

CARTOGRAPHIE SPATIALE ET TEMPORELLE DES PARTICULES FINES PM2.5 EN ATELIER À L'AIDE DE CAPTEURS LOW COST ET DU MACHINE LEARNING

Adrien Rizza^{1,2}, Olivier Cheze², Olivier Dufaud¹, Dominique Thomas¹

¹Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy

²Centre Technique De Matériaux Naturels De Construction (CTMNC), 75015 Paris, France

*Courriel de l'orateur : rizza.a@ctmnc.fr

TITLE

Spatial and temporal mapping of fine particles PM2.5 in the workshop using low-cost sensors and machine learning

RESUME

Dans l'industrie de la pierre naturelle en France, des dépassements fréquents des seuils réglementaires de poussières ont été constatés, surtout en conditions sèches. Les méthodes gravimétriques classiques ne permettent pas de suivre les dynamiques d'émission, ce qui limite la prévention en entreprise. Pour y remédier, un dispositif innovant de cartographie 3D des PM2.5 a été développé, reposant sur dix capteurs SPS30 disposés selon le plan expérimental 3Δ de Roulet et al. (Roulet et al., 1991) et sur un modèle prédictif. Validé en laboratoire, sur banc de découpe et en industrie, il reconstruit fidèlement les panaches ($R^2 > 0,95$). Cette approche offre aux entreprises une alternative rapide aux CFD et un outil opérationnel pour anticiper les risques respiratoires.

ABSTRACT

In the French natural stone industry, frequent exceedances of regulatory dust exposure limits have been observed, particularly under dry processing conditions. Conventional gravimetric methods fail to capture the spatial and temporal dynamics of emissions, thereby limiting effective prevention strategies at the enterprise level. To address this gap, an innovative 3D mapping system for PM2.5 was developed, combining ten SPS30 optical sensors arranged according to the 3Δ experimental design of Roulet et al. (Roulet et al., 1991) with a predictive machine learning model. Validated through laboratory trials, cutting bench experiments, and industrial deployment, the system accurately reconstructs dust plumes with coefficients of determination above 0.95. This approach provides companies with a rapid alternative to CFD simulations and a practical tool for anticipating respiratory risks in the workplace.

MOTS-CLÉS: Cartographie 3D, poussières, exposition professionnelle, apprentissage automatique/ **KEYWORDS:** 3D mapping, dust, occupational exposure, machine learning.

1. CONTEXTE

Dans l'industrie de la pierre naturelle, une campagne expérimentale menée sur huit sites représentatifs a mis en évidence des expositions variables aux poussières minérales, avec des dépassements fréquents des seuils réglementaires fixés par le décret n°2021-1763 (4 mg/m³ pour la fraction inhalable et 0,9 mg/m³ pour la fraction alvéolaire depuis juillet 2023), en particulier lors des opérations de finition manuelles. Les dispositifs de prélèvement individuels classiques (CIP10, cyclone) ne fournissent toutefois que des données post-exposition, sans résolution spatio-temporelle, ce qui limite l'analyse des dynamiques de dispersion. Face à ces limites, et aux contraintes des simulations CFD (coût computationnel élevé, complexité de la modélisation des particules, circulation d'air, aspiration locale...), une approche expérimentale hybride a été développée, combinant mesures physiques et cartographie en temps réel des concentrations de PM2.5, enrichie par des algorithmes de machine learning. Cette intégration permet d'améliorer la représentation des gradients spatio-temporels et d'identifier plus finement les zones de dépassement dans les environnements industriels.

2. MÉTHODE

La méthodologie repose sur l'utilisation d'un réseau de dix capteurs optiques low-cost SPS30 (Sensirion AG, n.d.) disposés selon le plan expérimental 3Δ (Roulet et al., 1991) dans un volume cubique normalisé [-1,1]³. Ces capteurs mesurent en temps réel les concentrations de particules fines PM2.5 et génèrent un vecteur de données synchronisées. La figure 1 illustre la disposition spatiale des capteurs : dix points répartis sur trois plans parallèles ($z = -1$, $z = 0$, $z = 1$), formant trois triangles inversés, avec un capteur central en (0,0,0). Deux approches ont été comparées : le modèle 3Δ simple. (Roulet et al., 1991), fondé sur une interpolation quadratique par moindres carrés, et le modèle 3Δ amélioré, intégrant un prétraitement des séries temporelles (moyennage, gestion des valeurs manquantes, calcul des différences temporelles), un algorithme d'apprentissage supervisé (XGBoost (Chen and Guestrin, 2016)) pour la prédition des dynamiques non linéaires, ainsi qu'une interpolation spatiale hybride combinant triangulation de Delaunay et pondération

inverse à la distance (Arnaud et al., n.d.; Lotrecchiano Nicoletta et al., 2021). Cette combinaison permet de produire une cartographie tridimensionnelle continue et physiquement cohérente des concentrations, en limitant les artefacts et les valeurs négatives.

Les deux modèles ont été évalués et comparés à travers une validation théorique (explosion ponctuelle, dilution gaussienne isotrope) et des essais en laboratoire (génération continue d'aérosol). Seul le modèle 3Δ amélioré a été retenu pour les essais sur banc de découpe, réalisés en configuration avec et sans aspiration, ainsi que pour le déploiement in situ lors d'opérations de finition manuelle sur granite, en raison de ses meilleures performances. Les comparaisons ont été effectuées à l'aide de deux capteurs placés dans la maille expérimentale, qui n'intervenaient pas dans la résolution du modèle mais servaient de points indépendants de validation. Les résultats ont été représentés à l'aide des bibliothèques Matplotlib et Plotly, sous forme d'iso-concentrations, de coupes orthogonales et d'animations temporelles, permettant d'analyser avec précision les gradients de concentration et les trajectoires d'exposition.

Point	X	Y	Z
1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1
3	0	0	-1
4	-1	-1	1
5	-1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	0
8	1	-1	0
9	1	0	-1
10	0	0	0

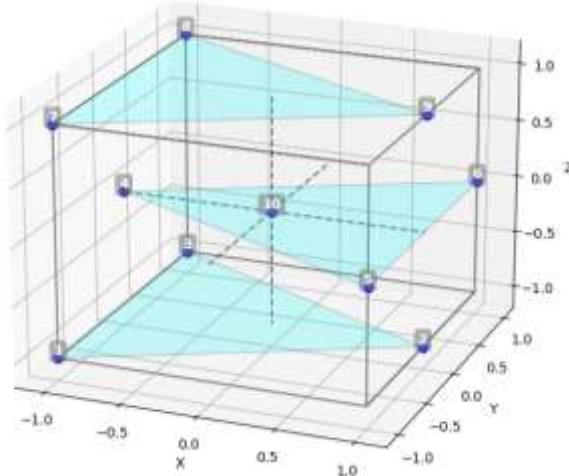


Figure 1: Coordonnées et représentation 3D des points de mesures du modèle 3Δ

3. RÉSULTATS

Les résultats obtenus mettent en évidence les limites du modèle 3Δ simple, qui tend à générer des gradients artificiels et des valeurs négatives lors de variations rapides de concentration. Ces instabilités se traduisent par des performances très hétérogènes, avec des coefficients de détermination dispersés (R^2 compris entre –0,70 et 0,96) et des erreurs absolues moyennes en pourcentage particulièrement élevées (MAPE de 16 % à plus de 200 %). L'intégration de l'algorithme XGBoost (Chen and Guestrin, 2016) associée à une interpolation spatiale hybride corrige ces biais et permet de restituer des dispersions plus réalistes, qu'elles soient sphériques ou directionnelles, avec des performances nettement améliorées (R^2 de 0,55 à 0,97 et MAPE réduit à 13–66 % selon les essais).

En laboratoire, lors des expériences de génération continue, le modèle simple parvient à reproduire des profils stationnaires mais reste difficile à interpréter, avec des R^2 allant de –0,51 à 0,93 et des MAPE de 18–205 %. Le modèle amélioré fournit en revanche des cartographies plus cohérentes et identifie clairement les zones de génération, avec des R^2 compris entre 0,55 et 0,95 et des MAPE ramenés à 14–36 %. Lors des essais impulsifs simulant une impulsion de Dirac, le modèle simple génère des artefacts, notamment des concentrations négatives et une forte dispersion des indicateurs (R^2 de –0,70 à 0,96 ; MAPE de 16–168 %), tandis que le modèle amélioré restitue une dilution radiale proche du comportement attendu, avec des erreurs inférieures à 3 % et des R^2 de 0,79 à 0,97, confirmant sa robustesse face aux phénomènes transitoires.

Les essais sur banc de découpe mettent en évidence des différences notables selon la présence ou non d'un dispositif d'aspiration. En configuration sans aspiration, les coupes sèches génèrent des concentrations supérieures à 3000 particules/cm³, correspondant à la limite fiable pour le SPS30. Au-delà de ce seuil, les résultats deviennent incertains et les prédictions du modèle s'écartent des mesures de référence, avec des performances hétérogènes (R^2 de –0,51 à 0,93 ; MAPE moyen de 12–42 %). Les cartographies tridimensionnelles montrent néanmoins la formation de panaches transitoires marqués en aval de la source, confirmant la capacité du système à restituer les gradients spatiaux. En configuration avec aspiration, les concentrations restent en-deçà de ce seuil critique, ce qui améliore nettement la cohérence des résultats. Les performances du modèle sont alors renforcées, avec des R^2 compris entre 0,88 et 0,99 et des MAPE réduits à 5–14 %. Les cartographies 3D mettent en évidence l'effet de l'aspiration, qui accélère la dilution du nuage généré et favorise une disparition plus rapide des panaches. Cette comparaison souligne que si le modèle

amélioré est robuste pour représenter les dynamiques spatiales et temporelles, sa précision dépend fortement des conditions expérimentales et de la zone de validité du capteur SPS30. Enfin, le déploiement *in situ* lors de finitions manuelles sur granite confirme ces observations. Le système suit fidèlement les pics d'exposition, ainsi que les décroissances par sédimentation, tout en révélant des dispersions asymétriques liées aux gestes de l'opérateur. Enfin, le déploiement *in situ* lors de finitions manuelles sur granite confirme ces observations. Le système suit fidèlement les pics d'exposition, ainsi que les décroissances par sédimentation, tout en révélant des dispersions asymétriques liées aux gestes de l'opérateur et à la configuration de la ventilation. La figure 2 présente la configuration expérimentale ainsi qu'une cartographie tridimensionnelle du nuage de particules obtenue à $t = 865$ s de prélèvement. Cette représentation est complétée par des coupes orthogonales dans les plans XY, XZ et YZ passant par l'origine (0,0,0), permettant de visualiser avec précision les gradients de concentration et la dynamique de dispersion. Les cartographies tridimensionnelles mettent en évidence des zones critiques, notamment derrière l'opérateur (Point G), et illustrent l'intérêt de cette approche pour la compréhension des expositions réelles en milieu industriel.

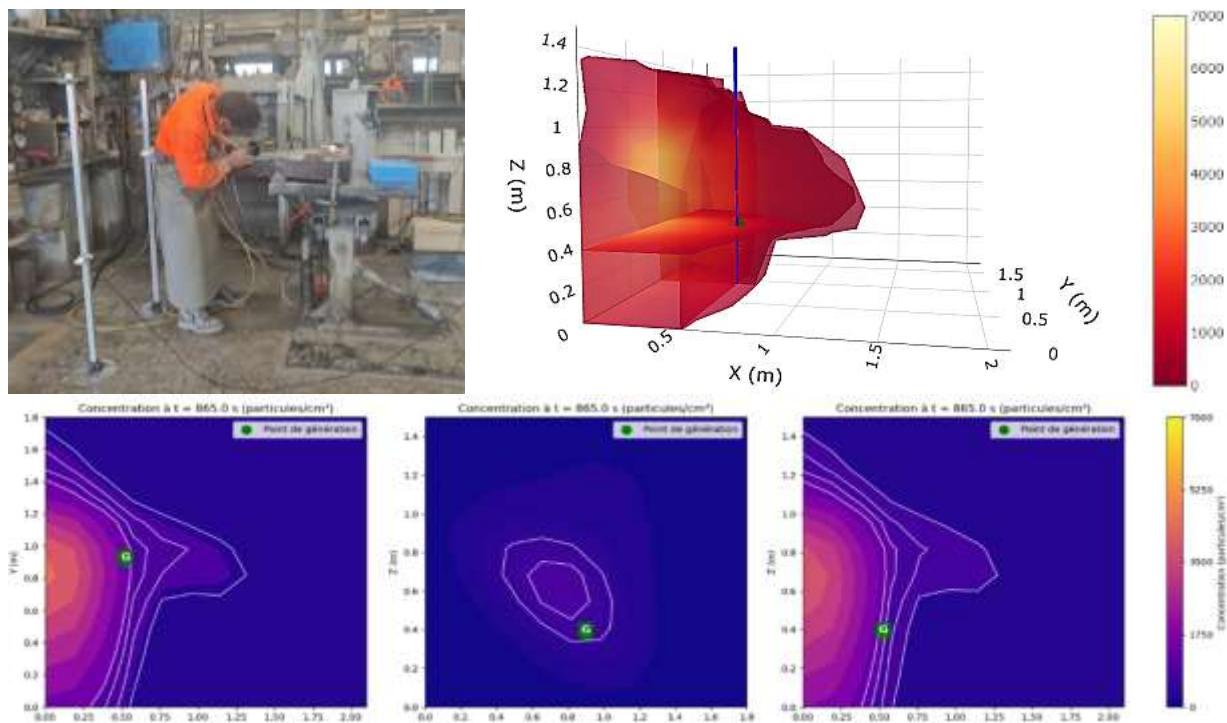


Figure 2 : Configuration expérimentale et cartographie tridimensionnelle du nuage de particules à $t = 865$ s, avec coupes orthogonales dans les plans XY, XZ et YZ passant par l'origine (0,0,0).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés ont permis de comparer le modèle 3Δ simple proposé par Roulet et al (Roulet et al., 1991) et le modèle 3Δ amélioré intégrant un prétraitement des séries temporelles, un algorithme d'apprentissage supervisé (XGBoost (Chen and Guestrin, 2016)) et une interpolation hybride. Les résultats montrent que si le modèle simple restitue certaines tendances stationnaires, il demeure limité par la génération d'artefacts (valeurs négatives, gradients artificiels) et par une forte dispersion des indicateurs de performance. À l'inverse, le modèle amélioré s'est révélé plus robuste et plus cohérent, tant en laboratoire (générations continue et impulsionale) que lors des essais appliqués sur banc de découpe avec et sans aspiration. En particulier, il a permis de mettre en évidence l'effet de l'aspiration sur la dilution des panaches, tout en confirmant la dépendance des performances à la zone de validité instrumentale du SPS30. Le déploiement *in situ* lors de finitions manuelles sur granite a enfin validé la pertinence de l'approche, en révélant des dispersions liées au travail de l'opérateur et en identifiant des zones d'exposition. Ces résultats ouvrent plusieurs perspectives. D'une part, l'application du modèle amélioré à des environnements industriels plus complexes permettra de tester sa robustesse face à des configurations de ventilation et de production variées. D'autre part, l'intégration de capteurs supplémentaires ou de technologies complémentaires (capteurs de référence, mesures gravimétriques) pourrait renforcer la validité métrologique et étendre la zone de confiance au-delà du seuil critique du SPS30. Enfin, l'exploitation des cartographies tridimensionnelles interactives dans une logique de prévention et de régulation des expositions constitue une voie prometteuse pour le transfert opérationnel, en offrant aux acteurs de la santé au travail un outil d'aide à la décision directement applicable en milieu industriel.

- Arnaud, M., Emery, X., de Chile, S., n.d. Estimation et interpolation de données spatiales.
- Chen, T., Guestrin, C., 2016. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System, in: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Lotrecchiano Nicoletta, Sofia Daniele, Giuliano Aristide, Barletta Diego, Poletto Massimo, 2021. Spatial Interpolation Techniques For innovative Air Quality Monitoring Systems. *Chem. Eng. Trans.* 86, 391–396. <https://doi.org/10.3303/CET2186066>
- Roulet, C.-A., Compagnon, R., Jakob, M., 1991. A Simple Method Using Tracer Gas to Identify the Main Airflow and Contaminant Paths within a Room. *Indoor Air* 1, 311–322. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1991.08-13.x>
- Sensirion AG, n.d. Sensor Specification Statement.