

# CARACTERISATION ET IDENTIFICATION DES SOURCES DE PARTICULES DANS L'AIR DES ENCEINTES FERROVIAIRES SOUTERRAINES

S. Ngo<sup>\*1</sup>, G. Brun<sup>1</sup>, N. Gournet<sup>1</sup>, F. Ghazzi<sup>1</sup>, T. Bouillet<sup>1</sup>, et H. Carrilho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agence d'Essai Ferroviaire, SNCF Voyageurs – Direction de l'Ingénierie du Matériel, 94407 Vitry sur Seine Cedex, France  
\*sylvie.ngo@sncf.fr

## TITLE

**Characterization and source apportionment of particulate matter in underground railway station**

## RESUME

Des prélèvements ont été réalisés sur le quai d'une gare souterraine afin d'étudier la caractérisation chimique des particules en suspension dans l'air des enceintes ferroviaires souterraines et d'identifier les sources d'émissions de ces particules. Des prélèvements ponctuels des particules dans l'air à l'extérieur de la gare ont également été effectués.

Les concentrations moyennes sur les 5 campagnes de mesure sont de 129,78 µg/m<sup>3</sup> pour les particules PM10. Les PM10 sont en moyenne composés à 52% de métaux et de composés élémentaires principalement du Fer, du silicium et du baryum. Le carbone élémentaire et la matière organique représentent respectivement 8% et 14% des PM10. La famille des ions représente 2% de la masse des PM10.

L'identification des sources d'émission des PM10 et la détermination de leur contribution ont été réalisées à l'aide du modèle PMF (Positive Matrix Factorization). Il en résulte que 82,1% des PM10 proviennent de l'activité ferroviaire et 17,9% de ces particules sont apportés par l'air extérieur. Néanmoins, à cause de la simultanéité des émissions d'origine ferroviaire et leur composition chimique proche, il est difficile de séparer davantage ces sources d'origine ferroviaire avec le modèle PMF et avec les données disponibles actuellement. Cette étude souligne la nécessité d'approfondir nos connaissances sur la composition chimique des émissions d'origine ferroviaire et l'identification de composés traceurs plus spécifiques de chacune des sources ferroviaires de particules en suspension dans l'air.

## ABSTRACT

This study presents the chemical characterization and the source apportionment of particulate matter (PM10) in an underground railway station. The sampling site is the platform of an underground SNCF station. Outdoor PM were also sampled in the roof of this station. During the 5 measurement campaigns, the mean concentration of PM10 was 129.78 µg/m<sup>3</sup>. PM10 were composed by 52% of metals and elemental compounds, mostly iron, silicon, and barium. Elemental carbon and organic matter represent respectively 8% and 14% of the mass of PM10. Ionic species represent 2% of the mass of PM10.

Source apportionment conducted by PMF analysis shows that 82.1% of PM10 are emitted by the railway traffic. 17.9% of the PM10 in that underground station are coming from the outdoor air. Nevertheless, the combination of simultaneous emissions from railway sources and the similarity between their chemical compositions make it difficult to further separate emissions from railway traffic. This study underlines the need to expand our knowledge on the chemical composition of railway emissions and to define more specific tracer compounds of each railway sources of PM.

**MOTS-CLES** : PM10, ferroviaire, sources, PMF / **KEYWORDS** : PM10, railway, sources, PMF

## 1. INTRODUCTION

Santé Publique France révèle que la pollution aux particules fines de l'air extérieur est responsable de 40 000 morts par an en France Medina *et al* (2021). Sur les recommandations de l'Anses, les normes et les réglementations devraient continuer à être renforcées, notamment dans les gares souterraines où il n'existe toujours pas de réglementation spécifique mais où les concentrations en particules, notamment métalliques, sont souvent supérieures à celles mesurées dans l'air ambiant. ANSES Saisine n°2011-SA-0265 (2015).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui vise à caractériser la composition chimique des PM10 présents dans les enceintes ferroviaires souterraines (EFS) afin d'identifier leurs sources d'émissions en utilisant le modèle PMF version 5.0 (Positive Matrix Factorization) développé par l'US EPA. Ces résultats permettront *in fine* l'identification des solutions de prévention de la pollution afin de protéger les agents travaillant dans les EFS ainsi que les voyageurs qui y circulent.

## 2. MATERIELS ET METHODES

Le site de mesure est une gare souterraine appartenant au réseau SNCF située en Ile de France. Cette gare comporte deux voies et un quai central entièrement souterrain. Des tunnels encadrent la gare à chaque extrémité du quai.

Plusieurs instruments ont été déployés sur le quai de la gare pour réaliser des mesures de septembre 2020 à mai 2021. Un analyseur TEOM-FDMS (Thermo Scientific), géré par Airparif, a permis le suivi en continu de la

concentration massique de PM10. Des prélèvements intégratifs ont également été réalisés sur le quai à l'aide de deux préleveurs Partisol (Thermo Scientific) munis d'une tête de prélèvement PM10. Ces prélèvements ont été effectués lors de 5 campagnes de mesure d'un mois, réparties entre septembre 2020 et mai 2021.

Un point de mesure situé sur le toit de la gare vient compléter ces prélèvements afin de permettre l'obtention d'informations sur les caractéristiques chimiques des PM dans l'air ambiant à proximité de la gare. Pour cela, deux dispositifs portables de prélèvements sur filtres ont été déployés : un impacteur personnel PEM 200 (MSP-TSI) et une tête de prélèvement CATHIA (Tecora).

Les composés chimiques recherchés sur les PM prélevées aux deux points de mesure et les techniques analytiques associées sont présentés dans le Tableau 1. Afin de permettre l'analyse de cette liste de composés chimiques, les prélèvements de PM ont eu lieu en simultanément sur des filtres en quartz (Tissuquartz Pallflex, diamètre 47mm) et des filtres en ester de cellulose (Millipore, diamètre 47mm). Les concentrations en carbone organique (OC) ont été converties en concentration de matière organique (OM) en utilisant un facteur de conversion de 1,8 Favez *et al* (2010). Ce facteur défini pour des particules présentes en air ambiant a été pris en compte à défaut d'avoir un facteur de conversion propre aux particules dans l'air des environnements ferroviaires souterrains.

Tableau 1 : Composés chimiques analysés dans les PM10 prélevés

Composés	Techniques d'analyse
Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, S, Si, Zn	ICP-OES après digestion acide en four micro-ondes fermé
As, Cd, Ni, Pb, Sb, Sn, Ti	ICP-MS après digestion acide en four micro-ondes fermé
EC, OC, TC	Méthode thermo-optique par transmission avec protocole EUSAAR2 (Sunset Lab)
Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Chromatographie ionique avec détection conductimétrique

Le modèle PMF version 5.0 a été appliqué pour identifier les sources d'émissions des PM10 sur le quai et de déterminer la contribution de chacune de ces sources à partir de la mesure de la composition chimique de ces particules. Pour cela, un jeu de données constitué de 96 échantillons (prélèvements Partisol) a été établi. Pour chacun des échantillons, les concentrations de 26 composés chimiques constitutifs des PM10 ont été renseignées.

### 3. RESULTATS

Sur la totalité des campagnes, les concentrations horaires moyennes en PM10 sur le quai sont respectivement de 129,78 µg/m<sup>3</sup>. Ces particules PM10 sont composées en moyenne à 52% de métaux et de 2% d'espèces ioniques. Le carbone élémentaire et la matière organique représentent respectivement 8% et 14% des PM10 (Figure 1). Malgré le nombre conséquent d'espèces chimiques recherchées dans cette étude, une moyenne de 24% de la masse des PM10 n'a pu être identifiée. Cette portion nommée « Autre » (Figure 1) semble être majoritairement composée d'oxygène. En effet, Querol *et al* (2012), Salma *et al* (2009) ou encore Smith *et al* (2020) montrent qu'une part significative des métaux et composés élémentaires se trouvent sous la forme d'oxyde.

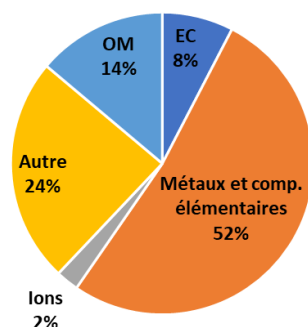


Figure 1 : Composition chimique moyenne des PM10 présents sur le quai

Concernant le travail d'identification des sources émettrices de PM dans les EFS, deux familles de sources ont été investiguées : les éléments du matériel roulant et des infrastructures ferroviaires émetteurs de particules ainsi que les particules provenant de l'air extérieur à la gare.

La recherche de la composition chimique des différents éléments du matériel roulant ferroviaire (Normes NF F01-135, NF EN 13262, NF F21-267, NF EN 50367) sur la ligne étudiée et de ses infrastructures (Normes NF F50-201-1, NF EN 13674-1+A1, NF F42-149, NF EN 50149) connus pour être émetteurs de particules dans l'air (Tableau 2 : Composition chimique des éléments du matériel roulant et des infrastructures ferroviaires

émetteurs de particules (Tableau 2) montre que le fer, le carbone ou encore le cuivre se retrouvent dans la composition de plusieurs de ces éléments émetteurs.

Tableau 2 : Composition chimique des éléments du matériel roulant et des infrastructures ferroviaires émetteurs de particules

Elément	Composition
Frein (Garnitures et semelles)	Fe (20-75%), Ba (8-16%), Si (3-15%), Ca (2-14%), Cu (0,2-8%), S (<0,1-4%), Mg (0,3-2%), Zn (<0,1-10%)
Roue	Fe (97%), Mn (0,8%), C (0,5%), Si (0,4%), Cr (0,3%), Ni (0,3%), Cu (0,3%)
Rail	Fe (97%), Mn (1,2%), C (0,6%), Si (0,6%)
Caténaire (Fil de contact)	Cu (99 – 99,9%)
Pantographe (Bande de frottement)	C pur, Ou C (60% min), Cu ou alliage Cu-Al (40% max)

L'analyse de la composition chimique des PM prélevés à l'extérieur de la gare révèle une composition chimique similaire aux PM10 d'un site urbain. Le carbone organique (OC) est le composé majoritaire de ces particules en suspension. La présence de  $\text{NO}_3^-$  et de  $\text{NH}_4^+$  est représentative des émissions de particules liées au trafic routier et à l'épandage agricole. La présence de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{Cl}^-$  relate la présence de sels marins anthropisés. Toutefois, il est remarqué que le Silicium fait également partie des composés majoritaires des PM en air extérieur. D'ailleurs ses concentrations sont plus élevées lors des prélèvements réalisés en 2021, où des travaux sur la voie publique au niveau du parvis de la gare ont été observés.

Le modèle PMF permet de déterminer les sources d'émissions des PM10 prélevées dans l'air et les contributions de ces sources au PM10 à partir des concentrations des espèces chimiques composant ces PM10. Le modèle PMF permet d'obtenir une solution à 5 facteurs sources (Figure 2).

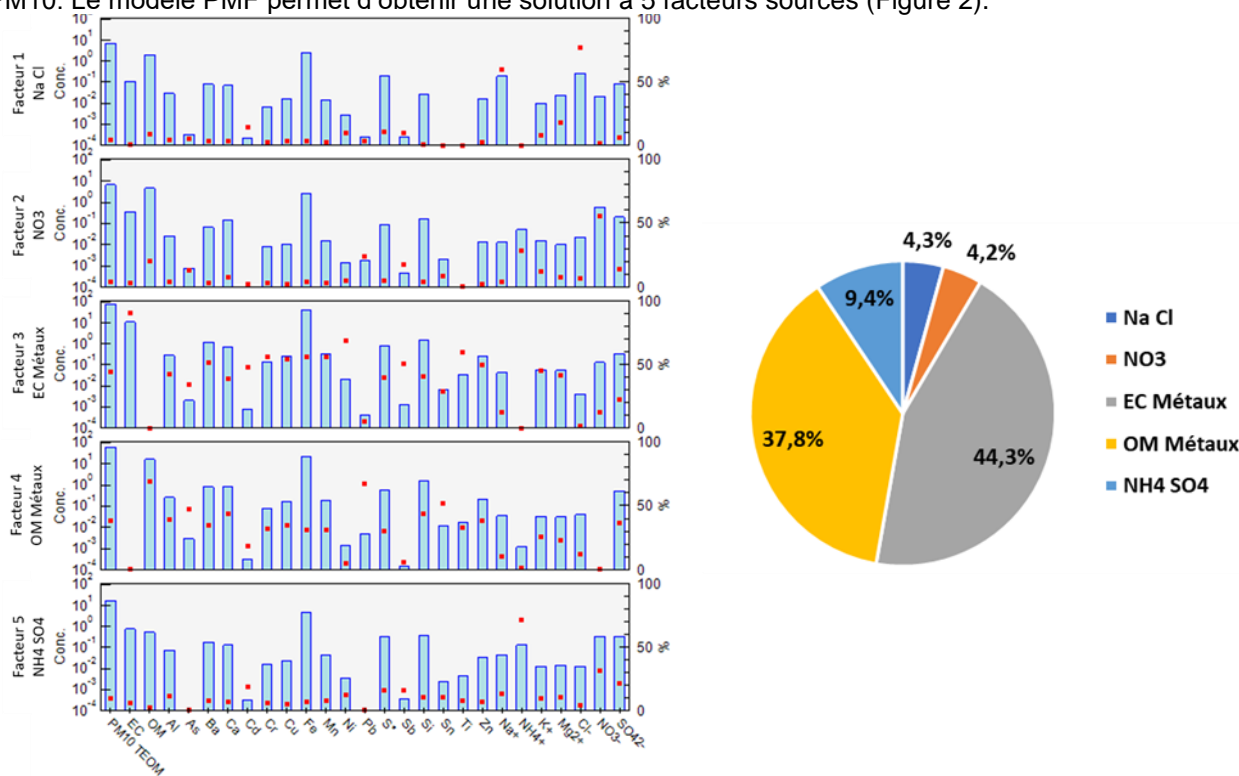


Figure 2 : Profil des facteurs identifiés par le modèle PMF (à gauche, les points rouges représentent le pourcentage des composés et les histogrammes la concentration des composés) et leur contribution à la concentration de PM10 sur le quai (à droite)

A partir des informations issues de la composition des éléments émetteurs du matériel roulant, des infrastructures ferroviaires et de la composition chimique des PM10 en air extérieur, les facteurs «  $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$  », «  $\text{NO}_3^-$  » et «  $\text{NH}_4^+ \text{SO}_4^{2-}$  » sont attribués aux émissions provenant de l'air à l'extérieur de la gare. Les facteurs « EC Métaux » et « OC Métaux » sont quant à eux liés à des émissions en lien avec l'activité ferroviaire.

La contribution des 5 facteurs aux concentrations de PM10 sur le quai (Figure 2) montre que ces particules sont principalement associées au facteur « EC Métaux » à hauteur de 44,3% et à 37,8% au facteur « OC Métaux ». Les facteurs liés aux émissions de l'air extérieur («  $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$  », «  $\text{NO}_3^-$  » et «  $\text{NH}_4^+ \text{SO}_4^{2-}$  ») contribuent au total à 17,9% aux concentrations de PM10.

Ainsi, le modèle PMF montre un fort impact des émissions liées à l'activité ferroviaire sur le quai de la gare et constituent la source majoritaire de PM10 (à hauteur de 82,1%). Néanmoins, il est important de noter la difficulté de séparer davantage les sources d'origine ferroviaire à cause de la simultanéité des émissions et de leur composition chimique très proche.

#### 4. CONCLUSIONS

La concentration moyenne de PM10 sur toutes les campagnes de mesure est de 129,78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ces PM10 sont en moyenne composés à 52% de composés élémentaires principalement du Fer mais le Silicium et le Baryum font également partie de la tête de liste des métaux et composés élémentaires les plus quantifiés. Le carbone élémentaire et la matière organique représentent respectivement 8% et 14% des PM10. La famille des ions représente 2% de la masse des PM10, parmi lesquels les sulfates, le calcium et les nitrates sont les ions majoritaires retrouvés dans cette fraction particulaire.

Ce travail de caractérisation chimique a permis d'investiguer les sources d'émission des PM10 et d'estimer la contribution de chacune de ces sources grâce au modèle PMF. Il en résulte que 82,1% des PM10 proviennent de l'activité ferroviaire et 17,9% des PM10 présents sur le quai de la gare souterraine sont apportés par l'air extérieur. Néanmoins, à cause de la simultanéité des émissions d'origine ferroviaire et leur composition chimique proche, il est difficile de séparer davantage ces sources d'origine ferroviaire à l'aide du modèle PMF et avec les données disponibles actuellement. Cette étude souligne ainsi la nécessité d'approfondir nos connaissances sur la composition chimique des émissions d'origine ferroviaire et l'identification de composés traceurs plus spécifiques de chacune des sources ferroviaires de particules en suspension dans l'air.

Ce travail a été soutenu par la Direction des Gares d'Ile de France (SNCF - Gares et Connexions) et l'Ingénierie du Matériel (Direction du Matériel – SNCF Voyageurs). Il a également été réalisée en collaboration avec Airparif et l'INERIS.

Anses (2015) Avis relatif à la pollution chimique de l'air des enceintes de transports ferroviaires souterrains et risques sanitaires associés chez les travailleurs. (saisine 2011-SA-0265 ). Maisons-Alfort : Anses, 361 p.

Favez, O., El Haddad, I., Piot, C., Boréave, A., Abidi, E., Marchand, N., Jaffrezo, J-L., Besombes, J.-L. Personnaz, M.-B., Sciare, J., Wortham, H., George, C., and D'Anna B. (2010) Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France), *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5295–5314, doi:10.5194/acp-10-5295-2010

Medina S, Adélaïde L, Wagner V, de Crouy Chanel P, Real E, Colette A, Couvidat F, et al. (2021) Impact de pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019. Saint-Maurice : Santé publique France, 63 p. Disponible à partir de l'URL : [www.santepubliquefrance.fr](http://www.santepubliquefrance.fr)

Norme NF F01-135, NF EN 13262, Applications ferroviaires — Essieux montés et bogies — Roues — Prescriptions pour le produit

Norme NF F21-267, NF EN 50367 Applications ferroviaires - Systèmes de captage de courant - Critères techniques d'interaction entre le pantographe et la ligne aérienne de contact (réalisation du libre accès)

Norme NF F50-201-1, NF EN 13674-1+A1, Applications ferroviaires — Voie — Rails — Partie 1 : Rails Vignole de masse supérieure ou égale à 46 kg/m

Norme NF F42-149, NF EN 50149 Applications ferroviaires - Installations fixes Traction électrique - Fils rainurés en cuivre et en cuivre allié

Querol, X., Moreno, T., Karanasiou, A., Reche, C., Alastuey, A., Viana, M., Font, O., Gil, J., de Miguel, E., and Capdevila M. (2012) Variability of levels and composition of PM10 and PM2.5 in the Barcelona metro system, *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, n° 11 (8 juin 2012): 5055-76. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5055-2012>.

Salma, I., Posfai, M., Kovacs, K., Kuzmann, E., Homonnay, Z., Posta, J. (2009) Properties and sources of individual particles and some chemical species in the aerosol of a metropolitan underground railway station, *Atmospheric Environment*

Smith, J.D., Barratt, B.M., Fuller, G.W., Kelly, F.J., Loxham, M., Nicolosi, E., Priestman, M., Tremper, A.H., Green, D.C., (2020) PM2.5 on the London Underground, *Environment International*, 0160-4120 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105188>