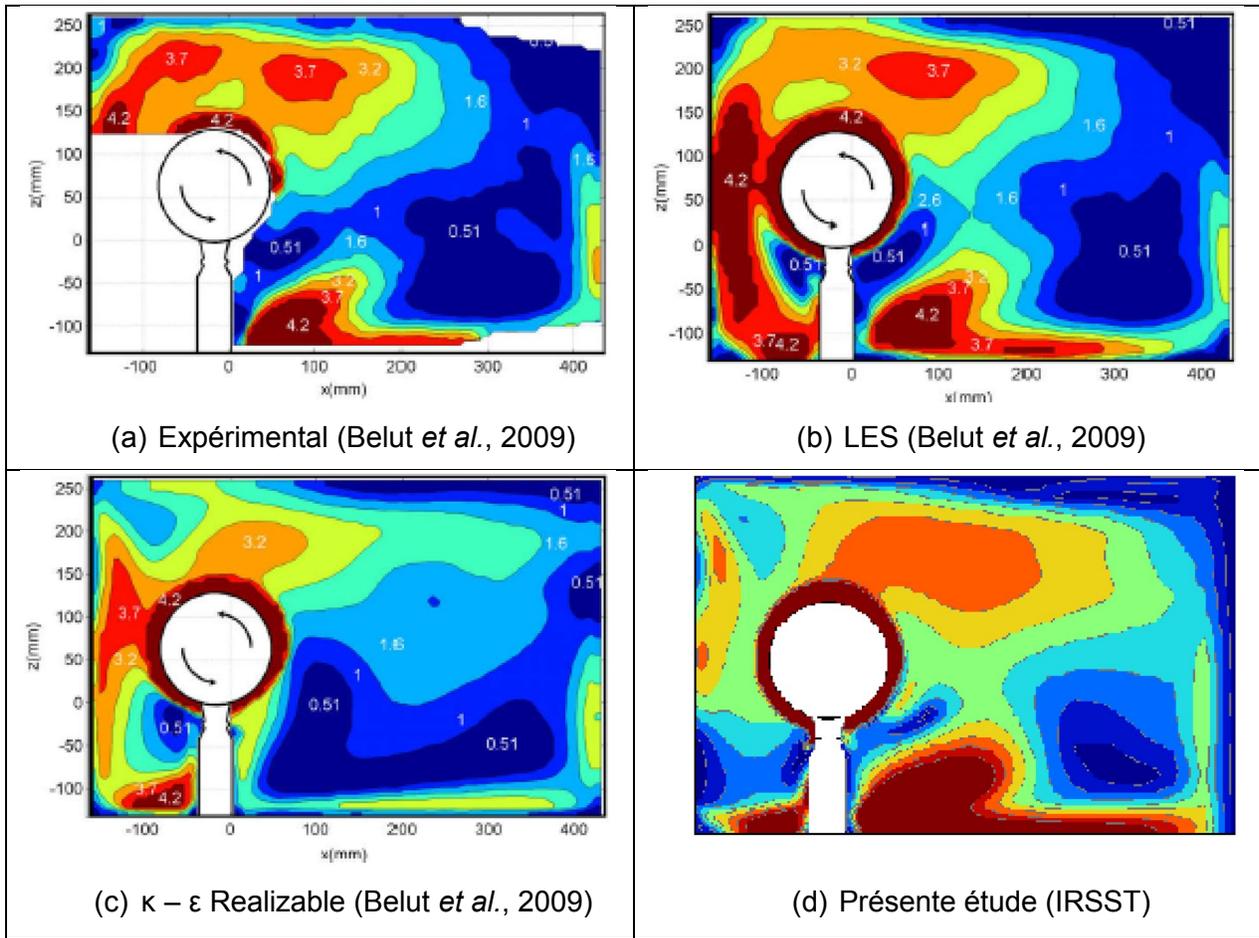


Figure 67. Iso-contours de vitesse (données expérimentales et numériques).

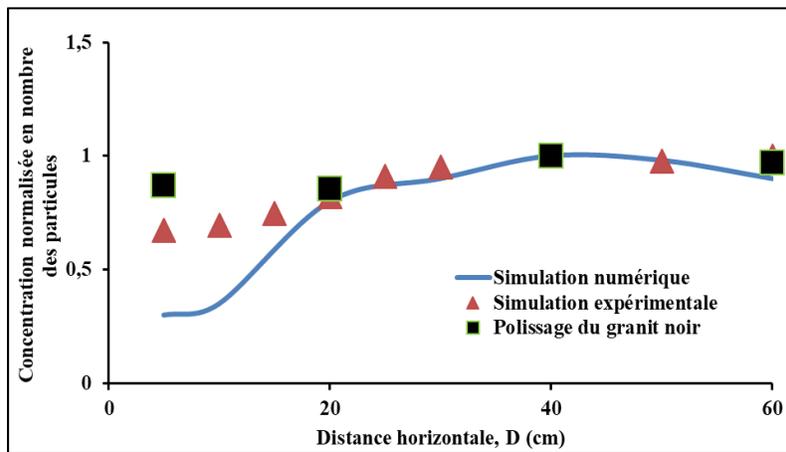


Figure 68. Comparaison des données numériques et expérimentales de dispersion des particules, à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.

Subséquentement, des comparaisons des données des simulations numérique et expérimentale ont été effectuées en utilisant le gaz traceur CO₂ pour les simulations expérimentale et numérique, et les données expérimentales de la dispersion des poussières émises par le procédé de polissage de granit noir à une vitesse de rotation de 2500 tr/min obtenues au volet 1. À des fins de comparaison, les concentrations des particules ont été normalisées par rapport à leur valeur maximale (Figure 69). Pour une distance D > 20 cm, les résultats des simulations numériques sont conformes aux données expérimentales. Ces données expérimentales et numériques démontrent que la répartition des particules est quasi uniforme dans la direction radiale.

La dispersion obtenue par simulation numérique du gaz traceur CO₂ a été comparée à celle des particules de 1 µm sous l'effet d'une rotation de disque de 2500 tr/min. La Figure 70 montre que le gaz traceur décrit correctement le comportement des particules. Le CO₂ a donc été utilisé dans la suite de la présente étude pour l'évaluation de différents concepts de réduction à la source des émissions de particules lors du polissage du granit.

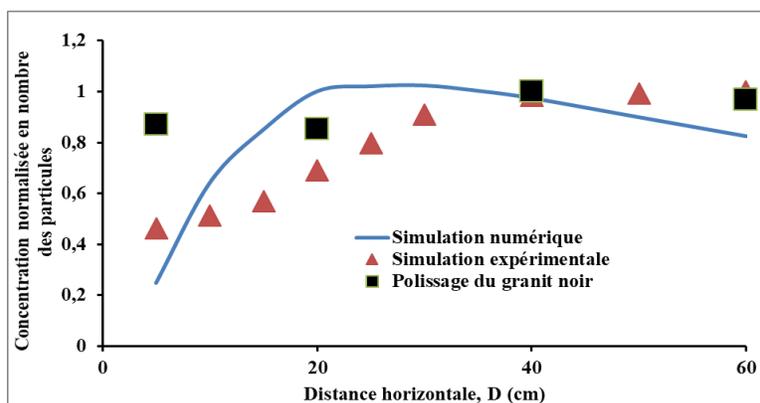


Figure 69. Comparaison des données numériques et expérimentales de dispersion du CO₂ et de la poussière, à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.

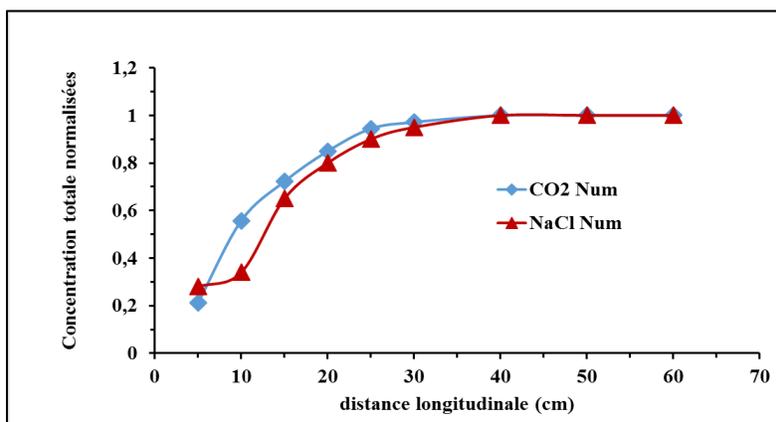


Figure 70. Comparaison des données numériques de dispersion du CO₂ et des particules, à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.

La Figure 71 présente des isocontours de concentration, obtenus par simulations numériques et expérimentales des particules et des gaz traceurs. Les données de simulations numériques et expérimentales montrent une répartition des concentrations quasi uniformes dans l'espace du gaz traceur (CO_2) et des particules à des distances supérieures à 20 cm du disque rotatif.

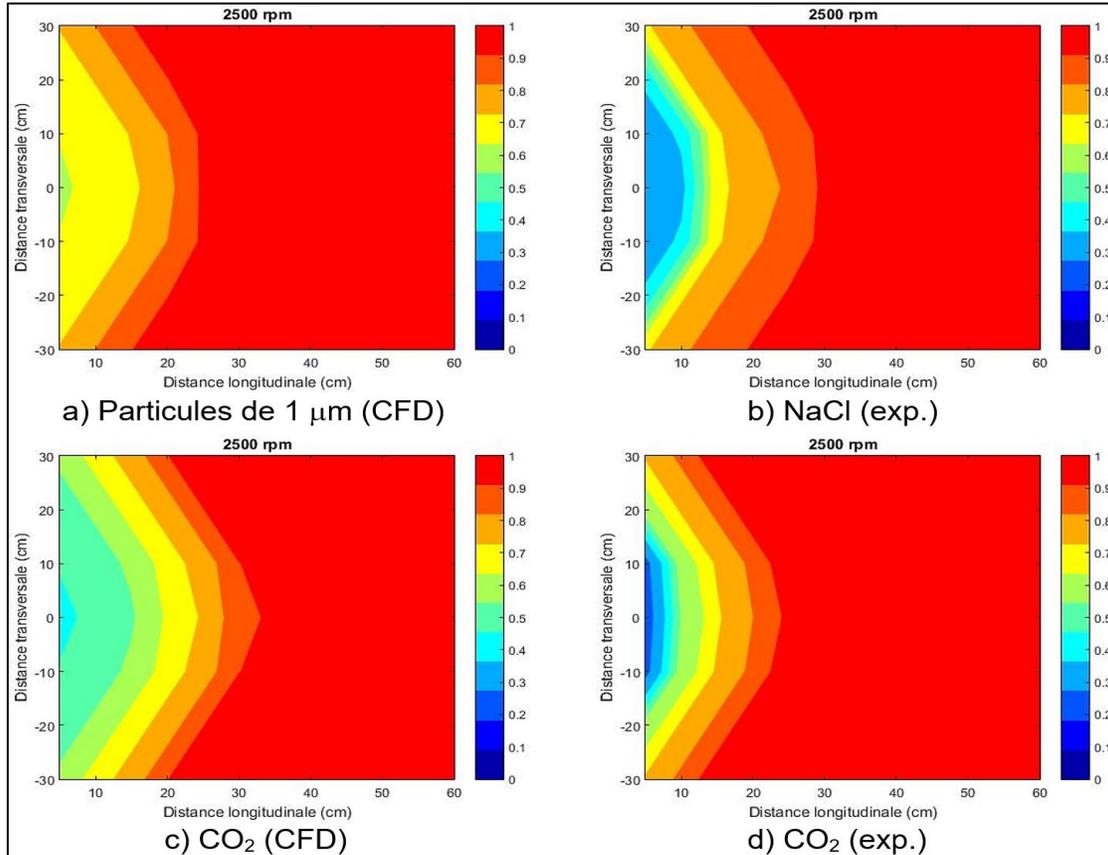


Figure 71. Isocontours de concentration à une vitesse de rotation de 2500 tr/min.

6.2.2 Réduction à la source

La simulation numérique des particules est complexe et très exigeante sur les plans financier et temporel. Les résultats des comparaisons entre les données numériques et les données expérimentales dans la sous-section précédente démontrent que le gaz traceur permet de simuler adéquatement le comportement des poussières fines et ultrafines de silice lors du procédé de polissage du granit. Le gaz traceur offre alors une solution moins coûteuse et utile pour l'étude paramétrique de l'efficacité des différents concepts de réduction à la source des émissions de poussières.

6.2.2.1 Soufflage-aspiration

Pour évaluer le concept de soufflage-aspiration, la validation des calculs de simulation numérique (à l'aide d'un gaz traceur) a été effectuée en ayant recours à des données de simulations expérimentales utilisant des particules de NaCl pour reproduire la poussière émise lors du polissage du granit. La Figure 72 présente les résultats de comparaison entre les données de simulations expérimentales et numériques à différentes vitesses de rotation du disque. La figure présente la variation de l'efficacité en fonction du débit de soufflage pour un débit d'aspiration de 2250 l/min. Les résultats obtenus par simulations expérimentales et numériques sont en adéquation. En l'absence de soufflage, la fente d'aspiration n'a pas permis, à elle seule, d'intercepter les contaminants piégés dans l'écoulement de rotation du disque. À faible débit de soufflage, ce concept de réduction à la source n'a pas suffisamment permis de diminuer les concentrations du contaminant. Le système soufflage-aspiration est devenu rapidement plus efficace à un débit de soufflage qui dépendait de la vitesse de rotation. Ce débit de soufflage a augmenté avec la vitesse de rotation.

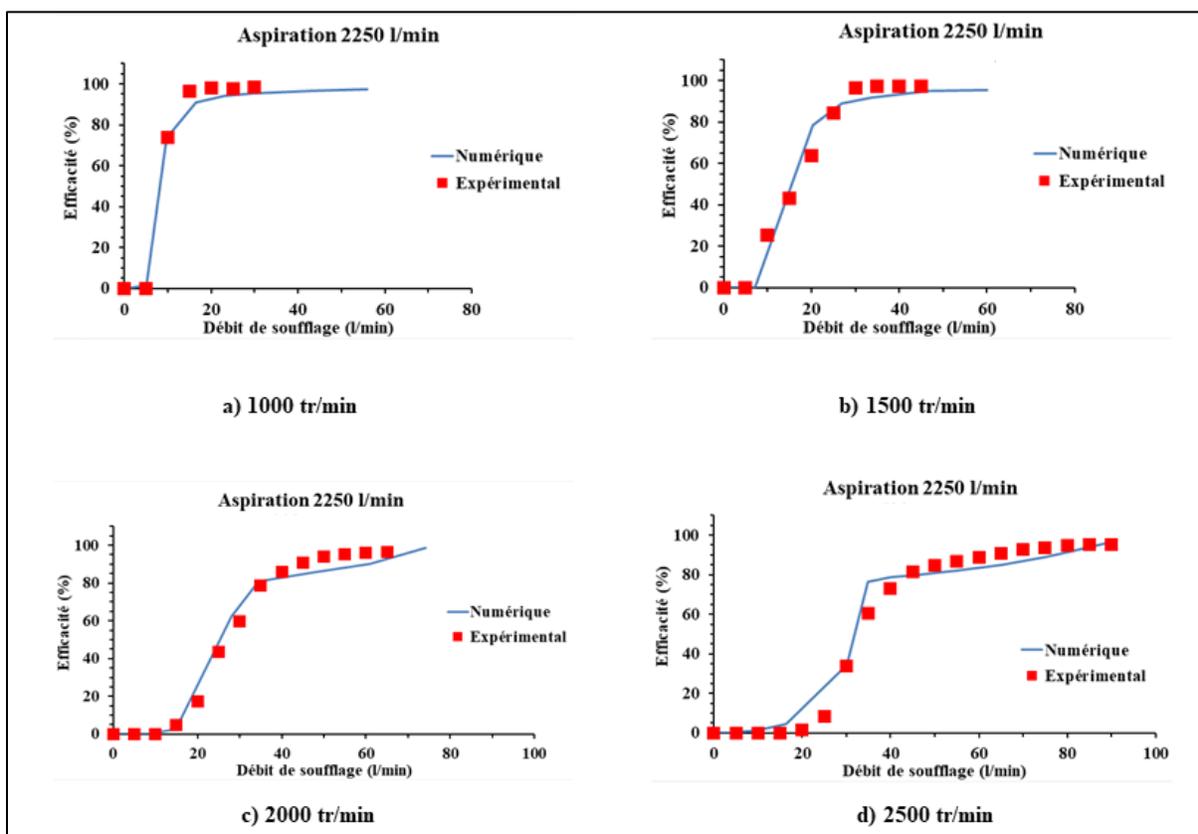


Figure 72. Efficacité du soufflage-aspiration en fonction du débit de soufflage pour différentes vitesses de rotation du disque.

La Figure 73 présente les isocontours de concentration à un débit d'aspiration de 2250 l/min, pour deux vitesses de rotation et à des différents débits de soufflage. À faible débit de soufflage, le champ de concentration du CO_2 était porté par l'écoulement de rotation. Au fur et à mesure que le débit de soufflage a augmenté, le contaminant a été redirigé vers la fente d'aspiration pour être capturé par celle-ci.

La Figure 74 présente l'efficacité du soufflage-aspiration en fonction du débit de soufflage à différentes vitesses de rotation et à un débit d'aspiration de 2250 l/min. Tiré de ces figures, le débit de soufflage associé à une efficacité de 95 % de réduction à la source du contaminant est par la suite présenté en fonction de la vitesse de rotation (Figure 75) et comparé aux données des simulations expérimentales. Les courbes de tendance du débit de soufflage à 95 % d'efficacité en fonction de la vitesse de rotation du disque obtenues par simulations numérique et expérimentale se sont avérées équivalentes.

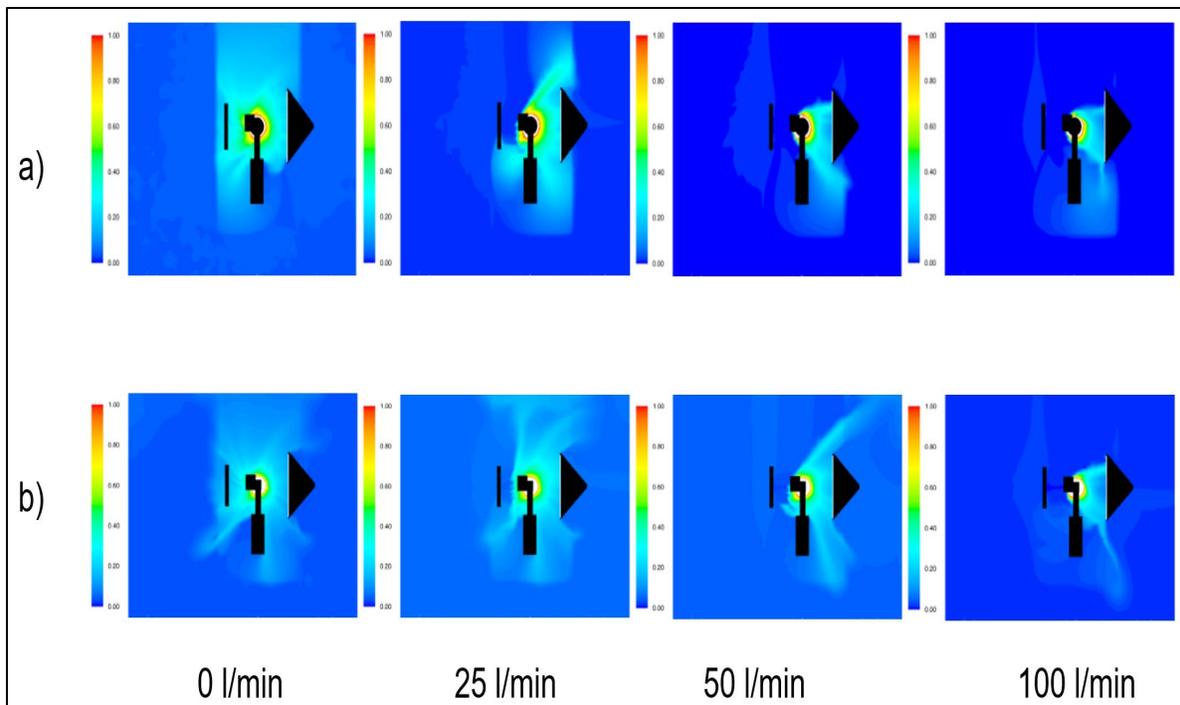


Figure 73. Isocontours de concentration à différents débits de soufflage, avec une vitesse de rotation de a) 1000 tr/min et b) 2500 tr/min.

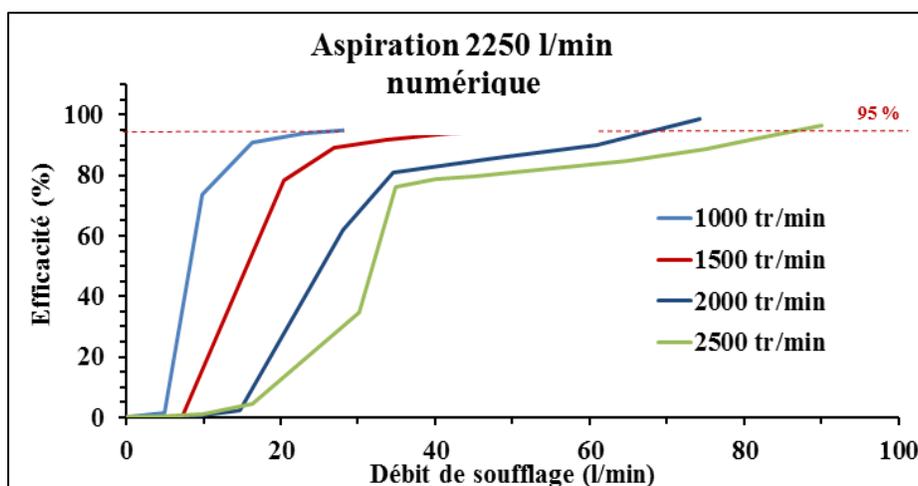


Figure 74. Efficacité du soufflage-aspiration obtenue par simulations numériques.

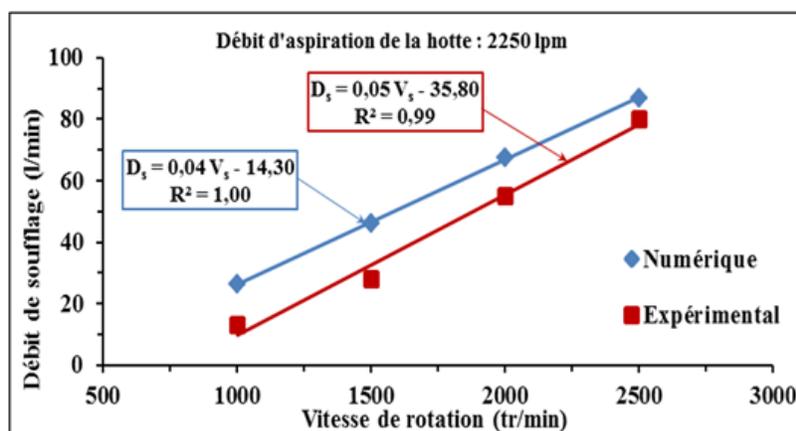


Figure 75. Débit de soufflage à 95 % d'efficacité pour les simulations numérique et expérimentale.

6.2.2.2 Carter d'aspiration

La validation des calculs de simulation numérique utilisant un gaz traceur pour évaluer le concept de carter d'aspiration a été effectuée en ayant recours aux données de simulations expérimentales en présence de particules de NaCl. La Figure 76 expose les résultats de comparaison entre les données de simulations expérimentales et numériques à différentes vitesses de rotation, en illustrant la variation de l'efficacité en fonction du débit d'aspiration. Les résultats obtenus par simulations expérimentales et numériques sont en adéquation. Ainsi, l'efficacité du carter d'aspiration augmentait rapidement avec le débit d'aspiration pour ensuite atteindre un pic. Bien que l'efficacité dépendait légèrement de la vitesse de rotation, le comportement général est demeuré fondamentalement le même.

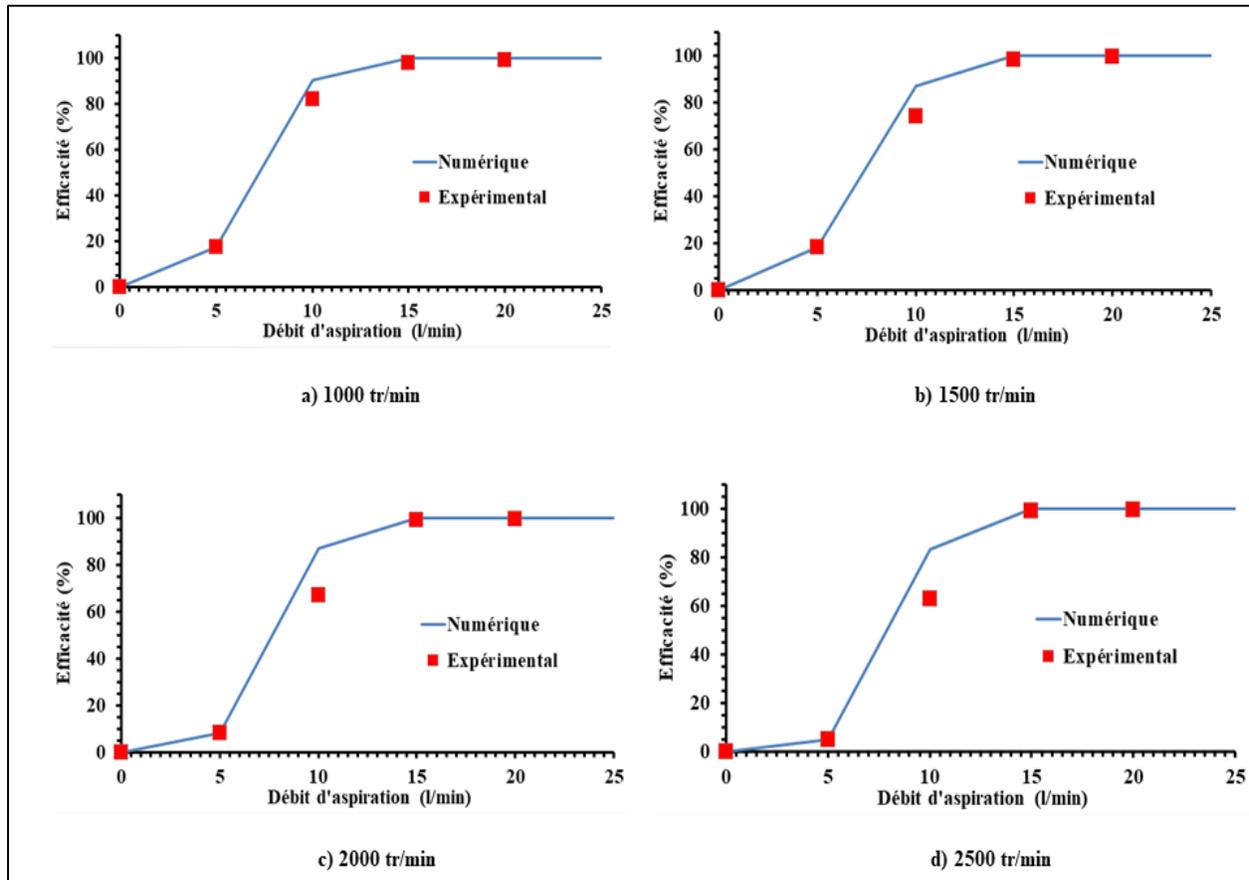


Figure 76. Efficacité du carter d'aspiration en fonction du débit d'aspiration pour différentes vitesses de rotation du disque.

La Figure 77 présente les isocontours de concentration de gaz traceur à différentes vitesses de rotation du disque, pour différents débits d'aspiration. À de très faibles débits d'aspiration, le contaminant s'échappait de la zone d'aspiration et le champ de concentration du CO_2 était alors emporté par l'écoulement rotatif. Cependant, dès que le débit d'aspiration augmentait légèrement, le contaminant était aspiré par le carter d'aspiration au point d'émission avant qu'il soit emporté par l'écoulement induit par la rotation du disque.

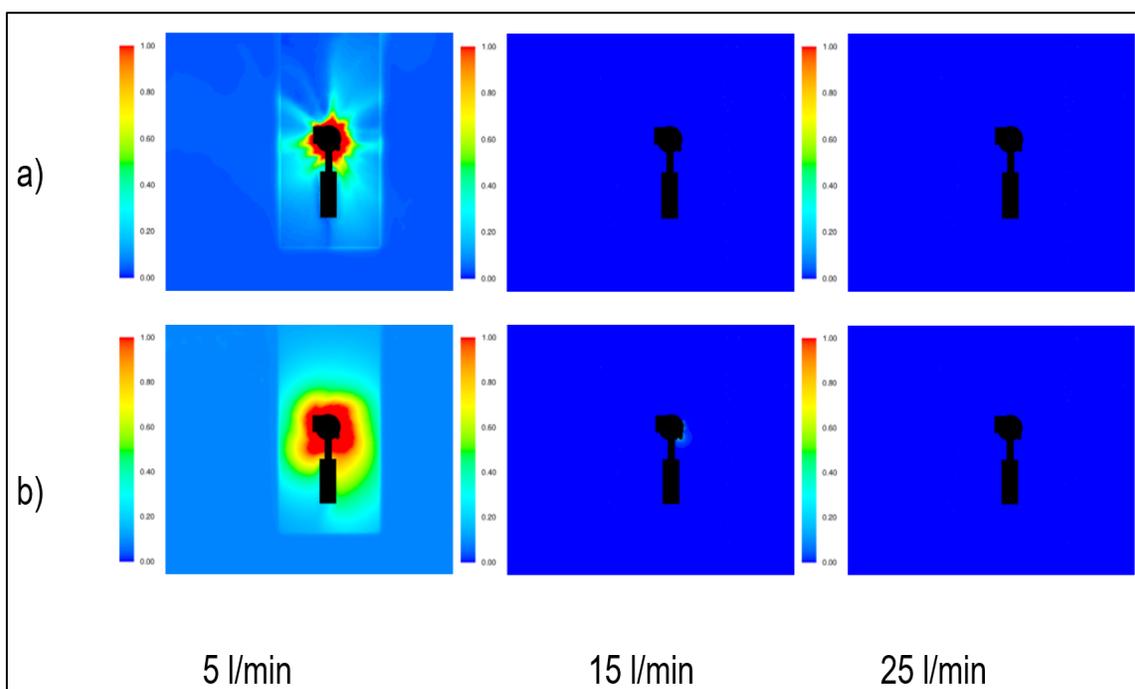


Figure 77. Isocontours de concentration de gaz traceur à différents débits d'aspiration, pour une vitesse de rotation du disque de a) 1000 tr/min et b) 2500 tr/min.

La Figure 78 illustre l'efficacité du carter d'aspiration en fonction du débit d'aspiration, pour différentes vitesses de rotation. Ces courbes montrent que l'efficacité de ce concept d'aspiration est quasi indépendante de la vitesse de rotation du disque.

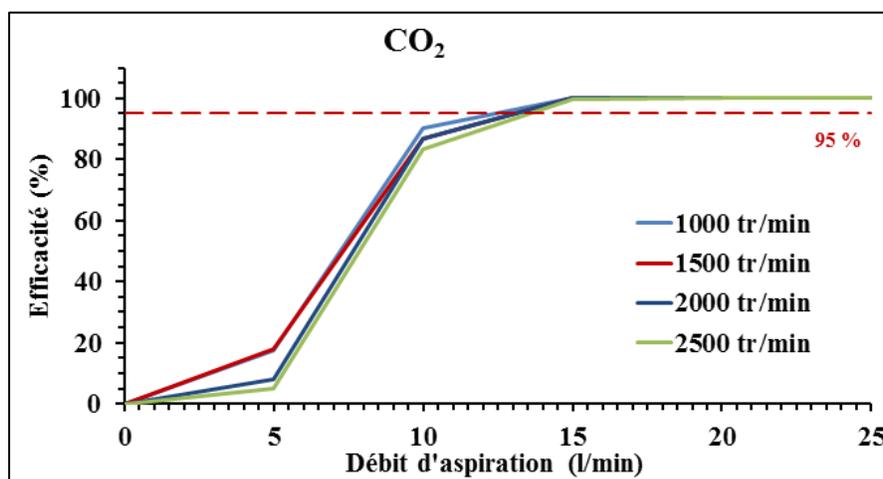


Figure 78. Efficacité du carter d'aspiration en fonction du débit d'aspiration, à différentes vitesses de rotation du disque.

6.3 Récapitulation

La simulation numérique a d'abord été validée par des données recensées dans la littérature. Une comparaison a ensuite été menée entre les simulations numériques et expérimentales pour l'analyse du comportement de particules et du gaz traceur soumis à un sillage rotatif. Les résultats des simulations numérique et expérimentale ont montré que les données numériques et expérimentales sont semblables.

Les simulations numériques et expérimentales ont permis par la suite d'analyser la dispersion des particules et des gaz traceurs autour d'un disque rotatif. Qu'il soit éloigné ou rapproché, l'espace entourant le disque a été contaminé de la même façon. La taille des particules n'a pas eu d'effets sur leur dispersion autour du disque en rotation. Le gaz traceur a simulé adéquatement le comportement des particules soumises à de grands écoulements rotatifs.

Deux concepts de réduction à la source ont été évalués : 1) le soufflage-aspiration, 2) le carter d'aspiration. Pour les 2 concepts, les simulations numériques ont donné des résultats comparables aux données expérimentales obtenues avec le banc de simulation expérimentale du laboratoire de l'IRSST (chapitre 5).

7. DISCUSSION

La présente étude a permis d'analyser en laboratoire les deux premiers éléments hiérarchiques de mesures de prévention pour contrôler le risque d'exposition à la poussière, en particulier à celle de la silice cristalline, lors des procédés de transformation du granit : le contrôle du danger d'exposition par élimination (utilisation de matériaux ne contenant pas de silice cristalline) ou par réduction à la source (modification des paramètres du procédé industriel et/ou utilisation d'un système de ventilation efficace). Le procédé de polissage du granit a été choisi puisqu'il présente le risque d'exposition à un type de poussières le plus difficile à contrôler. En effet, lors du polissage, la poussière est projetée dans toutes les directions à de grandes vitesses dans un sillage rotatif de forte intensité. Dans un tel contexte, il est difficile de mettre en place des mesures de contrôle de l'exposition à la poussière.

Le procédé de polissage de deux granits à faible et à moyen taux de silice cristalline a été évalué par rapport à l'exposition à la poussière et au fini de surface. Afin de promouvoir l'élimination à la source des dangers d'exposition, un granit qui contient peu ou pas de quartz a été retenu. Dans cette même optique, l'abrasif utilisé était fait de grains de diamant, un matériel ne contenant pas de quartz. Ce matériel abrasif ne générant pas de particules de quartz, il n'a pas contaminé les échantillons de poussières de silice cristalline lors des essais expérimentaux.

Ensuite, différentes mesures d'ingénierie de prévention visant à réduire l'exposition ont été évaluées en laboratoire : 1) des modifications aux équipements et aux paramètres intrinsèques du procédé de polissage à sec ou humide comme l'abrasif, la vitesse de rotation, la vitesse d'avance, 2) l'utilisation de différents concepts de ventilation. L'analyse détaillée de ces mesures a découlé des simulations numériques et expérimentales qui ont fait appel aux techniques de particules et de gaz traceurs. L'évaluation des mesures d'ingénierie a permis de développer des connaissances qui devront être validées sur le terrain, dans le secteur de la transformation du granit.

7.1 Polissage du granit

Le polissage à sec ou humide de deux granits, blanc et noir, a été évalué à la fois sur les plans de l'exposition à la poussière et de la qualité du fini de surface.

7.1.1 Matériau granit

La taille des grains, la dureté des éléments et la minéralogie des granits noir et blanc ont une influence sur l'état de fini de surface et sur la quantité de poussières émises lors de leur transformation. En effet, le fini de surface est meilleur pour le granit noir que pour celui du granit blanc; le fini de surface du granit noir est aussi plus brillant. Le polissage du granit noir émet plus de poussières que celui du granit blanc. Cependant, la poussière émise par le granit noir ne présente pas de risque d'exposition à la silice cristalline puisqu'elle ne contient pas de quartz à l'état naturel. Le granit noir possède alors 2 avantages indéniables par rapport au granit blanc : 1) il présente un bon fini de surface dont la brillance est éclatante; 2) il n'expose pas les travailleurs à la poussière de silice cristalline. Il est donc important de favoriser le granit issu de la roche contenant peu ou pas de quartz pour un meilleur produit transformé et pour prévenir l'exposition à la silice cristalline. L'élimination à la source du risque devrait être la mesure privilégiée en optant pour des matériaux sans silice cristalline ou à de très faibles teneurs en

quartz. Cette approche pourrait permettre de prévenir efficacement de graves maladies professionnelles tout en obtenant un produit final de bonne qualité.

7.1.2 Procédé de polissage

Les émissions de PF et de PUF ont été étudiées simultanément pour deux phases d'abrasion afin de couvrir différentes étapes du procédé de transformation du granit, soit l'ébauche et la finition du produit granit. L'objectif était de rechercher les paramètres optimaux du procédé de polissage pour, à la fois, réduire l'émission des PF et des PUF, et maintenir un état de finition du produit en granit intéressant pour l'industriel.

Tout d'abord, les émissions et la dispersion des PF et des PUF ont été analysées pour un polissage stationnaire du matériau granit. Une vitesse d'avance nulle a permis d'isoler l'effet de la rotation sur l'émission et la dispersion de la poussière émise par les granits blanc et noir. La concentration totale en nombre et en masse des PF à l'ébauche et à la finition a augmenté avec la vitesse de rotation du disque.

Lors du polissage, la phase d'ébauche a généré plus de PF que celle de finition, et ce, pour les deux granits. À l'opposé, la phase de finition a généré plus de PUF que celle d'ébauche. En général, la concentration en nombre des PUF était plus importante que celle des PF, le nombre total des PF et des PUF était donc déterminé par celui des PUF. Le nombre total des PF et des PUF était plus important lors de la phase de finition que lors de la phase d'ébauche. À l'opposé, la masse totale des PF et des PUF était moins importante lors de la phase de finition que lors de celle d'ébauche. Cela s'explique par le fait que la quantité de PF était moins importante en phase de finition qu'en phase d'ébauche. La masse totale des PF et des PUF était déterminée par celle des PF. Par conséquent, la pesée des poussières respirables captées ne permet pas d'évaluer l'ampleur de l'exposition des travailleurs à la poussière totale en nombre; elle pourrait même surestimer l'ampleur de l'exposition aux PUF.

La vitesse de rotation du disque abrasif a généralement augmenté la concentration totale en nombre et en masse des PF et des PUF lors des phases d'ébauche et de finition. Or, les simulations expérimentale et numérique examinant l'effet de la rotation stationnaire du disque ont montré un effet contraire de la vitesse de rotation sur la concentration des particules d'un gaz traceur. En effet, la vitesse de rotation du disque a plutôt dilué la poussière dans l'espace autour de ce dernier. Puisque le taux de génération des particules et de gaz traceurs était maintenu constant, la concentration totale des particules et des gaz traceurs a diminué en fonction de la vitesse de rotation. Pour le polissage stationnaire des granits blanc et noir, l'augmentation de la concentration totale des PF s'explique alors par une augmentation de taux d'arrachement de la matière du matériau granitique avec la vitesse de rotation du disque abrasif. Ce taux était d'autant plus important lorsque la dureté du matériau granitique diminuait. L'arrachement de la matière du matériau granitique lors du polissage augmentait aussi avec l'étalement granulométrique des grains du granit. Le granit noir a alors émis plus de PF et de PUF que le granit blanc, car il présentait un étalement des grains minéraux plus important et une dureté moins grande. Par contre, son fini de surface était plus éclatant et brillant et les poussières émises lors de son polissage ne contenaient pas de silice cristalline. La vitesse de rotation a légèrement amélioré le fini de surface des granits. Cependant, des trous ont été observés sur le granit blanc à de grandes vitesses de rotation. Le granit noir a présenté beaucoup moins d'anomalies semblables même si la vitesse de rotation était élevée.

La répartition de la poussière émise par le polissage des granits blanc et noir était quasi uniforme dans l'espace autour du procédé de polissage stationnaire. Les zones rapprochée et éloignée étaient contaminées presque de la même façon par le polissage stationnaire du granit. En outre, la dispersion des PF et des PUF ne dépendait pas de leur taille. Les simulations expérimentale et numérique ont confirmé ces observations. Les résultats des simulations expérimentale et numérique ont fortement été comparables à la fois pour le gaz traceur et pour les particules de NaCl. La technique des gaz traceurs a adéquatement simulé le comportement des particules de NaCl soumises à de grandes vitesses de rotation : cas de pire scénario. Le gaz traceur peut donc être utilisé comme outil fiable pour évaluer la répartition des PF et des PUF lors de la transformation du granit.

L'effet d'une augmentation de la vitesse de rotation sur l'émission et la dispersion des PF et des PUF des granits blanc et noir observé lors du polissage stationnaire a été confirmé lors du procédé de polissage réel des 2 granits soumis à une vitesse d'avance. Contrairement à la vitesse de rotation, l'augmentation de la vitesse d'avance n'a pas amplifié l'émission des PF et des PUF lors des phases d'ébauche et de finition des granits blanc et noir. L'effet a plutôt été de réduire légèrement les concentrations des PF et des PUF, en diluant modérément la poussière dans l'espace de travail. Contrairement à la vitesse de rotation, la vitesse d'avance n'a pas eu d'effet sur l'arrachement de la matière graniteuse lors du polissage réel des granits blanc et noir.

Une analyse statistique des données expérimentales obtenues au banc d'essai muni d'une machine-outil à l'ÉTS a permis d'évaluer l'effet de chacun des paramètres de polissage, vitesses de rotation et d'avance, et de leur interaction avec l'émission et la dispersion des PF et des PUF lors des phases d'ébauche et de finition du polissage des granits blanc et noir. Les essais ont été répétés 3 fois avec 3 répétitions au centre du plan des points de mesure. Un point arbitraire a été déterminé pour valider le modèle statistique. Pour chaque configuration, le modèle statistique a relié les paramètres d'entrée, que sont la vitesse de rotation (V_s) et la vitesse d'avance (f), aux paramètres de sortie : le logarithme népérien de la concentration en nombre des PF ($\ln CPF$), le logarithme népérien de la concentration en nombre des PUF ($\ln CPUF$), la rugosité (R_a) et la brillance (B_r). Le modèle choisi est un modèle quadratique avec des interactions doubles; il est décrit par l'équation 5 (sous-section 4.1.6).

Le Tableau 8 montre les coefficients du modèle statistique (équation 5) de l'étude des émissions des PF. Les paramètres sous formes linéaire, quadratique et en interaction ont été analysés. Les paramètres étudiés ayant une influence au regard de la concentration des PF étaient la vitesse de rotation (V_s), avec une influence positive, et la vitesse d'avance (f), avec une influence négative, pour les deux phases de polissage et pour les deux granits. Le modèle statistique a un bon coefficient de détermination (R^2) situé entre 86 et 97 %, avec un manque d'ajustement (entre les valeurs réelles et les valeurs données par le modèle statistique) non significatif ($p > 0,05$). Par conséquent, le modèle choisi représente bien le phénomène d'émission des PF observé dans les conditions actuelles de l'étude. Une comparaison des moyennes des PF émises montre que ces émissions étaient plus importantes lors de la phase d'ébauche que lors de la phase de finition (ligne 1 du tableau 8). L'effet de l'interaction entre les vitesses de rotation et d'avance et l'effet quadratique de ces deux paramètres étaient marginaux.

Tableau 8. Coefficients du modèle statistique d'émission des PF pour les deux phases du procédé de polissage et les deux types de granit (R^2 entre 86 et 97 %). Les valeurs marquées en rouge indiquent les paramètres pour lesquels l'influence est significative ($p < 0,05$).

Paramètre	Ébauche		Finition	
	Granit blanc	Granit noir	Granit blanc	Granit noir
Moyenne	9,7888	9,4453	7,9454	7,7283
V_s	0,1660	0,6148	1,0845	0,5833
V_s^2	-0,0294	-0,1391	0,1649	0,1327
f	-0,2941	-1,0055	-0,4998	-0,5711
f^2	0,0058	-0,1573	-0,1325	0,1399
$V_s f$	0,0037	0,5687	-0,0909	0,3910

Le Tableau 9 indique les paramètres optimaux de polissage, calculés par le logiciel statistique, permettant de minimiser les émissions de PF. Ces paramètres ont été obtenus avec une désirabilité allant de 94 à 100 %. Selon cette analyse, assurer une vitesse de rotation de 1000 tr/min et une vitesse d'avance de 25,5 mm/s permettrait de minimiser les émissions des PF lors des phases d'ébauche et de finition de polissage des granits blanc et noir.

Tableau 9. Optimisation des paramètres de polissage pour réduire l'émission des PF lors du polissage régulier, pour une désirabilité entre 94 et 100 %

Phase de polissage	Paramètre de polissage	
	V_s (tr/min)	f (mm/s)
Ébauche du granit blanc	1000	25,5
Ébauche du granit noir	1000	25,5
Finition du granit blanc	1000	25,5
Finition du granit noir	1000	25,5

Le Tableau 10 montre les coefficients du modèle statistique pour l'étude de l'émission des PUF. Les paramètres les plus influents sur la concentration des PUF étaient la vitesse de rotation, avec une influence positive, et la vitesse d'avance, avec une influence négative pour les deux phases de polissage des deux granits. Le coefficient de détermination du modèle statistique est bon et se situe entre 87 et 98 %, avec un manque d'ajustement non significatif. Le modèle choisi représente alors bien le phénomène d'émission des PUF dans les conditions actuelles de l'étude. Une comparaison des moyennes des PUF émises montre que ces émissions étaient légèrement moins importantes lors de l'ébauche que celles émises lors de la finition pour les granits blanc et noir. Les effets quadratique et d'interaction des vitesses de rotation et d'avance se sont avérés négligeables.

Tableau 10. Coefficients du modèle statistique d'émission des PUF pour les deux phases de polissage et les deux types de granit (R^2 entre 87 et 98 %). Les valeurs marquées en rouge indiquent les paramètres pour lesquels l'influence est significative ($p < 0,05$).

Paramètre	Ébauche		Finition	
	Granit blanc	Granit noir	Granit blanc	Granit noir
Moyenne	13,5120	13,3539	13,9634	14,5495
V_s	0,2106	1,2011	0,6412	0,3198
V_s^2	-0,0047	0,2737	-0,1283	-0,1020
f	-0,3347	-1,2966	-0,8628	-1,3484
f^2	-0,0798	-0,2849	-0,1733	0,2942
$V_s f$	-0,2480	0,5047	-0,2106	-0,1528

Le Tableau 11 montre le résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant de minimiser les émissions de PUF. Ces paramètres ont été obtenus avec une désirabilité allant de 81 à 100 %. Ainsi, pour minimiser les émissions des PUF lors des deux phases de polissage pour les deux types de granit, les vitesses de rotation et d'avance devraient respectivement atteindre entre 1000 et 1375 tr/min et 21,25 et 25,5 mm/s.

Tableau 11. Optimisation des paramètres de polissage pour réduire l'émission des PUF lors du polissage régulier, pour une désirabilité entre 81 et 100 %

Phase de polissage	Paramètre de polissage	
	V_s (tr/min)	f (mm/s)
Ébauche du granit blanc	1000	21,25
Ébauche du granit noir	1000	25,5
Finition du granit blanc	1000	25,5
Finition du granit noir	1375	25,5

Le Tableau 12 montre les coefficients du modèle statistique pour l'étude de la rugosité de la surface lors des deux phases de polissage des granits blanc et noir. Les paramètres les plus influents sur la rugosité étaient la vitesse de rotation, avec une influence négative, et la vitesse d'avance, avec une influence négative pour la phase d'ébauche des deux granits. Dans la phase de finition des deux granits, le paramètre le plus influent sur la rugosité a été la vitesse de rotation, avec une influence négative, et la vitesse d'avance, avec une influence positive. Le modèle statistique se caractérise par un coefficient de détermination (R^2) situé entre 86 et 99 %, avec un manque d'ajustement non significatif. Le modèle choisi représente alors bien la rugosité obtenue dans les conditions actuelles de l'étude.

Tableau 12. Coefficient du modèle statistique de la rugosité de la surface pour les deux phases de polissage et les deux types de granit (R^2 entre 86 et 99 %). Les valeurs marquées en rouge indiquent les paramètres pour lesquels l'influence est significative ($p < 0,05$).

Paramètre	Ébauche		Finition	
	Granit blanc	Granit noir	Granit blanc	Granit noir
Moyenne	0,5235	0,5672	0,2122	0,1925
V_s	-0,0710	-0,0585	-0,0270	-0,0130
V_s^2	-0,0320	-0,0207	-0,0064	0,0008
f	-0,0358	-0,0703	0,0089	0,0110
f^2	0,0170	0,0025	0,0029	0,0020
$V_s f$	0,0195	0,0152	0,0055	0,0042

Le Tableau 13 montre le résultat de l'optimisation des paramètres de polissage permettant d'atténuer la rugosité de la surface. Ces paramètres ont été obtenus avec une désirabilité allant de 91 à 100 %. Ainsi, pour minimiser la rugosité de la surface lors de la phase d'ébauche, les vitesses de rotation et d'avance devraient être respectivement entre 2125 et 2500 tr/min et de 25,5 mm/s pour les deux granits, alors qu'elles devraient être respectivement de 2500 tr/min et 8,5 mm/s pour la phase de finition des granits blanc et noir.

Tableau 13. Optimisation des paramètres de polissage pour réduire la rugosité de la surface lors du polissage régulier, pour une désirabilité entre 91 et 100 %

Phase de polissage	Paramètre de polissage	
	V_s (tr/min)	f (mm/s)
Ébauche du granit blanc	2125	25,5
Ébauche du granit noir	2500	25,5
Finition du granit blanc	2500	8,5
Finition du granit noir	2500	8,5

Pour le granit noir, l'analyse de la poussière respirable prélevée pendant 8 h a montré qu'il n'émettait pas de quartz lors des deux phases de polissage, ébauche et finition. Pour le granit blanc, du quartz dans une proportion de 20 % de la poussière respirable était émis lors de la phase d'ébauche alors que l'émission de silice cristalline s'est avérée être négligeable lors du polissage de finition. Ce résultat pourrait s'expliquer par le grand écart entre les tailles des grains de l'abrasif de finition et celle des grains de quartz du granit blanc. En effet, la taille des grains de l'abrasif de finition était très fine, empêchant le disque d'arracher de gros grains de silice cristalline du granit blanc, alors que l'abrasif d'ébauche possédait de gros grains permettant d'arracher le quartz et de le pulvériser avant de le diffuser sous forme de particules dans la zone de travail. Bien que l'émission de silice cristalline était moindre lors du polissage de finition du granit blanc, la quantité de PUF émises lors de cette phase de polissage était très

importante. L'émission notable de PUF pourrait engendrer des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs puisqu'elles présentent une réactivité majeure en surface et donc une toxicité élevée. De plus, ces PUF pourraient pénétrer très profondément dans le système respiratoire humain.

Finalement, le procédé de polissage à sec a été comparé à celui du polissage par voie humide. L'effet de la quantité d'eau utilisée sur l'émission des PF et des PUF a été analysé. Les données expérimentales obtenues ont montré que le polissage humide a permis de réduire la concentration totale en masse des PF et des PUF. En effet, le jet d'eau a permis de rabattre au sol les particules de grosses tailles, réduisant ainsi la quantité des PF dispersées. Cependant, le travail humide n'a pas eu de grands effets sur la concentration totale en nombre des PF et des PUF. Le jet d'eau n'a pas permis de rabattre au sol les PUF. Le nombre de PUF étant plus élevé que celui des PF, la concentration en nombre de la poussière totale émise lors du polissage humide n'a pas été affectée par le jet d'eau.

Les effets de trois jets d'eau à différents débits ont été analysés. La quantité d'eau utilisée n'a pas montré qu'elle influençait la quantité des PUF émises. En fait, une augmentation du débit d'eau n'a permis qu'une légère réduction de la quantité de PF générées par le procédé de polissage des granits blanc et noir.

Le travail humide est tout de même un procédé intéressant de réduction du risque d'exposition à la silice cristalline lors du polissage du granit blanc, particulièrement pour les PF; il devrait cependant être accompagné de moyens de réduction à la source pour abaisser le niveau d'émission des PUF.

7.2 Réduction à la source : ventilation

L'étude de la dispersion des particules soumises à un écoulement rotatif a montré que la répartition des particules ne dépend pas de la taille des PF et des PUF. Les simulations numérique et expérimentale ont montré que le gaz traceur reproduisait adéquatement le comportement des PF et des PUF soumises à un sillage rotatif de forte intensité. Cette situation correspond au pire scénario du procédé de polissage. En effet, plus la vitesse de rotation du disque de polissage est élevée, plus il devient difficile d'extraire la poussière qui est entraînée dans le sillage rotatif. La simulation numérique de l'écoulement de la poussière soumise à l'action d'un disque rotatif était très exigeante. Elle a nécessité des ressources informatiques importantes et beaucoup de temps. Le gaz traceur a alors été choisi pour réaliser l'analyse numérique de différents concepts de réduction à la source et étudier l'extraction dans un environnement soumis à un écoulement en rotation. La simulation expérimentale a permis de valider les résultats de la simulation numérique. Une analyse paramétrique et détaillée de trois concepts de réduction à la source a ainsi été menée. Ces trois concepts étaient : 1) le soufflage-aspiration, 2) le carter d'aspiration, 3) les fentes d'aspiration intégrées au disque. Les trois concepts ont été étudiés dans une configuration simulant le polissage d'une surface plane de granit. Cette étude n'est donc valide que pour les conditions expérimentales utilisées lors de la présente investigation. Des validations sur le terrain seront ultimement nécessaires pour ajuster les modèles obtenus aux différentes situations de polissages propres au secteur de transformation de granit.

7.2.1 Soufflage-aspiration

Les résultats des simulations expérimentales ont montré que l'utilisation d'une hotte d'aspiration sans soufflage est inefficace puisque cette utilisation n'a pas permis de réduire la concentration des contaminants dans l'espace autour du disque de rotation. En effet, l'écoulement de rotation était tellement puissant qu'il était impossible de rediriger les contaminants captés par le sillage de rotation vers la hotte d'aspiration. Un soufflage laminaire était nécessaire afin de réduire la force de l'écoulement de rotation et d'orienter le contaminant vers la hotte en favorisant son aspiration. Lorsque la puissance du soufflage laminaire était très faible, le couplage soufflage et aspiration était encore inefficace, car l'écoulement des contaminants qui en résultait était toujours dominé par la rotation. À certains débits, le soufflage laminaire a cependant permis de réorienter l'écoulement de rotation, l'efficacité du système soufflage-aspiration a augmenté et a rapidement atteint son maximum quand l'écoulement qui en résultait était totalement redirigé par le soufflage. Par conséquent, le débit de soufflage nécessaire pour rendre efficace le système soufflage-aspiration dépend beaucoup de la vitesse de rotation et un peu du débit d'aspiration de la hotte. En effet, plus la vitesse de rotation était grande, plus le débit de soufflage devait être important pour atteindre l'efficacité souhaitée. Le débit d'aspiration de la hotte a permis d'augmenter la force de l'écoulement qui en résultait et à rediriger le contaminant vers celle-ci; le débit de soufflage pouvait alors être réduit.

La simulation numérique utilisant un gaz traceur a été comparée à la simulation expérimentale utilisant des particules de NaCl. Les résultats obtenus par les simulations expérimentale et numérique étaient très semblables. Les simulations numériques ont permis de visualiser l'écoulement à différents débits de soufflage et à différentes vitesses de rotation. Ces visualisations ont confirmé que le contaminant était redirigé vers la hotte et aspiré par celle-ci. L'étude paramétrique du système soufflage-aspiration a permis d'obtenir un modèle de calcul permettant de déterminer le débit de soufflage laminaire optimal pour atteindre une efficacité de 95 %.

7.2.2 Carter d'aspiration

L'aspiration par un confinement intégré du disque rotatif, soit un carter d'aspiration, a permis d'intercepter le contaminant avant qu'il soit entraîné dans le sillage rotatif. Cette configuration n'avait pas besoin de faire appel à un soufflage laminaire pour réduire l'intensité de l'écoulement rotatif. L'efficacité du concept de carter d'aspiration a augmenté avec le débit d'aspiration et est devenue maximale à un débit d'aspiration de l'ordre de 15 l/min. Le rendement à 95 % du carter d'aspiration a été atteint à un débit d'aspiration constant, soit 15 l/min, indépendamment de la vitesse de rotation.

La simulation numérique utilisant un gaz traceur a été comparée à la simulation expérimentale utilisant des particules de NaCl. Les résultats obtenus par les simulations expérimentale et numérique étaient en adéquation. Les simulations numériques ont permis de visualiser ensuite l'écoulement à différents débits d'aspiration et à différentes vitesses de rotation. Ces visualisations ont confirmé que le contaminant était bien capturé par le carter d'aspiration et que la concentration du contaminant était fortement réduite à un débit d'aspiration de l'ordre de 15 l/min pour de grandes ou de faibles vitesses de rotation.

7.2.3 Fentes d'aspiration intégrées au disque

De la même façon que le carter d'aspiration, les fentes d'aspiration intégrées au disque ont permis d'intercepter le contaminant en le captant avant qu'il soit entraîné dans le sillage rotatif. Cette configuration n'a pas nécessité le besoin de faire appel à un soufflage laminaire pour réduire l'intensité de l'écoulement rotatif. L'efficacité du concept de fentes d'aspiration intégrées au disque a augmenté avec le débit d'aspiration. Ce concept a fonctionné avec un maximum d'efficacité à un débit d'aspiration de l'ordre de 25 l/min. L'efficacité à 95 % des fentes d'aspiration intégrées au disque a été atteinte à un débit d'aspiration constant, indépendamment de la vitesse de rotation.

Quatre configurations d'aspiration intégrée au disque rotatif ont été évaluées : des fentes circulaires, des fentes linéaires et des fentes courbées orientées dans le sens de rotation du disque et dans le sens inverse. Les 4 configurations ont montré la même efficacité à aspirer le contaminant émis entre la table et le disque en rotation.

Le système à fentes intégrées au disque a aussi été évalué en utilisant le gaz traceur CO₂. Le gaz traceur s'est avéré être un outil efficace pour évaluer les systèmes de réduction à la source des poussières émises lors de procédés industriels. En effet, l'efficacité de ce système de réduction à la source était quasi identique en utilisant un gaz traceur (CO₂), ou des particules traceuses (NaCl). L'efficacité obtenue avec les particules de NaCl était légèrement supérieure à celle obtenue par le gaz traceur. Le gaz traceur a donné un résultat conservateur puisqu'il a sous-estimé l'efficacité de la captation à la source; il a donc présenté un cas de pire scénario comparé aux comportements des particules. L'extraction du gaz traceur de l'écoulement en rotation provoqué par le disque est difficile. Il donne alors un résultat conservateur qui offre une marge de manœuvre dans l'évaluation des systèmes de réduction à la source.

8. CONCLUSION

La poussière émise lors de la transformation du granit peut contenir un pourcentage suffisamment élevé de quartz pour représenter un risque important pour la santé des travailleurs. La présente étude permet un avancement des connaissances à l'égard de la détermination de moyens d'élimination et de réduction à la source des poussières fines et ultrafines, et de celles contenant de la silice cristalline émises lors de la transformation du granit.

Le polissage manuel à sec et humide des matériaux graniteux constitue le pire scénario d'exposition des travailleurs à la poussière issue de la transformation du granit. La poussière est ainsi transportée par l'écoulement rotatif de l'air qui est induit par le mouvement du disque abrasif. Les particules sont ainsi projetées dans toutes les directions. Les poussières de grosses tailles finissent par se déposer sous l'action de la gravité, par contre les PF et les PUF sont entraînées dans le tourbillon créé par la rotation de l'outil et se retrouvent dans la zone respiratoire du travailleur. La force centrifuge entraîne la dispersion de cette poussière loin de la zone de polissage et sa concentration est alors répartie dans les zones rapprochées et éloignées de l'environnement de travail, au fur et à mesure que la rotation augmente d'intensité. Les PF et les PUF peuvent ainsi voyager et contaminer des espaces encore plus éloignés. Dans une telle situation, les travailleurs se trouvant à proximité de l'outil ne sont pas les seuls exposés.

Par ailleurs, le sillage rotatif présente une complexité au regard de la mise en place d'un système de réduction à la source. En effet, le positionnement d'une hotte d'aspiration à proximité du procédé de polissage a été démontré inefficace en milieu de travail du secteur de transformation du granit. Cette étude visait donc à trouver des solutions de contrôle du risque d'exposition aux PF et aux PUF émises par les matériaux granits lors d'un procédé de polissage. Deux types de granits, un noir et un blanc, ont été choisis; ces derniers comportant respectivement un faible et un fort taux de silice cristalline.

Pour parvenir à des solutions efficaces, il s'est avéré être essentiel de mener une étude en laboratoire sur la caractérisation et sur le contrôle de la poussière de silice cristalline émise par les opérations de polissage à sec et humide. Ces moyens incluaient la modification de la méthode de travail (vitesse de rotation et d'avance du procédé de polissage, polissages à sec et humide), l'utilisation de la ventilation locale adaptée à l'opération de polissage (vitesse et angle de captage, direction de l'écoulement, etc.). En somme, cette étape a conduit à la validation et à la vérification de l'applicabilité de solutions identifiées lors des tests effectués en laboratoire, afin de répondre aux besoins de l'industrie en matière de SST, de coûts et de productivité.

L'opération de polissage du granit a été effectuée avec une machine-outil dans un environnement contrôlé. Ces tests ont permis de comprendre et de paramétrer la génération et la dispersion de particules lors des polissages à sec et humide.

Sans moyen de contrôle des particules, l'émission, la dispersion et le taux de silice cristalline de la poussière émise par des opérations de polissage de matériaux graniteux ont été caractérisés selon des paramètres du procédé de polissage variables. Cette caractérisation a permis d'établir des corrélations entre les paramètres du procédé (vitesse de rotation, vitesse d'avance, abrasif, taille du disque, polissage à sec ou humide) et les émissions des PF et de PUF sans

compromettre la qualité du produit final. Pour cette raison, l'état de fini de surface a aussi été évalué.

Les simulations expérimentale et numérique ont permis d'analyser la dispersion des poussières sous l'effet de la rotation d'un disque reproduisant d'abord une opération de polissage sans déplacement. En utilisant des particules générées à base d'une solution de sel (NaCl), ces simulations ont permis de comprendre l'effet de la rotation sur la répartition spatiale des aérosols autour du disque rotatif selon la granulométrie des particules et la vitesse de rotation. Ensuite, trois concepts de réduction à la source ont été analysés pour déterminer celui ou ceux adapté(s) aux opérations de polissage. Les concepts analysés étaient : 1) le soufflage-aspiration, 2) le carter d'aspiration, 3) les fentes d'aspiration intégrées au disque. Cette analyse paramétrique de ventilation a contribué à l'établissement d'un modèle de ventilation pour le concept soufflage-ventilation et à l'évaluation de l'efficacité de ces trois concepts selon les paramètres de ventilation.

Les travaux expérimentaux de polissage et les simulations expérimentale et numérique ont mené aux constats suivants :

1. La concentration des poussières émises par le polissage du granit noir est plus élevée que celle du granit blanc. La concentration en nombre des PUF est plus importante que celle des PF. La phase d'ébauche de polissage émet des PF en plus grande quantité que la phase de finition, mais elle produit une plus faible quantité de PUF. La concentration totale des PF et des PUF est dominée par les PUF sur le plan du nombre et par les PF sur le plan de la masse. L'émission des PF et des PUF augmente avec la vitesse de rotation et elle diminue avec la vitesse d'avance. La répartition des poussières émises par le polissage des granits blanc et noir est quasi uniforme dans l'espace environnant ce procédé. Les zones rapprochées et éloignées sont contaminées de la même façon par le polissage du granit. La dispersion PF et des PUF ne dépend pas de leur morphologie.
2. L'augmentation de la vitesse de rotation du disque de polissage améliore l'état de fini de surface, par contre, elle peut endommager la surface si elle est très élevée. La vitesse d'avance du disque de polissage ne produit que peu d'effets sur l'état de fini de surface.
3. La taille du disque abrasif a un effet sur l'émission des PF et des PUF. Plus la circonférence du disque abrasif est grande, plus l'émission de poussières est élevée, et vice versa.
4. Le granit noir ne contient pas de quartz; il n'émet donc pas de silice cristalline lors des deux phases de polissage (ébauche et finition). Par contre, le granit blanc, en contient et en émet dans une proportion de 20 % de la poussière respirable lors de la phase d'ébauche. Toutefois, la proportion de silice cristalline contenue dans la poussière respirable est négligeable lors du polissage de finition du granit blanc.
5. L'analyse de la morphologie des PF et des PUF a montré que le taux de silice croît avec la taille des particules émises par le polissage du granit.
6. Le polissage humide permet de réduire la concentration massique totale des PF et des PUF. Cependant, il ne produit pas un effet significatif sur la concentration totale en nombre de ces poussières. Le jet d'eau permet de rabattre vers le sol les grosses

particules comme les PF, alors que son effet sur les PUF est mineur. Le travail humide réduit le taux de silice cristalline émis par le polissage du granit blanc puisque celle-ci est transportée par les particules de fortes tailles. Il ne permet cependant pas de réduire le nombre de particules, en particulier les PUF, émises dans l'espace par le procédé de polissage du granit.

7. L'effet de trois jets d'eau à différents débits a été analysé; les quantités d'eau utilisées n'ont pas produit d'effets sur l'émission de PUF, alors que le débit d'eau a réduit légèrement la quantité de PF générées par le procédé de polissage des granits blanc et noir.
8. La simulation numérique a été validée par des données issues de la littérature. Une comparaison a aussi été menée entre les simulations numérique et expérimentale pour l'analyse du comportement de particules et des gaz traceurs entraînés dans un sillage rotatif. Les résultats des simulations numérique et expérimentale montrent une très bonne adéquation entre les valeurs numériques et les données expérimentales.
9. Les simulations numérique et expérimentale ont par la suite servi à analyser la dispersion des particules et des gaz traceurs autour d'un disque rotatif. L'espace entourant le disque est autant contaminé en zones éloignées qu'en zones rapprochées. La taille des particules n'a pas d'effet sur leur dispersion autour du disque en rotation. Les gaz traceurs simulent adéquatement le comportement des particules soumises à de grands écoulements rotatifs.
10. Trois concepts de réduction à la source ont été évalués : 1) le soufflage-aspiration, 2) le carter d'aspiration, 3) les fentes d'aspiration intégrées au disque. L'étude paramétrique a montré que les trois concepts permettent d'atteindre un degré d'efficacité de réduction de l'émission supérieur à 95 %. Un modèle de calcul a d'ailleurs été établi pour le concept de réduction à la source par soufflage-aspiration. Il a permis de déterminer le débit de soufflage laminaire optimal permettant d'atteindre une efficacité de 95 %. Le rendement de ces trois concepts de ventilation a été évalué en fonction des divers paramètres de ventilation.
11. Finalement, les gaz traceurs ont permis d'examiner adéquatement le comportement des poussières soumises à un écoulement rotatif et d'évaluer la performance d'un système de réduction à la source. Ils donnent des résultats comparables à ceux de particules soumises à de grandes rotations, situation de pire scénario. Ils permettent de fournir une évaluation conservatrice de l'efficacité de la ventilation puisque, en utilisant des gaz traceurs, l'efficacité mesurée est légèrement moins élevée que celle obtenue en utilisant des particules comme traceur.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed, T. et Rahman, Z. (2012). Performance investigation of building ventilation system by calculating comfort criteria through HVAC simulation. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 3, 7-12.
- ACGIH. (2008). *2008 TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices*. Cincinnati, OH.
- Akbar-Khanzadeh, F. (2007). Crystalline silica dust and respirable particulate matter during indoor concrete grinding: Wet grinding and ventilated grinding compared with uncontrolled conventional grinding. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(10), 770-779.
- American Federal Register. (2016). Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica; Final Rule, 81(58), 16285-16890. Occupational Safety and Health Administration. (2016). Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica. Final rule. *Federal register*, 81(58), 16285.
- American Thoracic Society. (1997). Adverse effects of crystalline silica exposure. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 155(2), 761-765.
- Alzahrany, M., Van Rhein, T., Banerjee, A. et Salzman, G. (2016). Fluid flow and particle transport in mechanically ventilated airways. Part II: particle transport. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 54(7), 1097-1109.
- Ardkapan, S. R., Nielsen, P. V. et Afshari, A. (2014) Studying passive ultrafine particle dispersion in a room with a heat source. *Building and environment*, 71, 1-6
- Bahloul, A., Gravel, R., Roberge, B., Goyer, N., Chavez, M. et Reggio, M. (2009). Modélisation du temps de ventilation par soufflage dans les silos-tours à fourrage. *Travail et santé*, 25(3), S18-S21.
- Bahloul, A. Roberge, B., Goyer, N., Chavez, M. et Reggio, M. (2010). *La prévention des intoxications dans les silos à fourrage, Études et recherches* (Rapport n° R-672). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-672.pdf>
- Bahloul, A., Chavez, M., Reggio, M., Roberge, B., Goyer, N. (2012). Modeling ventilation time in forage tower silos. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 18(4), 259-272.
- Bahloul, A., Mahdavi, A. Haghghat, F. et Ostiguy, C. (2014a). Evaluation of N95 filtering facepiece respirator efficiency with cyclic and constant flows. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. doi: 10.1080/15459624.2013.877590
- Bahloul, A., Villalpando, F., Chavez, M., Reggio, M., Goyer, N. (2014b). *Modélisation par simulation numérique de la ventilation des silos-tours en tenant compte de la chute, Études et recherches* (Rapport R-818). <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-818.pdf>
- Bahloul, A., Stathopoulos, T., Chavez, M. et Hajra, B. (2015). *L'effet de bâtiments en amont et en aval sur la dispersion des effluents : une approche axée sur la mécanique des fluides numérique (CFD)* (Rapport n° R-852). Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-852.pdf>
- Bahloul, A., Haghghat, F., Mostofi, R., Mahdavi, A., Ostiguy, C. (2016). *Évaluation de l'efficacité d'un filtre N95 contre des particules ultrafines, dont les nanoparticules, en mode de débits d'air constant et cyclique simulant la respiration des travailleurs* (Rapport n° R-932). Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-932.pdf>

- Balout, B., Songmene, V. et Masounave, J. (2007). An experimental study of dust generation during dry drilling of pre-cooled and pre-heated workpiece materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 9(1), 23-34.
- Bémer, D., Lecler, M. T., Régnier, R., Hecht, G., et Gerber, J. M. (2002). Measuring the emission rate of an aerosol source placed in a ventilated room using a tracer gas: influence of particle wall deposition. *Annals of Occupational Hygiene*, 46(3), 347-354.
- Belut, E. (2006). Etude des écoulements d'air et de particules au voisinage de pièces en mouvement : application à la conception des captages sur machines tournantes réalisant des opérations d'usinage, NS 262, INRS
- Belut, E., Bonthoux, F., Fontaine, J. R., Kheiri, A. et Oesterlé, B. (2005). *Comparaison de modèles de turbulence sur le cas du disque tournant*. Communication présentée au 17^e Congrès Français de Mécanique, Troyes, France.
- Belut, E., Bonthoux, F., Oesterlé, B., Fontaine, J. R., et Kheiri, A. (2009). Investigation of the particle-laden airflow generated by a pseudo-machining operation. *International Journal of Multiphase Flow*, 35(8), 710-724.
- Bish, D. L. et Post, J. E. (édit.). (1989). *Modern powder diffraction*. Washington, DC: Mineralogical Society of America.
- Bouilly, J., Limam, K., Beghein, C. et Allard, F. (2005). Effect of ventilation strategies on particle decay rates indoors: An experimental and modelling study. *Atmospheric Environment*, 39(27), 4885-4892.
- Brochot, C., Djebara, A., Haghigat, F. et Bahloul, A. (2015). Validation of a laboratory test bench for the efficiency of an N95 filtering face piece, using simulated occupational exposure. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 5(4), 1-11.
- Chen, F., Yu, Simon.C. M. et Lai, A. C. K. (2006). Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model. *Atmospheric Environment*, 40(2), 357-367.
- Centre international de Recherche sur le Cancer (1997). Silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils, IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 68. Lyon. Tiré de <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono68.pdf>
- Couture, B., Gaulin, C., Hains, M., Lavallée, L. et Martin, M. (2010). Programme d'intervention régional Silice-Granit : échanger connaissances et expériences : Congrès de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail / AQHSST, Levis, Canada. Tiré de https://www.congresaqhsst.ca/archives-congres/archives/2010/Actes2010_ProgrammeInterventionRegional.pdf
- Dahal, S., Kim, T. et Ahn, K. (2016). Indirect prediction of welding fume diffusion inside a room using computational fluid dynamics. *Atmosphere*, 7(6), 74.
- Djebara, A., Songmene, V. et Bahloul, A. (2013). Effects of machining conditions on specific surface of PM_{2.5} emitted during metal cutting. *Health*, 5(10), 36.
- Vadillo, C. G., Gómez, J. S., et Morillo, J. R. (2011). Silicosis in quartz conglomerate workers. *Archivos de Bronconeumologia (English Edition)*, 1(47), 53.
- Gonzalez, R. M., Edwards, T. E., Lorbieke, T. D., Winburn, R. S. et Webster, J. R. (2002). Factors Influencing Quantitative Results for Coal Combustion By-Products Using the Riestveld Method. *Advances in X-ray Analysis*, 45, 188-193.
- Goyer, N., Bahloul, A. et Veillette, C. (2010). *Prévention de l'exposition des travailleurs à la silice à l'intention des entreprises du secteur de la transformation du granit et autres matériaux contenant du quartz*. Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/Silice-CSST-IRSST.pdf>

- Gubler, D. (2002). *REEXS: Reinforced exhaust system optimization of operating and design parameters*. (Thèse de doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Suisse). Tiré de <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:26149/eth-26149-02.pdf>
- Health and Safety Executive. (2001). *Controlling exposure to stonemasonry dust*. Sudbury, Angleterre: HSE. Tiré de <http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/hsg201.pdf>
- Institut national de recherche et de sécurité. (2006). *Cabines ventilées pour le travail de la pierre* (Document technique n° ED 947). Paris, France: INRS. Tiré de <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20947>
- Kermani, A. (2015). *CFD modeling for ventilation system of a hospital room*. Communication présentée à la COMSOL Conference, Boston, MA. Tiré de https://www.comsol.com/paper/download/257311/kermani_paper.pdf
- Khettabi, R., Songmene V., Masounave J. et Zaghbani I. (2010). Modeling of fine and ultrafine particle emission during orthogonal cutting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(6), 776-789.
- Khettabi, R., Songmene V. et Masounave J. (2010). Effects of cutting speeds, materials and tool geometry on metallic particle emission during orthogonal cutting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(6), 767-775.
- Khettabi, R., Songmene, V. et Masounave, J. (2010). Effect of tool lead angle and chip formation mode on dust emission in dry cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 194(1-3), 100-109.
- Kouam J., Songmene V. et Bahloul A. (2013). Experimental investigation on PM2.5 particle emission during polishing of granite. *Health*, 5(10), 29-35.
- Kouam J., Songmene V., Djebara A. et Khettabi R. (2011). Effect of friction testing of metals on particle emission. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(6), 965-972. doi: 10.1007/s11665-011-9972-6.
- Kramer, M., Blanc, P., Fireman, E., Amital, A., Guber, A. et Rhahman., N. (2012), Artificial stone silicosis: Disease resurgence among artificial stone workers. *chest*, 142(2), 419-424.
- Lacasse, Y., Martin, S. et Desmeules, M. (2010). *Silicose, silice et cancer du poumon : méta-analyse de la littérature médicale* (Rapport n° R-403). Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-403.pdf>
- Lai, A. C. K., Wang, K. et Chen, F. Z. (2008). Experimental and numerical study on particle distribution in a two-zone chamber, *Atmospheric Environment* 42(8), 1717-1726.
- Lara, J. et Vennes, M. (2002). *Guide pratique de protection respiratoire*. Tiré de https://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/200/Documents/DC200_1635web.pdf
- Le Bacle, C. Bouchami, R. et Gouffier, C. (2010) *Silicose : la situation en France dans les années 90*. Tiré de <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TC%2055>
- Liming, Y., Smith, A. C. et Brune, J. F. (2006). *Computational fluid dynamics study on the ventilation flow paths in longwall gobs*. Tiré de <http://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/cfdso.pdf>
- Mahdavi, A., Haghghat, F., Bahloul, A., Brochot, C. et Ostiguy, C., Particle loading time and humidity effects on the efficiency of a N96 filtering facepiece respirator model under constant and inhalation cyclic flows, 2015, *Annals of Occupational Hygiene*, 59(5), 629-640.
- Mahdavi, A., Bahloul, A., Haghghat, F. et Ostiguy, C. (2014). Contribution of breathing frequency and inhalation flow rate on performance of N95 filtering facepiece respirators, *Annals of Occupational Hygiene*, 58(2), 195-205.
- Malkin, S. et Guo, C. (2008). *Grinding technology: Theory and application of machining with abrasives* (2^e éd.) New York, NY: Industrial Press.

- Marble Institute of America. (2008). *Silicosis: An industry guide to awareness and prevention*. Cleveland, OH: Marble Institute of America.
- Martin J., Beauparlant, M., Lesage, J. et Van Tra, H. (2012). Development of a quantification method for quartz in various bulk materials by X-ray diffraction and the Rietveld method *Powder Diffraction*, 27(1), 12-19.
- Martinez, C., Prieto, A., Garcia, L., Quero, A., Gonzalez, S. et Casan, P. (2010). Silicosis: A disease with an active present. *Archivos de Bronconeumologia*, 46(2), 97-100.
- Mostofi, R., Noël, A., Haghghat, F., Bahloul, A., Lara, J., Cloutier, Y. (2012). Impact of two particle measurement techniques on the determination of N95 class respirator filtration performance against ultrafine particles, *Journal of Hazardous Materials*, 217, 51-57.
- Mostofi, R., Bahloul, A., Lara, J., Wang, B., Cloutier, Y. et Haghghat, F. (2011). Investigation of potential affecting factors on performance of N95 respirators, *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 28(1), 26-39.
- Oberbeck, B., et Fairfax R. (2008). OSHA compliance issues – Exposure to crystalline silica in a countertop manufacturing operation, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(8), D81-D85.
- OSHA/NIOSH (2012). Hazard Alert: Worker exposure to silica during hydraulic fracturing. Tiré de https://www.osha.gov/dts/hazardalerts/hydraulic_frac_hazard_alert.html
- OSHA/NIOSH (2015). Hazard Alert: Worker exposure to silica during countertop manufacturing, finishing, and installation. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2015-106/pdfs/2015-106.pdf>
- Phillips, M. L. et Johnson, A. C. (2012). Prevalence of Dry Methods in Granite Countertop Fabrication in Oklahoma. *Journal of Occupational Environmental Hygiene*, 9, 437-442.
- Phillips, M. L., Johnson, D. L., et Johnson, A. C. (2013). Determinants of Respirable Silica Exposure in Stone Countertop Fabrication: A Preliminary Study. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(7), 368-373.
- Marble Institute of America (2013). *MIA safety services: Crystalline silica and silicosis*. Tiré de http://naturalstoneinstitute.org/default/assets/File/news/Safety_Services_24_0_2013.pdf.
- Phuong, N. L. et Kazuhide, I. (2012). Experimental and numerical study of airflow and particle dispersion in a vertical ventilation duct. *Building and Environment*, 59, 466-481.
- Ranjan, M., Kumar, K. et Ghosh, S. K. (2013). Mine ventilation in a bord and pillar mines using CFD. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3), 389-393.
- RSST. *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (2007). R.R.Q., c. S-2.1, r. 13, à jour au 1^{er} novembre 2016, [Québec], Éditeur officiel du Québec.
- Sabourin G. (2013). Silice cristalline : la poussière invisible qu'on a à l'œil. *Prévention au travail*, 25(4), 7-14. Tiré de http://www.irsst.qc.ca/media/magazines/V25_04/7-14.pdf.
- Saidi M. N., Songmene V., Kouam J. et Bahloul A. (2015). Experimental investigation on fine particle emission during granite polishing process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9), 2109-2121.
- Songmene, V. Balout, B. et Masounave, J. (2008). Clean Machining: Experimental Investigation on Dust Formation - Part I: Influence of Machining Parameters and Chip Formation- Part II: Influence of Machining Strategies and Drill Condition, *International Journal. of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, 14(1), 1-33.
- Songmene, V. Khettabi, R.; Viens, M., Kouam, J., Hallé, S., Morency, F., Masounave, J. et Djebara, A. (2014). *Mesure, contrôle et caractérisation des nanoparticules : Procédure appliquée à l'usinage et au frottement mécanique*, (Rapport n° R-814). Montréal: IRSSTet Nanoquébec. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublRSST/R-814.pdf>

- Tönshoff, H., Karpuschewski, B. et Glatzel, T. (1997). Particle Emission and Emission in Dry Grinding. *Annals of the CIRP*, 46(2), 693-695.
- Yuan, F.-D. et You, S.-J. (2007). CFD simulation and optimization of ventilation for subway side-platform. *Tunneling and underground Space Technology*, 22(4), 474-482.
- Worthington, K., Filios, M., Reilly, M. J., Harrison, R. et Rosenman, K. D. (2014). Silica hazards from engineered stone countertops, ASTM C616, Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone, Science Blog, American Geological Institute, Dictionary of Geological Terms.
- Zaghbani, I., Songmene, V. et Khettabi, R. (2009). Fine and Ultrafine Particle Characterization and Modeling In High Speed Milling of 6061-T6 Aluminium Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(1), 38-49.
- Zhao, B., Yang, C., Yang, X. et Liu, S. (2008). Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models, *Building and Environment* 43(4), 388-397.
- Zhao, B., Li, X., et Zhang, Z. (2014a). Numerical study of particle deposition in two differently ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*, 13, 443-451.
- Zhao, B., Zhang, Y., Li, X., Yang, X. et Huang, D. (2014). Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical methods. *Building and Environment*, 39(1), 1-8.