

Cartographie spatio-temporelle d'aérosols générés dans un environnement contrôlé au laboratoire

Houessou, N.^{1,2}, Gérardin K.¹, E. Monnoyer¹, N. Monta¹, S. Miron² et P. Duquenne^{1*}

¹INRS - Laboratoire d'Analyses Spatiales et Temporelles des Expositions Chimiques, INRS, 54519

Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

²Centre de Recherche en Automatique de Nancy, Université de Lorraine, CNRS, 54519 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

Courriel de l'orateur : philippe.duquenne@inrs.fr

TITRE

Cartographie spatio-temporelle d'aérosols générés dans un environnement contrôlé au laboratoire

RESUME

Cette étude examine la dispersion spatio-temporelle d'aérosols (PM_1) générés dans un chambre expérimentale contrôlée instrumentée par un réseau de capteurs préalablement calibrés. Les séries temporelles massiques et numériques obtenues montrent que les particules restent fortement concentrées à proximité de la source d'émission, avec une diffusion latérale restreinte, en accord avec leurs propriétés physico-chimiques qui limitent leur mobilité et favorisent leur dépôt. Les différentes approches de reconstruction mobilisées restituent de manière cohérente cette dynamique localisée. Ces résultats soulignent l'intérêt d'associer une instrumentation à haute résolution et des outils de cartographie spatio-temporelle pour analyser finement la dispersion des particules et mieux appréhender les conditions d'exposition en milieu de travail.

TITLE

Spatio-Temporal Mapping of aerosols generated in a controlled Environment

ABSTRACT

This study investigates the spatio-temporal dispersion of PM_1 microaerosols within a controlled experimental chamber instrumented with a wired network of pre-calibrated sensors. The resulting mass and number concentration time series show that the particles remain highly concentrated near the emission source, with limited lateral diffusion, consistent with their physico-chemical properties that constrain mobility and promote rapid losses by deposition. The different reconstruction approaches employed consistently reproduce this localized dynamic. These findings highlight the value of combining high-resolution instrumentation with advanced spatio-temporal mapping tools to characterize particle dispersion and improve the understanding of exposure conditions in occupational environments.

MOTS-CLÉS: aérosols, PM_1 , cartographie spatio-temporelle, réseau de capteurs, krigage, régularisation, PINNS

KEYWORDS: aerosols, PM_1 , spatio-temporal mapping, sensor network, Kriging, regularization, PINNS.

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La mesure des polluants atmosphériques, gazeux ou particulaires, présents dans les environnements professionnels, constitue un enjeu majeur pour l'évaluation et la gestion des expositions. La coexistence de ces différentes classes de polluants au sein d'un même espace de travail génère des dynamiques spatio-temporelles complexes et hétérogènes. Dans ce contexte, la cartographie spatio-temporelle des concentrations de polluants s'impose comme un outil méthodologique pertinent pour appréhender la variabilité des concentrations. En combinant des mesures issues de réseaux de capteurs et des approches de modélisation dédiées, la cartographie permet de reconstruire des champs de concentration continus de chaque type de polluant dans l'espace et le temps, fournissant ainsi une représentation plus fine et dynamique des environnements de travail. Elles contribuent notamment à détecter des zones d'accumulation locales ou transitoires, et à caractériser les mécanismes de dispersion induits par les sources, la ventilation ou l'agencement spatial. L'efficacité des méthodes de cartographie spatio-temporelle dépend toutefois de leur capacité à représenter fidèlement les propriétés physico-chimiques du contaminant étudié. Les mécanismes de diffusion, de convection, de dépôt, ou encore d'interaction avec les surfaces diffèrent fortement selon que l'on considère un polluant gazeux ou un aérosol présentant une distribution granulométrique complexe.

Afin d'éclairer cette problématique, cet article s'appuie sur un essai expérimental dédié (mené dans le cadre d'une thèse), au cours duquel des aérosols ont été générés dans un environnement contrôlé et les concentrations mesurées en différents points de l'espace à l'aide d'un réseau de capteurs. Les données acquises servent de base à la génération de cartographies spatio-temporelles à l'aide de plusieurs approches d'analyse que sont le krigage, la régularisation tensorielle et les réseaux de neurones informés par la physique. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure les propriétés spécifiques aux aérosols se reflètent visuellement sur les cartes et influencent la fidélité des reconstructions obtenues.

2. DEMARCHE EXPERIMENTALE

La démarche expérimentale repose sur le protocole illustré en Figure 1, composé des étapes suivantes: la préparation de la stratégie de mesure, la calibration des instruments, leur déploiement dans l'espace d'étude, la réalisation des acquisitions, puis le prétraitement et l'analyse des données en vue d'établir la cartographie spatio-temporelle.

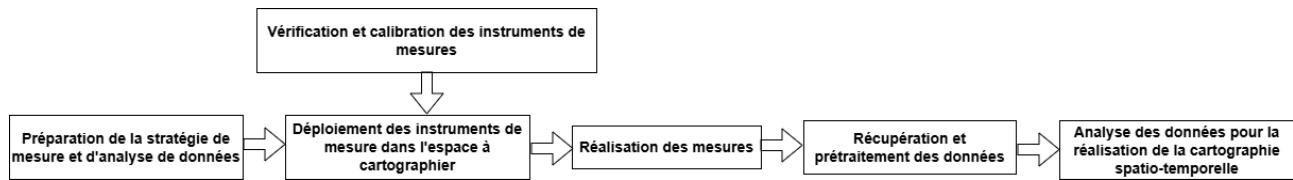


Figure 1. Protocole expérimental et analytique pour la collecte et la cartographie spatio-temporelle de données issues de réseaux de capteurs

L'essai a été conduit à partir d'une grille d'échantillonnage dite « régulière » (Figure 2) déployée dans une enceinte semi-hermétique de 175 m³ (10 m × 5 m × 3,5 m), située à l'INRS à Vandœuvre-lès-Nancy (Figure 3). Le protocole expérimental suit un plan en trois phases : (i) une phase de pollution, durant laquelle les microparticules sont générées à partir du point source S1 ; (ii) une phase de stabilisation, débutant à l'arrêt de la génération et permettant d'observer la dispersion du polluant dans un état quasi-stationnaire ; (iii) une phase d'épuration, au cours de laquelle le polluant est progressivement éliminé par un dispositif de renouvellement d'air, tel qu'un épurateur adapté.

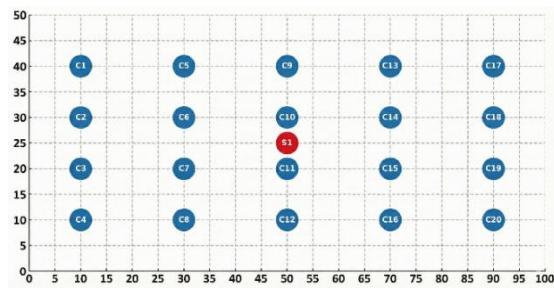


Figure 2. Grille d'échantillonnage des essais avec les points de mesures en bleu (C1 à C20), la source de pollution en rouge (S1).

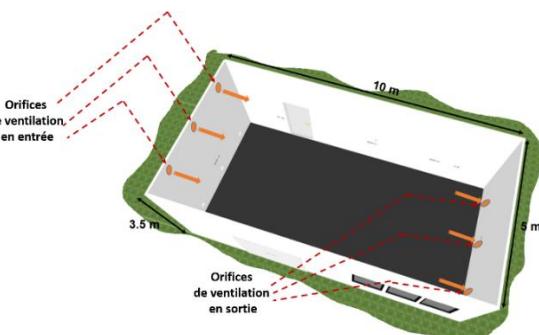


Figure 3. Illustration de l'enceinte expérimentale

La génération des aérosols a été réalisée au point S1 à l'aide d'un générateur d'aérosols salins Palas AGK 2000. Cet appareil nébulise une solution aqueuse de chlorure de sodium à 1.0% (m/m) suivie d'une évaporation contrôlée de l'eau excédentaire, produisant un aérosol solide de NaCl dont le diamètre modal est compris entre 70 et 120 nm. Le dispositif permet un réglage du débit d'aérosol et de la concentration massique grâce à un système de buses ultrasoniques couplé à un sécheur thermique, garantissant ainsi une stabilité et reproductibilité des émissions condition indispensable à toute caractérisation métrologique fiable.

Les concentrations massiques et numériques en aérosols ont mesurées avec des capteurs C1 à C20 du réseau filaire de capteurs. Ce réseau est composé de 20 capteurs particules SPS30 Sensirion installés dans l'enceinte expérimentale en fonction de la grille d'échantillonnage sur les points de mesures (Figure 4).



Figure 4. Installation du dispositif expérimental pour l'essai dans l'enceinte expérimentale.

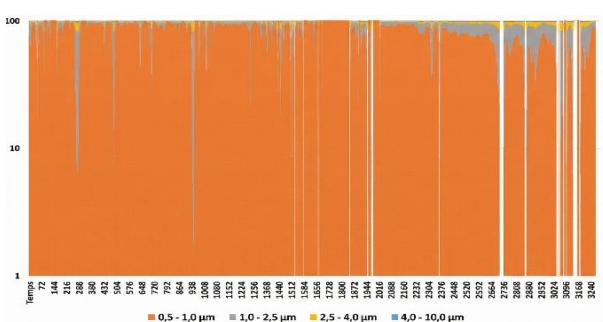


Figure 5. Évolution temporelle (en secondes) des concentrations en nombre de particules par classe granulométrique lors de l'essai.

L'ensemble des capteurs a été calibré préalablement dans une enceinte de 1 m³ afin d'assurer la fiabilité métrologique des mesures. Regroupés en grappe pour garantir une exposition homogène, ils ont été exposés

à un flux de microparticules généré par un Palas AGK 2000, avec comme appareil de référence, un DustTrak DRX 8533 qui fournissait les concentrations de référence. Les coefficients de calibration obtenus (Tableau 1) ont ensuite été appliqués à toutes les données enregistrées lors de l'essai. La figure 5 présente l'évolution temporelle de la distribution granulométrique des particules mesurées, réparties en quatre classes de tailles: 0,5-1,0 μm , 1,0-2,5 μm , 2,5-4,0 μm et 4,0-10,0 μm . Les données montrent une prédominance nette de la fraction 0,5-1,0 μm , qui constitue, à presque tout instant, la quasi-totalité des concentrations détectées. Les classes de tailles supérieures (1,0-2,5 μm , 2,5-4,0 μm , 4,0-10,0 μm) n'apparaissent qu'à titre minoritaire et sous forme de fluctuations ponctuelles, confirmant la faible proportion de particules de plus grand diamètre dans l'aérosol mesuré.

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
0.941	0.930	0.893	1.023	0.915	0.949	0.911	0.970	0.900	0.955
C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
1.145	1.128	1.017	0.914	1.100	1.145	1.040	1.076	1.031	1.018

Tableau 1. Coefficients d'étalonnage des capteurs SPS30

3. METHODES DE CARTOGRAPHIE SPATIO-TEMPORELLE

Après récupération et prétraitement, les résultats des mesures effectuées par le réseau de capteurs ont permis d'obtenir des séries temporelles des concentrations numériques et massiques pour les PM₁, mesurées par les capteurs C1 à C20 (Figures 6 et 7). Le choix de cette classe granulométrique est justifié par sa forte prédominance au sein de l'aérosol généré (Figure 5), faisant de cette taille un indicateur pertinent pour l'analyse des dynamiques spatio-temporelles.

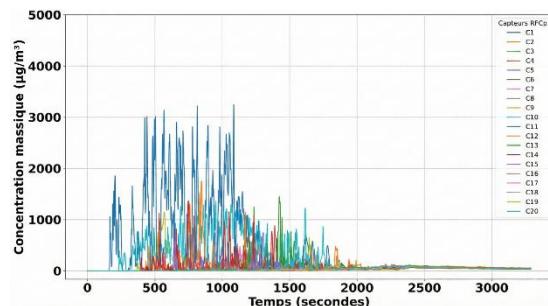


Figure 6. Séries temporelles des concentrations numériques en aérosols de 1,0 μm mesurées par les capteurs C1-C20 du réseau.

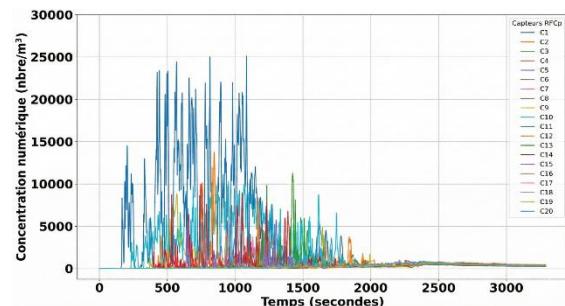


Figure 7. Séries temporelles des concentrations massiques en aérosols de 1,0 μm mesurées par les capteurs C1-C20 du réseau.

Pour la reconstruction du champ spatio-temporel des concentrations, trois méthodes ont été retenues :

- (i) Le krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique souvent utilisé pour ce type d'étude, il estime un champ spatial en combinant linéairement les mesures disponibles selon un variogramme (Li et al. (2018))
- (ii) La régularisation tensorielle, permettant une reconstruction conjointe espace-temps en imposant une régularité structurelle sur le tenseur des concentrations (Houessou et al., 2024)
- (iii) Les réseaux de neurones informés par la physique (Pinns), intégrant explicitement les lois de diffusion au processus d'apprentissage (Raissi et al., 2021)

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les cartes spatio-temporelles obtenues par les différentes méthodes ont été comparées afin d'évaluer leur capacité à restituer efficacement les dynamiques de dispersion des aérosols au cours de l'essai. La Figure 8 donne un exemple des cartographies de concentrations numériques pour les PM₁ aux instants T = 21 min et T = 24 min.

L'analyse des cartographies spatio-temporelles des PM₁ montre que les trois méthodes krigeage, régularisation tensorielle et Pinns convergent vers une même conclusion : les particules restent fortement confinées autour de la source d'émission, avec une diffusion latérale limitée dans toute l'enceinte. Les trois approches localisent ainsi systématiquement un noyau de forte concentration en position centrale, tandis que seule une atténuation progressive est observée en périphérie, sans réelle propagation homogène dans l'espace expérimental. Cette persistance d'un gradient marqué autour de la source résulte directement des propriétés physico-chimiques des aérosols de taille micrométrique. Les PM₁, bien que fines, présentent une mobilité réduite comparativement à des polluants strictement diffusifs (trajectoires demeurent fortement influencées par les interactions particule-air ainsi que par les pertes par dépôt sur les surfaces). Ces mécanismes limitent leur capacité à se disperser uniformément, favorisant au contraire leur maintien dans la zone d'émission et générant des distributions spatiales nettement concentrées et faiblement étalées. Ainsi, la

localisation persistante du panache, observée de manière cohérente sur les trois modèles, traduit la dynamique caractéristique des aérosols PM_1 , dominée par une diffusion lente et un transport restreint à proximité immédiate de la source.

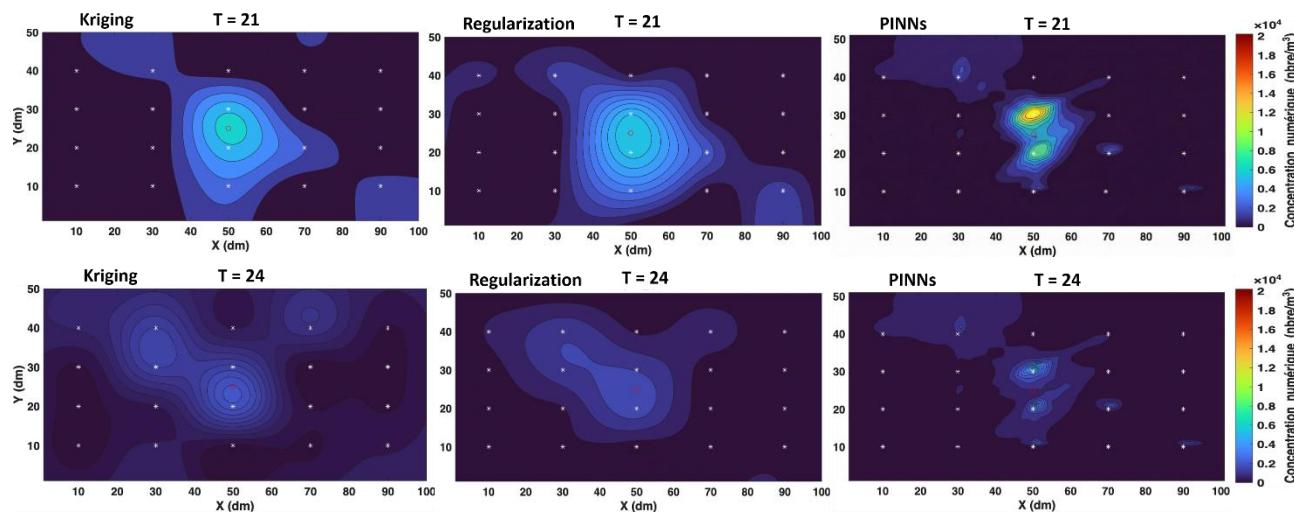


Figure 6. Cartographies spatio-temporelles des concentrations numériques des aérosols de taille $1 \mu m$ à $T = 21$ et $T = 24$ minutes de l'essai E1

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude a permis de caractériser la dispersion spatio-temporelle des PM_1 dans un environnement contrôlé à l'aide d'un réseau de capteurs préalablement calibrés. Les cartes reconstruites mettent en évidence un comportement fortement localisé : les PM_1 restent concentrées autour de la source d'émission, avec une diffusion latérale restreinte, ce qui reflète directement leurs propriétés physico-chimiques, notamment leur mobilité limitée et leur tendance au dépôt rapide sur les surfaces environnantes. L'exploitation conjointe des approches de reconstruction qu'il s'agisse du krigage, de la régularisation ou des Pinns confirme cette configuration générale, bien que leur niveau de lissage ou de structuration varie. Au-delà des différences méthodologiques, l'ensemble des résultats converge vers une même conclusion : la dynamique des PM_1 est dominée par des processus diffusifs faibles et par des dépôts, limitant leur propagation dans le volume étudié. Ces observations soulignent la pertinence d'une instrumentation dense associée à des méthodes avancées de cartographie pour décrire finement la dispersion des aérosols en milieu intérieur, et mettent en évidence l'importance d'intégrer les particularités physico-chimiques des particules dans l'interprétation des phénomènes et dans l'évaluation du niveau d'exposition en environnement de travail.

Des essais sont en cours pour la robustesse des cartes générées.

REFERENCES

- Li, J., Li, H., Ma, Y., Wang, Y., Abokifa, A. A., Lu, C., & Biswas, P. (2018). Spatiotemporal distribution of indoor particulate matter concentration with a low-cost sensor network. *Building and Environment*, 127, 138-147.
- Houessou, N., Miron, S., Gerardin, K., Galland, B., & Duquenne, P. (2024, September). A Tensor Regularized Approach to Spatio-Temporal Pollutant Cartography Applied to Working Environments. In 2024 9th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP) (pp. 63-67). IEEE.
- Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational physics*, 378, 686-707.