

EXPOSITION AUX PARTICULES DE SILICE CRISTALLINE LORS D'OPÉRATIONS SUR DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT : EVALUATION DES MOYENS DE PRÉVENTION EN LABORATOIRE ET IN SITU

Y. Taouis^{1*}, A. Alazard², S. Ritoux¹

¹Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 84 Avenue Jean Jaurès - 77420 Champs sur Marne

²Organisme Professionnel Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics – 92100 Boulogne Billancourt

TITLE

Exposure to crystalline silica particles during operations on construction materials in the building sector: Evaluation of prevention methods in laboratory and in situ

RESUME

La silice cristalline représente un risque majeur dans le bâtiment, du fait de sa présence dans de nombreux matériaux et situations de travail. Des techniques comme l'aspiration à la source ou le travail à l'humide sont reconnues pour réduire l'empoussièrement, mais leur efficacité reste peu documentée, nécessitant une évaluation quantitative et qualitative. Le projet EMESIBAT, porté conjointement par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), et l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTP), vise à améliorer la compréhension du risque d'exposition à la silice cristalline en caractérisant les émissions à la source et en évaluant les dispositifs existants de réduction.

ABSTRACT

Occupational exposure to silica dust represents a major health concern in the construction sector, due to its widespread presence in various materials and the diversity of work situations. Technical solutions such as vacuum dust collection system, or integrated water delivery system are widely recognized for their potential to reduce dust emissions. However, their effectiveness remains insufficiently documented, highlighting the need for quantitative performance assessment. The EMESIBAT project, jointly led by the French Scientific and Technical Center for Building (CSTB) and the Professional Organization for Risk Prevention in Construction and Public Works (OPPBTP), aims to improve understanding of crystalline silica exposure risks by characterizing emissions at the source and evaluating existing dust control technologies.

MOTS-CLES : silice, silice cristalline, particules, aérosols, sollicitations mécaniques, exposition / **KEYWORDS**: silica, crystalline silica, particles, aerosols, mechanical stress, exposure

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Le projet EMESIBAT, vise à améliorer la compréhension du risque d'exposition à la silice cristalline en caractérisant les émissions à la source et en évaluant les dispositifs existants de réduction. L'analyse des performances d'abattement, menée sur différentes plages granulométriques, a permis de mieux comprendre la distribution des particules de silice cristalline générées lors d'opérations courantes telles que le ponçage et le perçage du béton.

Le projet a mobilisé les expertises de l'OPPBTP et du CSTB autour de deux phases :

- **Phase en laboratoire** : essais contrôlés simulant les opérations courantes pour contrôler les conditions d'émission et analyser les empoussièrements générés.
- **Phase sur chantier** : mesures en conditions réelles pour évaluer l'exposition des opérateurs dans leur environnement de travail.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Choix des outils/matériaux/MPC

Sur la base des travaux antérieurs disponibles, le choix de l'équipement s'est porté vers deux situations de travail courantes : le ponçage et le perçage de béton. Les combinaisons outils/matériaux/MPC testées expérimentalement sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Configuration des sollicitations mécaniques

| Outils | Matériau (teneur en quartz) | MPC |
|----------------------------|-----------------------------|---|
| Perforateur (mèche Ø22 mm) | Béton (14,8% quartz) | Mèche creuse aspirante + aspirateur de classe H |
| Ponceuse | | Carter d'aspiration + aspirateur de classe H |

2.2. Matériels et méthodes

Essais en laboratoire :

Les essais de performance des moyens de protection collective (MPC) associés aux outils mécaniques ont été réalisés sur le banc Aérotest du CSTB (Taouis *et al*, 2025). Ce dispositif permet de caractériser les émissions de poussières générées par des sollicitations sur matériaux de construction. Il comprend une zone de travail (source) intégrée dans un caisson étanche balayée par un flux d'air ascendant permettant d'entraîner les particules jusqu'à la plateforme métrologique. Ainsi, chaque configuration outil/matériau/MPC (Tableau 1) a fait l'objet de plusieurs essais successifs afin de caractériser :

- La dynamique d'émission particulaire (évolution temporelle de la concentration),
- La distribution granulométrique des aérosols émis (ELPI DEKATI, 40 nm – 10 µm),
- La teneur en silice cristalline des fractions inhalable, thoracique et alvéolaire collectées (analyses DRX).

Les essais ont suivi une procédure standardisée incluant une phase de blanc, les sollicitations mécaniques, les prélèvements et mesures en temps réel, la récupération des filtres et le nettoyage du banc.

Essais sur chantier :

La deuxième phase de l'étude a été conduite sur chantier, les équipements utilisés lors des essais en laboratoire ont été réemployés. Le protocole mis en œuvre est le suivant :

- Prélèvements individuels sur opérateur : CIP 10-R (fraction alvéolaire) – analyse par gravimétrie (poussières alvéolaires) et DRX (poussières de silice cristalline)
- Mesures en temps réel des concentrations particulières : compteur optique Grimm 1.108 à proximité de l'opérateur et/ou capteur U-dust positionné au niveau des voies respiratoires de l'opérateur

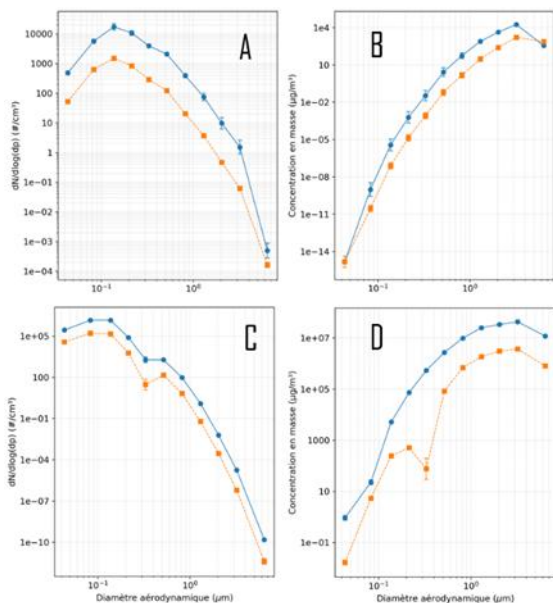
Cette approche combinée permet d'évaluer la concentration liée à chaque tâche et d'identifier d'éventuels pics d'exposition en lien avec l'activité réalisée.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés concernent les expérimentations menées lors du ponçage et percement de béton en absence et en présence de mesure de protection collective (MPC).

3.1. Caractérisation des émissions particulières en laboratoire

Les résultats obtenus en laboratoire montrent que les opérations de ponçage et de percement génèrent un aérosol contenant une fraction non négligeable de silice cristalline alvéolaire.



| Modalité d'émission | Ponçage | | Percement | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | GMD sans MPC (µm) | GMD avec MPC (µm) | GMD sans MPC (µm) | GMD avec MPC (µm) |
| Nombre | 0,096 | 0,092 | 0,162 | 0,149 |
| Masse | 2,17 | 2,25 | 2,88 | 3,68 |

L'analyse des valeurs de diamètres géométriques moyens (GMD), reportées dans le tableau associé, montrent :

- Pas d'effets significatifs des MPC sur les GMD en nombre ($\approx 0,1 \mu\text{m}$ pour le ponçage, $\approx 0,15 \mu\text{m}$ pour le percement)
- Les GMD en masse se situent entre 2 et 4 µm, traduisant la prépondérance des particules micrométriques dans l'apport massique.

Ainsi, les MPC ne modifient pas la distribution granulométrique des aérosols mais permettent une réduction significative de la concentration totale de particules émises. Les résultats mettent également en évidence la persistance d'une fraction ultrafine majoritaire en nombre, même après captation, suggérant la nécessité d'approfondir la compréhension de cette composante pour mieux évaluer son rôle dans l'exposition des travailleurs du BTP à la silice cristalline.

Figure 1 : Distributions granulométriques, en nombre et en masse, des émissions de poussière issues du perçement (A, B) et du ponçage (C, D) d'un coupon de béton ; Tableau des diamètres géométriques moyens déterminés à partir de ces résultats.

Les distributions granulométriques (Figure 1) montrent une prédominance, en nombre, de particules submicroniques ($D_a < 1 \mu\text{m}$), notamment ultrafines (PUF) ($< 100 \text{ nm}$). Lors du **ponçage**, les PUF représentent **environ 97,4 %** des émissions totales, tandis que la **fraction fine ($< 1 \mu\text{m}$)** atteint **99,9 %**. Pour le **perçement**, ces proportions sont de **57 %** pour les PUF et **99,8 %** pour la fraction fine. Ces résultats confirment que les aérosols générés sont majoritairement composés de particules submicroniques, les particules micrométriques contribuant marginalement au nombre total. La fraction micrométrique contribue faiblement au nombre total mais domine la masse générée. L'utilisation de moyens de protection collective (MPC), (carter d'aspiration et mèche creuse aspirante) permet une réduction globale des émissions en nombre et en masse, sans modifier la granulométrie de l'aérosol. En présence d'un MPC, les courbes conservent un caractère polydispersé et multimodal, indiquant des mécanismes de génération similaires (abrasion, condensation, ...). La mise en œuvre du MPC agit sur l'amplitude de la concentration particulière, l'abattement moyen est supérieur à un ordre de grandeur pour la concentration en nombre et atteint plus de 90 % en masse totale.

L'utilisation des MPC entraîne une réduction significative des émissions de poussières, avec des facteurs de réduction allant de 9 à 12 selon la configuration expérimentale. Lors du perçement de béton, la concentration massique moyenne chute de $2,3 \times 10^4 \mu\text{g.m}^{-3}$ à $2,7 \times 10^3 \mu\text{g.m}^{-3}$ (facteur de réduction de 8,7) et la concentration en nombre diminue d'un facteur d'environ $\approx 11,6$.

Pour la tâche de ponçage de béton, les réductions sont similaires : la concentration massique passe de $1,26 \times 10^8 \mu\text{g.m}^{-3}$ à $1,01 \times 10^7 \mu\text{g.m}^{-3}$ et celle en nombre de $7,4 \times 10^5 \text{ Particules/cm}^3$ à $8,1 \times 10^4 \text{ Particules/cm}^3$, soit des facteurs de réduction de 12,4 et de 9,1 respectivement.

Tableau 2 : Masses totales et masses de silice cristalline (SiO_2) mesurées dans les fractions granulométriques d'intérêt (PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$) lors du ponçage et du perçement de béton, avec et sans MPC.

| Modalité d'émission | Ponçage | | Perçement | |
|---------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Fraction granulométrique d'intérêt | PM_{10} | $\text{PM}_{2,5}$ | PM_{10} | $\text{PM}_{2,5}$ |
| Masse prélevée sans MPC (mg) | 31,2 | 98,7 | 0,2 | 0,55 |
| Masse de SiO_2 sans MPC (mg) | 3 | 12,7 | < LD | < LD |
| Masse prélevée avec MPC (mg) | 2,4 | 7 | < LQ | < LQ |
| Masse de SiO_2 avec MPC (mg) | 0,2 | 0,8 | < LD | < LD |

L'analyse gravimétrique et DRX de la fraction fine (PM_{10}) et alvéolaire ($\text{PM}_{2,5}$) met en évidence l'efficacité des MPC pour réduire les émissions de silice cristalline lors des sollicitations mécaniques (tableau 2).

Pour le ponçage de béton, l'utilisation du MPC permet une réduction en masse totale des poussières collectées de 92% pour les PM_{10} et de 93% pour les $\text{PM}_{2,5}$. La masse de silice cristalline (SiO_2) est quant à elle réduite de 93 %. Dans le cas du perçement du béton, les masses mesurées dans les fractions PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ se situent à la limite du seuil de détection. En l'absence de MPC, la masse de silice cristalline était de 24 μg pour la fraction PM_{10} et de 40 μg pour la fraction $\text{PM}_{2,5}$. Or avec la mise en œuvre du MPC les masses mesurées étaient toutes inférieures à la limite de détection, indiquant un abattement quasiment total de la silice cristalline dans la fraction fine et alvéolaire.

Bilan des essais en laboratoire :

Ces résultats montrent que les MPC testés sont globalement efficaces pour réduire l'exposition aux poussières de silice cristalline lors d'opérations de ponçage et perçement de béton. Les performances observées dépendent du type de sollicitation et de la technologie mise en œuvre (~93%). L'étude met également en évidence un point crucial : la **persistance d'une fraction ultrafine majoritaire ($> 97\%$)**, encore peu caractérisée (en termes de teneur en silice cristalline notamment), dont l'effet sanitaire devrait être étudié, les réglementations actuelles se focalisant sur la fractions alvéolaires ($\text{PM}_{2,5}$).

3.2. Mise en œuvre des solutions en conditions réelles de chantier :

Les mêmes équipements ont été réemployés sur chantier, avec le concours d'entreprises volontaires et engagées dans l'amélioration des solutions de réduction de l'exposition à la silice cristalline.

Résultats obtenus pour la situation de ponçage de béton avec aspiration à la source :

L'utilisation d'un système d'aspiration via le carter ne permet pas de garantir systématiquement le respect de la valeur limite d'exposition professionnelle de 0,1 mg/m³ pour le quartz. L'analyse croisée des observations de terrain et des données issues des mesures en temps réel a révélé que le dispositif ponceuse + carter d'aspiration + aspirateur classe H présente des limites d'efficacité selon les phases de travail. En effet, les analyses en temps réel ont mis en évidence l'apparition de pics d'exposition en poussières alvéolaires dès que le carter perd son adhérence complète à la surface à poncer. Cela se produit notamment lors du ponçage des zones difficiles d'accès, comme les angles (encadrements de portes) ou les jonctions entre les murs et les plafonds/sols. Le ponçage d'importantes coulures de béton peut également engendrer des niveaux d'empoussièrement élevés. Par ailleurs, la configuration de la zone de travail constitue un facteur déterminant dans le niveau d'exposition des opérateurs. Les données recueillies indiquent que les pics d'exposition peuvent être doublés lorsque les opérations sont effectuées dans un environnement confiné. En conclusion les tests sur chantier pour la situation de ponçage ont mis en évidence que l'efficacité de l'aspiration est fortement conditionnée par la typologie de l'interface outil-support et par la configuration de la zone de travail.

Résultats obtenus pour la situation de percement de béton avec mèche creuse :

Lors des tâches de percement de béton avec mèche creuse et aspirateur de classe H, les concentrations mesurées sont systématiquement inférieures à la limite de quantification, confirmant les résultats obtenus en laboratoire avec des niveaux d'émission de poussières plus faibles.

4. CONCLUSION ET DISCUSSION

Bien que les MPC testés en laboratoire démontrent une efficacité globale >90% pour réduire l'exposition aux poussières de silice cristalline, les résultats terrain révèlent des performances variables selon les dispositifs, les gestes opératoires et la configuration de la zone de travail. La mèche creuse aspirante avec aspirateur classe H permet d'obtenir des concentrations inférieures aux limites de quantification, tandis que le ponçage avec carter d'aspiration et aspirateur classe H génère des niveaux plus élevés de silice cristalline et poussières alvéolaires. Les tests terrain ont également révélé des pics d'empoussièrement lors de certains gestes (ponçage d'angles, et des jonctions murs/plafonds et murs/sols), liés à une perte d'adhérence du carter. L'étude met en lumière la persistance d'une fraction ultrafine majoritaire, encore peu caractérisée, notamment en silice cristalline alvéolaire. Ces particules, pénètrent les alvéoles pulmonaires mais impactent peu les résultats des mesures de contrôle technique des VLEP compte tenu de leur plus faible masse. Des pistes de réflexion concernant l'ergonomie des équipements, la mise en œuvre d'aspirateur disposant d'une double filtration (classe M puis classe H) et l'aménagement des interventions sont actuellement étudiées. La formation des opérateurs, l'organisation du travail et l'amélioration de la qualité des bétons sont également des leviers pour réduire l'exposition des opérateurs aux poussières de silice cristalline.

5. REFERENCES

- Motzkus C., Boutaleb C., & Ritoux S. (2021). *Caractérisation expérimentale des poussières émises lors d'opérations sur des matériaux de construction contenant de la silice cristalline*.
OPPBTP. (2021). *Rapport d'étude exploratoire : étude de l'émission des poussières de silice cristalline lors d'opérations du BTP*.
OPPBTP. (2025). *CARTO SILICE BTP - rapport de la campagne de mesures des poussières de silice cristalline alvéolaire lors d'opérations du BTP*. OPPBTP Publications.
Rees, D., & Murray, J. (2007). Silica, silicosis and tuberculosis. *The international Journal of tuberculosis and lung diseases*.
Taouis T., Alazard A., Draghi M., Ollivier C., Delaby S., Ritoux S. (2025). Etude de la maîtrise de l'exposition aux particules de silice cristalline lors d'opération sur matériaux de construction dans le domaine du bâtiment. Congrès Français sur les Aérosols 2025, Paris.

6. REMERCIEMENTS

ANSES - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
Projet EMESIBAT financé par l'ANSES (Convention ANSES-21-EST-021)