

ANALYSE DES DONNEES ISSUES D'INSTRUMENTS DE MESURE EN TEMPS REELS POUR LA CARTOGRAPHIE SPATIO-TEMPORELLE DES POLLUANTS DANS L'AIR DES LIEUX DE TRAVAIL : PREMIERS RESULTATS

P. Flores¹, P. Duquenne^{1*}, K. Gerardin¹, B. Galland¹, N. Monta¹, P. Martin¹ et S. Miron²

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

TITLE

Analysis of data from real-time measurement for the spatiotemporal cartography of airborne pollutants in occupational environments: first results

RESUME

La présente communication propose de faire un état d'avancement du projet concernant l'analyse de données. Une étude est en cours à l'INRS visant à concevoir des réseaux de capteurs pour polluants particulaires et gazeux en vue d'établir une cartographie spatiotemporelle utilisable dans les environnements professionnels. A ce stade, des méthodes, fondées sur le krigeage, ont été proposées pour l'analyse des données spatiotemporelles provenant des mesures effectuées par un réseau de capteurs Gaz dans un environnement professionnel. Les facteurs importants à prendre compte dans l'analyse ont été mise en évidence. Si les mesures n'ont pas permis de conclure concernant l'effet de la disposition des capteurs et des sources sur les résultats observés, les cartes obtenues sont opérationnelles et permettent de mieux comprendre les phénomènes. Un protocole a été mis en place pour une étude en conditions contrôlées. L'étude sera poursuivie avec des essais en conditions contrôlées intégrant le déploiement d'un réseau de capteurs pour particules, la prise en compte de et la faisabilité de fusion des données de cartographies spatiotemporelles avec d'autres données.

ABSTRACT

The present communication proposes to report on the progress of the project concerning data analysis. A study is underway at INRS to design sensor networks for particulate and gaseous pollutants with a view to establishing a spatiotemporal cartography that can be used in professional environments. At this stage, methods, based on kriging, have been proposed for the analysis of spatiotemporal data from measurements made by a network of gas sensors in a professional environment. The important factors to be taken into account in the analysis have been highlighted. Although the measurements did not allow conclusions to be drawn concerning the effect of the arrangement of the sensors and sources on the observed results, the maps obtained are operational and provide a better understanding of the phenomena. A protocol was set up for a study under controlled conditions. The study will be continued with tests under controlled conditions integrating the deployment of a network of particle sensors, the taking into account of and the feasibility of merging spatiotemporal mapping data with other data.

MOTS-CLES : réseau de capteurs, cartographie spatiotemporelle, analyse des données, krigeage

KEYWORDS: sensor network, spatiotemporal mapping, data analysis, kriging

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'utilisation d'une cartographie des concentrations peut s'avérer être un puissant instrument pour communiquer sur le risque dans un format facile à comprendre, mais aussi pour orienter les décisions sur les stratégies de prévention visant à réduire les expositions des travailleurs dans certaines situations. Une étude récente a démontré que la cartographie des dangers dynamiques, interpolant les concentrations dans l'espace et dans le temps, est beaucoup plus informative et représentative de l'évolution des niveaux de danger [1]. Les praticiens peuvent étendre la couverture temporelle et spatiale de la collecte de données en augmentant le nombre de capteurs statiques qui collectent des données de séries chronologiques à différents emplacements [2]. La représentation cartographique et l'analyse des données doivent livrer une indication la plus représentative possible des valeurs moyennes mesurées, mais également une indication de la variabilité des concentrations dans le temps et l'espace. Elles doivent aussi permettre d'apprécier les incertitudes liées aux mesures et aux calculs. Ces éléments reposent sur la qualité des mesures, mais aussi sur les méthodes utilisées pour traiter les données qui ont un impact à la fois sur la fiabilité de la cartographie et sur l'interprétation de résultats [2, 3]. Une étude est en cours à l'INRS visant à concevoir des réseaux de capteurs pour polluants particulaires et gazeux en vue d'établir une cartographie spatiotemporelle utilisable dans les environnements professionnels. Cette étude comporte un volet analyse de données et l'objectif de la présente communication de faire un état d'avancement du projet.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'étude a été organisée en 2 séries d'essais : une série d'essais théoriques fondés sur des simulations numériques et une série d'essais expérimentaux menés dans un conteneur de fret maritime.

2.1. Série d'essais théoriques préliminaires (simulations numériques)

Une série de simulations numériques exploratoires a été effectuée en vue de définir et de proposer des modèles et des outils pour l'analyse des données et des signaux multidimensionnels, adaptés à l'étude des variations spatiotemporelles des concentrations en polluants chimiques dans l'air des lieux de travail. Un algorithme a été conçu dans le but de produire des cartes de pollutions prenant en compte la taille de la matrice, la précision spatiale de la cartographie (pas spatial), des critères relatifs aux sources (nombre, position, amplitude et portée). Ces cartes ont été utilisées afin d'évaluer les performances de différentes méthodes de cartographie comme le krigeage [4] ou la méthode SLRMC (Smoothing Low-Rank Matrix Completion) [5]. Les erreurs de reconstruction ont été évaluées pour chaque méthode et les principaux facteurs ont été investigués (nombre et positions de capteurs, type de modèle de variogramme). Toutes les simulations et les cartographies ont été effectuées sur MATLAB (MathWorks® inc, EU, version R2020a).

2.2. Conteneur utilisé pour les essais expérimentaux

Les mesures ont été effectuées dans un conteneur de fret maritime, situé en extérieur sur le site de l'INRS (Vandœuvre-lès-Nancy) et constituant un parallélépipède rectangle droit de 2,3 m de côté, de 11,9 m de longueur et 2,5 m de hauteur (Figure 1). Le conteneur dispose de deux portes hermétiques situées à l'avant et comportant une bouche d'aération sur laquelle a été connecté un épurateur d'air. Pour les besoins de l'étude, le conteneur a été numérisé sur un plan en une matrice de taille 119x23 avec un maillage de carrés de 10 cm de côté. Chaque maille a été codifiée avec une lettre entre A et W pour la largeur du conteneur et un numéro entre 1 et 119 pour sa longueur. Un marquage au sol a été réalisé dans le conteneur afin de visualiser le système de coordonnées et de faciliter le positionnement des sources et des détecteurs.

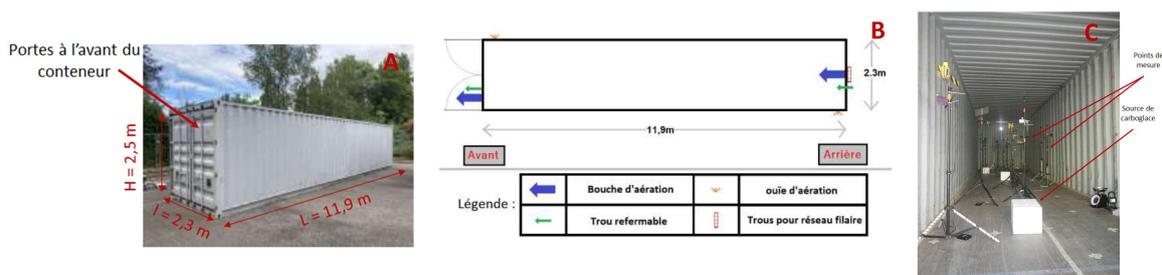


Figure 1. Description du conteneur maritime utilisé pour l'étude. A : vue extérieure ; B : vue du dessus ; C : vue intérieure

2.3. Stratégie de déploiement des capteurs et des sources pour les essais expérimentaux

Les capteurs ont été déployés dans le conteneur selon deux dispositions, une disposition dite régulière « R » et une disposition dite aléatoire « A » (Figure 2A). Pour la disposition « R », les capteurs ont été placés dans une configuration rectangulaire sur 7 lignes et 2 colonnes. Pour la disposition « A », les capteurs ont été placés par tirage aléatoire, en assurant une répartition uniforme dans le conteneur ; trois dispositions notées A1, A2 et A3 ont été ainsi définies pour les essais. Par ailleurs, 3 sources ont été placées dans le conteneur et les essais ont été effectués en faisant varier la position des sources selon trois configurations S1, S2, et S3 (Figure 2A).

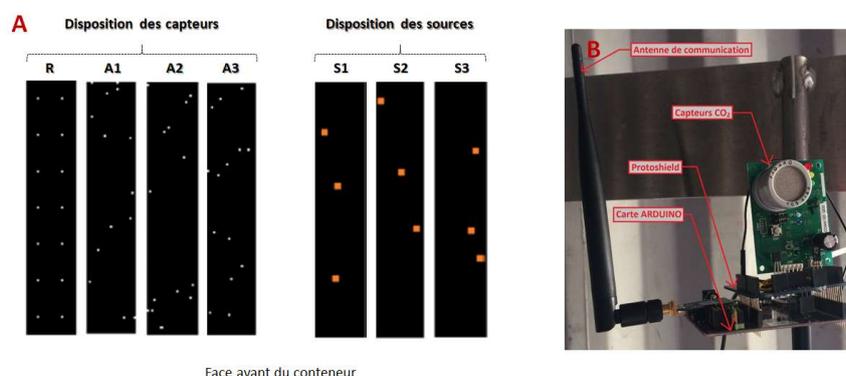


Figure 2 : A : Dispositions des sources et des capteurs dans le conteneur mises en œuvre lors des essais (vue du dessus). Les coordonnées précises ont été enregistrées. Les capteurs ont été déployés avec une disposition dite régulière « R » et trois dispositions dites aléatoires « A1, A2 et A3 ». Les 3 sources ont été déployées selon trois configurations S1, S2, et S3. B : Balise constituant le réseau de capteurs utilisés pour les mesures.

2.1. Organisation générale des essais expérimentaux

Les essais ont été programmés sur 6 journées répartis sur le mois de juillet 2020 de manipulations. Pour chaque essai, les sources et les capteurs ont été disposés dans le conteneur, les portes ont été fermées puis l'épurateur a été mis en marche lorsque la concentration atteignait environ 4000 ppm_v. Les portes ont ensuite été ouvertes puis les sources et les capteurs ont été repositionnés dans une autre configuration ; le cycle de pollution/dépollution a alors été reproduit. Pour chaque journée, 3 essais ont été effectués, correspondant chacun à l'une des configurations de déploiement des capteurs et des sources présentées dans la Figure 2. Les mesures effectuées ont porté sur la concentration en CO₂, la température et l'humidité relative de l'air ainsi que la vitesse de sublimation de la carboglace, et les données ont été analysées selon les méthodes indiquées dans la section 2.

2.2. Aperçu des méthodes de mesure mises en œuvre

Les mesures ont été effectuées par le biais de 14 balises réparties dans le volume du conteneur, sur un plan à 1,5 m du sol. Un réseau de capteurs conçus à l'INRS a été utilisé pour les mesures (Figure 2B); il a été complété par des détecteurs ToxiRAE Pro CO₂ (RAE Systems France, France). Chaque balise enregistrait la concentration en CO₂, ainsi que l'humidité relative et la température de l'air, et a été étalonnée avant les essais.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Bilan de l'étude théorique

Les simulations numériques ont confirmé la faisabilité de la cartographie avec les méthodes étudiées (Krigage, Matrix Completion). Elles indiquent que le nombre de capteurs utilisés ainsi que leurs dispositions dans l'espace à cartographier (régulière ou aléatoire) sont des paramètres déterminants pour la qualité de la cartographie. Les simulations montrent également que les paramètres des méthodes (le modèle de variogramme¹ pour le kigeage et l'hyperparamètre de lissage pour SLRMC) jouent sur la continuité et la cohérence spatiale des cartes obtenues. Ces résultats ont permis de concevoir les modèles mathématiques nécessaires aux essais expérimentaux et déterminer le plan d'expérience pour ces derniers.

3.2. Conditions d'intervention de réalisation des essais expérimentaux

Dix-sept essais expérimentaux ont pu être menés au cours de l'étude (certains essais ont été répétés), permettant de tester toutes les dispositions des capteurs et des sources envisagées.

3.3. Evolution de la concentration en polluant dans le conteneur

La fermeture des portes du conteneur se traduit par une augmentation progressive de la concentration en CO₂ dans l'air de ce dernier sous l'action de la sublimation de la carboglace (Figure 3, étapes 1A, 2A et 3A). La mise en route de l'épurateur se traduit par un pic de concentration attribuable à un afflux d'air important au niveau des capteurs (Figure 3, étapes 1B, 2B et 3B) puis la dépollution se poursuit (Figure 3, étapes 1C, 2C et 3C) jusqu'à l'ouverture des portes (Figure 3, O).

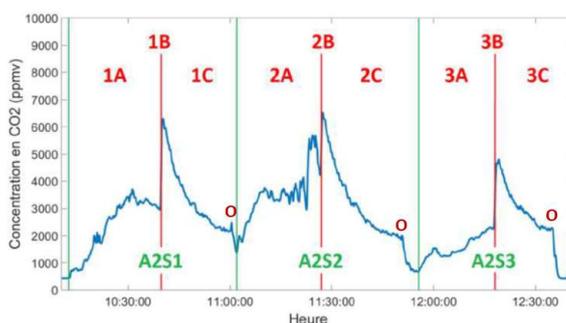


Figure 3 : Evolution de la concentration en CO₂ dans le conteneur. Exemple pour une journée avec trois essais successifs (1, 2 et 3) qui ont permis d'expérimenter les configurations A1S2, A2S2 et A2S3 (enregistrement de la balise N°10). Les lettres indiquent les phases d'un essai expérimental. **A** : contamination du conteneur, **B** : mise en route de l'épurateur et **C** : décontamination du conteneur. **O** : ouverture des portes

3.4. Influence de la méthode choisie pour l'analyse de données

La cartographie des données obtenues lors de l'essai RS2 a été effectuée avec les deux méthodes par krigeage et par SLRMC qui se sont révélées être les plus performantes en terme de reconstruction lors de la série d'essais théoriques préliminaires. Les résultats indiquent que seule la méthode par krigeage permet

¹ Le variogramme est une fonction mathématique utilisée en géostatistique, en particulier pour le krigeage, caractérisant la dissimilarité spatiale des mesures.

d'obtenir une cartographie de concentration ayant un sens physique (données non montrées dans ce résumé) ; l'emploi de la méthode SLRMC requiert un nombre de balises de mesurage beaucoup plus important pour l'obtention d'une cartographie exploitable. Ce résultat confirme que le choix de la méthode d'analyse de données est dépendant de la stratégie de mesures déployée. Dans ce qui suit, la méthode par krigeage a été utilisée.

3.5. Influence des paramètres du variogramme (méthode par krigeage)

Les données collectées au cours des essais ont permis d'étudier l'influence de la portée du variogramme et du type de modèle utilisé lors de la modélisation de celui, sur les résultats de cartographie. Les résultats indiquent que la portée du variogramme varie au cours du temps pour tous les essais effectués et peut être faible à certains moments (phénomène se traduisant par l'apparition d'un cercle de concentration autour du capteur). A ces moments, la variabilité des données est importante et, au-delà d'une certaine distance (relativement faible), la corrélation spatiale des données ne permet pas d'estimer une meilleure valeur que la moyenne de la pollution des 14 capteurs. L'analyse aboutie à des cartes pour lesquelles l'information des capteurs n'est pas suffisante pour cartographier l'ensemble du volume investigué. Pour pallier ce phénomène, la séquence temporelle des portées a été filtrée temporellement afin d'assurer une certaine continuité de la cartographie dans le temps. Les résultats ne montrent pas d'améliorations substantielles de la cartographie, mais le filtrage permet de diminuer légèrement la continuité temporelle des cartes. (Données non montrées dans ce résumé). Une étude spécifique reste nécessaire sur le sujet.

Trois modèles populaires dans la littérature pour de la modélisation du variogramme expérimental, ont été comparés : exponentiel, gaussien et sphérique. Les résultats montrent que les modèles exponentiel et gaussien sont plus adaptés aux données produites mais que le choix définitif est fonction du rendu attendu pour la cartographie et de la dynamique spatiale du phénomène observé (Données non montrées dans ce résumé). Notamment, le modèle choisi ne sera pas forcément la même si la pollution à cartographier est de nature gazeuse ou particulaire. Dans la suite de l'étude, le modèle exponentiel sera utilisé car il a une portée plus grande en moyenne et permet d'obtenir des cartes plus cohérentes avec le phénomène physique de diffusion spatiale du CO₂.

3.6. Influence de la disposition des capteurs et des sources

Le modèle établi a permis de construire les cartes spatiotemporelles pour toutes situations prévues dans le plan d'expérience de l'étude. La cartographie spatiale (à un instant donné), est donnée pour toutes les configurations décrites dans la Figure 4 et un exemple de cartographie spatiotemporelle est donné au lien suivant (<https://youtu.be/7DtL8gtIx0>).

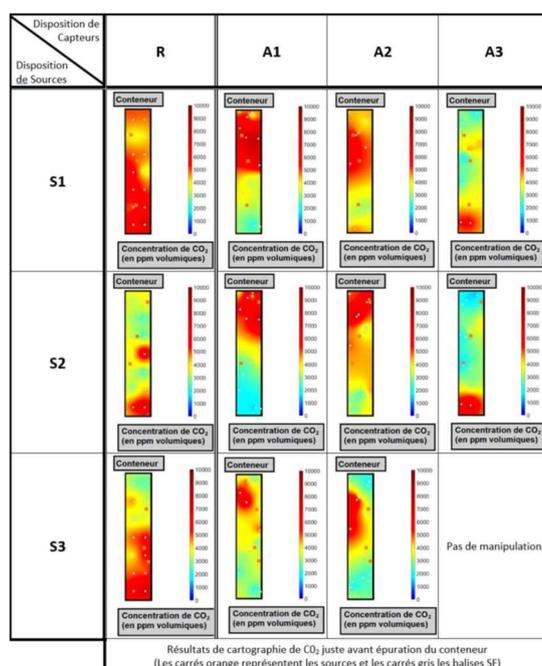


Figure 4 : Résultats de cartographie des concentrations CO₂ dans le conteneur maritime pour les 12 configurations envisagées. Les données correspondent aux concentrations en CO₂ mesurées par les capteurs juste avant le déclenchement de l'épurateur et elles ont été analysées par le biais de la méthode par krigeage avec modèle exponentiel.

Les résultats indiquent une évolution des concentrations en CO₂ dans le volume étudié variable en fonction des configurations (Figure 4). Ils permettent de visualiser les événements qui affectent les concentrations dans le conteneur. La dynamique des concentrations permet de visualiser les différentes phases des essais,

notamment l'accumulation progressive de CO₂ dans le conteneur, la mise en route de l'épurateur et la diminution des concentrations lors de la phase d'épuration (<https://youtu.be/7DtL8gtIx0>). Les résultats sont en faveur d'un effet de la disposition des sources et des capteurs sur les cartographies obtenues mais un travail complémentaire en conditions plus contrôlées est nécessaire afin mieux appréhender l'implication d'autres facteurs (émission des sources, température etc.) sur les phénomènes observés. Ils permettent toutefois de mieux comprendre la dynamique de la pollution dans les conteneurs investigués.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude a permis de proposer des méthodes, fondées sur le krigeage, pour l'analyse des données spatiotemporelles provenant des mesures effectuées par un réseau de capteurs Gaz dans un environnement professionnel. Elle met aussi en évidence les facteurs importants à prendre compte dans l'analyse. Si les mesures n'ont pas permis de conclure concernant l'effet de la disposition des capteurs et des sources sur les résultats observés, les cartes obtenues sont opérationnelles et permettent de mieux comprendre les phénomènes. Un protocole a été mis en place pour une étude en conditions contrôlées. L'étude sera poursuivie avec des essais en conditions contrôlées intégrant le déploiement d'un réseau de capteurs pour particules, la prise en compte de et la faisabilité de fusion des données de cartographies spatiotemporelles avec d'autres données issues, notamment, de la numérisation des environnements professionnels et la localisation des instruments de mesure et des personnes dans ces derniers.

5. REFERENCES

1. Ludwig G, Chu T, Zhu J, Wang H, Koehler K.: The annals of applied statistics 2017, 11(1):139-160.
2. Lake K, Zhu J, Wang H, Volckens J, Koehler KA.: Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2015, 12(4):256-265.
3. Koehler KA, Peters TM. The Annals of Occupational Hygiene 2013, 57(5):558-570.
4. Krige DG.: Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 1951, 52(6):119-139.
5. Hu Y, Zhou W, Wen Z, Sun Y, Yin B.: Mathematical Problems in Engineering 2013, 2013:461089.