

THÈSE DE DOCTORAT

**Évaluation et optimisation de la qualité de l'air dans les enceintes
ferroviaires souterraines : analyse des concentrations en
particules et efficacité des systèmes de filtration**

**Assessment and optimization of air quality in underground
railway stations: analysis of PM concentrations and the
effectiveness of filtration systems**

Valisoa Miadana Rakotonirinjanahary

RÉSUMÉ

Les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) présentent des concentrations en particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) souvent supérieures aux seuils d'exposition recommandés par l'OMS, ainsi qu'à celles mesurées dans l'air extérieur. Cette situation peut avoir des impacts négatifs, tant sur la santé des voyageurs et des agents que sur l'image et l'attractivité des transports ferroviaires. Consciente de ces enjeux, la SNCF mène depuis 2016 des campagnes de mesure pour suivre les PM_{2.5} et PM₁₀ dans l'ensemble de ses gares souterraines franciliennes. Parmi ces gares, trois sont instrumentées en continu depuis plusieurs années. De plus, des expérimentations de filtration de l'air au niveau des quais ont été réalisées pour améliorer la qualité de l'air dans ces environnements spécifiques. Cependant, l'analyse et l'interprétation de ces mesures représentent aujourd'hui encore un vrai défi, notamment la définition de valeurs de référence. C'est la raison pour laquelle la SNCF a souhaité explorer et développer de nouvelles approches.

Les travaux présentés dans cette thèse s'attèlent donc au développement de nouvelles méthodes d'analyse, adaptées aux dynamiques spécifiques des EFS, notamment les très fortes fluctuations des concentrations en particules. Pour ce faire, à partir des mesures longue durée (plusieurs années), nous avons développé une méthodologie rigoureuse et robuste pour déterminer les profils journaliers types dans chaque gare et un coefficient d'amplitude journalier (DAC – daily amplitude coefficient), en distinguant jours de semaine et weekends. Nos résultats révèlent une évolution saisonnière des concentrations, avec des niveaux plus élevés en été et plus faibles en hiver, qui diffère donc de l'évolution rapportée dans la littérature dans les EFS et dans l'air extérieur. L'approche DAC permet de s'affranchir des fluctuations saisonnières pour analyser l'évolution des concentrations de particules sur le long terme. Elle facilite également les comparaisons entre les différentes gares et contribue à identifier quelques paramètres influençant les concentrations en particules, tels que la fréquence des trains, la présence de systèmes de ventilation, la typologie de la gare (souterraine ou partiellement souterraine) ou la ligne ferroviaire concernée.

Une analyse plus poussée a été réalisée à l'aide de Modèles Additifs Généralisés (GAM). Elle a permis d'identifier les facteurs les plus importants et de quantifier leur impact, parmi lesquels l'heure de la journée, reflétant la fréquence des trains, la période de l'année et les niveaux de CO₂. Les effets de la température et de l'humidité, mesurés au niveau du quai de la gare, sont moins marqués, et la contribution de l'air extérieur est très faible, ce qui suggère que les principaux facteurs influençant les concentrations de particules proviennent principalement de l'intérieur des EFS.

Enfin, trois expérimentations de dépollution ont été évaluées : une technologie d'ionisation positive, une technologie par voie humide et une filtration classique. Les résultats obtenus via DAC et GAM montrent une efficacité variable selon les technologies et les classes de particules (PM₁₀ et PM_{2.5}), avec des taux d'efficacité allant de 0 à 34 % selon la technologie utilisée. Nous avons également mis en œuvre un modèle de réseaux de neurones récurrents (LSTM), qui permet d'analyser l'efficacité de ces systèmes de filtration de manière quasi immédiate et non a posteriori des concentrations.

Cette thèse propose ainsi une méthodologie rigoureuse et adaptable pour comprendre la dynamique des concentrations en particules dans les EFS, applicable aux particules mais aussi à d'autres polluants. Les protocoles développés fournissent des outils immédiatement exploitables par SNCF, qui pourra les utiliser pour améliorer de manière durable la qualité de l'air dans ces environnements complexes. Des recommandations concernant les futures campagnes de mesures ont également été émises.

Mots clés :

Qualité de l'air, pollution intérieure, particules, enceintes ferroviaires souterraines, systèmes de filtration

ABSTRACT

Underground railway stations (URS) often exhibit concentrations of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) that exceed the exposure limits recommended by the World Health Organization, as well as those measured in outdoor air. This situation can have negative impacts, both on the health of travelers and employees and on the image and attractiveness of rail transport. Aware of these issues, since 2016 SNCF has been conducting measurement campaigns to monitor $PM_{2.5}$ and PM_{10} across its underground stations in the Île-de-France region. Among these stations, three have been continuously instrumented for several years. Moreover, air filtration experiments at platform levels have been carried out to improve air quality in these specific environments. However, analyzing and interpreting these measurements remains challenging, particularly in defining reference values. This is why SNCF wished to explore and develop new approaches.

The work presented in this thesis focuses on the development of new analysis methods, adapted to the specific dynamics of URS, especially the very strong fluctuations in particle concentrations. Using long-term measurements (several years), we have developed a rigorous and robust methodology to determine typical daily profiles in each station and a daily amplitude coefficient (DAC), distinguishing weekdays from weekends. Our results reveal a seasonal evolution of concentrations, with higher levels in summer and lower in winter, which differs from the trends reported in the literature in URS and outdoor air. The DAC approach allows us to disregard seasonal fluctuations to analyze the long-term evolution of particle concentrations. It also facilitates comparisons between different stations and contributes to identifying some parameters influencing particle concentrations, such as train frequency, the presence of ventilation systems, the type of station (underground or partially underground), and the railway line concerned.

A more detailed analysis was carried out using Generalized Additive Models (GAM). It helped identify the most significant factors and quantify their impact, including the time of day, reflecting train frequency, the period of the year, and CO_2 levels. The effects of temperature and humidity, measured at the platform level, are less pronounced, and the contribution of outdoor air is very low, suggesting that the main factors influencing particle concentrations mainly originate from within the URS.

Finally, three depollution experiments were evaluated: a positive ionization technology, a wet technology, and traditional filtration. The results obtained via DAC and GAM show variable effectiveness depending on the technologies and particle classes (PM_{10} and $PM_{2.5}$), with efficiency rates ranging from 0 to 34% depending on the technology used. We also implemented a model of recurrent neural networks (LSTM), which allows for analyzing the effectiveness of these filtration systems almost immediately and not a posteriori of the concentrations.

This thesis thus proposes a rigorous and adaptable methodology for understanding the dynamics of particle concentrations in URS, applicable to particles but also to other pollutants. The protocols developed provide immediately usable tools for SNCF, which can use them to sustainably improve air quality in these complex environments. Recommendations for future measurement campaigns have also been outlined.

Keywords:

Air quality, indoor pollution, particulate matter, underground railway stations, filtration systems